

博士論文

国際静脈物流システムに関する研究

杉村 佳寿

— 目次 —

第1章 序論	4
1.1 研究の背景	4
1.1.1 静脈物流の実行要因	4
1.1.2 静脈物流と社会システムの関係	5
1.1.3 国際静脈物流システム構築の必要性	6
1.2 静脈物流を取り巻く状況	8
1.2.1 我が国における静脈物流の位置付け	8
1.2.2 静脈物流の特徴	12
1.3 本研究の目的と論文の構成	12
1.3.1 本研究の目的	12
1.3.2 本論文の構成	13
1.4 重要となる用語の解説	16
参考文献	20
第2章 先行研究の整理と我が国における静脈物流研究の方向	21
2.1 先行研究整理の必要性	21
2.2 我が国における静脈物流研究の系譜	22
2.2.1 Reverse logistics 概念の導入と我が国における静脈物流との関係	22
2.2.2 我が国における静脈物流研究の状況	27
2.3 文献レビューと定性的な Reverse logistics 研究動向	33
2.3.1 先行レビュー研究の整理	33
2.3.2 データベースの作成	35
2.3.3 定性的な研究動向	37
2.4 社会ネットワーク分析による重要文献の抽出	40
2.4.1 中心性指標の適用	40
2.4.2 研究テーマの分類	42
2.4.3 重要文献の抽出	45
2.4.4 文献間引用関係ネットワークから見た我が国における静脈物流研究	47
2.5 我が国静脈物流システムへの示唆	49
2.6 まとめ	50
第2章付録	52
参考文献	86
第3章 静脈物流の効率化を組込んだ社会システムの設計	98

3.1	はじめに	98
3.2	制度創設の経緯と先行研究の整理	99
3.3	費用対効果分析と制度への示唆	101
3.3.1	評価対象便益の設定	101
3.3.2	分析ケース	103
3.3.3	計算方法	104
3.3.4	分析結果と制度の在り方への示唆	110
3.4	感度分析	114
3.5	便益帰着構成表と役割分担の導出	115
3.6	制度の経済学的意味と現状を踏まえた考察	119
3.7	まとめ	123
	第3章付録	124
	参考文献	126
	第4章 国際資源循環に係る我が国の社会システムの課題と解決方策	127
4.1	はじめに	127
4.2	国際資源循環に係る社会システム	128
4.3	使用済み電気電子機器貿易の社会システム上の課題	134
4.3.1	廃掃法に係る制度的課題	135
4.3.2	バーゼル法に係る制度的課題	140
4.4	欧州と比較した我が国の社会システムの課題	142
4.5	まとめ	145
	参考文献	147
	第5章 静脈資源貿易ネットワーク構造から見た我が国における国際静脈物流システムのあり方	149
5.1	はじめに	149
5.2	社会ネットワーク分析による静脈資源貿易ネットワークの評価	150
5.2.1	使用データ	150
5.2.2	分析方法	151
5.2.3	分析結果	153
5.2.4	我が国の特徴	162
5.3	静脈資源貿易における我が国の社会システムの課題	163
5.4	まとめ	165
	参考文献	167

第6章 静脈物流ネットワークの強靱性評価と国際静脈物流システムへの適用	168
6.1 はじめに	168
6.2 先行研究の整理と本研究の位置付け	169
6.3 静脈物流の特徴と強靱なネットワークの形成可能性	174
6.3.1 本研究のアプローチ	174
6.3.2 経済モデル	175
6.3.3 静脈物流ネットワークの強靱性検証シミュレーション	181
6.4 強靱性を制約条件としたシミュレーションモデル	188
6.5 国際静脈物流ネットワークへの適用	205
6.6 まとめ	215
第6章付録	217
参考文献	221
第7章 望ましい国際静脈物流システムの設計方法	223
7.1 はじめに	223
7.2 各章の成果の有機的結合	223
7.2.1 マネジメント概念としての静脈物流システム	223
7.2.2 静脈物流システムと社会システムの関係	225
7.2.3 国際静脈物流システム構築の課題	227
7.3 政策提言	229
7.3.1 マネジメント概念としての静脈物流システム	231
7.3.2 経済的国際静脈物流システムを支える社会システム	232
7.3.3 社会システムとしての環境的国際静脈物流システム	234
7.3.4 リサイクルポートの活用	235
7.4 まとめ	236
参考文献	237
第8章 結論	238
謝辞	243

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

1.1.1 静脈物流の実行要因

本研究の対象は静脈物流である。後述する通り、より正確には **Reverse logistics**（以下、「**RL**」と呼ぶ。）あるいは静脈物流システムと言うべきかもしれない。世界的に見ても静脈物流研究の歴史は比較的浅く、本格化は 1990 年代後半からとなっている^{1),2)}。そもそも **Physical distribution** の訳語として「物流」という日本語が文献に登場し始めるのが 1963 年と言われており比較的新しい³⁾。概念あるいはその変遷については諸説あるが⁴⁾、重要なことは経済活動あるいは経済的機能であるということである。そのため、その効率化に関しては、多くの実務的成果と学術的研究が蓄積されてきた。静脈物流も物流の一種である以上、当然経済的機能であり、必然的に効率性が要求される。

企業の平均的な売上高物流コスト比率は 4.72%であり⁵⁾（公益社団法人日本ロジスティクス協会 2014）、静脈産業の場合その比率はさらに高いと言われている⁶⁾。企業の平均的な売上高利益率は 3%であり⁷⁾、それぞれの平均的な数値を用いて単純に計算すれば、物流コストが 3 割削減されれば、利益は約 5 割増加することとなる。これが物流効率化を産業の競争力の根源であるとする所以であるが、我が国では静脈物流であっても経済的機能としての側面が重視されてきた。例えば国土交通省のホームページには静脈物流の説明として「人の血管に例えて、製品系の輸送を動脈物流と表現するのに対し、生産や消費活動で排出されたものの輸送」とされており⁸⁾、まさに **Physical distribution** の一種として輸送にのみ注意が払われている。

一方で、静脈物流の英訳として一般的に用いられる **RL** は、現在最も包括的なものとして「原料・製造過程・完成財・使用済み製品・廃棄物・廃棄過程・関連する情報に対して、消費地点から発生地点又は処分地点までの全てのフローを、価値の再取得や適切な処理、広い意味では循環型社会の形成のため、効率的かつ費用効果的に計画・実行・コントロールするプロセス」と定義されている（なお、これは尹⁹⁾による静脈物流に対するものだが、Fleishmann¹⁰⁾などを参考にしており、あくまでも **RL** に対する定義と捉えられる）。すなわち、マネジメント概念として認識されており、輸送は一要素に過ぎない。

こういったことは、我が国で「物流」と「ロジスティクス」が概ね同じ意味として認識されていることに起因していると考えられる。本来、物流とロジスティクスの概念は異なる¹¹⁾。日本工業規格（JIS）によると物流は「物資を供給者から需要者へ、時間的、空間的に移動する過程の活動。一般的には、包装、輸送、保管、荷役、流通加工及びそれらに関連する情報の諸機能を総合的に管理する活動」と定義され、ロジスティクスは「物資流通の活動目標を最終需要の必要条件や環境保全などの社会的課題への対応に求め、包装、

輸送、保管、荷役、流通加工及びそれらに関連する情報の諸機能を高度化し、統合化を進めるとともに、調達、生産、販売、回収などの分野との一体化、一元化を図る経営活動」と定義されている。他の定義でも「総合的なシステム（日本ロジスティクスシステム協会監修、基本ロジスティクス用語辞典）」、「管理システム（広辞苑）」といったキーワードがあるように、管理、経営、システムといったマネジメント概念であることが、物流とロジスティクスの大きな違いであろう。「静脈ロジスティクス」という言葉もあるが、我が国では一般的ではない。定義の詳細は第2章で述べるが、本研究では「静脈物流システム」をRLの同義語として使用する。すなわち、静脈物流システムを、輸送を含む様々な機能を全体として最適化するマネジメント概念であると捉え、この言葉を用いる。

静脈物流をマネジメント概念たる静脈物流システムの一機能として捉えれば、実行される要因も含めて動脈物流との違いも鮮明になってくる。そして、動脈物流とは異なる静脈物流の実行の要因と言えるものとして、環境や資源というキーワードが挙げられる。

1.1.2 静脈物流と社会システムの関係

20世紀の経済成長は天然資源の採取・消費の増加や環境劣化と密接に結び付いてきた。経済発展至上主義の時代を経て、その弊害とも言える環境問題や資源枯渇問題が顕在化し、経済と環境の関係について多くの議論がなされてきた。両者の関係をトレードオフしてその最適解を目指す方向性から、近年ではデカップリングの概念の登場に至っている。その過程で世界における環境意識も高まり続けている。現在では各種の経済活動に対して、程度の差こそあれ、環境への配慮が常に求められているといっても過言ではない。経済活動である物流もその例外ではなく、グリーン物流あるいは Green supply chain management（以下、「GSCM」と呼ぶ。）がそれに対応する概念であろう。Srivastava¹²⁾が GSCM を *"Integrating environmental thinking into supply chain management including product design, material sourcing and selection, manufacturing processes, delivery of final product to the consumer as well as end-of-life management of the product after its useful life"*（製品設計、材料獲得と選択、生産過程、消費者への最終商品の配達、耐用年数後の使用済み製品の管理を含むサプライチェーンに対する統合的な環境面の考え方）と定義し、RLを一要素とした GSCM の概念的なフレームワークを示しているとおり、静脈物流は環境面と密接に関連している。

しかしながら、現在においても依然として環境問題には常に経済発展とのトレードオフが付き纏う。米国オバマ大統領が就任直後に打ち出したグリーン・ニューディール政策は、環境分野への公共投資といういわばデカップリングの好事例として当初は考えられた。雇用の創出に加え、地球温暖化問題、エネルギー安全保障というまさに経済、環境、資源に関する課題に同時に対応しうる政策として大きく期待された。しかしこのグリーン・ニューディール政策も、経済、資源・エネルギー分野に大きな恩恵をもたらすシェールガス革命の前では、もはや風前の灯火の状態となっている。こういった事例を見ても、環境改善

の優先度が後回しにされることは、現在でも決して珍しいことではない。結局は、シェールガスを経済効率的に上回る再生可能エネルギーが誕生しない限り、グリーン・ニューディール政策は成功しなかったのであろう。

米国の例だけではなく、我が国でも同様に例えば環境税の導入には経済界が事実上反対してきた。2004年度以降の環境省案環境税、2010年度の地球温暖化対策基本法案（衆議院解散により廃案）、2011年度の平成24年度税制大綱に盛り込まれた「地球温暖化対策のための税」に対し、産業界は悉く反対的立場からの意見書等を出している¹³⁾。各省の審議会における環境政策の議論においても多くの場合は経済界の代表が委員としては参加しているが、決して賛成意見ばかりではない。むしろ、企業に対して過度な規制や義務を担わせる制度の創設等の場合は、懸念や反対の意見を主張することも多い。

そもそも大企業を中心に環境経営を掲げる企業も多い中、経済界のこういった行動は一見矛盾しているようにも見える。しかし企業の存在意義は株主の利益の最大化である以上、こういった行動は正当化されるべきだと捉える方が自然であろう。企業イメージの向上、環境配慮性能を評価されての売上の増加など、単なる社会貢献ではなく、利益に繋がる場合においてのみ経済活動は環境経営の対象となっているようにも映る。すなわち、経済活動や経済的機能に対して環境的配慮を行わせようとするれば、少なくとも現在まででは、利益に繋がる場合かあるいは同業各企業に平等に負担を与え、競争力に影響を及ぼさない社会システムとして制度化する場合のどちらかしかないという見方ができる。

我が国でも経済発展と引き換えに多くの環境問題にも直面し、国民の環境意識の高まりを背景に、環境保全や循環型社会形成のための法律や制度が社会システムとして整備されてきた。公害を防止するための各種規制の整備や廃棄物問題を解決し有限な資源を有効利用するための各種リサイクル法制の制定などである。限りある資源を循環利用し、環境保全に資するためにリサイクルや適正な廃棄物処理がルール化され、また環境配慮行動が社会的に評価されることを受けた企業の自主的な取組みの中で、それらを支える機能として静脈物流が必要となった。

特に、環境保全や循環型社会形成という経済原則だけでは最適化が担保されにくい実行要因を有する以上、静脈物流の社会システムとの関係は動脈物流以上に深い。したがって、静脈物流は実行の要因やそれと関連する社会システムとの関係を含めて、動脈物流よりも多角的に評価されるべきであろう。

1.1.3 国際静脈物流システム構築の必要性

社会システムとの関係が強いため、静脈物流が必要とされる社会によってその望ましいあり方は異なる。すなわち、その国にとって望ましい静脈物流のあり方は、その国の特徴を踏まえる必要があり、さらにその国の社会を取り巻く状況の変化について留意する必要がある。例えば我が国の場合、静脈物流に影響する面からだけでも、静脈資源の大量発生を意味する経済の成熟、世界的に見ても厳しい環境規制の存在、貿易には海上輸送を必ず

伴うことを意味する島国であることなど、静脈物流システムの重要性を諸外国より相対的に高める特徴を有している。特に、時間的にも空間的にも急速に進展する経済のグローバル化と四面を海に囲まれているという地政的特徴は、我が国の静脈物流システムに大きな影響を与えるだろう。

静脈物流は環境保全や循環型社会の形成、またはそれと関連して企業が社会的責任を果たしていく中で必要となるが、経済がグローバル化した現在ではもはや国内だけで閉じるものではない。その是非は各国の社会システムにより方向付けられるものであるが、特に国際資源循環の動向は静脈物流のあり方を大きく左右する。20 世紀の経済成長に伴う環境汚染と資源枯渇問題を踏まえて国際的にもデカップリングが注目されており¹⁴⁾、この問題の議論のために一般的に使われる指標が資源生産性であるが¹⁵⁾、各国の経済成熟度が異なり、経済のグローバル化が進んだ現在、その最大化のためには国際資源循環の進展が必要となっている。

動脈経済に目を向けてみると、経済障壁が取り除かれ、経済のグローバル化が進む中、企業は地球全体をその活動範囲として、良質で低廉な労働力や旺盛な消費力を抱えた市場等を求めて、常に自身のサプライチェーンの最適化を指向している。すなわち、動脈経済においてはもはや国境はないに等しい。企業的意思決定において地理的な隔たりはもはや意味をなさず、製造業の分野においてもモジュール化された個々の生産拠点を ITC と物流ネットワークにより有機的に連結し、グローバルなサプライチェーンを形成することにより、各地の消費市場に最適な商品を供給するシステムが志向されている。このような状況の中、国際物流は産業の血液とも言える役割を果たし、その円滑化は産業の国際競争の鍵となる¹⁶⁾。

一方で静脈経済には依然として国境は存在する。その原因は静脈資源の持つ潜在汚染性だが、その顕在化のリスクが高く、責任の所在が曖昧化するほど、輸出入両国側の国際資源循環に関連する社会システムにより静脈資源貿易の障壁は高くなる。国際資源循環に対する各国のスタンスはまちまちであり、かつ変化するものだが、貿易の中心となっている国々のスタンスに大きな変化が生じれば、世界の国際資源循環の状況は大きく変化することになる。国際資源循環を支えるのは、国際的な静脈物流、すなわち国際静脈物流である。

国際静脈物流システムの設計の際には、国内で閉じる場合と比較して二つの重要な要素を加えて考慮する必要がある。すなわち、貿易であるということと海上輸送を前提とした遠距離輸送を伴うことである。貿易という要素が加わると、貿易に関連する社会システムによって静脈物流システムが変動する。そもそも静脈資源の貿易に対し、その国の社会システムが資源循環を重視するか環境管理を重視するかで、望ましい国際静脈物流システムは変動する。さらに、貿易である以上、必然的に追加的な手続きやそれに伴う追加コストも発生する。また、運賃負担力の低い静脈資源を輸送対象とする以上、輸送費用の増加を伴う遠距離の輸送は本来的には避けられるが、一方で需給バランスや輸送費用の増加を凌駕する要因の存在により、遠距離の輸送を伴う国際静脈物流も存在する。欧州域内など

一部の地域では陸送による近距離の貿易もありうるが、世界の貿易の 90%以上は海上輸送によって実施されており、また遠距離になるほど有利になる交通モードであるため、遠距離貿易は海上輸送が前提となる。一方で、ロットが小さく疎から密の流れである静脈物流では、消費者からの回収段階を中心にトラックによる回収が一般的である。すなわち、トラックからの積み替えが発生し、また大量一括輸送が特徴である海上輸送の活用は、ロットの小ささという特徴により一定の困難さが付きまとう。四面を海に囲まれた島国である我が国では、運賃負担力が低い静脈資源の貿易は完全に海上輸送の活用を意味する。加えて、輸出先国との相対的地理関係は輸送距離と輸送費用に大きく影響する。このように貿易という手続きと海上輸送を前提とする国際静脈物流システムは必然的に課題を抱えることになる。その国の特徴を踏まえながら、今後の国際資源循環の動向と関係する社会インフラを含めた我が国の社会システムの関係を検証することは、その国の国際静脈物流のあり方を検討する上で重要となる。

さらに、我が国には少資源国であるという特徴もある。例えばエネルギー自給率は 2012 年で 6.0%であり、OECD 諸国 34 か国中 33 位という状況にある¹⁷⁾。しかも、我が国が迎ってきた様に、世界では次々と新興国が登場しており、もはや規模では 2010 年以降世界第二の経済大国となった中国をはじめ、BRICs 諸国、そして今後はインドや他のアジア諸国、アフリカも大きな経済成長を遂げることが予想されている。経済発展には資源やエネルギーの供給が不可欠であるため、世界的な資源獲得競争がすでに起こっており、特に我が国のような少資源国では、資源の安定供給が産業や経済に与える影響は計り知れない。そのような中、静脈資源リサイクルにより国内で資源を確保することは、資源確保戦略上の意義を持つが、その場合には国内での静脈物流が重要な役割を果たす。多くの生産拠点が海外に移転している状況下においては、むしろ海外進出した国内企業の競争力のためには海外の生産拠点での資源確保が重要な場合も多く、その場合には国内企業の海外拠点への資源供給に資する国内発生静脈資源の輸出が必要となり、その際にも国際静脈物流が重要な役割を果たす。

1.2 静脈物流を取り巻く状況

1.2.1 我が国における静脈物流の位置付け

1.1.2 で述べたとおり、我が国においては環境保全や循環型社会形成のための法律や制度が社会システムとして整備され、それらを支える機能として派生的に静脈物流が求められてきた。ここでは、静脈物流あるいは静脈物流システムが我が国において各種の公的な計画等にこれまでどのように位置付けられてきたかを概観する。静脈物流が公的な計画等にどのように位置付けられてきたかを表 1-1 に示す。表 1-1 では国際物流に関する内容は斜体で示している。

表 1-1 静脈物流の公的な計画等への位置付け

年	月	法律、計画等	静脈物流、国際静脈物流の位置付け、法律の概要等
1997	4	総合物流施策大綱(1997-2001)	記述なし。
2000	4	容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律(容器包装リサイクル法)施行	容器(商品を入れるもの)、包装(商品を包むもの)のうち、中身商品が消費されたり、中身商品と分離された際に不要になるものを「容器包装」として、消費者は分別して排出、市町村は分別収集、事業者(容器の製造事業者・容器包装を用いて中身の商品を販売する事業者)は再商品化(リサイクル)する役割分担を定めた法律。
2000	12	港湾の開発、利用及び保全並びに開発保全航路の開発に関する基本方針	記述なし。ただし、「副産物や再生資源等の輸送については、関係者と連携して環境負荷の少ない海上輸送の利用を推進」との記述あり。
2001	1	循環型社会形成推進基本法施行	法の対象となる物を有価・無価を問わず「廃棄物等」とし、廃棄物等のうち有用なものを「循環資源」と位置づけ、その循環的な利用を促進することを目的とする法律。①発生抑制、②再利用、③再生利用、④熱回収、⑤適正処分の優先順位を明確化。
2001	4	資源の有効な利用の促進に関する法律(資源有効利用促進法)施行	事業者による製品の回収・リサイクルの実施などリサイクル対策を強化するとともに、製品の省資源化・長寿命化等による廃棄物の発生抑制対策や、回収した製品からの部品等の再利用対策を新たに講じ、また産業廃棄物対策としても、副産物の発生抑制、リサイクルを促進することにより、循環型経済システムの構築を目指す法律。パソコン、小型二次電池を指定再資源化製品として位置づけられるなど、10業種・69品目を法の対象業種・対象製品として位置付け。
2001	4	特定家庭用機器再商品化法(家電リサイクル法)施行	家電4品目(家庭用エアコン、テレビ、電気冷蔵庫・電気冷凍庫、電気洗濯機・衣類乾燥機)について、小売業者による引取り及び製造業者等による再商品化等が義務付けられ、消費者には、家電4品目を廃棄する際、収集運搬料金とリサイクル料金を支払うことなどをそれぞれの役割分担として定めた法律。
2001	5	食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律(食品リサイクル法)施行	食品関連事業者などから排出される食品廃棄物の発生抑制と減量化により最終処分量を減少させるとともに、肥料や飼料等としてリサイクルを図ることを目的とし、年間の食品廃棄物などの発生量が100トン以上の事業者は再生利用などを促進することを義務付けた法律。
2001	6	都市再生プロジェクト(第一次決定)	廃棄物の発生抑制、資源としての再利用、再利用によるゴミゼロ型都市の再構築に関連し「水運等を活用した静脈物流システムを構築」との記述あり。
2001	7	総合物流施策大綱(2001-2005)	「各種リサイクル法の制定・施行等が進められる中・・・循環資源の効率的な循環ルートの形成が求められており、循環型社会の実現に貢献する新たな物流システムを構築するための環境を整備することが必要」、「効率的な物流システムの検討、必要な施設の整備等の環境整備を行うとともに、静脈物流の環境負荷を極力小さいものとする観点から、鉄道・海運の利用の推進」、「生産拠点の状況、リサイクル関連拠点の配置計画、当該拠点間における輸送等の実態把握に努めるとともに、鉄道・海運の活用を含めて効率的な静脈物流システムについての検討」
2002	5	リサイクルポート一次指定	室蘭港・苫小牧港、東京港、神戸港、北九州港
2002	5	建設リサイクル法完全施行	特定建設資材(コンクリート、アスファルト・コンクリート、木材)を用いた建築物に係る解体工事又はその施工に特定建設資材を使用する新築工事等であって一定規模以上の建設工事について、その受注者等に対し、分別解体等及び再資源化等を行うことを義務付ける法律
2002	10	港湾を核とした静脈物流システム事業化検討委員会報告	「海上輸送を活用した静脈物流ネットワークの構築の考え方整理、海上輸送を活用した静脈物流システムの課題、静脈物流システムの事業化に向けた検討」 更なる検討課題として「輸出が増加している循環資源の国際的な視点での静脈物流システムの検討」
2003	3	港湾を核とした静脈物流システム事業化検討委員会提言	「大量生産、大量消費、大量廃棄を前提とした従来型システムは・・・天然資源の浪費や最終処分場の逼迫、不法投棄の増大といった社会問題が生じており、リサイクル等の推進による「循環型社会の構築」への転換を図ることが不可避・・・「循環型社会の構築」を図るには・・・広域的に循環資源を流動させ、全国規模での大きなリサイクルの輪を構築していくことが必要・・・広域的なリサイクル拠点を・・・港湾に配置し、低廉で環境負荷の小さい海運で広域ネットワーク化する「港湾を核とした静脈物流システムの構築」が有効」 「循環資源の国内蓄積量が拡大・・・将来の発生量の増大・・・産業の空洞化等により国内の需要に限界があり、循環資源の余剰が生まれ、この動きは今後さらに増大・・・アジア諸国の経済成長に伴う循環資源の需要量増加を背景として、我が国における循環資源の対アジア輸出量は年々増加・・・ターミナルの分散化や小型船による輸送、ストックヤードの不足など必ずしも効率的なシステムにはなっておらず、国際的な市況商品でもある鉄スクラップ、古紙等循環資源の国際競争力が低下・・・バーゼル条約で規定される有害廃棄物の越境移動が国際問題・・・これらの課題に対応するため、国際静脈物流システム形成の方向性として、輸出货量が多い地域に立地する港湾を拠点化することにより、物流管理を強化して受入国への信頼を確保するとともに低コスト化を図り、循環資源の国際競争力を強化することにより、国際的な資源循環システムの構築を図っていく必要・・・国内の高度な技術を活用して、海外の生産活動で発生する循環資源を受け入れてリサイクルすることにより、国際的な循環型社会の構築に寄与するため、安全かつ効率的な循環資源の輸入システムについて検討する必要」
2003	3	循環型社会形成推進基本計画(第一次)	「リユースやリサイクルに係る物流については、環境負荷の低減などの観点から、トラック輸送と適切に組み合わせつつ、中長距離において鉄道や海運を活用するなど効率的な静脈物流システムの構築を推進」 「経済のグローバル化に伴う国際的な循環については、環境規制が十分に整備されていない国への廃棄物等の輸出が結果的に現地での環境破壊を招くことについての国際的な関心の高まりを踏まえ、バーゼル条約による有害廃棄物に対する環境に配慮した管理の取組・・・各国の実情の把握とその状況に合わせた我が国の廃棄物処理・リサイクルシステムの提供・・・輸出港の集約化など効率的な国際静脈物流システムの検討」
2003	4	リサイクルポート二次指定	石狩湾新港、八戸港、釜石港、酒田港、木更津港、川崎港、姫川港、三河港、姫路港、徳山下松港、宇部港、三池港、中城湾港
2003	12	広域認定制度施行	当該廃棄物の処理を当該製品の製造、加工、販売等の事業を行う者(製造事業者等)が広域的に行うことにより、当該廃棄物の減量その他その適正な処理が確保されることを目的として、廃棄物処理業に関する法制度の基本である地方公共団体毎の許可を不要とする特例制度

表 1-1 静脈物流の公的な計画等への位置付け（続き）

2004	6	港湾における循環資源取扱に関するガイドライン	「循環型社会を形成するためには、循環資源を広域的に輸送する静脈物流システムの構築が必要…循環資源の輸送には、環境負荷が小さく、低廉で大量輸送が可能な海上輸送が適していることから、静脈物流の拠点として港湾の役割は大きい」、「循環資源には、廃棄物と位置付けられているものも含まれることから、その取扱いが廃棄物として一律に抑制されている事例が見受けられる。循環型社会を形成するためには、環境保全の為の調整・対策を適切に講じることが前提として、港湾における循環資源の円滑な取扱いがなされるよう配慮することが望ましい」
2004	10	港湾の開発、利用及び保全並びに開発保全航路の開発に関する基本方針	「循環型社会の実現のためには循環資源を適正かつ効率的に収集・輸送する静脈物流システムの構築が重要」、「広域的な静脈物流網の形成の重要性…大量輸送によりコストの低廉化が可能である海上輸送の活用…既存の物流基盤と循環資源の再生が可能な産業の集積…循環資源を保管する用地等の確保が容易…静脈物流網の拠点機能を有する港湾を核とした静脈物流システム」 「鉄スクラップ等の循環資源については輸用量が増加しており、国際的な観点で活用が進むよう、輸出ターミナルの拠点化・集約化等を図る」
2004	10	持続可能なアジア循環型経済社会圏の実現へ向けて	「循環資源は、動脈の貨物に比較して運賃負担力が小さいため、循環資源の資源性を発揮させ有効利用を進めるためには物流コストを低減させる必要」、「大量一括輸送や、動脈物流の返り荷として循環資源を輸送する等、経済的な静脈物流システムを構築することが効果的」、「循環資源の汚染性ゆえに保管・輸送により外部の環境に影響を及ぼす可能性」、「リサイクルポート等の施策を進めるとともに、港湾における循環資源のストック施設等の整備を推進していくことが必要」
2005	3	今後の港湾環境政策の基本的な方向について（答申）	「我が国が循環型社会に転換していくためには…3R（リデュース、リユース、リサイクル）を進めていく必要」、「循環資源の輸送や集積のために、海上輸送を活用した効率的な静脈物流システムを形成する必要」、「循環資源は…運賃負担力が小さいため、円滑な静脈物流を実現するためには、低廉に輸送できるよう、大量一括輸送するための保管機能を増大させる必要」、「循環資源は、廃棄物としての性格も持つため…十分な環境対策をとる必要」、「静脈物流については…適切に輸送されることを確認できる信頼性が重要…産業廃棄物については「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」によるマニフェスト制度があるものの、港湾の保管施設でストックし、海運により大量一括輸送する物流実態に必ずしも適合したものとなっていない。このため、港湾で取り扱う循環資源の輸送を追跡できる情報システムを官民共同して構築する必要…廃棄物の輸送にあたっては、廃棄物に対する手続きと物流に関する手続きが二重に必要であり、手続きが煩雑…廃棄物が適切に輸送されていることを保証しつつ…特例として規制を緩和するなどにより、輸送の効率化を図る必要」 「近年、中国をはじめとするアジア諸国との経済活動における分業が急速に進行しており、循環資源の国際循環も増大すると見込まれる。そのため、低廉・円滑で信頼性の高い国際静脈物流ネットワークの構築について検討していく必要」
2005	11	総合物流施策大綱（2005-2009）	「相次ぐリサイクル関係法の施行等により、循環資源活用のための静脈物流が注目されており、海運、鉄道を利用した循環資源の広域的輸送、港湾周辺にリサイクル施設を集積させた総合静脈物流拠点港（リサイクルポート）の整備等が実施…適正な処理・輸送を確保した効率的な静脈物流システムの構築を推進していく必要」
2006	10	循環型社会形成促進のための海上輸送円滑化検討委員会提言書	「海上輸送需要の大きな循環資源品目毎の品質基準を明確化し、港湾の汚損などの影響を考慮した港湾における循環資源の取り扱い基準（荷姿、荷役方法等）を共通化することが必要」、「付加価値の低い循環資源の利用を前提とした場合には、港湾での保管一荷役一海上輸送一利用の一連のシステムにおける環境影響を適切に管理しつつ、適切な物流管理等を経済的に行う必要…排出者と海陸の運送事業者が連携するコンソーシアム（企業連合）を組み、循環資源の排出から再生利用までの一連の物流管理と再生処理について、海上輸送の特性を最大限に発揮した信頼性の高いリサイクルチェーン（循環資源活用連携）を構築することが効果的」、「リサイクルポートにおいても…循環資源物流基盤の整備は最小限…信頼性の高いIT機器等を活用した安全・安心な物流情報管理システムや…情報交流の仕組みなど、ソフト基盤の整備も立ち遅れている」 「近年の東アジア諸国における循環資源需要の急激な拡大に対して、国内だけで完結する循環資源利用ではなく、東アジア地域全体における循環資源の有効活用の促進と適正な循環資源物流の円滑化の観点から、水際管理の役割を担う「国際循環資源物流拠点」の整備が求められている。国際間の循環資源活用にとって海上輸送が不可欠であることから、リサイクルポート指定港の中でも循環資源の輸出入が多い港湾等について、国内における循環資源取扱い基準の検討を踏まえた国際港湾間における実証実験等の蓄積を通じて、国際循環資源物流の核となる拠点港として必要な機能や国際的な循環資源物流の適正管理のあり方を探る取り組みを、関係省庁と連携しながら我が国が率先して進めることが必要」
2006	12	リサイクルポート三次指定	能代港、舞鶴港、三島川之江港
2007	1	使用済自動車の再資源化等に関する法律（自動車リサイクル法）施行	自動車の再資源化等について自動車の所有者、関連事業者、自動車メーカー・輸入業者の役割を定めた法律。自動車製造業者、輸入業者は、自動車から発生するフロン類、エアバッグ類及びシュレッダーダストを引き取り、リサイクル（フロン類については破壊）を実施。
2008	3	循環型社会形成推進基本計画（第二次）	「特に広域的な地域循環圏について…リサイクルポートの推進による海上輸送の円滑化等、環境負荷の低い静脈物流システムの構築」、「ユースやリサイクルを含めた廃棄物等の運搬に係る物流については、環境負荷の低減などの観点から…中長距離において環境に配慮された鉄道や海運を積極的に活用するなど効率的な静脈物流システムの構築を推進」 「国際的な循環型社会の構築に当たっては、循環資源の環境負荷を考慮し、まず発生国内で適正に処理することを原則とし、各国内で環境汚染を防止するための法令の整備や法執行能力などの適正処理能力を向上させていくことを最優先…廃棄物の不法な輸出入を防止する取組を充実させることが必要…循環資源の持つそれぞれの性質に応じて、環境負荷の低減や資源の有効利用に資する場合には、各国内での循環利用を補完するものとして、循環資源の国際的な移動の円滑化を図ることも重要」

表 1-1 静脈物流の公的な計画等への位置付け（続き）

2008	7	国土形成計画(全国計画)	<p>「循環型社会の構築を進めるため、排出者責任や拡大生産者責任の考え方を踏まえ、廃棄物等の発生抑制並びに適正な循環的利用及び処分に向けた取組を推進…廃棄物の処理にともなう環境への負荷の低減に関しては…各種リサイクル制度の強化を図る。循環資源等の性質に即した望ましい方法・規模で3R(リデュース(発生抑制)、リユース(再利用)、リサイクル(再生利用))及び適正処分を進める…効率的で安全性の高い循環資源等の輸送システムを活用するとともに、リサイクルポート、エコタウンなどの静脈物流拠点の形成や活用を図る」</p> <p>「アジアを中心とした経済成長と人口増加にともなう、循環資源の発生量が増加し、質も多様化している中で、リサイクルなどを目的とした循環資源の国際移動が活発化…これにともなう環境汚染なども懸念…国際的な循環型社会構築に当たっては、まず各国の国内で循環型社会を構築し、次に廃棄物の不法な輸出入を防止する取組を充実・強化し、その上で循環資源の輸出入の円滑化を図ることを基本に以下の施策を実施…国内及び国際間における循環資源の移動把握(トレーサビリティ)の高度化、アジア共通の有害廃棄物のデータベースの作成、適切な輸出入管理のための国際連携の強化等に取り組むつつ、それらが適切に確保された循環資源物流システムの構築等を促進…その際、環境負荷の低い海運等の活用に配慮」</p>
2008	12	港湾の開発、利用及び保全並びに開発保全航路の開発に関する基本方針	<p>「循環型社会の形成を進めるため、地域で循環可能な資源はなるべく地域で循環させる一方、地域で循環が困難なものについては広域的に対応する必要…港湾では、利便性の高い海上輸送を活用でき、既存の物流基盤と循環資源の再生が可能な産業の集積があり、さらに循環資源を保管する用地等の確保が容易であるという、循環資源の取扱いに適した特性…循環資源を巡る情勢の変化に適切に対応しつつ、資源の特性と地域の状況を勘案し、港湾を核とした静脈物流網を強化」</p> <p>「国際的な動向として、我が国の近隣諸国の経済成長を背景に、循環資源の貿易量が増加しており、当該循環資源の中には、我が国の高度なリサイクル技術を必要とするものがあり、受入れを求められる等の動き」</p>
2009	7	総合物流施策大綱(2009-2013)	<p>「静脈物流に関しては、静脈物流ネットワークの拠点としてのリサイクルポートの指定や、岸壁、ストックヤード等重点的な静脈物流基盤の整備を進めてきたところであるが、更なる輸送コストの削減が課題…適正な処理・輸送を確保した上で、効率的な静脈物流システムの構築を推進していく必要」、「静脈物流に関しては、臨海部等の適切な場所にリサイクル施設・最終処分場の立地を集約すること等を含め、物流面での環境負荷低減のための工夫が求められる…静脈物流の効率化・高度化は、CO2排出量抑制や循環資源の利用促進等にも大きく貢献するため、国・地方公共団体は、各事業者間による更なる連携強化等の施策に、官民一体となって強力に取り組んでいくことが必要」</p>
2010	9	港湾における循環資源の取扱いに関する指針	<p>「港湾の管理運営上循環資源を公共埠頭で取扱うことが著しく不適当であったり、現有する港湾施設の処理能力の限界などの課題があることも事実…リサイクルポートとして指定を受けた港湾においては、他の港湾以上に循環資源を円滑に取扱えることを事業者は期待しており、港湾管理者はこれに応えることを求められている」、「循環資源は通常の一般貨物と比べて商品価値が比較的小さいため、継続して安定的な循環資源の輸送が確保されるためには、海上輸送の結節点である港湾でロット調整を行い、輸送単価を下げることで事業者の収益が確保されることも必要…ロット調整の機能を一層発揮させるためには、循環資源の積替え・保管、梱包、選別、在庫調整等の流れを把握した上で効率的に処理できる一連の機能を循環資源関連施設に持たせることも有効」、「船舶輸送に関しては保管上限の特例が設けられており、運搬過程での保管上限は「船舶の積載量」、処分・再生過程での保管上限は「船舶の積載量＋処理施設の日当たりの処理能力×7」…コンテナの発港で船待ちのコンテナを埠頭に置くことはコンテナの滞留(すなわち、廃棄物処理法上の積替え・保管)に該当しない」</p>
2011	1	リサイクルポート四次指定	境港
2013	4	使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律(小型家電リサイクル法)施行	<p>使用済小型電子機器等の再資源化を促進するため、主務大臣による基本方針の策定及び再資源化事業計画の認定、当該認定を受けた再資源化事業計画に従って行う事業についての廃棄物処理法の許可等に関する特例等について定めた法律</p>
2013	5	循環型社会形成推進基本計画(第三次)	<p>「廃棄物等や再生資源・再生製品の輸送は、リサイクル対象品目の増加や、循環利用率の向上、アジア圏での経済成長に伴う循環資源の輸出入の増加などによって、輸送大量化・長距離化が進むことが予想…廃棄物・リサイクル施設の集中立地、拠点間の相互連携を進め、適正な処理・輸送を確保した効率的な静脈物流システムの構築を推進していく必要…静脈物流に係る更なる環境負荷低減と輸送コスト削減を図るため、以下の取組を進める。①静脈物流の拠点となる港湾をリサイクルポートに指定し、広域的なリサイクル関連施設の臨海部への立地を推進するとともに、官民連携の推進、港湾施設の整備など総合的な支援を講じることにより国内外の資源循環を促進する。②静脈物流の輸送手段を道路輸送から相対的に環境負荷が小さい鉄道・船舶へと転換するモーダルシフトを促進する。③首都圏の建設発生土を全国の港湾の用地造成等に用いる港湾建設資源の広域利用促進システム(スーパーフェニックス)を推進する。④廃棄物処理法の適正な運用を図りつつ、静脈物流コストの削減を図るための取組の検討を進める。」</p> <p>「国際的な循環資源の移動は、適切に行われれば、環境負荷の低減や資源の有効利用に資する一方、輸出先で不適正な処理が行われた場合には環境汚染を生じさせるおそれがある。このため、循環資源については、①まず国内で適正に処理することを原則とした上で、②循環資源の性質に応じて、国際的な循環資源の移動が環境負荷の低減や資源の有効利用に資する場合には、国際的な移動の円滑化を図ることが重要…これらを踏まえ…バゼル条約の枠内での手続の簡素化等により、手続に要する期間の短縮…石灰灰、高炉水砕スラグなど…他国における安定的な需要のある循環資源においては、輸出先での再生利用等において環境汚染が生じないことが担保できる場合については、物品に応じた必要な輸出後の処理手続の確認を行い、手続の迅速化を講じることなどにより、輸出の円滑化…国際的な循環資源の移動に当たっては、玄関口としての港湾が果たす役割の重要性に鑑み、円滑な資源輸送に必要な港湾施設の整備や受入体制の確保」</p>
2013	6	総合物流施策大綱(2013-2017)	「資源の有効活用を促進するための静脈物流拠点を整備し、関連する制度の改善等を行う」

表 1-1 静脈物流の公的な計画等への位置付け（続き）

2014 11	港湾の開発、利用及び保全並びに開発保全航路の開発に関する基本方針	<p>「循環型社会の形成を進めるため、地域で循環可能な資源はなるべく地域で循環させる一方、地域で循環が困難なものについては広域的に対応する必要・・・港湾では、利便性の高い海上輸送を活用でき、既存の物流基盤と循環資源の再生が可能な産業の集積があり、さらに循環資源を保管する用地等の確保が容易であるという、循環資源の取扱いに適した特性・・・循環資源を巡る情勢の変化に適切に対応しつつ、資源の特性と地域の状況を勘案し、港湾を核とした静脈物流網を強化」</p> <p>「国際的な動向として、我が国の近隣諸国の経済成長を背景に、循環資源の貿易量が増加しており、当該循環資源の中には、我が国の高度なリサイクル技術を必要とするものがあり、受入れを求められる等の動き」</p>
---------	----------------------------------	--

我が国では、2000 年代初めから公的な計画等に静脈物流に関する記述が登場し始める。これまでの大きな流れとしては、黎明期には輸送時の環境負荷低減が主目的であったものが、各種リサイクル法等の施行に伴い循環型社会形成を主目的とする形へとシフトしている。また、特に 2005 年ごろまでは、国際静脈物流に関しても輸出促進を目的として一部検討が行われているが、徐々に環境保全の観点が強まり、近年では輸出を促進する方向での記述は相対的に減少している。

1.2.2 静脈物流の特徴

静脈物流の特徴については先行研究において十分に議論がなされてきている。例えば、我が国における数少ない先行研究である尹⁶⁾は静脈物流の特徴として、短・中距離の輸送が多い、時間的に急がない、輸送ロットが小さい、営業上の秘密が少ない、集中型の輸送形態であること、を挙げている。尹⁶⁾はそれまでの先行研究を踏まえた上でこれらの特徴を挙げているため非常に示唆に富むものと言える。しかし最近では静脈物流でもビジネス的側面が重視されており^{18),19)}、時間的に急がないことや営業上の秘密が少ないという特徴は徐々に薄れてきている。そして、海外の多くの先行研究が示すとおり、静脈物流の最大の特徴は不確実性と疎から密の流れであることだろう。さらに、輸送対象が規制の対象となり得る静脈資源であることも重要な点となる。こういった点から、静脈物流の特徴を考える際、動脈物流と逆向きの流れであるというだけでは済まされない。

1.3 本論文の構成

1.3.1 本研究の目的

これまで述べてきたとおり、我が国では静脈物流は環境意識の高まりを背景に、社会的なニーズから、あるいは循環型社会形成に係る社会システム創設に合わせて派生的に必要とされてきた。経済的機能であるという本来の性質から考えれば効率化が求められるが、社会システムの設計次第ではその効率化を目指すインセンティブが働かないケースもある。そういった場合はその社会システムがマネジメント機能を果していないばかりか、国民にとって望ましい社会システムにもなり得ないという課題がある。一方で、実務面や学術面では効率性の観点が偏重され、経済面以外の背景を持つ割には他の評価軸で評価されるこ

とは相対的に少ないという課題もある。

さらに、社会システムとの関係が強いため、我が国にとって望ましい静脈物流システムのあり方は、我が国の特徴や我が国社会を取り巻く状況の変化について留意する必要がある。中でも特に、時間的にも空間的にも急速に進展する経済のグローバル化と四面を海に囲まれているという我が国の地勢的特徴は、我が国の静脈物流システムに大きな影響を与える。すなわち、我が国にとって国際静脈物流システムの重要性は諸外国よりも相対的に高く、グローバル化の進展を踏まえれば今後益々高くなる可能性が極めて高い。しかし環境面への配慮の必要性から国際静脈物流が推進されるべきか否かは国際資源循環の推進状況に左右されるため、世界の動向や我が国の社会システムの理念的方向性を見極める必要がある。したがって、国際静脈物流システムは積極的に構築されるべきか否か、さらにはどのように構築されるべきかという両面において課題がある。

しかしながら、こういった課題に対して学術的な答えは用意されていない。そもそも国際的に見ても、社会システムと静脈物流システムの関係性をテーマとした先行研究や国際静脈物流を扱った先行研究はほとんど存在しない。ましてや我が国の経済的、地勢的特徴を踏まえ、社会システムとの関係を明確にしながら国際静脈物流システムを論じた研究はこれまで行われていない。先述したような背景を踏まえれば、本来であれば我が国に適応すべき国際静脈物流については本格的に研究がなされるべきである。このような中で我が国において十分な研究蓄積がないことは、我が国社会に影響を及ぼすような大きな問題であると言っても過言ではない。

以上の様な問題意識の下、本研究は我が国をケーススタディとしながら、社会システムとの関係を踏まえた望ましい国際静脈物流システムの設計方法を示すことを目的とする。日本のケーススタディを含んでいるため、本研究の成果は我が国あるいは我が国と類似した地勢的特徴や社会システムを有した国における国際静脈物流システムの設計のあり方に直結するものであるが、静脈物流システムと社会システムとの関係を検討し、また国際静脈物流システムにおいて重要となる貿易や海上輸送のあり方を検討するという本研究のアプローチ自体は世界共通で有益なものとなる。

1.3.2 本論文の構成

本論文は全 8 章で構成される。各章の内容は以下のとおりである。

第 2 章 先行研究の整理と我が国における静脈物流研究の方向性

第 2 章では静脈物流に関する既往研究を整理する。我が国では静脈物流に関する既往研究は少なく、マネジメント概念として捉えられている海外における RL とは概念上の乖離も見られる。そこで、まず我が国におけるこれまでの静脈物流研究の状況と RL の研究動向のギャップとその理由について考察する。また、世界における RL 研究を包括的に把握して、我が国の静脈物流システムへの示唆を得るとともに、社会ネットワーク分析を適用した重

要文献の抽出等により、今後の我が国における静脈物流研究に資する整理を行う。さらに、我が国の静脈物流を取り巻く特徴を踏まえ、我が国の望ましい静脈物流システム構築のために必要となる研究の方向性を特定する。

第3章 静脈物流の効率化を組込んだ社会システムの設計

我が国の個別リサイクル法等の社会システムにおいては、ステークホルダーの役割を規定する社会システムが設計されることで、静脈物流は派生的に必要とされる。静脈物流の存在を特別に意図しない社会システムの場合、静脈物流の効率化に対するインセンティブは働きにくい。しかし、静脈物流システムをマネジメント概念として意識し、その最適化を目指すことで、静脈物流の効率化を社会システムに組み込むことも可能となる。そこで、効率的な静脈物流を前提として社会システムが設計された唯一の事例である小型家電リサイクル制度について、その制度創設において導入された費用対効果分析の意義と絡めながら、静脈物流の効率化が社会システムの設計にどのように影響したのか、さらに社会システムとしての小型家電リサイクル制度と静脈物流システムの関係を整理する。

第4章 国際資源循環に係る我が国の社会システムの課題と解決方策

国際静脈物流を介して行われる国際資源循環は、世界的な資源生産性を高めるとはいえ、一方で途上国における環境問題に繋がる危険性も孕んでいる。そのため、国際資源循環を促進させるか否かについては、必然的に意見が分かれる。我が国が国際資源循環に対するスタンス次第で国際資源循環の今後の進展が左右されるが、国際資源循環に関連する社会システムの動向を詳細に把握することで、全体として理念的に促進の方向性にあることを明らかにする。さらに、促進の方向性の阻害に繋がる我が国の社会システム上の課題と解決方策を検討することで、今後の我が国の静脈物流システムのあり方を考える。

第5章 静脈資源貿易ネットワーク構造から見た我が国における国際静脈物流システムのあり方

国際静脈物流を介して行われる我が国の国際資源循環は、世界全体の静脈資源の需給バランスや貿易相手国との関係性によって変化する。そこで、世界的な国際資源循環の動向を把握するため、静脈資源貿易ネットワークの構造と中心性の経年変化を社会ネットワーク分析により検証する。その結果から、我が国のネットワーク全体の中での特徴と位置付けを整理し、ネットワーク構造から見た関連する我が国の社会システムの課題と解決策について検討する。その上で、今後国際資源循環が促進されるために我が国の国際静脈物流システムがどのような方向性を取るべきかを検討する。

第6章 静脈物流ネットワークの強靱性評価と国際静脈物流システムへの適用

静脈物流は経済活動であるという性質から経済効率性についての研究が多く蓄積されて

いるが、一方で他の評価軸についてはあまり重視されてこなかった。複数の評価軸で総合的に評価される必要性を考えると、過度に効率性を追求することには問題がある。そこで有効になるべき評価軸でありながらこれまで定量的に評価されてこなかった静脈物流ネットワーク全体の強靱性について検討する。特に、静脈物流の特性を踏まえると動脈物流ネットワークとの強靱性が劣る可能性があることを明らかにし、その上で、動脈物流と同等の強靱性を備える方策について検討する。さらに、我が国の国際静脈物流ネットワークに強靱性を持たせる方法について検証することで、望ましい国際静脈物流システムの設計に寄与させる。

第7章 望ましい国際静脈物流システムの設計方法

前章までで検討するマネジメント概念としての静脈物流システムを社会システムに組込むことの必要性、我が国の国際資源循環を進展させるための方法、効率性を前提としたうえでの強靱なネットワークとすることを意識しながら、我が国の特徴、我が国を取り巻く周辺状況の動向を踏まえて、我が国がどのような国際静脈物流システムを設計すべきか、どのように設計すべきかについて検討する。第7章は第6章までの成果を有機的に結合させることで、我が国における望ましい国際静脈物流システムの設計方法を政策提言として提案する。この提言は直接的には我が国に対するものであるが、社会システムとの関係を踏まえたアプローチ自体は各国共通のものであり、そういう点では世界に対する提言にもなる。

第8章 まとめ

本論文のまとめと今後の課題を第8章で整理する。

各章の関係を図示すると図 1-1 のようになる。本研究では、第4章で国際資源循環に係る我が国の社会システムの課題とその解決方策を論じる。また、第3章では静脈物流の効率化を社会システムに組込むという一般性のある検討を行いつつも我が国における小型家電リサイクル制度を題材としており、同様に第5章は世界の静脈資源貿易ネットワークについて論じつつも、その中における我が国の特徴について深堀することになる。第6章においても一部で我が国を題材とした実証的なシミュレーションを行う。このように、第4章全体と第3章、第5章、第6章の一部は我が国をケーススタディとすることになるが、我が国の特徴から導かれる内容を除き、多くの成果はそのまま他国でも適用可能なものとなると考えられる。また研究アプローチ自体は世界各国において有益なものであり、前提条件の一部を変更することで、世界各国で適用されるべき内容となる。

なお、本研究の第2章で提示する RL 研究の方向性や重要文献の抽出は、我が国に関する RL の他の研究にも寄与し、これより本研究の目的が間接的に達成されることを意味している。

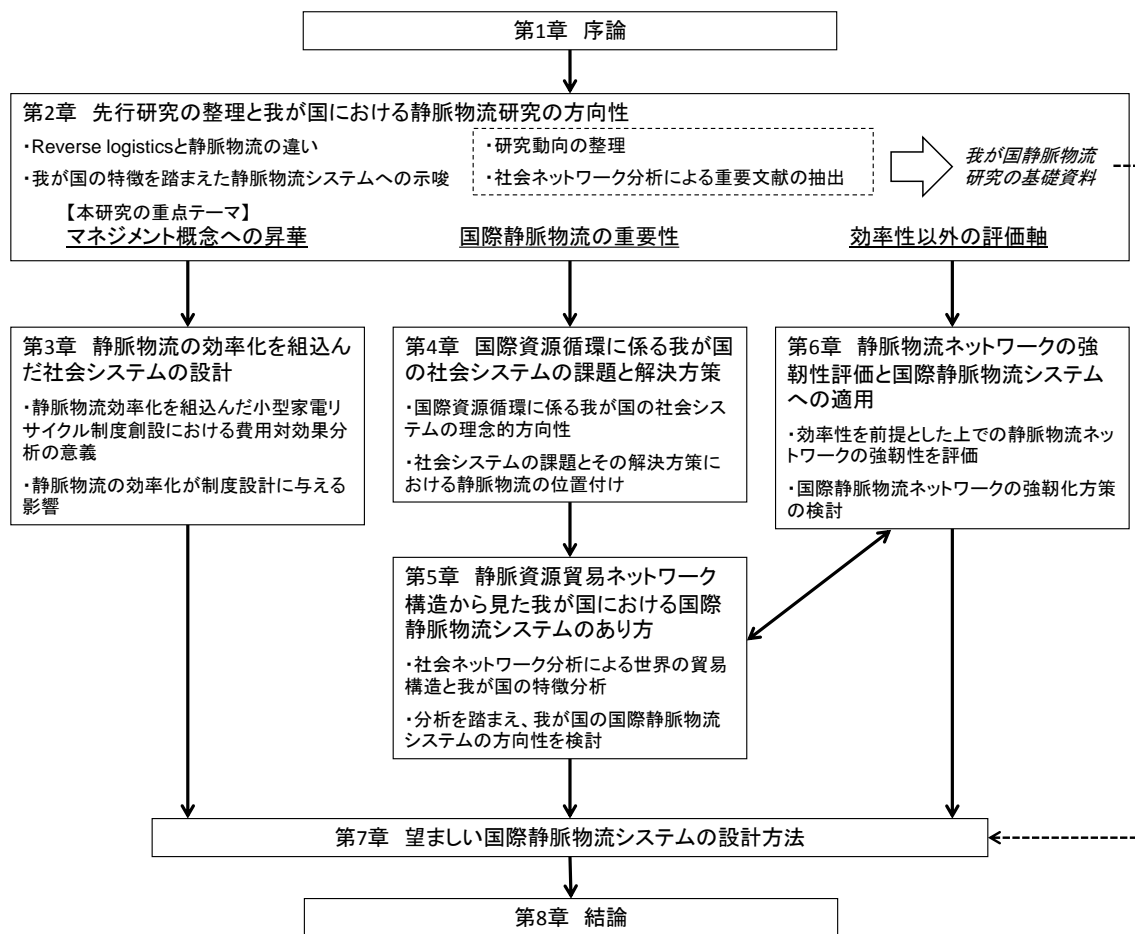


図 1-1 各章の関係

なお、第3章²⁰⁾、第4章²¹⁾及び第5章²²⁾については、すでに対外的に発表した論文に加筆したものとなっている。

1.3 重要となる用語の解説

本研究で重要となる用語について、その使用の意図を記載する必要がある。本文中で特に断りのない限り、ここに記した意図で以下の用語を使用することとする。

静脈物流

国土交通省の用語解説²³⁾を踏まえ、製品を製造者から消費者まで輸送する「動脈物流」に対して、消費者から排出される廃棄物等を循環資源として再利用、再資源化するための輸送によって生じる物流のことを指す。重要な点は、経済的機能としての物流であること、Reverse logistics や静脈物流システムよりも狭い概念であることである。本研究では、

Reverse logistics との対比のため、世間に一般的に受け止められているイメージ通りの概念として位置付け、輸送に特化した経済機能として捉える。

動脈物流

国土交通省の用語解説²³⁾を踏まえると、製品の製造者から消費者までの輸送によって生じる物流ということになるが、静脈物流との対比によって初めて意味を持つ。静脈物流とは逆向きの流れを持った物流ということが重要な点である。Forward logistics と英訳されることが多いが、物流と logistics の間の概念の違いから、完全に同一のものではなく、本研究でも両者は区分して取り扱う。

システム

広辞苑によるとシステムとは「複数の要素が有機的に関係しあい、全体としてまとまった機能を発揮している要素の集合体。組織。系統。仕組み」である。自然科学の分野では、個々の要素が相互に影響しあいながら、全体として機能するまとまりや仕組みを指すものとして使用されることが多いが、人文系の分野ではルールや制度を指す場合が多いと考えられる。本研究では、「静脈物流システム」については前者を意図して、「社会システム」については後者を意図している。

Reverse logistics

最も包括的である尹⁹⁾の定義に従い、原料・製造過程・完成財・使用済み製品・廃棄物・廃棄過程・関連する情報に対して、消費地点から発生地点又は処分地点までの全てのフローを、価値の再取得や適切な処理、広い意味では循環型社会の形成のため、効率的かつ費用効果的に計画・実行・コントロールするプロセスを Reverse logistics として考える。重要なのはマネジメント概念であるという点である。適切な日本語訳が浸透していないが、比較的理解されやすい類似語として静脈物流システムがあり、本研究でも同等の概念として扱う。

静脈物流システム

国土交通省の用語解説²³⁾によると、社会経済活動における製品の生産から流通、利用、回収、再資源化までの物流循環を人体の血流にたとえて表現したもので、製品が生産され利用者に届けられるまでの物流を動脈物流と言うのに対し、消費者から排出され、利用後の廃棄物が回収、再資源化されるまでの物流システムのことを指す。本研究においては、静脈物流のマネジメント概念として使用し、Reverse logistics に最も近い日本語訳として扱う。

国際静脈物流システム

国境を越えて静脈資源が輸送される国際的な静脈物流を「国際静脈物流」と呼び、「国際静脈物流システム」はマネジメント概念として使用する。筆者の知る限り「国際静脈物流」という言葉は政府の資料には過去に登場しているが、先行研究で使用されたことはなく、研究面では本研究において初めて提唱される概念であると考えている。

静脈資源／循環資源

静脈物流の輸送対象となる使用済み製品等については、一般的には「循環資源」と呼ばれることが多い。循環資源とは、循環型社会形成推進基本法（平成 12 年法律第 110 号）で「廃棄物等のうち有用なもの」と定義されており、有価・無価を問わないがリサイクルされるポテンシャルを持ったものを指す。本研究では貿易対象となる使用済み製品等に関する課題を議論するため、違法・脱法的なリサイクルや不適正処理がなされるものまでも循環資源と呼ぶのは違和感がある。細田²⁴⁾は「使用済み製品・部品・素材を静脈資源と呼ぶ。静脈資源に一定の処理が施され、付加価値が生じるとしそれらが再生資源となる」としており、本研究でも循環資源より広い概念で意図されている「静脈資源」という用語を用い、静脈物流の輸送対象として考える。なお、静脈資源は潜在資源性と潜在汚染性の 2 つの性質を有する²⁴⁾。

国際資源循環

静脈資源の貿易を通じた国際的な移動のことを指す。静脈資源の有する潜在資源性と潜在汚染性の両性質から、リサイクル不可能な廃棄物が有用な資源の名目で国際取引される、あるいは輸出先でのリサイクル過程で汚染が引き起こされるといった問題が生じている。例えば、e-waste (electronic waste；電気電子機器廃棄物) による途上国における環境汚染問題²⁴⁾ などが有名である。国際資源循環を進展させるか否かについては、立場によって意見が分かれることが多い。国際資源循環に関しては、国際的には条約、国内では法令や制度など様々な社会システムが関連している。

社会システム

社会システムの定義自体が社会学の分野で研究対象となっており（例えば、宮台²⁶⁾、伊庭²⁷⁾）、学術的な定義は専門家に委ねるべきだが、本研究では法令を含む社会のルールとしての制度を意図して用いる。したがって、変化することや、新たに創設されることもあり得る。

Reuse（再利用）、Repair（修理）、Refurbish（再整備）、Remanufacture（再利用モジュールによる製造）、Cannibalization（再利用部品による製造）、Recycling（リサイクル）、Recovery（リカバリー）

我が国においては、循環型社会形成推進基本法（平成 12 年法律第 110 号）に位置付けられているとおり、3R はリデュース、リユース、リサイクルであるが、国際的には使用済製品等の再生のレベルに応じて、再利用（reuse）、修理（repair）、再整備（refurbish）、再利用モジュールによる製造^{9）、28）}（remanufacture）、再利用部品による製造^{9）、28）}（cannibalization）、リサイクル（recycling）に分類される^{29）}。これらを全て含めた概念、あるいは repair 以降の包括的な概念がリカバリー（Recovery）である。このように、我が国の分類では、国際的な分類と比べてリユースとリサイクルの間で曖昧さが残る。我が国では依然としてリサイクルという言葉が国際的な意味でのリカバリーと同様に使用されることが多いが、本研究ではリサイクルはリカバリーの一概念として捉える。

第1章参考文献

- 1) Rubio S., Chamorro A., Miranda F.J.: Characteristics of the research on reverse logistics (1995-2005), *International Journal of Production Research*, 46(4), pp.1099-1120, 2008.
- 2) Pokharel S, Mutha A: Perspectives in reverse logistics: A review”, *Resources, Conservation and Recycling*, 53(4), pp.175-182, 2009.
- 3) 日本物流学会ロジスティクス研究会：物流・ロジスティクス・SCM の概念について，<http://www.logistics-society.jp/01L-concept.pdf>.
- 4) 中田信哉・嘉瀬英昭・橋本雅隆：ロジスティクス概論，実務出版，2007.
- 5) 公益社団法人日本ロジスティクス協会：2013 年度 物流コスト調査報告書【概要版】，2014，http://www.logistics.or.jp/jils_news/2013cost_summary.pdf.
- 6) 尹鍾進：静脈物流の現状分析に基づいた静脈物流の効率化方案に関する研究，*土木学会論文集 G*, 63(4), pp.332-344, 2007.
- 7) 経済産業省：企業活動基本調査
- 8) 国土交通省ホームページ：http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr6_000007.html.
- 9) 尹鍾進：静脈物流に関する研究の動向と課題－論文レビュー，*運輸政策研究*, Vol.12, No.3, pp.2-12, 2009.
- 10) Fleishmann M.: *Quantitative Model for Reverse Logistics*, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Ch.5, 2001.
- 11) 浜崎章洋：「物流」と「ロジスティクス」の違いについての一考察－その定義と日本に紹介された時代背景－，*ロジスティクスレビュー*，第 57 号，2004.
- 12) Srivastava S: Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review, *International Journal of Management Review*, 9(1), pp. 53-80, 2007.
- 13) 一般社団法人日本経済団体連合会ホームページ：<http://www.keidanren.or.jp/policy/index07.html>.
- 14) United Nations Environment Programme: *Decoupling2: technologies, opportunities and policy options*, 2014.
- 15) 環境省：平成 26 年版環境・循環型社会・生物多様性白書，2014.
- 16) 経済産業省資源・エネルギー庁：平成 25 年度エネルギーに関する年次報告，2014.
- 17) 交通政策審議会港湾分科会：我が国の産業を我が国産業の国際競争力強化等を図るための今後の港湾政策のあり方（答申），2008.
- 18) Chan HK, Yin SZ, Chan FTS: Implementing just-in-time philosophy to reverse logistics systems: a review, *International Journal of Production Research*, 48, pp. 6293-6313, 2010.
- 19) Govindan K, Popiuc MN, Diabat A: Overview of coordination contracts within forward and reverse supply chains, *Journal of Cleaner Production*, 47, pp. 319-334, 2013.
- 20) 杉村佳寿・村上進亮，鶴飼隆広：小型家電リサイクル制度創設における費用対効果分析の意義，*土木学会論文集 G（環境）*, Vol.70, pp. II_183-II_19, 2014.
- 21) Sugimura Y, Murakami S: Problems in Japan's governance system related to end-of-life electrical and electronic equipment trade, *Resources, Conservation & Recycling* (in press)
- 22) 杉村佳寿・青木渉一郎・村上進亮：ネットワーク構造から見た静脈資源貿易に係る社会システムの課題，*土木学会論文集 G（環境）*, Vol.71, pp. II_287-II_296, 2015.
- 23) 国土交通省ホームページ：用語解説ページ，<http://www.mlit.go.jp/yougo/j-s2.html>.
- 24) 細田衛士：資源循環型社会－制度設計と政策展望－，慶應義塾大学出版会，2008.
- 25) The Basel Action Network (BAN) and Silicon Valley Toxic Coalition (SVTC) : *Exporting Harm, The High-Tech Trashing of Asia*, 2002.
- 26) 宮台真司：社会システム論の再編に向けて，*ソシオロギス*, 10, pp.96-119, 1986.
- 27) 伊庭崇・宮台真司・熊坂賢次・公文俊平：社会システム理論：不透明な社会を捉える知の技法（リアリティ・プラス），慶應義塾大学出版会，2011.
- 28) 島田智明：循環型サプライチェーン，神戸大学大学院 MBA プログラムホームページ，<http://mba.kobe-u.ac.jp/eureka/2009/090424/square/keyword/no.25shimada.htm>.
- 29) Thierry M, Salomon M, van Nunen J.A.E.E, van Wassenhove L.N.: Strategic issues in product recovery management, *California Management Review*, 37, pp.114-135, 1995.

第2章 先行研究の整理と我が国における静脈物流研究の方向性

2.1 先行研究整理の必要性

第1章で述べたとおり、静脈物流は企業戦略にとっても社会システムにとっても重要な要素となる。まず、環境経営の重要性増大に伴い企業の静脈物流への関与は今後一層高まることが予想されることから¹⁾、静脈物流の効率化は企業の競争力を左右し得ることは論を待たない。海外においても、もはや企業は Reverse logistics（以下、「RL」と呼ぶ。）を経済的収益や社会イメージのための重要な戦略的ツールとして認識し²⁾、費用最小化すべき対象ではなくむしろ収益機会として捉えられている³⁾。一方、静脈物流は社会システムと関係が深く、歴史的には社会システムを所与として効率化が目指されてきたが、逆に社会システムに影響を及ぼす場合もある。例えば、平成25年4月1日から施行されている小型家電リサイクル法⁴⁾では、自区内処理を原則とする廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和45年法律第137号）（以下、「廃掃法」と呼ぶ。）の特例措置を講じ、静脈物流を効率化することでリサイクル費用を低減させることを想定している。これによりリサイクルされる金属の売却益でリサイクル費用を賄え、そのため原則として排出時の料金徴収もなく、いかなる関係者にも義務が発生しない。すなわち、効率的な静脈物流が社会システムの前提になっているのである。

このように企業にとっても社会システムにとっても重要な要素であるにも関わらず、我が国では静脈物流に関する研究はそれほど多く行われていない。事実、我が国における静脈物流研究の蓄積に関しては、「研究のメスも入れられることがなかった⁵⁾」、「研究そのものがほとんど存在しない⁶⁾」、「これまでほとんど研究されてこなかった⁷⁾」などの記述が各年次の先行研究で散見される。他国と比較しても厳格であると言われる廃掃法等の規制⁸⁾との整合や、国際資源循環の進展に伴う国際静脈物流システムを島国としてどう構築すべきかなど、我が国独自の静脈物流を取り巻く課題もあり、本来であれば我が国に適応すべき静脈物流については本格的に研究がなされるべきである。このような中で我が国において十分な研究蓄積がないことは、我が国社会に影響を及ぼすような大きな問題であると言っても過言ではない。

そのため、本章ではまずは我が国における静脈物流に関する研究の歴史を概観した上で、十分な研究蓄積がなされてこなかった理由について考察する。その上で、海外における静脈物流の先行研究をレビューすることで、その研究動向と将来の研究の方向性を整理する。なお、和文論文の英語タイトルを見て明らかなように、我が国において静脈物流は一般的には「Reverse logistics」と訳される。そのため、静脈物流と RL のそれぞれの定義を明確にした上で、ここでは海外における RL の研究動向を把握することとする。また、先行の RL 研究が与える我が国の静脈物流システムへの示唆と我が国の静脈物流研究の前提とす

べき重要な先行 RL 文献の整理を行う。さらに、世界的な静脈物流の研究動向を踏まえて我が国の静脈物流に関する研究の特徴、特に対象分野の偏りを検証するとともに、我が国の特徴を踏まえた今後の重視すべき研究分野の特定を行う。重要文献の抽出や我が国の静脈物流研究の特徴の検証に当たっては、定性的なレビューとともに、社会ネットワーク分析による評価も試みる。

以下、本章の構成は以下のとおりである。2 節では我が国における静脈物流に関する研究の状況と静脈物流がこれまで研究対象とならなかった原因の考察を行う。3 節では海外における RL 研究の文献レビューを行い、結果から定性的な RL の研究動向について整理する。4 節では社会ネットワーク分析により研究分野の分類や重要論文の抽出を行うとともに、我が国の先行研究の課題について検証する。5 節では、我が国の静脈物流システムへの示唆と我が国において特に重視すべき研究分野を整理する。6 節が本章のまとめである。

2.2 我が国における静脈物流研究の系譜

2.2.1 Reverse logistics 概念の導入と我が国における静脈物流との関係

まず、我が国におけるこれまでの静脈物流に関する研究の状況を把握するためには、概念の導入時期と定義の 2 つの視点が必要となる。静脈物流に関する研究は、当然、静脈物流の概念の導入後開始されていると捉えるべきであるが、一方でその定義に含まれる内容をテーマとした研究が静脈物流の概念導入前に開始されている可能性もある。すなわち、静脈物流の概念導入前に実施された静脈物流の定義に含まれる内容を対象とした研究の扱いを決めることで、本研究の対象を明確にすることができる。

津久井⁵⁾は、RL の概念が 1996 年にアメリカから我が国に導入されたことや RL 黎明期の研究の流れを紹介している。岡田・塩見⁹⁾はアメリカにおける RL の概念の変遷について論じており、当初の環境問題への対処から、順次経済性、戦略性、社会性に着目した概念規定が行われていることを示している。その上で、「日本においてもアメリカと同様に経済性・戦略性を追及した RL が導入されていると考えられる」としながらも、この時点では日本における調査・分析を課題としている。これらを踏まえると、海外における先行研究の中で RL の概念が概ね形成され、RL 研究が本格化し始めた段階であると考えられる 1990 年代後半に日本に導入され、以後静脈物流の概念が徐々に普及してきたと捉えられる。事実、日本の物流政策の基本方針となる総合物流施策大綱（1997 年以降 4 年ごとに改定）では、1997 年に閣議決定された第一次大綱には物流における環境負荷の低減こそ謳われているが、静脈物流の記述はない。2001 年に閣議決定された第二次大綱以降は静脈物流の記述が登場している。

海外の先行研究から RL 研究の歴史的経緯について確認すると、RL 研究は Pokharel and Mutha¹⁰⁾ が 1960 年代から、Ye and Zhenhua¹¹⁾ は 1970 年代からと指摘しているが、いずれも RL の戦略やモデルは 1980 年代以降であるとしている。Rubio et al.¹²⁾ は RL 自体の

概念が統合され、学術誌に SCM の環境面に関する論文が見られるようになるのが 1995 年以後、本格化は 2000 年以降であるとしている。1990 年代後半の Fleischmann et al.¹³⁾ は RL がかなり新しい分野であり、成果も疎らで狭い範囲やひとつの問題を対象とした研究だけで包括的なアプローチがほとんどないと述べており、同様に Carter and Ellram¹⁴⁾ がそれまでの既往文献について、学術誌より商業的出版物が多いことや RL の全体的な概念を扱った文献がほとんどないことを指摘していることから、RL の本格的な研究は 1990 年代後半以降とするのが妥当であろう。事実、それ以前については、RL を全体論的視点及び学術的側面から扱っているのは 1992 年の Stock¹⁵⁾ に限られると Carter and Ellram¹⁴⁾ は指摘している。このように海外の先行研究から見ても、海外における RL 研究の本格化は 1990 年代後半からであり、津久井⁵⁾ や岡田・塩見⁹⁾ の主張が裏付けられる。

このように、日本へも RL の概念が導入された 1990 年代後半以降明示的に静脈物流を扱った研究が登場することになる。概念として導入され、市民権を得始めたのが 1990 年代後半からであるとしても、日本においても物流における環境配慮についてはより古くから行われており⁵⁾、また、概念として導入される以前から機能としての静脈物流自体は当然に存在していた。すなわち、静脈物流の概念を意図せずに行われつつも静脈物流に関する研究と位置づけられるべきものも存在しているはずであり、それらを本研究の対象に含めるべきかどうかを決定するためには、RL や静脈物流の定義が重要となる。

RL の定義については、先行研究の中で議論されてきている。Fleishmann¹⁶⁾ は既往研究を踏まえて RL の定義を行っており、廃棄物減量化の要素を強調し、環境マネジメントの一環に位置づけた Stock¹⁵⁾、サプライチェーンに関連してモノの流れの方向に言及したものとなっている Pohlen and Farris¹⁷⁾、サプライチェーンにおける循環に繋がるモノの流れのマネジメントとして見ている Rogers and Tibben-Lembke¹⁸⁾ の 3 つの定義を参考にしながら、*“the process of planning, implementing, and controlling the efficient, effective inbound flow and storage of secondary goods and related information opposite to the traditional supply chain direction for the purpose of recovering value or proper disposal.”* (価値の回復を目的としたあるいは適正な処分のための、中古品とその関連情報の、従来のサプライチェーンの方向と反対のインバウンドなフローと保管の効率的・効果的な計画、実行、管理のプロセス) と定義している。その他にも、Rubio et al.¹²⁾ で「最も完璧な RL の定義」とされている de Brito and Dekker¹⁹⁾ による定義や Council of Supply Chain Management Professional²⁰⁾ による定義もあるが、Fleishman¹⁶⁾ の定義と大きな違いはない。このように、RL の定義としては、1992 年の Stock¹⁵⁾ の段階で既にマネジメントの概念を含んでおり、「適正な処分」を目的とすることで既に社会的な側面も考慮している 2001 年の Fleishman¹⁶⁾ の段階からこの 10 年以上に亘り包括的なマネジメント概念として共通認識が得られていると考えられる。

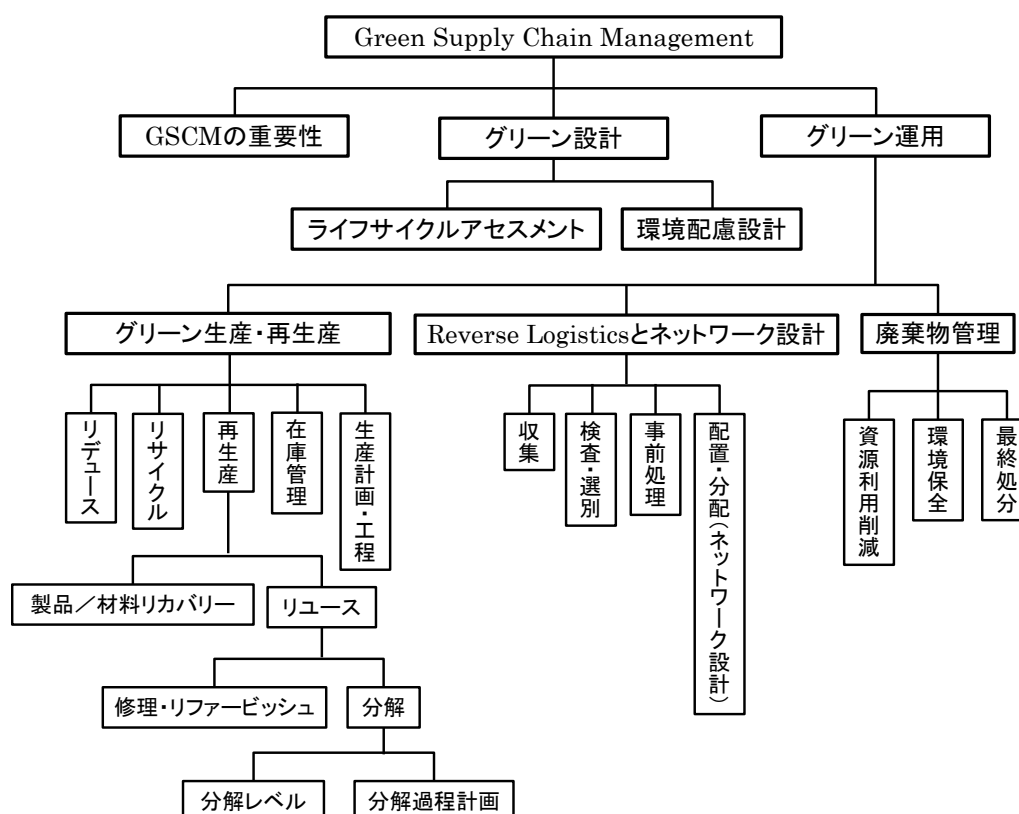
ただし、RL と類似の概念となる用語がいくつか存在し、本章で対象となる我が国の静脈物流に関する研究及び海外の RL 研究の範囲を正確に絞るためには、それらとの違いや関係

を明確にする必要がある。海外の先行研究でもしばしばその関係が整理される（あるいは依然として混同される）類似の用語として、Green supply chain management（以下、「GSCM」と呼ぶ.）、Sustainable supply chain management（以下、「SSCM」と呼ぶ.）Reverse supply chain management（以下、「RSCM」と呼ぶ.）、Closed-loop supply chain management（以下、「CLSCM」と呼ぶ.）が挙げられる。

実際、例えば Fahimnia et al.²¹⁾ は GSCM や SSCM には統一的な定義はないとしている。また、Ahi and Searcy²²⁾ は Supply chain management（以下、「SCM」と呼ぶ.）におけるサステナビリティの意味については依然として議論があり、SCM とサステナビリティの両概念の結合を意味するものとして GSCM, SSCM, CLSCM, RL を含む異なる言葉が使用され、それらの内容が完全に重ならない一方で互換的に使用されてきていることを指摘している。Ahi and Searcy²²⁾ はその上で、GSCM と SSCM が SCM とサステナビリティの両概念を結び付けるものとして近年特に使用される言葉であるとし、先行研究から 22 の GSCM の定義と 12 の SSCM の定義をレビューし、文献により内容と対象に大きな幅があることを示している。こうした詳細な定義の検証を行っている Ahi and Searcy²²⁾ による SSCM の定義は、Ahi and Searcy²³⁾ において示されている *“The creation of coordinated supply chains through the voluntary integration of economic, environmental, and social considerations with key inter-organizational business systems designed to efficiently and effectively manage the material, information, and capital flows associated with the procurement, production, and distribution of products or services in order to meet stakeholder requirements and improve the profitability, competitiveness, and resilience of the organization over the short- and long-term”*（短期・長期にわたってステークホルダーの要求を満たし、組織の利益性、競争性、強靱性を改善するために製品あるいはサービスの調達、生産、配送に関連した資源、情報、資本の流れを効果的・効率的に管理するために設計された鍵となる組織間ビジネスシステムと経済的、環境的、社会的配慮の自発的統合を通じて調整されたサプライチェーンの創造）であり、GSCM の定義としては SSCM の定義から経済的、社会的配慮を除いたものとしている。すなわち、最も包括的な概念が SSCM であり、それより範囲の小さい概念が GSCM ということが分かる。また、Srivastava²⁴⁾ は GSCM を *“Integrated environmental thinking into supply chain management including product design, material sourcing and selection, manufacturing processes, delivery of final product to the consumer as well as end-of-life management of the product after its useful life”*（製品設計、材料獲得と選択、生産過程、消費者への最終商品の配達、耐用年数後の使用済み製品の管理を含むサプライチェーンに対する統合的な環境面の考え方）と定義しており、環境面を重視する点では Ahi and Searcy²³⁾ の定義と一致している。さらに、Srivastava²⁴⁾ が RL を一要素とした GSCM の概念的なフレームワークを図 2-1 のように図示していることから、GSCM は RL より広い概念であることが分かるが、同時に GSCM における RL の重要性についても言及している。なお、GSCM に最

も近い我が国における概念は「グリーン物流」である。実際、グリーン物流の解説として、「一般的に温室効果ガス、特に二酸化炭素を低減させる物流であるが、『グリーン』について考えると、対象とするものは、何も二酸化炭素(CO₂)だけではない。窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)も対象となるべきだし、粒子状物質(PM)も対象となるべきだろう。また、『物流』に関して考えると、単に『物を運ぶ』という行為についてのみに着目せず、『物流』を『物を運ぶ』システム全体として捉え、組織的な対応や、人材の育成、事業所内での取り組みや、地域社会との共生をも対象とすべきだろう」とある²⁵⁾。

また、Ilgin and Gupta²⁶⁾ 等にあるように RL と RSCM は同じ意味と捉えられることが多い。例えば Prahinski and Kocabasoglu²⁷⁾ のように RSCM と RL の違いについて後者を輸送、倉庫、在庫の活動に焦点を当てたものであるとして両者の線引きを明確化している文献も例外的にあるが、これは Logistics を SCM の下位概念と見ているためであり、基本的には RL と RSCM は同等の概念とする方が一般的であると思われる。CLCSM は Akçali and Çetinkaya²⁸⁾ 等にあるように、Forward supply chain management と RSCM を統合したものであるが、両方を含まないものを open-loop あるいは recovery network と表記して差別化した文献も多い(例えば Melo et al.²⁹⁾ など)。



出所：Srivastava²⁴⁾ を参考に著者作成

図 2-1 Srivastava²⁴⁾ による Green supply chain management のフレームワーク

以上を踏まえると、最も大きな概念として SSCM があり、より環境面に特化した概念が GSCM となり、その下位概念として RL が捉えられることが多い。RSC は RL と同じ概念であると捉えられることが一般的で、さらに CLSCM には必ず RL を含むが、RL であるからといって必ずしも CLSCM の一部であるとは限らないことになる。

我が国における静脈物流の定義に関しては、国土交通省の用語解説³⁰⁾では静脈物流は「製品を製造者から消費者まで輸送する『動脈物流』に対して、消費者から排出される廃棄物等を循環資源として再利用、再資源化するための輸送によって生じる物流」と定義されており、あるいは国土交通省港湾局 HP で「人の血管に例えて、製品系の輸送を動脈物流と表現するのに対し、生産や消費活動で排出されたものの輸送」との注釈がなされている箇所もある³¹⁾。研究面では静脈物流に係る唯一の和文のレビュー文献である尹³²⁾が、静脈物流を「原料・製造過程・完成財・使用済み製品・廃棄物・廃棄過程・関連する情報に対して、消費地点から発生地点又は処分地点までの全てのフローを、価値の再取得や適切な処理、広い意味では循環型社会の形成のため、効率的かつ費用効果的に計画・実行・コントロールするプロセス」と定義している。これは Rogers and Tibben-Lembke¹⁸⁾は廃棄物処分といった社会的な側面を考慮しておらず、Stock¹⁵⁾が経済的な側面を考慮していないことを踏まえていることから、Fleishmann¹⁶⁾等の先行研究における RL の定義を参考にしていないと想定され、実際、先行研究における RL の定義と比較しても最も包括的なものとなっている。

そのため、本研究でも RL の定義として尹³²⁾による定義を採用する。このように、尹²³⁾による定義を RL に対するものとすれば、我が国の「静脈物流」が専ら輸送をその対象としているのに対し、RL は輸送を一機能とするマネジメント概念となっている。

こういったことは、我が国で「物流」と「ロジスティクス」が概ね同じ意味として認識されていることに起因していると考えられる。本来、物流とロジスティクスの概念は異なる³³⁾。日本工業規格 (JIS) によると物流は「物資を供給者から需要者へ、時間的、空間的に移動する過程の活動。一般的には、包装、輸送、保管、荷役、流通加工及びそれらに関連する情報の諸機能を総合的に管理する活動」と定義され、ロジスティクスは「物資流通の活動目標を最終需要の必要条件や環境保全などの社会的課題への対応に求め、包装、輸送、保管、荷役、流通加工及びそれらに関連する情報の諸機能を高度化し、統合化を進めるとともに、調達、生産、販売、回収などの分野との一体化、一元化を図る経営活動」と定義されている。他の定義でも「総合的なシステム (日本ロジスティクスシステム協会監修、基本ロジスティクス用語辞典)」、「管理システム (広辞苑)」といったキーワードがあるように、管理、経営、システムといったマネジメント概念であることが、物流とロジスティクスの大きな違いであろう。「静脈ロジスティクス」という言葉もあるが、我が国では一般的ではない。そこで、国土交通省の用語解説³⁰⁾で「社会経済活動における製品の生産から流通、利用、回収、再資源化までの物流循環を人体の血流にたとえて表現したもので、製品が生産され利用者に届けられるまでの物流を動脈物流と言うのに対し、消

費者から排出され、利用後の廃棄物が回収、再資源化されるまでの物流システム」とされている「静脈物流システム」を、本研究では RL と同義の訳語として使用する。すなわち、静脈物流システムをマネジメントシステムとして捉える。

以上により、本研究における静脈物流と RL 及び静脈物流システムの定義が明確となった。ここで、本研究の対象とする静脈物流に関する研究の範囲は、RL の定義の内容を含むものとし、RL 類似用語の関係を踏まえ広範囲となる SSCM, GSCM, グリーン物流に関する研究は含めないこととする。次に、我が国では廃棄物収集の効率化に関する研究が存在するが、これは静脈物流の概念導入前に開始されている静脈物流の定義に含まれる内容を対象とした研究ということになる。先述したとおり 2001 年に閣議決定された第二次大綱以降は静脈物流の記述が登場するが、どちらかと言えば循環型社会形成のためのツールとしての位置づけとなっており、定義には含まれる廃棄物処分の側面にはあまり触れられていないことから静脈物流はリサイクルを念頭に置いた循環型社会形成と密接に関係している。本研究の目的は幅広い実行要因を有し、それらを踏まえた望ましい静脈物流システムのあり方を検討することであるため、RL の概念の導入前から開始されている専ら廃棄物収集の効率化のみを対象として循環型社会形成を意図しない研究領域については、本研究の対象からは除外し、参考的に俯瞰することとする。

以上を踏まえ、我が国に関連するこれまでの静脈物流研究を表 2-1 に示す。対象は学術論文とし、日本で出版されている論文誌、海外の論文誌に日本から投稿されたものに加えて、日本を題材としたものも網羅的に示しているが、プロシーディング、書籍、学位論文は含めていない。

2.2.2 我が国における静脈物流研究の状況

我が国における静脈物流研究は表 2-1 に示したとおりである。これらを概観すると、1990 年代後半から、Ishikawa³⁴⁾、盛岡ら³⁵⁾、盛岡ら³⁶⁾、Ishikawa³⁷⁾ といったリサイクルを目的とする回収システムを対象とした研究が登場し始める。2000 年代に入ると、田畑ら³⁹⁾、荒井ら⁴¹⁾、溝本ら⁴³⁾、吉永ら⁴⁵⁾ といった施設配置計画の中で静脈物流を扱う研究が本格化している。ただしこれらは明示的に静脈物流を対象とはしているが、実質的に廃棄物収集の効率化を目的としているものが多い。なお、回収システムを対象とした研究の流れでも、林ら⁴⁶⁾ がリユースまでを含め近畿圏を対象とした実証的な先行研究が行われている。

2000 年代半ば以降は、研究分野の広がりを見せる。廃掃法の下で自区内処理の原則を有する我が国の廃棄物輸送の特徴を踏まえた広域化による輸送効率化を目指す研究の流れとして藤井⁴⁷⁾、荒井ら⁶⁷⁾、藤山・松本⁶⁸⁾ が挙げられ、同様に最適規模の地域循環圏の観点から輸送距離に着目した研究として藤山・松本⁶⁴⁾ がある。効率的な静脈物流ネットワークの設計を対象とした研究としては、Lee et al.⁵⁹⁾、Lee et al.⁶⁰⁾、Lee et al.⁶¹⁾、宮原ら⁶⁵⁾、李⁶⁶⁾らがある。

表 2-1 日本関連の静脈物流研究

文献	内容
Ishikawa ³⁴⁾ , 1996	廃棄物リサイクル
津久井 ⁵⁾ , 1999	RLの概念
盛岡ら ³⁵⁾ , 1997	家電リサイクル
盛岡ら ³⁶⁾ , 1998	家電リサイクル
Ishikawa ³⁷⁾ , 1999	容器包装リサイクル
Nakashima et al. ³⁸⁾ , 2002	再生産・在庫マネジメント
田畑ら ³⁹⁾ , 2002	産業廃棄物リサイクル
岡田・塩見 ⁹⁾ , 2003	RLの概念
Nakashima et al. ⁴⁰⁾ , 2004	再生産・在庫マネジメント
荒井ら ⁴¹⁾ , 2004	家電リサイクル
近藤 ⁴²⁾ , 2004	循環型社会
篠田ら ⁴³⁾ , 2004	循環型社会
溝本ら ⁴⁴⁾ , 2004	廃棄物リサイクル
吉永ら ⁴⁵⁾ , 2004	容器包装リサイクル
林ら ⁴⁶⁾ , 2005	リユース, リサイクル
藤井 ⁴⁷⁾ , 2005	リサイクル
吉田ら ⁴⁸⁾ , 2005	紙リサイクル
Kumar and Yamaoka ⁴⁹⁾ , 2006	自動車リサイクル
Murayama et al. ⁵⁰⁾ , 2006	リユース, リサイクル
川崎 ⁵¹⁾ , 2006	国際資源循環
藤川 ⁵²⁾ , 2006	RLの概念
山本ら ⁵³⁾ , 2006	東アジア, 金属くず
Kishore et al. ⁵⁴⁾ , 2007	再生産
Kumar and Yamaoka ⁵⁵⁾ , 2007	自動車リサイクル
福原 ⁵⁶⁾ , 2007	セメント製造プロセス廃棄物
細田 ⁵⁷⁾ , 2007	国際資源循環
尹 ⁵⁸⁾ , 2007	現状分析, 共同輸送, モーダルシフト
Lee et al. ⁵⁹⁾ , 2008a)	再生産
Lee et al. ⁶⁰⁾ , 2008b)	再生産
Lee et al. ⁶¹⁾ , 2009	再生産
伊藤ら ⁶²⁾ , 2010	産業廃棄物
尹 ³²⁾ , 2009	文献レビュー
胡ら ⁶³⁾ , 2010	国際資源循環
藤山・松本 ⁶⁴⁾ , 2010	産業廃棄物及び廃PETボトルリサイクル
細田 ⁷⁾ , 2010	循環型社会
宮原ら ⁶⁵⁾ , 2010	建設副産物リサイクル
李ら ⁶⁶⁾ , 2011	リユース
荒井ら ⁶⁷⁾ , 2011	産業系プラスチック廃棄物リサイクル
藤山・松本 ⁶⁸⁾ , 2011	容器包装リサイクル
大窪・奥村 ⁶⁹⁾ , 2012	小型家電リサイクル
Fang et al. ⁷⁰⁾ , 2013	自動車リサイクル
Kainuma ⁷¹⁾ , 2013	リユース, リサイクル
Karakama and Kainuma ⁷²⁾ , 2013	廃棄物リサイクル, グローバル
Yoon and Le ⁷³⁾ , 2013	現状分析, 共同輸送, モーダルシフト
Alqahtani et al. ⁷⁴⁾ , 2014	リファービッシュ, リマニュファクチャ
Hoz and Matsukawa ⁷⁵⁾ , 2014	ボトルリユース・リサイクル
Joshi et al. ⁷⁶⁾ , 2014	リサイクル
Tanimizu and Shimizu ⁷⁷⁾ , 2014	部品リユース
杉村ら ⁷⁸⁾ , 2014	小型家電リサイクル
山本 ⁷⁹⁾ , 2014	リサイクル

産業やテーマを特化した実証的な研究についても行われており、Kumar and Yamaoka⁴⁹⁾、Kumar and Yamaoka⁵⁵⁾はシナリオ分析に基づいた 3R と処分の間の関係を検証した上での日本の自動車産業の Reverse supply chain 設計、Fang et al.⁷⁰⁾は中国の自動車部品産業における RL が持続可能な経済へ与える影響、Kainuma⁷¹⁾は Closed-loop supply chain の中でカスケードリユースを想定した最適発注政策、Alqahtanir et al.⁷⁴⁾は Reverse supply chain における複数の処理方法を考慮したリカバリーシステムの効果、Hoz and Matsukawa⁷⁵⁾は再包装材を活用した RL による効果の検証、Joshi et al.⁷⁶⁾は Reverse supply chain における使用済み製品の供給者の選択基準、Tanimizu and Shimizu⁷⁷⁾は Closed-loop supply chain の中で部品リユースを想定した経済効率性を追求するモデルについて論じている。ただし、こうした実証的な研究の多くは、物流ではなく処理に主眼を置いているものが多く、マネジメント概念としての静脈物流システムを意図したものにはなっていない。その他、物流よりむしろリカバリー方法に重点を置いた研究としては、近藤⁴²⁾、Murayama et al.⁵⁰⁾、Kishore et al.⁵⁴⁾、福原⁵⁶⁾があり、効率的な輸送による環境負荷の低減をテーマとした研究として、篠田ら⁴³⁾、吉田ら⁴⁸⁾がある。論文誌に投稿されたものの以外でも、静脈物流の経済分析を行った山本⁶⁾、静脈物流におけるモーダルシフトを扱った山縣ら⁸⁰⁾がある。

2000 年代半ば以降に登場する別の系統の研究として、川崎⁵¹⁾、山本ら⁵³⁾、細田⁵⁷⁾、伊藤ら⁶²⁾、胡ら⁶³⁾が国際資源循環をテーマとする中で静脈物流を扱っているが、これらは工学的アプローチではなく、静脈物流の重要性を定性的に述べているものである。

なお、1990 年代後半以降解説論文も散見され、早い時期の津久井⁵⁾、塩見・岡田⁹⁾は RL の概念的な解説、2000 年代半ばに入ると藤川⁵²⁾が静脈物流を進化させた消費者起点ロジスティクスの提案、細田⁷⁾や山本⁷⁹⁾はリサイクル制度における静脈物流の重要性をテーマとしている。このように、当初は RL の概念自体がテーマであったものが、時期が後になるほど、その進化や徹底を論じる内容となっており、静脈物流の概念が浸透してきていることが伺える。また、我が国唯一の静脈物流に関するレビュー論文として尹³²⁾があり、国内外を問わず幅広く静脈物流に関する先行研究のレビューを行っている。

このような中、2000 年代後半以降には、我が国の静脈物流の現状を分析した上でモーダルシフトや共同輸送による静脈物流の効率化を論じた尹⁵⁸⁾や Yoon and Le⁷³⁾（ただし内容的には尹⁵⁸⁾とほぼ同一）、静脈物流の特徴である不確実性への対応を明示的にテーマとした大窪・奥村⁶⁹⁾、グローバルなリサイクルを対象とした Karakama and Kainuma⁷²⁾、リサイクル制度に静脈物流の効率化を組込む重要性を論じた杉村ら⁷⁸⁾といった特徴的な研究も登場している。これらは静脈物流や我が国の特徴・課題を踏まえている数少ない先行研究であり、我が国の静脈物流システムのあり方に大きな示唆を与えうる点から、非常に重要な位置付けを有していると考えられる。

関連する研究分野として、廃棄物の収集については RL の概念導入前である 1980 年代から行われており、松藤ら⁸¹⁾、小泉ら⁸²⁾、山中ら⁸³⁾、高桜・大山⁸⁴⁾、田中⁸⁵⁾など RL 概念

導入時期より早い先行研究も存在し、導入後も篠田・福地⁸⁶⁾、荒井ら⁸⁷⁾、小泉ら⁸⁸⁾、佐々木ら⁸⁹⁾、川端ら⁹⁰⁾、楊ら⁹¹⁾、荒井ら⁹²⁾、岡崎ら⁹³⁾、藤井ら⁹⁴⁾、藤井ら⁹⁵⁾、村上ら⁹⁶⁾、藤山・松本⁹⁷⁾、山本⁹⁸⁾、吉田ら⁹⁹⁾などがあり、静脈物流を明示的に対象としていないとはいえ、手法としては静脈物流に関する研究と類似したものも多い。また GSCM、グリーン物流をテーマとした研究についても石崎¹⁰⁰⁾、中野ら¹⁰¹⁾、内田ら¹⁰²⁾、金¹⁰³⁾、林ら¹⁰⁴⁾、加納¹⁰⁵⁾など静脈物流に関する研究以前から系譜がある。これらは先の整理により本研究における先行研究の対象からは除外しているが、こういった研究の流れは我が国の静脈物流研究の周辺分野であり、また RL と GSCM の定義を踏まえても一部重複する部分もあるため、これらの把握は我が国の静脈物流研究の系譜を見る上では参考にされるべきであろう。

以上のように、我が国の静脈物流研究は時代とともに一定の広がりを見せているとはいえ、文献数は少ない上、定義を踏まえると対象テーマも部分的なものとなっている。静脈物流に関する研究の初期の段階に多い回収システムや施設配置計画を対象としたもの、静脈物流を明示的にテーマとしているか否かは別として廃棄物問題を取扱う中で静脈物流を対象とした研究には一定の研究蓄積があるが、いずれも目的は輸送の効率化となっている。逆に、静脈物流と密接に関わるはずのリサイクル制度や国際資源循環など社会的なテーマに関する先行研究では静脈物流については定性的な記述がなされる程度である。実証的な先行研究においても、静脈物流は経済的機能としての側面が重視されており、社会システムとの関係性やマネジメント概念としての静脈物流システムを論じているわけではない。

このように、これまで国内ではそもそも静脈物流に関する先行研究の数が少なく、内容的にも経済的機能としての側面を重視した輸送効率化のみに注意が払われるものや社会システムとの関係の中での定性的な記述がなされる程度となっている。複数の先行研究で述べられているとおり明らかに絶対量としても少なく、定性的に見ても幅広い RL の概念を十分に網羅できているとは考えにくい。どの分野の研究が不足しているかについては後述するとして、以降で我が国において静脈物流がこれまで研究対象となりにくかった原因について考察する。

まず、静脈資源は廃掃法や個別リサイクル法といった社会システムの対象になるか否かにより、輸送も含めその取扱いが大きく変動する。したがって我が国における静脈物流に関する研究は、**図 2-2**に示す我が国の廃棄物・リサイクル法体系と密接に関わるはずである。

静脈物流の対象となる静脈資源について、全国貨物純流動調査（物流センサス）¹⁰⁶⁾における静脈物流関連品目として廃自動車、廃家電、金属スクラップ、金属製容器包装廃棄物、使用済みガラスびん、その他容器包装廃棄物、古紙、廃プラスチック、燃え殻、汚泥、鉋さい、ばいじん、その他産業廃棄物の 13 分類があり、これに一般廃棄物を加えれば全てがカバーされる。この静脈物流関連品目が全流動量に占める比率は最新調査で 4.5%（2010 年）であり、ウェイトが高まっている（2005 年で 3.9%）とはいえ物流全体から見ると決してシェアは大きくない。品目別流動量（重量ベース）では金属スクラップ 37.9%、その他の産業廃棄物（19.1%）、鉋さい（17.1%）、古紙（13.6%）の順となっており、この 4 品目

で全体の 87.8%を占めている。流動ロットをみると、鋳さい、ばいじん、廃自動車が各々 67.7 トン、67.6 トン、30.5 トンとロットが大きくなっているが、他の品目はほとんどが 10 トン以下となっている。

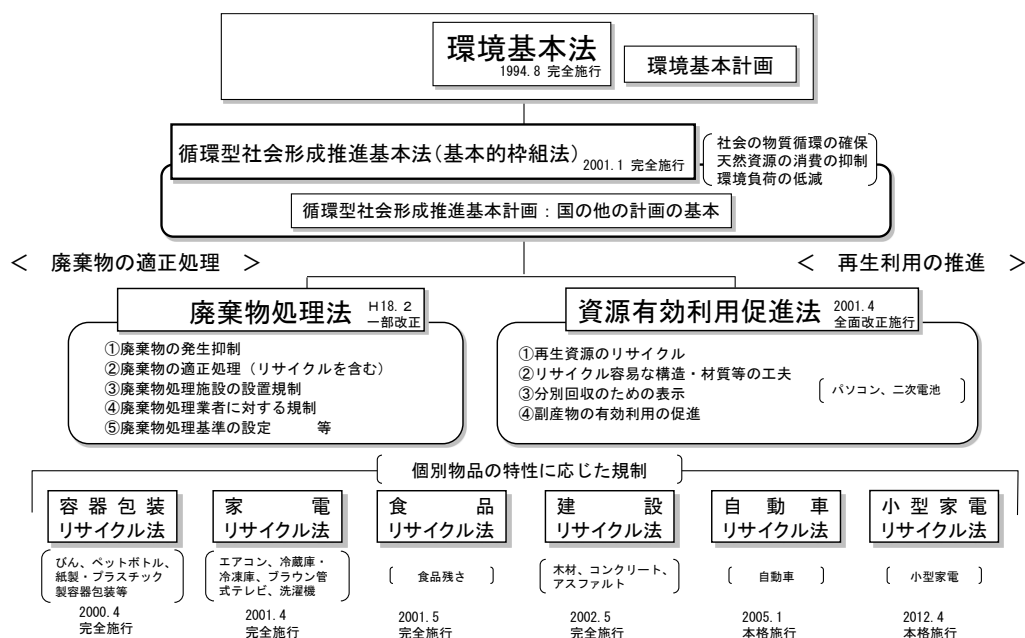


図 2-2 我が国における廃棄物・リサイクル法体系

静脈資源が図 2-2 におけるいずれの法の対象になるのかによって当該静脈資源の取扱いが変わる。廃掃法の対象外あるいは廃掃法上の専ら物であればその輸送に対して規制はかからない。先の分類では廃プラスチック、金属くず、古紙が該当し、疎から密へ向かう流れであることを除けば動脈物流と変わらない。廃掃法の対象となれば輸送に対しても規制がかかり、自治体または許可業者による自区内処理のための収集が行われる。ただし収集後の分別により、有価物として売却されるケースもあり、この際の輸送も静脈物流の一種となる。個別リサイクル法の対象である廃自動車、廃家電、金属製容器包装廃棄物、使用済みガラスびん、その他容器包装廃棄物及びその他産業廃棄物に含まれる個別リサイクル法対象品目については、そのリサイクル制度に規定されたプロセスの間を結ぶために静脈物流が実施され、廃掃法の自区内処理等の規制に対して特例措置が講じられる。同様に、再資源化または再商品化後の輸送についても定義を踏まえれば静脈物流の一種と言える。

こうしたことを踏まえ、我が国において静脈物流が研究対象となりにくかったことについてニーズとシーズの両面から検証すると以下のような理由が考えられる。

- ・ 静脈物流関連品目の全流動量に占める割合が小さいことから、物流全体で考えると、通常その最適化を目指すことの優先順位は動脈物流より高くはならない。ただし、このことは世界共通であり、むしろ我が国における歴史的経緯もあり静脈資源の輸送は限定的

な事業者によって行われる閉鎖的とも言える業界であるため、実務面からの研究ニーズがなかったことがひとつの原因として考えられる。

- ・廃掃法の対象となる静脈資源に係る静脈物流は廃棄物の収集であり、これは公的サービスとして実施されるため効率化に対するインセンティブが働きにくい。自治体または許可業者による自区内処理が原則となっているためステークホルダーも限定的で、廃棄物業界の特殊性もあり、実務面からの研究ニーズがなかったと考えられる。そのため回収ルート最適化に関して一部先行研究が存在する程度となっている。
- ・廃掃法の対象外あるいは廃掃法上の専ら物を対象とする静脈物流は、疎から密へ向かう流れであることを除けば動脈物流と変わらない。疎から密の流れである特徴に対しては、回収システムやネットワーク設計を対象とした先行研究で一部扱われているが、費用最小化問題としてモデル化するなど動脈物流の研究蓄積で対応が可能なものであるため、静脈物流に特化することで新規性に繋がるような研究分野にはなり得なかったと考えられる。
- ・個別リサイクル法は最終処分場の逼迫や不法投棄など大きな社会問題を背景に創設されているものが多く、廃棄物問題の解決に主眼が置かれたため、制度設計時に経済性の観点は議論されず、静脈物流やその効率化は意図されていない。義務型の制度であれば環境改善を確実に達成することを担保させるため制度に柔軟性がないことが静脈物流の最適化に対して裁量の余地が小さくさせ、促進型の制度であっても静脈物流の最適化を目指すことが制度に組み込まれていない。このため、制度を所与とすれば静脈物流の最適化は研究テーマにはなりにくい。制度設計の効果を検証するなど、制度そのものを対象とする場合は制度創設の背景から環境問題が対象となる。個別リサイクル法は環境的、社会的側面が重視された環境政策としての性格が強く、経済性の観点には留意が払われていないため、静脈物流が重要な一機能として認識されていない。このような理由から、社会システムから派生する静脈物流は研究対象とされにくかったと考えられる。
- ・個別リサイクル法に規定されているのは再資源化または再商品化するまでのプロセスとなっており、それ以降の機能についてはほとんど注目されていない。我が国の廃棄物・リサイクル法体系の中で、再資源化または再商品化後の輸送は、廃掃法の規制対象外となることから通常の動脈物流として認識されている。収集から販売まで全体をマネジメントする静脈物流システムとして捉えればその全体最適化が研究テーマとなり得たが、個別リサイクル法が静脈物流システムの部分的な領域のみをカバーしていることで法の範囲内外で境界を生み出す結果となった。このように、我が国のリサイクル制度と RL の概念の乖離が研究機会を失わせていたと考えられる。

このように、我が国では静脈物流は実務面のニーズの少なさ、廃棄物・リサイクル法体系、すなわち社会システムに起因したシーズ的研究の難しさから研究対象になり得なかったと考えられる。また、海外における RL 概念の十分な浸透が進んでいないことが、実務面のニーズの少なさ、廃棄物・リサイクル法体系における静脈物流の軽視に繋がっていると

も考えられる。

なお、静脈物流と社会システムとの関係という点では、ひとつの研究分野が存在する。社会システムの枠外に漏れるもの、すなわち海外への違法・脱法的輸出と輸出先での問題を対象とする研究分野である。例えば、小島¹⁰⁷⁾、Shinkuma and Huong¹⁰⁸⁾、寺園ら¹⁰⁹⁾、Fujimori et al.¹¹⁰⁾、寺園¹¹¹⁾ など一定の研究の蓄積があるが、環境問題を主眼にしているため、静脈物流が定性的に触れられる程度の扱いであり、これらは静脈物流をテーマとした研究としては扱わない。

2.3 文献レビューと定性的な Reverse logistics 研究動向

2.3.1 先行レビュー研究の整理

我が国に適応すべき静脈物流について本格的に研究がなされるべきであるにも関わらず、前節で述べたとおり、我が国における静脈物流研究においては十分な研究蓄積がない。そのため、海外における RL の研究動向を把握することで、先行研究が与える我が国の静脈物流システムへの示唆を整理することが可能となり、また現状の RL 研究の課題を把握することや重要な先行 RL 文献の整理することは我が国における今後の効率的な静脈物流に関する研究にも寄与する。

本節では海外における RL 研究の文献レビューを行い、結果から定性的な RL の研究動向について整理する。まず前節を踏まえ、RL に関連する文献レビューの先行研究を幅広く整理すると表 2-2 のとおりとなる。

RL 研究の背景としては、早い段階の先行研究である Carter and Ellram¹⁴⁾ が規制、消費者、政策立案者、不確実性を、また Fleischmann et al.¹³⁾ が政府の規制、経済的価値、環境イメージを挙げているなど、現在に至るまで一貫して経済的、環境的、社会的な背景が RL を実行する要因であり、研究の背景である。

研究拠点については Rubio et al.¹²⁾ が整理しており、RL 文献の 68.28% がヨーロッパで、31.72% がアメリカで出版されていることを示している。投稿元では、アメリカ 31.72%、オランダ 16.67%、ドイツ 11.29% の 3 国に集中しており、オランダ、ドイツは伝統的に環境意識が高いこと、アメリカは自由な返品政策を理由として挙げている。

研究の分類については、RL の機能別の分類、研究の方法論やアプローチによる分類、そして 2 つの混合によるものがある。例えば Fleischmann et al.¹³⁾ は流通問題、在庫管理、生産計画に、Prahinski and Kocabasoglu²⁶⁾ は製品獲得、RL、検査と処分、修理、流通と販売に、Dowlatschahi¹¹⁶⁾ は RL のグローバルな概念、定量化モデル、流通・倉庫・輸送、会社のプロフィール、応用に分類して整理している。別の視点では、Souza¹³³⁾ がネットワークデザインなど企業運営に長期の影響を与える戦略的決定が必要なもの、在庫管理など数週間の影響を与える戦術的決定が必要なもの、スケジューリングなど短期の影響を与える運営的決定が必要なものに分類している。方法論については Rubio et al.¹²⁾ がシェアを整

理しており、数学モデル 65.05%, 調査 4.84%, 全体的な理論 5.38%, ケーススタディ 21.51%, 文献レビュー 3.23%となっている。

表 2-2 文献レビューの先行研究

文献	対象
Fleischmann et al. ¹³⁾ , 1997	Reverse logistics
Carter and Ellrain ¹⁴⁾ , 1998	Reverse logistics
Brass and McIntosh ¹¹²⁾ , 1999	Remanufacturing
Guide et al. ¹¹³⁾ , 1999	Production planning and control for remanufacturing
Gungor and Gupta ¹¹⁴⁾ , 1999	Environmentally conscious manufacturing and product recovery
Fleischmann et al. ¹¹⁵⁾ , 2000	Reverse logistics
Dowlatsahi ¹¹⁶⁾ , 2000	Reverse logistics
Guide ¹¹⁷⁾ , 2000	Production planning and control for remanufacturing
Ferguson and Browne ¹¹⁸⁾ , 2001	Product recovery and reverse logistics
Prahinski and Kocabasoglu ²⁷⁾ , 2006	Reverse logistics
Rubio et al. ¹²⁾ , 2008	Reverse logistics
Sasikumar and Kannan ¹¹⁹⁾ , 2008a	Reverse logistics
Sasikumar and Kannan ¹²⁰⁾ , 2008b	Reverse logistics
Akcali et al. ¹²¹⁾ , 2009	Reverse and closed-loop supply chain
Chanintrakul et al. ¹²²⁾ , 2009	Reverse logistics
Pokharel and Mutha ¹⁰⁾ , 2009	Closed-loop supply chain
Subramoniam et al. ¹²³⁾ , 2009	Automotive remanufacturing
Sasikumar and Kannan ¹²⁴⁾ , 2009	Reverse logistics
Chan et al. ¹²⁵⁾ , 2010	Implementing just-in-time philosophy to reverse logistics systems
Ilgin and Gupta ²⁶⁾ , 2010	Environmentally conscious manufacturing and product recovery
Olugu et al. ¹²⁶⁾ , 2010	Automobile closed-loop supply chain
Setaputra and Mukhopadhyay ¹²⁷⁾ , 2010	Reverse logistics
Akçali and Çetinkaya ²⁸⁾ , 2011	Inventory and production planning in closed-loop supply chains
Carrasco-Gallego et al. ¹²⁸⁾ , 2012	Closed-loop supply chains of reusable articles
Kinobe et al. ¹²⁹⁾ , 2012	Reverse logistics related to waste management
Sheriff et al. ¹³⁰⁾ , 2012	Reverse logistics
Bouzon et al. ¹³¹⁾ , 2013	Reverse logistics in Brazil
Govindan et al. ¹³²⁾ , 2013	Coordination contracts within forward and reverse supply chains
Souza ¹³³⁾ , 2013	Closed-loop supply chain
Steeneck and Sarin ¹³⁴⁾ , 2013	Pricing and production planning for reverse supply chain
Aravendan and Panneerselvam ¹³⁵⁾ , 2014	Network design problems in closed-loop and reverse supply chains
Gan and He ¹³⁶⁾ , 2014	End-of-life vehicles reverse logistics
Ye and Zhenhua ¹³⁷⁾ , 2014	Reverse logistics
Agrawal et al. ²⁾ , 2015	Reverse logistics
Bhakhavatchalam et al. ¹³⁸⁾ , 2015	Closed-loop supply chain
Govindan et al. ³⁾ , 2015	Reverse logistics and closed-loop supply chain
Hosseini et al. ¹³⁹⁾ , 2015	Reverse logistics in the construction industry
Schenkel et al. ¹⁴⁰⁾ , 2015	Creating integral value for stakeholders in closed loop supply chains

既往研究の中で最も詳細なものとして Ilgin and Gupta²⁵⁾ は RL を包含する形で Environmentally conscious manufacturing and product recovery に係る包括的なレビューを実施しており、540 にも及ぶ文献を大きくは構成要素別に 4 分野、詳細には 35 の分野

に分類し、各分類で既往研究の概要と将来の研究の方向性について提案している。Agrawal et al.²⁾ は RL の採用と実行、製品返品予測、アウトソーシング、流通市場面からの RL ネットワーク、処分決定に分類している。Govindan et al.³⁾ も詳細に、設計・計画、調査、価格・調整、差異の検討、生産計画と在庫マネジメント、計画、概念及び分析の枠組み、レビュー及び部分的レビュー、差異分析、意思決定及び効果評価、3PRLP の選択、車両経路問題に分類している。その他にも RL を含む広い範囲の文献レビューとしては、Srivastava¹⁴¹⁾ が GSCM, Linton et al.¹⁴²⁾ や Eskandarpour et al.¹⁴³⁾ が SSCM, Ahi and Searcy²²⁾ が GSCM 及び SSCM を扱うなど一定量の文献が存在し、また Melo et al.²⁹⁾ がサプライチェーンにおける施設配置モデルの文献レビューの中で RL についても触れている。先行研究を俯瞰すると、比較的早い段階での先行研究は RL の特徴やフレームワーク等への言及が目立ち、RL 研究の発展過程であることが窺える。一方で、研究の蓄積が進んでからの文献レビューに関する先行研究は、蓄積データを踏まえた分析や範囲を限定して詳細に論じるものが目立つ。例えば、Subramoniam et al.¹²³⁾、Olugu et al.¹²⁶⁾、Gan and He¹³⁶⁾ は自動車を、Chan et al.¹²⁵⁾ はジャストインタイムを、Govindan et al.¹³²⁾ は契約を、Hosseini et al.¹³⁹⁾ は建設産業を対象にしている。また、国を特化したものとして、Bouzon et al.¹³¹⁾ がブラジルにおける RL 研究のレビューを行っている。

このように特に 2010 年以降ではレビュー文献が多く登場していることから、RL 研究については研究蓄積が進み、研究分野も広がってきていることが分かる。こういったレビュー文献の中では、レビューした文献量、研究分野の分類方法、分析内容から見て Ilgin and Gupta²⁵⁾ と Govindan et al.³⁾ が非常に重要な文献であると考えられる。

以上のような先行研究では RL 研究の定性的な変遷傾向は把握しているが、一方で核となる文献や文献間の関係、研究テーマの変遷が定量的に示されていない。計量書誌学に社会ネットワーク分析を用いた先行研究については、Yu et al.¹⁴⁴⁾ による Industrial symbiosis (産業共生) に関するものや渡辺¹⁴⁵⁾ による建築学研究に関するもの、最近では Fahimnia et al.²¹⁾ による GSCM に関するものなどがあるが、RL や静脈物流に関するものは筆者の知る限り存在しない。また、先述したとおり社会的、経済的、環境的な要請から RL に対する研究が行われていることから、その国々の社会システムや環境に対するスタンスとの関係も含めて RL システムが設計される必要がある。しかし、我が国社会システム、あるいは類似した社会システムを前提として RL を論じた先行研究は著者の知る限り存在せず、我が国の社会システムとの関係性を踏まえた今後の研究分野抽出が必要となる。

2.3.2 データベースの作成

本節では RL 研究の核となる文献を特定し、主要な研究テーマの変遷を分析することを目指すとしているため、文献を収集した上で、引用関係とテーマを含む形でデータベースを作成する必要がある。

先述したとおり RL 研究の本格化は 1995 年以降であることから、本研究での収集対象期間

についても1995年以降とする。収集対象はRubio et al.³⁹⁾等を参考にジャーナルのみとし、プロシーディングや博士論文は対象外とした。文献の収集方法としては、まずは電子ジャーナルを掲載したデータベースである Elsevier (www.sciencedirect.com), Emerald(www.emeraldinsight.com), Springer (www.springerlink.com)といった検索エンジンでRLをキーワードとして平成28年1月1日時点で入手可能な文献を検索し、入手した文献の参考文献のうちRLに関連する文献を収集し、新たな文献が登場しなくなるまで作業を繰り返した。RLの概念を踏まえ、先行研究を参考に文献のタイトル、キーワード、概要に closed-loop supply chain, recycling, remanufacturing, product returns, product recovery, end-of-life productsが含まれる文献は幅広く収集しRLに関連するものを抽出した。ただし、Prahinski and Kocabasoglu¹⁴⁾等を参考に、GSCM, SSCMに関する研究に位置付けられる文献のうち環境配慮のみをテーマとし実質的に物流への言及のないものは除外し、明示的に物流を含むRLを扱っているものについては含めることとする。また、本研究の目的を踏まえ、分解や処理といったRLの機能に含まれる機能を対象としていても物流について言及していない文献については除外する。レビュー論文については先に網羅的に整理しているため、収集対象から除外する。

表2-3 文献の分類方法

番号	分類	概要
1	RL/CLCSM	
1	ネットワークデザイン	施設配置割当問題など
2	輸送最適化	敗者計画問題や輸送方法の最適化など
3	RLサービス供給者の選択・評価	RLを3PRLなどの主体に実行させるかの選択問題など
4	効果の測定	RLを実行・採用することによる効果の計測など
5	市場関連問題	リカバリー後の製品の価格付けなど
6	使用済み製品等の処理方法の選択	リカバリーのオプションの選択問題など
7	使用済み製品等の獲得マネジメント	使用済み製品を回収する方法など
8	その他	1～7以外のテーマ
2	製品リカバリー	
1	生産計画	リカバリーする量や時期の最適化問題など
2	在庫マネジメント	不確実性や複雑性を考慮した在庫の最適化問題など
3	不確実性の影響	量、質、タイミングの不確実性による影響など
3	解説	概念やフレームワークの提示など解説的なもの

文献の分類方法については、研究テーマの動向を把握することを念頭に、RLの機能別の分類を基本とする。RLに含まれる機能としては、Barker and Zabinsky¹⁴⁶⁾が基本的な3つの機能として挙げているように、収集、選別・検査、処理が大分類とされることが多い。より詳細にはBai and Sarkis¹⁴⁷⁾がRLに含まれる機能と活動について既往文献を踏まえて整理しており、基本的な機能として収集、選別、分解、圧縮、外向きのロジスティクスを挙げている。これらの機能に加え、Pokharel and Mutha¹⁰⁾らが指摘するようにRLシステ

ムに係るインプット（投入される使用済み製品等）とアウトプット（リカバリー後製品の販売等）も重要な要素となる．本研究では，以上に加えて，先行研究のうち最も詳細にレビューしているIlgin and Gupta²³⁾やGovindan et al.³⁾，最も基本的な先行研究であるFleischmann et al.¹³⁾等を参考にして表2-3のとおりとした．

以上により，表2-1，表2-2の文献を含む計813編の文献からなるデータベースを作成した．なお，検索エンジンで検索した際に入手できていない文献があることも十分に想定され，またRLに関係した文献であるか否かの筆者の判断における主観性が完全に否定できないことから，このデータベースの網羅性については留意が必要である．

2.3.3 定性的な研究動向

ここでは，定性的な研究動向について把握する．表2-3における各分類の研究動向は以下のとおりである．

ネットワークデザインについては，最も多くの研究が行われているテーマである．例えばDiabat et al.¹⁴⁸⁾が比較的最近のRLネットワークデザインに関連する文献で用いられているモデルと解法を整理しているとおり，大部分が混合整数計画モデルであり，解法では遺伝的アルゴリズムを用いている研究が多い．決定論的モデルと確率論的モデルに大別されるが，前者では早い段階ではBarros et al.¹⁴⁹⁾などが代表的であり，最近でもDiabat et al.¹⁴⁸⁾やSantibanez-Gonzalez¹⁵⁰⁾などより複雑なモデルや解法の提案も含め，依然として多くの研究が行われている分野となっている．後者は早い段階ではRealff et al.¹⁵¹⁾があるが時期的には2000年代後半から本格化しており，最近でも多目的のFL/RL統合モデルを提案するRamezani et al.¹⁵²⁾などテーマの細分化が進んでいる．

輸送最適化については，車両経路問題を扱ったものが多く，例えば低頻度の回収を扱ったKrikke et al.¹⁵³⁾や解法アルゴリズムにタブー検索法の適用したKim et al.¹⁵⁴⁾など，時期が進むにつれテーマや解法面で広がりを見せている．また，Alshamrani et al.¹⁵⁵⁾など配送と回収を統合した問題についても比較的初期の段階から散見される．輸送資材の最適化についての研究もなされており，リターンブル輸送資材を扱ったHellström and Johansson¹⁵⁶⁾や梱包を扱ったSilva et al.¹⁵⁷⁾などがある．

RLサービス供給者の選択・評価については，AHP（analytic hierarchy process；階層分析法）（Efendigil et al.¹⁵⁸⁾など）やANP（analytic network process）（Rave et al.¹⁵⁹⁾など）により，生産者，小売店，3PL（third party logistics；荷主企業に代わって，最も効率的な物流戦略の企画立案や物流システムの構築の提案を行い，かつ，それを包括的に受託し，実行すること）のうちから，あるいは複数の3PLから最適のRLサービス供給者を選択する研究が比較的多く行われている．目標点法の発展版であるTOPSIS（technique for order preference by similarity to ideal solution）法を適用したKannan et al.¹⁶⁰⁾などもあり，Azadi and Saen¹⁶¹⁾は包絡分析法（DEA；data envelopment analysis）のひとつであるスラック基準効率値の最小化を目的としたSBM（slacks-based measure）モデルにより

3PLの評価を行っている。

効果の計測については、環境的あるいは経済的效果等を計測し、またはどの要因が成果に対して効果的かなどについて議論されており、近年特に多く扱われているテーマとなっている。例えばKara et al.¹⁶²⁾ は離散事象シミュレーションを用いてRLの重要な要因について分析し、Georgiadis and Vlachos¹⁶³⁾ は動的シミュレーションにより規制や環境イメージの影響を分析している。最近ではFahimnia et al.¹⁶⁴⁾ はCLCSに対する炭素税の影響を分析し、Lai et al.¹⁶⁵⁾ はRLの実行がトリプルボトムライン（企業を経済的、社会的、環境的側面から評価しようとする考え方）に影響するかを分析するなど、研究対象は多様な広がりを見せている。

市場関連問題については、リカバリー後製品のプライシングや市場における競争を扱っており、RLのビジネスの色合いが濃くなることに伴い、特に近年多く扱われるテーマとなっている。早い段階でMajumder and Groenevelt¹⁶⁶⁾ がリカバリー後製品の競争について、Guide et al.¹⁶⁷⁾ がプライシングについて分析しているが、最近ではChen and Chang¹⁶⁸⁾ が動的なプライシングを、Ma et al.¹⁶⁹⁾ は政府の消費助成がある場合のCLCSをテーマにするなど、深度・テーマの両面で研究が進展している。

使用済み製品の処理方法の選択については、リユース、リサイクル、処分などのオプションからのいずれを選択するかの問題等であり、早い段階ではKrikke et al.¹⁷⁰⁾ が確率的動的計画法、Tan and Kumer¹⁷¹⁾ は線形計画法を用いて利益を最大化するオプションを選択するモデルを構築するなど、数学的なモデルが多用されている。さらにBufardi et al.¹⁷²⁾ など多基準意志決定モデルも提案されている。近年ではZuidwijk and Krikke¹⁷³⁾ のように製品設計も含めて処分方法のオプションを議論する研究や、Rahman and Subramanian¹⁷⁴⁾ のように構造モデルのひとつであるデマテル法を用いてオプションを選択する要因を特定する研究などへも広がりを見せている。

使用済み製品の獲得マネジメントについては、量、質、タイミングに関して高い不確実性があるという特性により必要とされてきたが、近年ではビジネス的要素も色濃くなっている。Guide and Wassenhove¹⁷⁵⁾ など述べているとおり回収方法には主に廃棄物回収システムの中で行われるものと市場由来のものがあるが、RLの進展に伴い、特に後者の研究が支配的になってきている。例えばKaya¹⁷⁶⁾ は確率的な需要下での使用済み製品獲得のためのインセンティブについて考慮し、Minner and Kiesmüller¹⁷⁷⁾ は使用済み製品の買戻戦略モデルを提案し、Pokharel and Liang¹⁷⁸⁾ は使用済み製品の獲得価格を評価するモデルを提案している。

生産計画は、いつどれだけ分解・再生産し、一方で新しい材料をどれだけ生産あるいは発注するかを決定するものだが、例えば早い段階ではFerrer and Whybark¹⁷⁹⁾ がMRP（資材所要量計画）モデルにより部品の発注や分解の量や方法を決定した。Kim et al.¹⁸⁰⁾ はMIPモデルで再生産のコスト節約を最大化する再生産施設での処理量と外部供給者への発注する部品量を決定している。最近でもKenné et al.¹⁸¹⁾ が不確実下のCLCS内の生産・再生産

ハイブリッドシステムで確率的動的計画法に基づいた最適管理理論で保管，貯蔵コストを最小化する生産計画政策を提案している．再生産システムの不確実性と複雑性から再生産スケジュールについても，早い段階でのGuide¹⁸²⁾ や比較的最近でもTeunter et al.¹⁸³⁾ などテーマとしており，容量についてもGuide and Spencer¹⁸⁴⁾ やGeorgiadis and Athanasiou¹⁸⁵⁾ などの早い段階から現在至るまで一定の研究蓄積がある．またde Brito and van der Laan¹⁸⁶⁾のように使用済み製品量，すなわちシステムへのインプット量の予測を行う研究もある．

在庫マネジメントについては非常に多くの研究が行われており，特に決定論的在庫モデル（早い段階ではRichter¹⁸⁷⁾，最近でもJonrinaldi and Zhang¹⁸⁸⁾ など）と確率論的在庫モデル（早い段階でvan der Laan et al.¹⁸⁹⁾ や最近でもMitra¹⁹⁰⁾ など）の提案は多くなされている．その他にも，van der Laan¹⁹¹⁾ などは費用分析を行ったものや，Inderfurth and van der Laan¹⁹²⁾ などリードタイムの影響の評価も行ったものがあるなど，非常に幅広いテーマで研究が行われている．

不確実性の影響についてはRLの最大の特徴であることからネットワークデザインや在庫モデルでも確率論的モデルの構築により考慮されることもあるが，不確実性そのものをテーマとして扱う研究も多い．早い段階ではGuide and Srivastava¹⁹³⁾ がMRPシステムにおける在庫のバッファについて検討している．さらに例えばZikopoulos and Tagaras¹⁹⁴⁾ は使用済み製品の質の，Atasu and Çetinkaya¹⁹⁵⁾ はタイミングの不確実性を対象としており，Ketzenberg et al.¹⁹⁶⁾ のようにシステムにおける情報の価値について言及するものもある．

こうした定性的な研究動向に加え，レビューや解説文献では研究テーマの変遷や将来の研究の方向性が整理されることが多い．ここでは Ilgin and Gupta²⁶⁾，Sasikumar and Kannan¹²⁴⁾，Souza¹³³⁾，Agrawal et al.²⁾，Govindan et al.³⁾ 等の特に近年の網羅性の高い文献を参考に，レビューした文献の定性的な傾向を整理すると以下のとおりとなる．

- ・ RL 研究は，1990 年代では初期の段階であったが，レビュー文献が 2010 年代に多く発表されていることから，現在では確立された分野になっている．当初は企業ニーズを踏まえたマネジメントや実務の研究が多く，徐々に包括的・戦略的な研究も進んできているが十分ではない．
- ・ RL が進化してきたことに伴い，リカバリー後の製品の価格付けや消費者の行動など市場関連の研究や，経営的な観点からコスト構造に関する研究など専門的なビジネス的視点に立った研究が必要となってきた．例えば RL へのジャストインタイムの適用など RL でも Forward Logistics と同様なサービスが求められ始めている．
- ・ 拡大生産者責任（EPR ; extended producer responsibility）に基づく製品の回収義務を伴った制度創設など社会的な状況の変化により RSCM よりも CLCSM の研究が増えている．これに伴いより戦略的で包括的なシステムに関する研究，またこれまで支配的であった remanufacturing から recycling の研究が求められている．
- ・ RL の最大の特徴である量，質，タイミングの不確実性についてはこれまでも多く研究さ

れているが、依然として大きな課題として残っている。

- ・RLは社会的、経済的、環境的な要因で実行されているが、多目的最適化モデルでもせいぜい2つの目的に留まるなどRLの評価に関しては十分な研究蓄積がない。複数の評価軸を伴った普遍的な評価基準によるRLの評価に関する研究が必要となっている。
- ・初期の段階から情報技術については言及されることがあったが、近年の著しい技術の発達に伴い情報技術のRLへの関与については更なる研究が必要となっている。情報技術については、RLの特徴である不確実性等への対応にも繋がる。

2.4 社会ネットワーク分析による重要文献の抽出

前節では文献レビューにより定性的なRLの研究動向について述べたが、本節では社会ネットワーク分析を用いて重要論文の抽出や研究テーマの分類について定量的に把握する。

2.4.1 中心性指標の適用

計量書誌学における引用分析では直接引用、共引用、書誌結合の3つの手法が用いられるが、中でも直接引用が最も有効であると言われており^{197),198)}、本研究でも直接引用を基本とする。すなわち、文献間の直接引用の関係構造をネットワークとして捉え、文献をノード、文献間の直接引用関係をリンクとする。文献*i*が文献*j*を引用している場合、ノード*i*からノード*j*の向きにリンクが張られ、ネットワークは有向グラフで表される。

重要文献の抽出で最も分かりやすい指標は被引用数である。しかし直接的な引用関係からのみでは、文献の重要度を加味した引用関係（重要な文献から引用されている論文は重要であるとの視点に立ったもの）や文献間、研究テーマ間で特徴的な役割を果たしている論文は抽出できない。そこで本研究では社会ネットワーク分析の指標である媒介中心性、PageRank¹⁹⁹⁾を用いる。

媒介中心性とはノード間の連結関係上の重要性に注目した中心性指標であり、あるノードが他のノード間の最短経路上に位置する程度を示す²⁰⁰⁾。PageRankとは固有ベクトル中心性の分析には不向きである有向グラフにも適用可能な中心性指標である。固有ベクトル中心性とはノードと隣接したノードの中心性を反映した中心性の指標であり、そのノードに到達可能な全てのノードの中心性を間接的に反映でき、隣接行列（ノード*i*からノード*j*の向きにリンクが張られた場合に*i,j*成分が1、張られない場合に0となる行列）の固有ベクトルを用いて計算される。ただし、有向グラフが強連結（どのノード同士でも必ず相互に到達可能であること）でない場合、固有値が1つに定まらないという問題があるため、便宜的に強連結にすることでこの問題を解決した指標がPagerankである¹⁹⁹⁾。

本研究で作成したデータベースからレビュー論文を除いた775行775列の隣接行列を作成し、媒介中心性とPagerankを計算した。媒介中心性は(2-1)式で表現され、PageRankは以下の(2-2)式の*M*'の第一固有ベクトルとして計算される。

$$C_b(i) = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}} \quad (2-1)$$

ただし、 $C_b(i)$ ：ノード*i*の媒介中心性

g_{jk} ：ノード*j*と*k*の間の最短経路数

$g_{jk}(i)$ ：ノード*j*と*k*の間の最短経路数のうちノード*i*を通るものの数

$$M' = cM + (1 - c)[1/n]_{n \times n} \quad (2-2)$$

ただし、 M ：隣接行列から作られる遷移確率行列

c ：グラフを強連結にするためのパラメータ

被引用数も含め各指標で上位20番目までの文献を表2-4～表2-6に示す。

被引用数では、比較的早く研究テーマ横断的に参考となる文献が高く評価されており、Thierry et al.²⁰¹⁾ が突出して多い。

媒介中心性では解説文献が高く評価されている。解説文献や時期の古い媒介中心性の高い文献は、いかなる研究テーマでも前提とされるべき定義やフレームワーク的な要素を含んでおり、互いに引用関係のない異なる研究テーマの重要文献に引用されているためだと考えられる。また、比較的新しい媒介中心性の高い文献もあり、これらは重要文献を網羅的にレビューできていることを示している。

表2-4 被引用数（入次数）の上位文献

順位	文献	値	分類
1	Thierry et al. ²⁰¹⁾ , 1995	194	処分
2	Fleischmann et al. ²⁰²⁾ , 2001	107	ネット
3	Jayaraman et al. ²⁰³⁾ , 1999	89	ネット
4	Barros et al. ¹⁴⁹⁾ , 1998	80	ネット
5	Savaskan et al. ²⁰⁴⁾ , 2004	76	ネット
6	Rogers and Tibben-Lembke. ²⁰⁵⁾ , 2001	75	解説
7	van der Laan et al. ²⁰⁶⁾ , 1999	67	在庫
7	Toktay et al. ²⁰⁷⁾ , 2000	67	生産
9	Guide and van Wassenhove ¹⁷⁵⁾ , 2001	63	獲得
10	Jayaraman et al. ²⁰⁸⁾ , 2003	60	ネット
11	Kroon and Vrijens ²⁰⁹⁾ , 1995	58	ネット
11	Guide et al. ²¹⁰⁾ , 2000	58	解説
13	Inderfurth ²¹¹⁾ , 1997	55	在庫
13	Salema et al. ²¹²⁾ , 2007	55	ネット
15	van der Laan and Salomon ²¹³⁾ , 1997	53	在庫
15	Guide et al. ²¹⁴⁾ , 2003a	53	市場
17	Krikke et al. ²¹⁵⁾ , 1999	51	ネット
17	Guide and van Wassenhove ²¹⁶⁾ , 2009	51	解説
18	Shih ²¹⁷⁾ , 2001	46	ネット
19	Listes and Dekke ²¹⁸⁾ , 2005	46	ネット

処分方法: 処分方法の選択, ネットワーク: ネットワークデザイン, 在庫: 在庫マネジメント, 生産: 生産計画, 獲得: 使用済み製品等の獲得マネジメント, 市場: 市場関連問題

表2-5 媒介中心性の上位文献

順位	文献	値	分類
1	Guide et al. ²¹⁰⁾ , 2000	4,278	解説
2	Guide and van Wassenhove ²¹⁶⁾ , 2009	3,959	解説
3	Srivastava ²¹⁹⁾ , 2008	2,429	ネット
4	Srivastava and Srivastava ²²⁰⁾ , 2006	1,633	ネット
5	Kannan et al. ²²¹⁾ , 2006	1,561	解説
6	Shi et al. ²²²⁾ , 2011	1,320	生産
7	Galbreth and Blackburn ²²³⁾ , 2006	1,244	不確実
8	Mutha and Pokharel ²²⁴⁾ , 2009	1,244	ネット
9	Hasani et al. ²²⁵⁾ , 2012	1,142	解説
10	Fleischmann et al. ²⁰²⁾ , 2001	1,099	ネット
11	Lee and Dong ²²⁶⁾ , 2001	1,042	ネット
12	Pishvaei et al. ²²⁷⁾ , 2010	1,018	ネット
13	Jayaraman et al. ²⁰⁸⁾ , 2003	909	ネット
14	Das and Chowdhury ²²⁸⁾ , 2012	901	ネット
15	Guide and van Wassenhove ¹⁷⁵⁾ , 2001	891	獲得
16	Amin and Zhang ²²⁹⁾ , 2013	881	ネット
17	Dowlatabadi ²³⁰⁾ , 2005	851	解説
18	Pishvaei et al. ²³¹⁾ , 2011	812	ネット
19	Meade et al. ²³²⁾ , 2007	783	解説
20	Ravi et al. ¹⁵⁹⁾ , 2005	759	選択

ネットワーク: ネットワークデザイン, 生産: 生産計画, 不確実: 不確実性の影響, 獲得: 使用済み製品等の獲得マネジメント,

表2-6 PageRankの上位文献

順位	文献	値	分類
1	Thierry et al. ²⁰¹⁾ , 1995	0.0966	処分
2	Barros et al. ¹⁴⁹⁾ , 1998	0.0158	ネット
3	Richter ¹⁸⁷⁾ , 1996a	0.0151	在庫
4	Inderfurth ²¹¹⁾ , 1997	0.0145	在庫
5	Kroon and Vrijens ²⁰⁹⁾ , 1995	0.0133	ネット
6	van der Laan and Salomon ²¹³⁾ , 1997	0.0119	在庫
7	Guide et al. ²¹⁰⁾ , 2000	0.0119	解説
8	Johnson and Wang ²³³⁾ , 1995	0.0108	処分
9	Jahre ²³⁴⁾ , 1995	0.0097	解説
10	Jayaraman et al. ²⁰³⁾ , 1999	0.0096	ネット
11	Fleischmann et al. ²⁰²⁾ , 2001	0.0094	ネット
12	Klausner and Hendrickson ²³⁵⁾ , 2000	0.0093	在庫
13	Richter ²³⁶⁾ , 1996b	0.0092	獲得
14	Ayres et al. ²³⁷⁾ , 1997	0.0087	生産
15	van der Laan et al. ²³⁸⁾ , 1996b	0.0085	在庫
16	van der Laan et al. ²⁰⁶⁾ , 1999	0.0084	在庫
17	Krikke et al. ²¹⁵⁾ , 1999	0.0075	ネット
18	Rogers and Tibben-Lembke ²⁰⁵⁾ , 2001	0.0072	解説
19	Ferrer ²³⁹⁾ , 1997	0.0071	生産
20	Guide and van Wassenhove ¹⁷⁵⁾ , 2001	0.0070	獲得

処分方法: 処分方法の選択, ネットワーク: ネットワークデザイン, 在庫: 在庫マネジメント, 獲得: 使用済み製品等の獲得マネジメント, 生産: 生産計画

なお、媒介中心性については有向グラフの場合、出次数が0のノード、すなわちいかなる文献も引用していない（ここでは1994年以前の文献を引用している場合は同様の扱いとしている）初期の文献が評価されないことには留意が必要である。

PageRankは重要文献に引用されることでその中心性がより評価されることになる指標であるが、高く評価されている文献は結果として被引用数が大きい文献と一致する傾向にある。

以上のように中心性指標からはテーマ横断的な文献が高く評価され、特定のテーマ内における重要文献を評価するためには研究テーマの分類を踏まえる必要がある。

2.4.2 研究テーマの分類

2.4.1で述べたように、中心性指標はテーマ横断的な文献を高く評価する傾向にあり、特定研究テーマ内の重要文献の抽出には研究テーマの分類を踏まえる必要がある。ネットワーク内部では相対的に密度の高いサブグループが形成されることが多く、文献の引用関係ネットワークでは研究テーマ毎にサブグループが形成されることが想定される。そこでクラスタリングにより凝集性の高いコミュニティに分割することで、機械的に研究テーマを分類することを試みる。

表2-7 クラスタリング結果

番号	分類	A	B	C	D	E	F	G	※	合計
1	RL/CLCSM									
1	ネットワークデザイン	146	17	2	15	9	2		4	195
2	輸送最適化	18	6	3	2		9		6	44
3	RLサービス供給者の選択・評価	1	20		4	1				26
4	効果の測定	20	88	3	16	7	1		3	138
5	市場関連問題		7	5	30	1		2		45
6	使用済み製品等の処理方法の選択		5	2	3	8			1	19
7	使用済み製品等の獲得マネジメント		5	6	15	2		1		29
8	その他	3	25		6		1		2	37
2	製品リカバリー									
1	生産計画	3	3	27	12	15	1		2	63
2	在庫マネジメント	3	4	105	2	1				115
3	不確実性の影響	4	1	4	21	3				33
3	解説	1	14	3	6	1	5		1	31
合計		199	195	160	132	48	19	3	19	775

※いかなるコミュニティにも属さない文献も存在する

アルゴリズム的には媒介中心性の高いリンクの除去を繰返してグラフを分割し、分割の程度はモジュラリティ指標を評価値として用いた。解析及び可視化のためのソフトとしてGephiを、可視化アルゴリズムにはForce Atlas2²⁴⁰⁾を用いた。結果としてA～Gの6つのコミュニティに分割された。コミュニティ別に色分けし可視化したものを図2-3に、手作業で行った第3章における分類と機械的に行ったクラスタリングの結果を表2-7に示す。なお、図2-3における番号はデータベースの文献を年代順、アルファベット順に付したものであり、

若い番号ほど年代が古いことを表している。ただし、我が国に関連する静脈物流文献については海外文献の後になる726以降の番号を与えている。

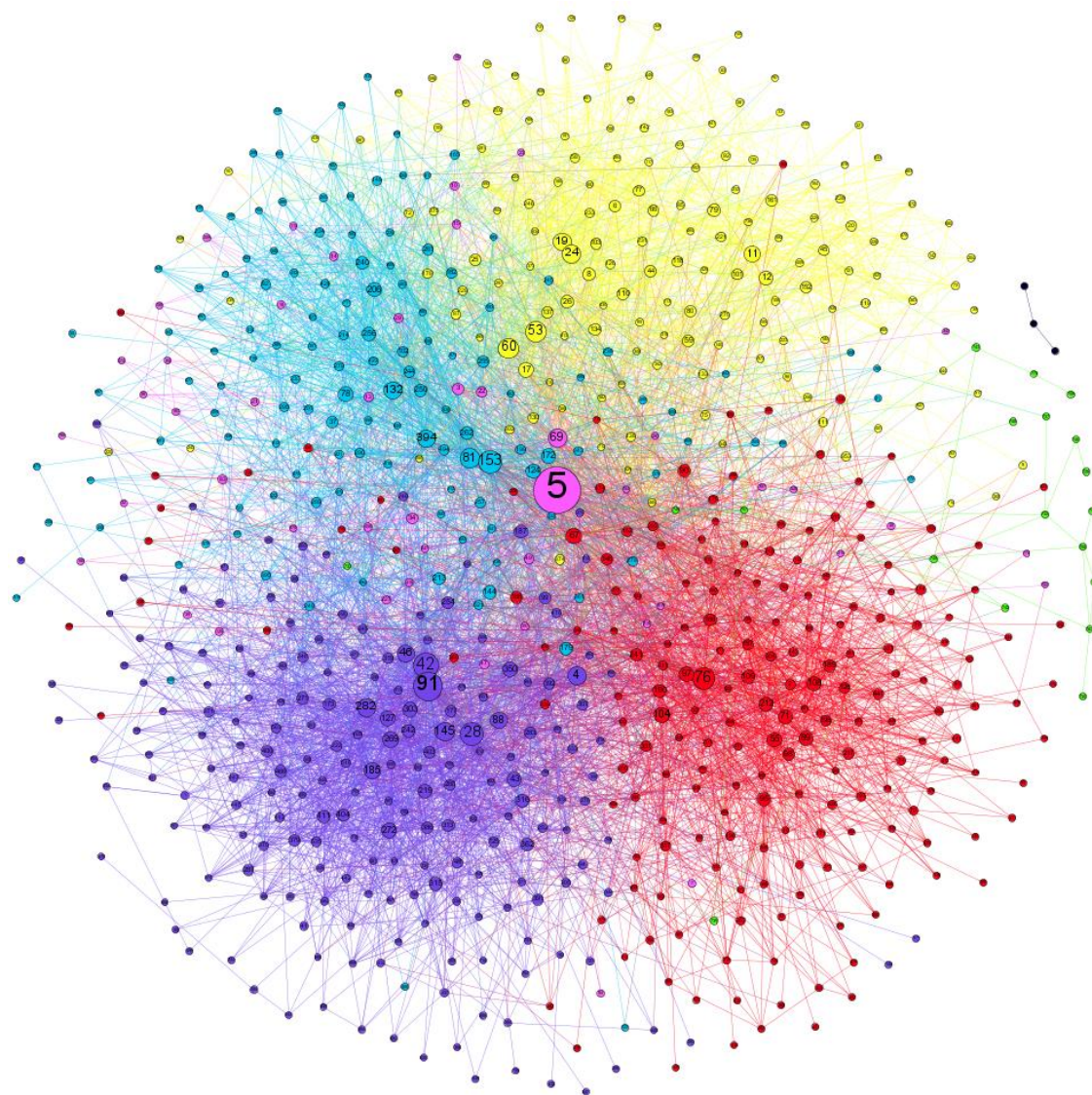


図2-3 可視化したネットワーク構造

まず、A～Gの6つに分割されたコミュニティのうち、構成するノードの数の多いのはAからEである。Aはネットワークデザイン、Cは在庫マネジメントが大宗を占めており、Bは効果の計測が半数程度を占めるなど、手作業による分類と機械的な分類は一定程度対応している。DとEについては、手作業で分類したテーマは比較的分散している。F、Gについては、数少ない文献が他のコミュニティと希薄な関係の下で独自のコミュニティを形成しており、このうちGは日本文献のみで形成されている。

特に研究テーマがAやCと比較して相対的に分散しているB、D、Eの研究テーマについて

考察すると、Bは実務や経営に関連する研究が多く、Dは再生産（remanufacturing）がキーワードとなり、Eは制度などRLの概念など社会的・総論的なテーマを扱ったものが多い。

以上を踏まえると、クラスタリングにより大きくはネットワークデザイン、実務・経営、在庫マネジメント、再生産、社会的テーマの研究に分類されることになる。なお、我が国の研究だけでひとつのコミュニティが形成されていることは、我が国の先行研究の多くが、十分に海外の先行研究を引用できていないことを意味する。世界の研究の流れからある意味独立に行われているということになる。

2.4.3 重要文献の抽出

2.4.2までの結果を踏まえ、社会ネットワーク分析を適用して重要文献を抽出すると以下のとおりとなる。被引用数が圧倒的に多く（次数中心性が高く）PageRankも大きいThierry et al.²⁰¹はRL研究ではバイブル的な位置づけにある。Thierry et al.²⁰¹は使用済み製品の処理目的として直接リユース、製品リカバリーマネジメント、廃棄物マネジメントを挙げ、さらに製品リカバリーマネジメントをrepair, refurbish, remanufacture, cannibalization, recyclingに細分化している。Thierry et al.²⁰¹は使用済み製品の処理目的として直接リユース、製品リカバリーマネジメント、廃棄物マネジメントを挙げ、さらに製品リカバリーマネジメントをrepair, refurbish, remanufacture, cannibalization, recyclingに細分化している。処理目的はRLシステムに大きく影響するため非常に重要なものであるが、この文献で示されたreuse, repair, refurbish, remanufacture, cannibalization, recyclingの分類は現時点でも通用する最も詳細なものである。

レビュー文献は最終的には本研究ではデータベースに含めていないが、本格的な分析を行う前に、平成26年10月1日時点までに収集可能な文献（収集作業上手間の係の一部文献も未収集）によるデータベースでレビュー文献も含めて試行的に分析を行っている。この試行的な分析では、唯一Thierry et al.²⁰¹より多く引用されている文献としてFleischmann et al.¹³が存在する。Fleischmann et al.¹³は流通計画、在庫管理、生産計画の分類でレビューを行いつつ、それぞれの分類についてフレームワークを提示している。RLが疎から密への流れであること、Forward logisticsと対称ではないことに加えて、不確実性の特徴及びその解決策として情報技術の有用性について言及しており、RLの基本的な文献として現時点でも依然として引用が多い。また、試行的分析では、媒介中心性についてはRubio et al.¹², Pokharel and Mutha¹⁰を始めとしたレビュー文献が高い順位となっている。こういった文献は重要文献を高い網羅性で引用していると考えられ、RL研究の俯瞰に適していると思われるものの、レビュー文献を介した文献間の繋がりが文献間の真の繋がりを正当に評価できない可能性を確認できたため本格的な分析ではレビュー文献を除外することとしている。

先述したとおり、中心性指標からはテーマ横断的な文献が高く評価され、特定のテーマ内における重要文献を評価するためには研究テーマの分類を踏まえる必要がある。そこで、研究テーマ別の重要文献として、クラスタリング後のコミュニティ毎の中心性指標上位文

献を表2-8に示す。

表2-8 研究テーマ毎の重要文献

	媒介中心性				PageRank			
	順位	文献	値	※	順位	文献	値	※
A ネットワーク デザイン	1	Srivastava ²¹⁹⁾ , 2008	2,429	26	1	Barros et al. ¹⁴⁹⁾ , 1998	0.0158	4
	2	Kannan et al. ²²¹⁾ , 2010	1,561	73	2	Kroon and Vrijens ²⁰⁹⁾ , 1995	0.0133	11
	3	Mutha and Pokharel ²²⁴⁾ , 2009	1,244	103	3	Jayaraman et al. ²⁰³⁾ , 1999	0.0096	3
	4	Hasani et al. ²²⁵⁾ , 2012	1,142	262	4	Fleischmann et al. ²⁰²⁾ , 2001	0.0094	2
	5	Fleischmann et al. ²⁰²⁾ , 2001	1,099	2	5	Krikke et al. ²¹⁵⁾ , 1999	0.0075	17
	6	Lee and Dong ²²⁶⁾ , 2001	1,042	47	6	Realff et al. ²⁴¹⁾ , 1999	0.0070	103
	7	Pishvaei et al. ²²⁷⁾ , 2010	1,018	56	7	Louwers et al. ²⁴²⁾ , 1999	0.0053	33
	8	Jayaraman et al. ²⁰⁸⁾ , 2003	909	3	8	Shih ²¹⁷⁾ , 2001	0.0044	19
	9	Amin and Zhang ²²⁹⁾ , 2013	881	138	9	Jayaraman et al. ²⁰⁶⁾ , 2003	0.0040	10
	10	Pishvaei et al. ²³¹⁾ , 2011	812	73	10	Wang et al. ²⁴³⁾ , 1995	0.0037	262
B 実務・経営	1	Srivastava and Srivastava ²¹⁹⁾ , 2006	1,633	63	1	Jahre ²³⁴⁾ , 1995	0.0097	123
	2	Dowlatsahi ²³⁰⁾ , 2005	851	73	2	Klausner and Hendrickson ²³⁵⁾ , 2000	0.0093	23
	3	Meade et al. ²³²⁾ , 2007	783	191	3	Rogers and Tibben-Lembke ²⁰⁵⁾ , 2001	0.0072	6
	4	Ravi et al. ¹⁵⁹⁾ , 2005	759	43	4	Blumberg ²⁵⁰⁾ , 1999	0.0068	28
	5	Huscroft et al. ²⁴⁴⁾ , 2013	744	421	5	Tibben-Lembke and Rogers ²⁴⁵⁾ , 2002	0.0048	22
	6	Tibben-Lembke and Rogers ²⁴⁵⁾ , 2002	738	22	6	Daugherty et al. ²⁵¹⁾ , 2001	0.0036	33
	7	Hazen et al. ²⁴⁶⁾ , 2015	716	333	7	Zhang et al. ²⁵²⁾ , 2012	0.0033	421
	8	González-Torre et al. ²⁴⁷⁾ , 2004	612	111	8	Daugherty et al. ²⁵³⁾ , 2002	0.0033	33
	9	Gobbi ²⁴⁸⁾ , 2011	563	370	9	Autry et al. ²⁵⁴⁾ , 2000	0.0033	37
	10	Hall et al. ²⁴⁹⁾ , 2013	546	421	10	Krumwiede and Sheu ²⁵⁵⁾ , 2002	0.0031	26
C 在庫 マネジメント	1	de Brito and Dekker ²⁵⁶⁾ , 2003	710	146	1	Richter ¹⁸⁷⁾ , 1996a	0.0151	21
	2	Rubio and Corominas ²⁵⁷⁾ , 2008	686	238	2	Inderfurth ²¹¹⁾ , 1997	0.0145	13
	3	van der Laan et al. ²⁰⁶⁾ , 1999	661	7	3	van der Laan and Salomon ²¹³⁾ , 1997	0.0119	15
	4	Mahadevan et al. ²⁵⁸⁾ , 2003	658	73	4	Richter ²³⁶⁾ , 1996b	0.0092	32
	5	Kannan et al. ²⁵⁹⁾ , 2009	610	128	5	Ayres et al. ²³⁷⁾ , 1997	0.0087	28
	6	Lambert et al. ²⁶⁰⁾ , 2011	583	279	6	van der Laan et al. ²³⁸⁾ , 1996b	0.0085	51
	7	Mitra ²⁶¹⁾ , 2007	572	191	7	van der Laan et al. ²⁰⁶⁾ , 1999	0.0084	7
	8	Fleischmann et al. ²⁶²⁾ , 2003	563	111	8	Ferrer ²³⁹⁾ , 1997	0.0071	51
	9	Teunter and Vlachos ²⁶³⁾ , 2002	536	63	9	van der Laan et al. ²⁶⁵⁾ , 1996	0.0059	83
	10	Teunter and van der Laan ²⁶⁴⁾ , 2002	531	160	10	Toktay et al. ²⁰⁷⁾ , 2000	0.0056	7
D 再生産	1	Guide and van Wassenhove ²¹⁶⁾ , 2009	3,959	17	1	Guide and van Wassenhove ¹⁷⁵⁾ , 2001	0.0070	9
	2	Shi et al. ²²²⁾ , 2011	1,320	128	2	Savaskan et al. ²⁰⁴⁾ , 2004	0.0056	5
	3	Galbreth and Blackburn ²²³⁾ , 2006	1,244	98	3	Guide et al. ²¹⁴⁾ , 2003a	0.0040	15
	4	Das and Chowdhury ²²⁸⁾ , 2012	901	160	4	Majumder and Groenevelt ¹⁷⁵⁾ , 2001	0.0040	33
	5	Guide and van Wassenhove ¹⁷⁵⁾ , 2001	891	9	5	Georgiadis and Vlachos ²⁶⁹⁾ , 2004	0.0032	56
	6	Savaskan et al. ²⁰⁴⁾ , 2004	717	5	6	Klausner et al. ²⁷⁰⁾ , 1998	0.0030	98
	7	Ferrer and Swaminathan ²⁶⁶⁾ , 2006	707	55	7	Guide et al. ²⁶⁷⁾ , 2003b	0.0028	37
	8	Guide et al. ²⁶⁷⁾ , 2003b	662	37	8	Blackburn et al. ²⁷¹⁾ , 2004	0.0028	28
	9	Guide et al. ²¹⁴⁾ , 2003a	572	15	9	Debe et al. ²⁷²⁾ , 2005	0.0026	37
	10	Ferrer and Ketzenberg ²⁶⁸⁾ , 2004	561	111	10	Nagurney and Toyasaki ²⁷³⁾ , 2005	0.0024	56
E 社会的 テーマ	1	Guide et al. ²¹⁰⁾ , 2000	4,278	11	1	Thierry et al. ²⁰¹⁾ , 1995	0.0966	1
	2	Krikke et al. ²⁷⁴⁾ , 1999	303	146	2	Guide et al. ²¹⁰⁾ , 2000	0.0119	11
	3	Fahimnia et al. ¹⁶⁴⁾ , 2013	296	370	3	Johnson and Wang ²³³⁾ , 1995	0.0108	92
	4	Sasikumar et al. ²⁷⁵⁾ , 2010	225	238	4	Guide et al. ²⁸¹⁾ , 1997	0.0054	138
	5	Guide and Srivastava ¹⁹³⁾ , 1998	207	146	5	Krikke et al. ²⁸²⁾ , 1998	0.0051	98
	6	Barker and Zabinsky ²⁷⁶⁾ , 2008	199	279	6	Guide and Srivastava ²⁸³⁾ , 1997b	0.0046	212
	7	Guide and Srivastava ²⁷⁷⁾ , 1997a	187	212	7	Guide and Srivastava ²⁷⁷⁾ , 1997a	0.0044	212
	8	Jorjani et al. ²⁷⁸⁾ , 2004	176	370	8	Guide et al. ²⁸⁴⁾ , 1997b	0.0040	103
	9	Guide et al. ²⁷⁹⁾ , 1997a	166	238	9	Guide and Srivastava ¹⁹³⁾ , 1998	0.0040	146
	10	Wang and Huang ²⁸⁰⁾ , 2013	165	421	10	Guide ¹⁸²⁾ , 1996	0.0039	191

※被引用数の順位

媒介中心性から見た研究テーマ別の重要文献は比較的新しい時期のものも含まれる。それらは重要文献を引用しているため各研究テーマの発展経緯を適切に捉えていると考えられ、当該研究テーマの現時点の動向を知る上で重要になると考えられる。比較的時期の古い物については、現時点でも通用する定義や解説的な内容を含んでいるものが多い。PageRankについては比較的古い時期のものが多く、当該研究テーマの初期の文献や定義や解説的な内容であるため、研究テーマの歴史的背景等の把握に適していると考えられる。

表2-7に示すように、中心性指標が高い文献でも被引用数が低いものが存在し、特に媒介中心性に関してその傾向が顕著となることは注目に値する。このことは社会ネットワーク分析により、被引用数を指標としない重要文献、特に新しい文献の特定が可能なことを示している。例えば、Hasani et al.²²⁵⁾は被引用数では262位だが、ネットワークデザインの媒介中心性では4位となっている。これは不確実性もテーマとしているためネットワークデザインに関連して互いに引用し合っていない重要文献を適切に引用することに成功しているためである。同様に、Huscroft et al.²⁴⁴⁾、Rubio and Corominas²⁵⁷⁾なども被引用数では低い順位だが、媒介中心性の高い重要文献を引用しているため結果として高い媒介中心性を持った文献となっている。以上のように、社会ネットワーク分析を活用することにより、効率的な研究テーマの分類や、中心性指標のひとつである媒介中心性を用いることで比較的新しい重要文献の抽出が可能となる。

2.4.4 文献間引用関係ネットワークから見た我が国における静脈物流研究

図 2-3 について、我が国に関連する文献のノードの色を変えたものが、図 2-4 となる。一見して分かるように、我が国に関連する文献はネットワークの中で重要な位置は占めていない。

被引用数、媒介中心性、PageRank のいずれでも総じて低い順位となっている。媒介中心性では Kumar and Yamaoka³²⁾ (92 位) や Nakashima et al.³²⁾ (197 位) といった海外ジャーナルに掲載されているものでも決して高い順位ではない。PageRank についても最も高いのが田畑ら³⁹⁾の 128 位であるが、これは他の和文論文に引用されている結果であり和文論文を含めなければこのような結果にはならない。このように、被引用数や PageRank が低いことは海外のジャーナルに投稿されているものが僅かであることから当然の結果であるが、効果的に先行研究を引用していれば媒介中心性だけは高くなっている可能性があるに関わらず、そのようになっていない。

表 2-7 について我が国に関連する文献のみを整理したものが表 2-9 となる。表 2-9 が示唆する大きな問題は、コミュニティ G に属するものといかなるコミュニティにも属さないものだけで半数を占めているということである。いかなるコミュニティにも属さないものはデータベースに含めた文献を引用していない、あるいは他の文献から引用されていないことを意味する。また、コミュニティ G は我が国に関連する文献のみで構成されている。すなわち、海外の先行研究からは距離を置く、我が国の文献だけで閉じたコミュニティとい

うことになる。十分な研究蓄積のない我が国だけで閉じたコミュニティが形成されることは、先行研究で得られている知見が十分に反映されていない可能性を意味する。世界的に見て我が国の静脈物流研究が未成熟であることを裏付けている。

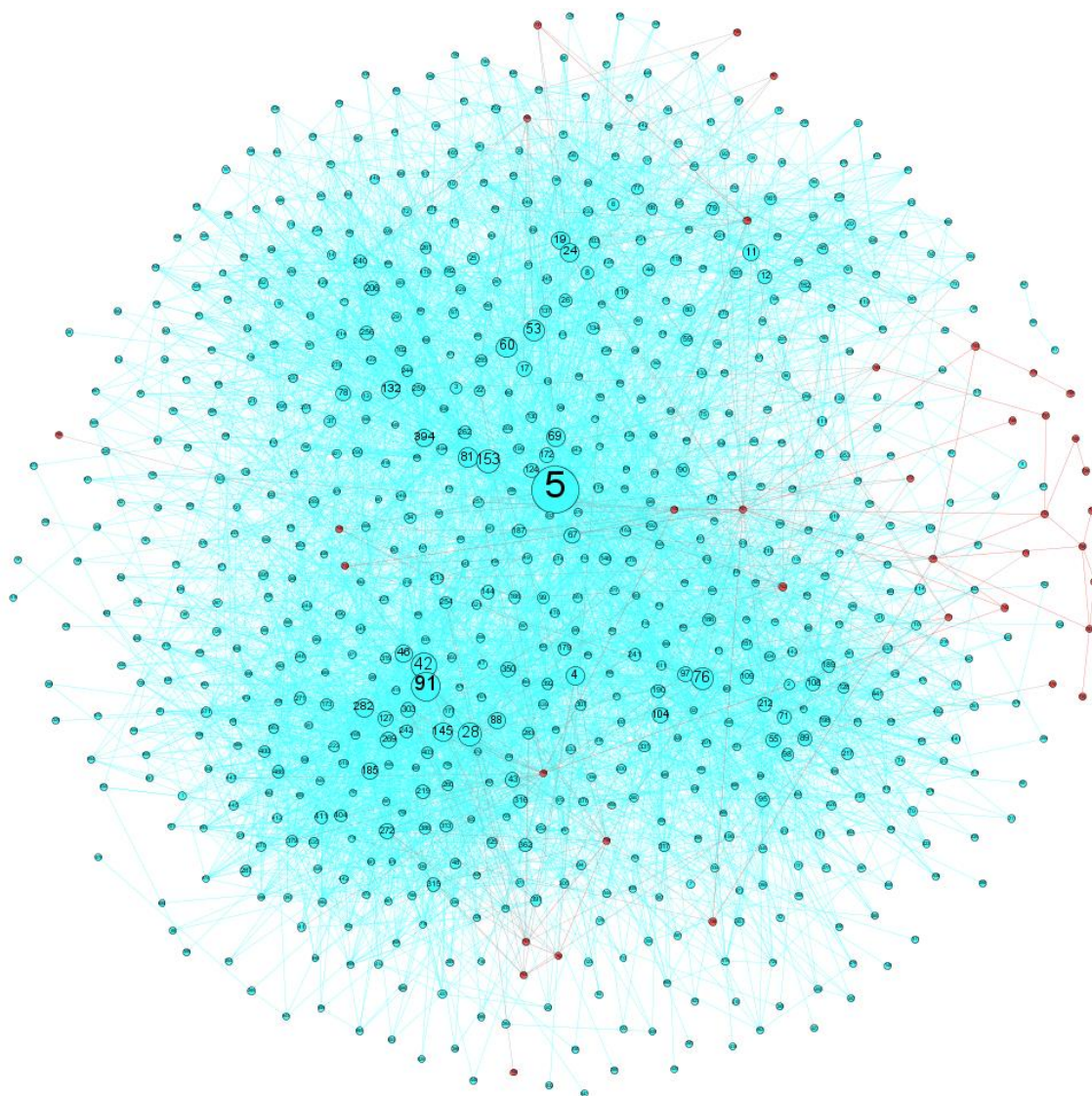


図 2-4 可視化したネットワーク構造（日本関連文献の確認）

残り半数の文献については、コミュニティ A～E のいずれかに分散しているが、詳細を見ると結果どおりには評価しにくい面もある。Nakashima et al.³²⁾ など海外ジャーナルに掲載された文献については、引用と被引用の両面から正当に評価されて属すべきコミュニティに属しているが、国内ジャーナルに掲載された文献については、引用文献次第で内容とは異なるコミュニティに属する場合もあり、A～E に分類された文献は外国人留学生等によって書かれた英語文献も多い。いずれにしろ、文献数が非常に少ないため、コミュニティ

への帰属の仕方については参考程度に捉えるべきであろう。手作業による分類に基づけば、ネットワークデザインや輸送最適化といった物流機能に着目したものや、効果の計測に分類している特定の業界における実証的な研究については一定の研究蓄積があるが、それ以外の分類にはほとんど研究蓄積がない。こういったことを現状の課題として認識する必要がある。

表 2-9 我が国に関連する文献のクラスタリング結果

番号	分類	A	B	C	D	E	F	G	※	合計
1	RL/CLCSM									
1	ネットワークデザイン	4					2		1	7
2	輸送最適化	1					9		5	15
3	RLサービス供給者の選択・評価								2	2
4	効果の測定		4	2	1	2	1			10
5	市場関連問題									
6	使用済み製品等の処理方法の選択								1	1
7	使用済み製品等の獲得マネジメント									
8	その他						1		1	2
2	製品リカバリー									
1	生産計画	1					1		1	3
2	在庫マネジメント			2						2
3	不確実性の影響				1					1
3	解説			1			5		1	7
	合計	6	4	5	2	2	19	0	12	50

※いかなるコミュニティにも属さない文献も存在する

2.5 我が国静脈物流システムへの示唆

2.2で述べたとおり、RLあるいは静脈物流システムはその国の社会状況や社会システム、環境に対するスタンスを前提に設計される必要がある。静脈物流システムに関係する我が国の社会状況・システムとしては、成熟した経済、国内企業のグローバル化、高い産業技術の保有、国民の高い環境意識、四面を海で囲まれた島国であるという地理的特性、廃棄物処理法等の法令、物流を支える基盤インフラの整備状況等が挙げられる。

これらとの関係性を前提として、海外でのRL研究が我が国静脈物流システムに示唆すること、我が国静脈物流システム発展のために今後必要な研究分野を整理すると以下のとおりとなる。

- ・我が国の静脈物流は輸送という経済的な機能を示しているのに対して、海外におけるRLの対象範囲は輸送や保管といった純粋な物流関連活動だけではなくリサイクルシステム全体に関わる処理や処分を含んだ活動を対象としており、システムマネジメントの概念である。分野の広がりについても、商業的な返品の問題から循環型社会の形成を目指したものまであり、大きな範囲を対象としている。我が国の静脈物流システムの発展のためには海外と同レベルのマネジメント概念にまで昇華させる必要がある。そのためにもこれまでのRL研究を俯瞰し今後の研究発展が必要となるが、その際には第4節で抽出し

たような核となる文献が参考になる。

- **RL** の概念に関連するものとして、**RL** の機能のひとつである処分の方法が細分化されていることが挙げられる。我が国では循環型社会形成推進基本法に定められた **3R**（リデュース、リユース、リサイクル）が一般的で、使用済み製品の処理方法について特にリユースとリサイクルの区別が相対的に曖昧となっている。**RL** に含まれる **repair, refurbish, remanufacture, cannibalization** の分類を我が国社会システムに組込むことで、例えば我が国で課題となっている偽装リユースと称されるバーゼル法逃れの脱法的輸出が防止できる可能性もある。
- 静脈物流の対象が廃棄物で、輸送や保管といった物流面でも法的な規制を大きく受けるにも関わらず、その非効率性を明示的に示した研究については、海外の **RL** 研究を含めてほとんどない。規制下での最適化、規制緩和時の効率化の両面が研究対象となり得る。
- 多くのネットワークデザインモデルが提案されてきているが、多国間での静脈物流ネットワーク、輸出入を前提としたモデルがほとんどない。数少ない先行研究としては **Fandel and Stammen²⁸⁵⁾**, **Kusumastuti et al²⁸⁶⁾**, **Piplani and Saraswat²⁸⁷⁾**, **Bing et al²⁸⁸⁾** や我が国における **Karakama and Kainuma⁷²⁾** が挙げられる。国際的な資源循環が進む中、輸出入を含む静脈物流、すなわち国際静脈物流について研究が行われるべきである。
- 輸送機関も陸送あるいは明示的に輸送モードが記載されてなくとも陸送を前提としたものが大部分である。静脈物流がそもそも環境意識の高まりを背景にしていることを踏まえれば、環境負荷が小さい海上輸送の活用もより考慮されるべきで、このことは海上輸送が前提となる国際静脈物流の効率化に繋がる可能性がある。
- 価値観が多様化する中、普遍的な静脈物流システムの評価方法が必要となる。**RL** の既往研究で提案される多目的最適化モデルでも現実的には多くの評価軸を持っておらず、静脈物流システムが適正に評価されなければシステム発展の阻害となる可能性もある。そのため、複数の評価軸を有した普遍的な評価方法が求められるとともに、既往研究では太宗を占めるシステムのパフォーマンスの評価ではなく、不確実性に対する柔軟性などシステムそのものの評価も求められる。

2.6 まとめ

本章では、**RL** 研究に関する文献レビューを行い、定性的な研究動向の把握とともに、引用ネットワーク分析による重要文献の抽出を行った。さらにその結果を踏まえ、海外での **RL** 研究が我が国静脈物流システムに示唆すること、我が国静脈物流システム発展のために今後必要な研究分野を整理した。

その結果、我が国静脈物流システムへの示唆としては、海外の **RL** のようなマネジメント概念を浸透させその対象範囲を広げること、処分方法の細分化を社会システムに組込むことが必要であることを示した。さらに我が国静脈物流システム発展のために今後必要な研

究分野としては、国際的に課題とされている分野に加え、我が国社会システムに起因する輸送の非効率性の考慮、我が国の地理的特性を踏まえた国際静脈物流システムの構築、国民の価値観の多様化を見据えたRLシステムの評価方法の確立などが挙げられる。

このように、RL研究の背景でもある社会的、経済的、環境的のいずれの観点からも我が国静脈物流システムは発展の余地があると考えられ、そのために本章で整理した海外のRL研究を踏まえた我が国社会システムへの示唆や今後必要であるとした分野の研究が役立てられることが期待できる。

本研究では社会システムとの関係性、さらにはそれを含めた国際静脈物流システムの構築について重点的に議論を進めることになる。

第2章付録 文献データベース（分類①が表2-3の分類，分類②がクラスタリング結果）

番号	著者	タイトル	ジャーナル名	号	頁	年	分類①	分類②
1	Wang CH, Even Jr. JC, Adams SK	A mixed-integer linear model for optimal processing and transport of secondary materials	Resources, Conservation and Recycling	15(1)	65-78	1995	1-1	A
2	Jahre M	Household waste collection as a reverse channel: A theoretical perspective	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	25(2)	39-55	1995	3	B
3	Johnson MR, Wang MH	Planning product disassembly for material recovery opportunities	International Journal of Production Research	33(11)	3119-3142	1995	1-6	E
4	Kroon L, Vrijens G	Returnable containers: An example of reverse logistics	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	25(2)	56-58	1995	1-1	A
5	Thierry M, Salomon M, van Nunen JAEE, van Wassenhove LN	Strategic issues in product recovery management	California Management Review	37(2)	114-135	1995	1-6	E
6	van der Laan E, Dekker R, Salomon R, Ridder A	An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal	International Journal of Production Economics	46-47	339-350	1996	2-2	C
7	Castillo ED, Cochran JK	Optimal short horizon distribution operations in reusable container systems	Journal of the Operational Research Society	47(1)	48-60	1996	1-1	E
8	van der Laan E, Dekker R, Salomon M	Product remanufacturing and disposal: A numerical comparison of alternative control strategies	International Journal of Production Economics	45(1-3)	489-98	1996	2-2	C
9	Rosenau WV, Twade D, Mazzeo MA, Singh SP	Returnable/reusable logistical packaging: a capital budgeting investment decision framework	Journal of Business Logistics	17(2)	139-165	1996	1-2	C
10	Guide Jr. VDR	Scheduling using drum-buffer-rope in a remanufacturing environment	International Journal of Production Research	34(4)	1081-1091	1996	2-1	E
11	Richter K	The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers	European Journal of Operational Research	95(2)	313-324	1996	2-2	C
12	Richter K	The extended EOQ repair and waste disposal model	International Journal of Production Economics	45(1-3)	443-447	1996	2-2	C
13	Guide JR. VDR, Srivastava R, Spencer MS	An evaluation of capacity planning techniques in a remanufacturing environment	International Journal of Production Research	35(1)	67-82	1997	2-1	E
14	Guide Jr. VDR, Srivastava R	An evaluation of order release strategies in a remanufacturing environment	Computers & Operations Research	24(1)	37-47	1997	2-1	E
15	Guide Jr. VDR, Srivastava R	Buffering from material recovery uncertainty in a recoverable manufacturing environment	Journal of the Operational Research Society	48(5)	519-59	1997	2-3	E
16	Clendenin JA	Closing the supply chain loop: Reengineering the returns channel process	International Journal of Logistics Management	8(1)	75-86	1997	1-1	B
17	Ayres RU, Ferrer G, Leynseele TV	Eco-efficiency, asset recovery and remanufacturing	European Management Journal	15(5)	557-574	1997	2-1	C
18	Guide Jr. VDR, Srivastava R, Kraus ME	Product structure complexity and scheduling of operations in recoverable manufacturing	International Journal of Production Research	35(1)	3179-99	1997	2-1	E
19	van der Laan E, Salomon M	Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal	European Journal of Operational Research	102(2)	264-278	1997	2-2	C
20	Richter K	Pure and mixed strategies for the EOQ repair and waste disposal problem	OR Spektrum	19(2)	123-129	1997	2-2	C
21	Guide Jr. VDR, Spencer MS	Rough-cut capacity planning for remanufacturing firms	Production Planning & Control	8(3)	237-244	1997	2-1	E
22	Guide Jr. VDR, Kraus ME, Srivastava R	Scheduling policies for remanufacturing	International Journal of Production Economics	48(2)	187-204	1997	2-1	E
23	Guide Jr. VDR	Scheduling with priority dispatching rules and drum-buffer-rope in a recoverable manufacturing system	International Journal of Production Economics	53(1)	101-116	1997	2-1	E
24	Inderfurth K	Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with leadtimes	OR Spektrum	19(2)	111-122	1997	2-2	C
25	Ferrer G	The economics of personal computer remanufacturing	Resources, Conservation and Recycling	21(2)	79-108	1997	2-1	C

26	Ferrer G	The economics of tire remanufacturing	Resources, Conservation and Recycling	19(4)	221-255	1997	2-1	C
27	Korugan A, Gupta SM	A multi-echelon inventory system with returns	Computers & Industrial Engineering	35(1)	145-148	1998	2-2	C
28	Barros AI, Dekker R, Scholten V	A two-level network for recycling sand: A case study	European Journal of Operational Research	110(2)	199-214	1998	1-1	A
29	Guide Jr. VDR, Srivastava R	Inventory buffers in recoverable manufacturing	Journal of Operations Management	16(5)	551-568	1998	2-3	E
30	Hirsch BE, Kuhlmann T, Schumacher J	Logistics simulation of recycling networks	Computers in Industry	36(1-2)	31-38	1998	1-4	E
31	Johnson PF	Managing value in reverse logistics systems	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	34(3)	217-227	1998	1-4	B
32	Krikke HR, van Harten A, Schuur PC	Mixed policies for recovery and disposal of multiple-type consumer products	Journal of Environmental Engineering	124(4)	368-379	1998	1-6	E
33	Yuan XM, Cheung KL	Modeling returns of merchandise in an inventory system	OR Spektrum	20(3)	147-154	1998	2-2	C
34	Krikke HR, Van Harten A, Schuur PC	On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products	International Journal of Production Research	36(1)	111-139	1998	1-6	E
35	Buchanan DJ, Abad PL	Optimal policy for a periodic review returnable inventory system	IIE Transactions	30(11)	1049-1055	1998	2-2	C
36	Guide Jr. VDR, Srivastava R, Kraus ME	Proactive expediting policies for recoverable manufacturing	Journal of the Operational Research Society	49(5)	479-491	1998	2-1	E
37	Klausner M, Grimm WM, Hendrickson C	Reuse of electric motors in consumer products	Journal of Industrial Ecology	2(2)	89-102	1998	1-6	D
38	Humphrey AS, Taylor GD, Landers TL	Stock level determination and sensitivity analysis in repair/rework operations	International Journal of Operations & Production Management	18(6)	612-630	1998	2-3	D
39	Uzsoy R, Venkatachalam G	Supply chain management for companies with product recovery and remanufacturing capability	International Journal of Environmentally Conscious Design and Management	7	59-72	1998	2-1	E
40	Tibben-Lembke RS	The impact of reverse logistics on the total cost of ownership	Journal of Marketing Theory and Practice	6(4)	51-60	1998	1-4	B
41	Marin A, Pelegrin B	The return plant location problem: Modelling and resolution	European Journal of Operational Research	104(2)	375-392	1998	1-1	A
42	Jayaraman V, Guide Jr. VDR, Srivastava R	A closed-loop logistics model for remanufacturing	The Journal of the Operation Research Society	50(5)	497-508	1999	1-1	A
43	Louwers D, Kip BJ, Peters E, Souden F, Flapper SDP	A facility location allocation model for reusing carpet materials	Computers & Industrial Engineering	36(4)	855-869	1999	1-1	A
44	van der Laan E, Salomon M, Dekker R	An investigation of lead-time effects in manufacturing/remanufacturing systems under simple PUSH and PULL control strategies	European Journal of Operational Research	115(1)	195-214	1999	2-2	C
45	Richter K, Dobos I	Analysis of the EOQ repair and waste disposal problem with integer setup numbers	International Journal of Production Economics	59(1-3)	463-467	1999	2-2	C
46	Krikke HR, van Harten A, Schuur PC	Business case Oce: Reverse logistics network re-design for copies	OR Spektrum	21(3)	381-409	1999	1-1	A
47	Krikke HR, van Harten A, Schuur PC	Business case Roteb: recovery strategies for monitors	Computers & Industrial Engineering	36(4)	739-757	1999	1-6	E
48	Realf MJ, Ammons JC, Newton D	Carpet recycling: Determining the reverse production system design	The Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering	38(3)	547-67	1999	1-1	A
49	Nagel C, Meyer P	Caught between ecology and economy: end-of-life aspects of environmentally conscious manufacturing	Computers & Industrial Engineering	36(4)	781-792	1999	1-1	E
50	Leah J, Thomas B	Computer take-back and recycling: An economic analysis for used computer equipment	Journal of Electronics Manufacture	9(1)	67-77	1999	1-4	B

51	Mantrala MK, Raman K	Demand uncertainty and supplier's returns policies for a multi-store style-good retailer	European Journal of Operational Research	115(2)	270-284	1999	1-7	G
52	van Hoek RI	From reversed logistics to green supply chains	Supply Chain Management: An International Journal	4(3)	129-135	1999	1-4	B
53	van der Laan E, Salomon M, Dekker R, Wassenhove LV	Inventory control in hybrid systems with remanufacturing	Management science	45(5)	733-747	1999	2-2	C
54	Lau HS, Lau AHL	Manufacturer's pricing strategy and return policy for a single-period commodity	European Journal of Operational Research	116(2)	291-304	1999	1-5	G
55	Blumberg DF	Strategic examination of reverse logistics & repair service requirements, needs, market size, and opportunities	Journal of Business Logistics	20(2)	141-159	1999	1-5	B
56	Chang NB, Wei YL	Strategic planning of recycling drop-off stations and collection network by multiobjective programming	Environmental Management	24(2)	247-263	1999	1-1	※
57	Linton JD, Johnston DA	A decision support system for planning remanufacturing at Nortel Networks	Interfaces	30(6)	17-31	2000	2-2	B
58	Golany B, Yang J, Yu G	Economic lot-sizing with remanufacturing options	IIE Transactions	33(11)	995-1004	2000	2-2	C
59	Teunter RH, van der Laan E, Inderfurth K	How to set the holding cost rates in average cost inventory models with reverse logistics?	Omega	28(4)	409-415	2000	2-2	C
60	Toktay LB, Wein LM, Zenios SA	Inventory Management of Remanufacturable Products	Management science	46(11)	1412-26	2000	2-1	C
61	Lee CH, Chang SL, Wang KM, Wen LC	Management of scrap computer recycling in Taiwan	Journal of Hazardous Materials	73(3)	209-220	2000	3	D
62	Goggin K, Reay E, Browne J	Modelling end-of-life product recovery chains - a case study	Production Planning & Control	11(2)	87-96	2000	1-1	B
63	Kiesmuller GP, Minner S, Kleber R	Optimal control of a one product recovery system with backlogging	IMA Journal of Mathematics in Business and Industry	11(3)	189-207	2000	2-2	C
64	Kleineidam U, Lambert AJD, Blansjaar J, Kok JJ, van Heijningen RJJ	Optimising product recycling chains by control theory	International Journal of Production Economics	66(2)	185-195	2000	2-1	E
65	Rudi N, Pyke DF, Sporsheim PO	Product recovery at the Norwegian National Insurance Administration	Interfaces	30(3)	166-179	2000	1-6	C
66	Richter K, Sombrutzki M	Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models	European Journal of Operational Research	121(2)	304-315	2000	2-2	C
67	Klausner M, Hendrickson CT	Reverse-Logistics Strategy for Product Take-Back	Interfaces	30(3)	156-165	2000	1-7	B
68	Reaff MJ, Ammous JC, Newton DJ	Strategic design of reverse production systems	Computers & Chemical Engineering	24(2-7)	991-996	2000	1-1	A
69	Guide Jr. VDR, Jayaraman V, Srivastava R, Benton WC	Supply-chain management for recoverable manufacturing systems	Interfaces	30(3)	125-42	2000	3	E
70	Ritchie L, Burnes B, Whittle P, Hey R	The benefits of reverse logistics: The case of the Manchester Royal Infirmary Pharmacy	Supply Chain Management: An International Journal	5(5)	226-233	2000	1-4	B
71	Autry CW, Daugherty PJ, Richey RG	The challenge of reverse logistics in catalog retailing	The International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	31(1)	26-37	2000	1-4	B
72	Ferrer G, Ayres RU	The impact of remanufacturing in the economy	Ecological Economics	32(3)	413-29	2000	1-5	C
73	Dobos I, Richter K	The integer EOQ repair and waste disposal model -further analysis.	Central European Journal of Operations Research	8(2)	173-194	2000	2-2	C
74	Goldsby TJ, Closs DJ	Using activity-based costing to reengineer the reverse logistics channel	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	30(6)	500-514	2000	1-4	B
75	Teunter RH	A reverse logistics valuation method for inventory control	International Journal of Production Research	39(9)	2023-2035	2001	2-2	C
76	Rogers DS, Tibben-Lembke R	An examination of reverse logistics practices	Journal of Business Logistics	22(2)	129-148	2001	3	B
77	Kiesmüller GP, van der Laan EA	An inventory model with dependent product demands and returns	International Journal of Production Economics	72(1)	73-87	2001	2-2	C

78	Majumder P, Groenevelt H	Competition in remanufacturing	Production and Operations Management	10(2)	125-141	2001	1-5	D
79	Teunter RH	Economic ordering quantities for recoverable item inventory systems	Naval Research Logistics	48(6)	484-495	2001	2-2	C
80	Inderfurth K, van der Laan E	Leadtime effects and policy improvement for stochastic inventory control with remanufacturing	International Journal of Production Economics	71(1-3)	381-390	2001	2-2	C
81	Guide Jr. VDR, Wassenhove LN	Managing product returns for remanufacturing	Production and Operations Management	10(2)	142-155	2001	1-7	D
82	Ferrer G, Whybark DC	Material planning for a remanufacturing facility	Production and Operations Management	10(2)	112-24	2001	2-1	D
83	Sodhi MS, Reimer B	Models for recycling electronics end-of-life products	OR Spektrum	23(1)	97-115	2001	1-1	E
84	Ferrer G	On the widget remanufacturing operation	European Journal of Operational Research	135(2)	373-393	2001	2-1	E
85	Minner S, Kleber R	Optimal control of production and remanufacturing in a simple recovery model with linear cost functions	OR Spektrum	23(1)	3-24	2001	2-2	C
86	Heisig G, Fleischmann M	Planning stability in a product recovery system	OR Spektrum	23(1)	25-50	2001	2-2	C
87	Inderfurth K, de Kok A, Flapper S	Product recovery in stochastic remanufacturing systems with multiple reuse options	European Journal of Operational Research	133(1)	130-52	2001	2-2	C
88	Shih LH	Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan	Resources, Conservation and Recycling	32(1)	55-72	2001	1-1	A
89	Daugherty PJ, Autry CW, Ellinger AE	Reverse logistics: The relationship between resource commitment and program performance	Journal of Business Logistics	22(1)	107-123	2001	1-4	B
90	Minner S	Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains	International Journal of Production Economics	71(1-3)	417-428	2001	2-3	B
91	Fleischmann M, Beullens P, Bloemhof-Ruwaard JM, Wassenhove LV	The impact of product recovery on logistics network design	Production and Operations Management	10(2)	156-173	2001	1-1	A
92	Richter K, Weber J	The reverse Wagner/Whitin model with variable manufacturing and remanufacturing cost	International Journal of Production Economics	71(1-3)	447-456	2001	2-2	C
93	Beukering PJH, Janssen MA	Trade and recycling of used tires in Western and Eastern Europe	Resources, Conservation and Recycling	33(4)	235-65	2001	1-4	C
94	Dethloff J	Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up	OR Spektrum	23(1)	79-96	2001	1-2	A
95	Meade L, Sarkis J	A conceptual model for selecting and evaluating third-party reverse logistics providers	Supply Chain Management: An International Journal	7(5)	283-295	2002	1-3	B
96	Kleber R, Minner S, Kiesmüller G	A continuous time inventory model for a product recovery system with multiple options	International Journal of Production Economics	79(2)	121-141	2002	2-2	C
97	Krumwiede DW, Sheu C	A model for reverse logistics entry by third-party providers	Omega	30(5)	325-333	2002	1-8	B
98	Knemeyer AM, Ponzurick TG, Logar CM	A qualitative examination of factors affecting reverse logistics systems for end-of-life computers	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	32(6)	455-479	2002	1-1	B
99	Hu TL, Sheu JB, Huang KH	A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	38(6)	457-473	2002	1-1	A
100	Tsoulfas GT, Pappis CP, Minner S	An environmental analysis of the reverse supply chain of SLI batteries	Resources, Conservation and Recycling	36(7)	135-154	2002	1-4	B
101	Koh SG, Hwang H, Sohn KI, Ko CS	An optimal ordering and recovery policy for reusable items	Computers & Industrial Engineering	43(1-2)	59-73	2002	2-2	C
102	Souza GC, Ketzenberg ME, Guide Jr. VDR	Capacitated remanufacturing with service level constraints	Production and Operations Management	11(2)	231-248	2002	2-1	D
103	Fleischmann M, Kuik R, Dekker R	Controlling inventories with stochastic item returns: A basic model	European Journal of Operational Research	138(1)	63-75	2002	2-2	C
104	Tibben-Lembke RS, Rogers DS	Differences between forward and reverse logistics in a retail environment	Supply Chain Management: An International Journal	7(5)	271-282	2002	3	B

105	Beltran JL, Krass D	Dynamic lot sizing with returning items and disposal	IIE Transactions	34(5)	437-448	2002	2-2	C
106	Teunter RH	Economic order quantities for stochastic discounted cost inventory systems with remanufacturing	International Journal of Logistics: Research and Applications	5(2)	161-175	2002	2-2	C
107	Mangun D, Thurston DJ	Incorporating component reuse, remanufacture, and recycle into product portfolio design	IEEE Transactions on Engineering Management	49(4)	479-490	2002	1-6	C
108	Daugherty PJ, Myers MB, Richey RG	Information support for reverse logistics: The influence of relationship commitment	Journal of Business Logistics	23(1)	85-106	2002	1-8	B
109	Tibben-Lembke RS	Life after death: reverse logistics and the product life cycle	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	32(3/4)	223-244	2002	1-8	B
110	Teunter RH, Vlachos D	On the necessity of a disposal option for returned items that can be remanufactured	International Journal of Production Economics	75(3)	257-266	2002	2-1	C
111	Teunter R, van der Laan E	On the non-optimality of the average cost approach for inventory models with remanufacturing	International Journal of Production Economics	79(1)	67-73	2002	2-2	C
112	de Koster Marisa P, de Brito RBM, van de Vendel MA	Return handling: an exploratory study with nine retailer warehouses	International Journal of Retail and Distribution Management	30(8)	407-421	2002	2-2	B
113	Linton JD, Yeomans JS, Yoogalingam R	Supply planning for industrial ecology and remanufacturing under uncertainty: A numerical study of leaded-waste recovery from television disposal	Journal of the Operational Research Society	53(11)	1185-1196	2002	2-1	C
114	Rogers DS, Lambert DM, Croxton KL, Garcia-Dastugue SJ	The returns management process	International Journal of Logistics Management	13(2)	1-17	2002	3	B
115	Souza GC, Ketzenberg ME	Two-stage make-to-order remanufacturing with service-level constraints	International Journal of Production Research	40(2)	477-493	2002	2-1	E
116	Guide Jr. VDR, Pentico DW	A hierarchical decision model for re-manufacturing and re-use	International Journal of Logistics: Research and Applications	6(1-2)	29-35	2003	1-7	B
117	Bayındır ZP, Erkip N, Güllü R	A model to evaluate inventory costs in a remanufacturing environment	International Journal of Production Economics	81-82	597-607	2003	2-2	C
118	Kiesmuller GP	A new approach for controlling a hybrid stochastic manufacturing/remanufacturing system with inventories and different leadtimes	European Journal of Operational Research	147(1)	62-71	2003	2-2	C
119	Dobos I, Richter K	A production/recycling model with stationary demand and return rates	Central European Journal of Operations Research	11	35-46	2003	2-2	C
120	Ching WK, Yuen WO, Loh AW	An inventory model with returns and lateral transshipments	Journal of the Operational Research Society	54(6)	636-641	2003	2-2	C
121	van der Laan EA	An NPV and AC analysis of a stochastic inventory system with joint manufacturing and remanufacturing	International Journal of Production Economics	81-82	317-31	2003	2-2	C
122	Georgiadis P, Vlachos D	Analysis of the dynamic impact of environmental policies on reverse logistics	Operations Research	3(2)	123-135	2003	1-8	D
123	Daniel SE, Pappis CP, Voutsinas TG	Applying life cycle inventory to reverse supply chains: a case study of lead recovery from batteries	Resources, Conservation and Recycling	37(4)	251-281	2003	1-4	A
124	Guide Jr. VDR, Jayaraman V, Linton JD	Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery	Journal of Operations Management	21(3)	259-279	2003	1-1	D
125	Schultmann F, Engels B, Rentz O	Closed-loop supply chains for spent batteries	Interfaces	33(6)	96-115	2003	1-1	A
126	Kiesmüller GP, Scherer CW	Computational issues in a stochastic finite horizon one product recovery inventory model	European Journal of Operational Research	146(3)	553-579	2003	2-2	C
127	Krikke H, Bloemhof-Ruwaard J, Van Wassenhove LN	Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators	International Journal of Production Research	41(16)	3689-3719	2003	1-1	A

128	Tan AWK, Yu WS, Arun K	Improving the performance of a computer company in supporting its reverse logistics operations in the Asia-Pacific region	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	33(1/2)	59-74	2003	1-4	B
129	Spengler T, Ploog M, Schröter M	Integrated planning of acquisition, disassembly and bulk recycling: a case study on electronic scrap recovery	OR Spektrum	25(3)	4713-442	2003	1-1	E
130	Fleischmann M, van Nunen JAEE, Gräve B	Integrating closed-loop supply chains and spare-parts management at IBM	Interfaces	33(6)	44-56	2003	2-2	C
131	Haas DA, Murphy FH, Lancioni RA	Managing reverse logistics channels with data envelopment analysis	Transportation Journal	42(3)	56-69	2003	1-4	B
132	Guide Jr. VDR, Teunter RH, Van Wassenhove LN	Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing	Manufacture & Service Operations Management	5(4)	303-316	2003	1-5	D
133	de Brito MP, Dekker R	Modelling product returns in inventor control—exploring the validity of general assumptions	International Journal of Production Economics	81-82	225-241	2003	2-2	C
134	Fleischmann M, Kuik R	On optimal inventory control with independent stochastic item returns	European Journal of Operational Research	151(1)	25-37	2003	2-2	C
135	Kiesmüller GP	Optimal control of a one product recovery system with leadtimes	International Journal of Production Economics	81-82	333-340	2003	2-2	C
136	Dobos I	Optimal production-inventory strategies for a HMMS-type reverse logistics system	International Journal of Production Economics	81-82	351-360	2003	2-2	B
137	Mahadevan B, Pyke DF, Fleischmann M	Periodic review, push inventory policies for remanufacturing	European Journal of Operational Research	151(3)	536-551	2003	2-2	C
138	White CD, Masanet E, Rosen CM, Beckman SL	Product recovery with some byte: an overview of management challenges and environmental consequences in reverse manufacturing for the computer industry	Journal of Cleaner Production	11(4)	445-458	2003	3	C
139	Kekre S, Rao US, Swaminathan JM, Zhang J	Reconfiguring a remanufacturing line at Visteon, Mexico	Interfaces	33(6)	30-43	2003	2-1	C
140	Vlachos D, Dekker R	Return handling options and order quantities for single period products	European Journal of Operational Research	151(1)	38-52	2003	2-2	C
141	Daugherty PJ, Richey RG, Hudgens BJ, Autry CW	Reverse logistics in the automobile aftermarket industry	International Journal of Logistics Management	14(1)	49-62	2003	1-4	B
142	Kiesmüller GP, Minner S	Simple expressions for finding recovery systems inventory control parameter values	Journal of the Operational Research Society	54(1)	83-88	2003	2-2	C
143	Spengler T, Schroter M	Strategic management of spare parts in closed-loop supply system: a system dynamic approach	Interfaces	33(6)	7-17	2003	2-2	B
144	Guide Jr. VDR, Harrison TP, Van Wassenhove LN	The challenge of closed-loop supply chains	Interfaces	33(6)	3-6	2003	3	D
145	Jayaraman V, Patterson RA, Rolland E	The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures	European Journal of Operational Research	150(1)	128-149	2003	1-1	A
146	Toffel MW	The growing strategic importance of end-of-life product management	California Management Review	45(3)	102-129	2003	1-6	B
147	Richter K, Gobsch B	The market-oriented dynamic product recovery model in the just-in-time framework	International Journal of Production Economics	81-82	369-374	2003	2-2	C
148	Sleptchenko A, van der Heijden MC, van Harten A	Trade-off between inventory and repair capacity in spare-parts network	Journal of the Operational Research Society	54(3)	263-272	2003	2-2	A
149	Ferrer G	Yield information and supplier responsiveness in remanufacturing operations	European Journal of Operational Research	149(3)	540-56	2003	2-3	D
150	Hicks C, Heidrich O, McGovern T, Donnelly T	A functional model of supply chains and waste	International Journal of Production Economics	89(2)	165-174	2004	1-4	B
151	Fandel G, Stammen M	A general model for extended strategic supply chain management with emphasis on product life cycles including development and recycling	International Journal of Production Economics	89(3)	293-308	2004	1-1	A
152	Dobos I, Richter K	An extended production/recycling model with stationary demand and return rates	International Journal of Production Economics	90(3)	311-323	2004	2-2	C

153	Savaskan RC, Bhattacharya S, Van Wassenhove LN	Closed-loop supply chain models with product remanufacturing	Management science	50(2)	239-252	2004	1-1	D
154	Pati RK, Vrat P, Kumar P	Cost optimisation model in recycled waste reverse logistics system	International Journal of Business Performance Management	6(3-4)	245-261	2004	2-1	E
155	Tang O, Grubbströma RW, Zanoni S	Economic evaluation of disassembly processes in remanufacturing systems	International Journal of Production Research	42(17)	3603-3617	2004	2-1	C
156	van Nunen JAEE, Zuidwijk RA	E-enabled closed-loop supply chains	California Management Review	46(2)	40-54	2004	1-8	B
157	González-Torre PL, Adenso-Díaz B, Artiba H	Environmental and reverse logistics policies in European bottling and packaging firms	International Journal of Production Economics	88(1)	95-104	2004	1-4	B
158	Stanfield PM, Wilson JR, King RE	Flexible modelling of correlated operation times with application in product-reuse facilities	International Journal of Production Research	42(11)	2179-2196	2004	2-1	E
159	Lau HCW, Lee CKM, Choy KL, Ip WH, Chan FTS, Ip RWL	Implementation of logistics information system to support reverse logistics: a case study	International Journal of Logistics Systems and Management	1(1)	112-126	2004	1-2	B
160	Teunter RH, van der Laan E, Vlachos D	Inventory strategies for systems with fast remanufacturing	Journal of the Operational Research Society	55(5)	475-484	2004	2-2	C
161	Teunter RH	Lot-sizing for inventory systems with product recovery	Computers & Industrial Engineering	46(3)	431-441	2004	2-2	C
162	Seitz MA, Peattie K	Meeting the closed-loop challenge: The case of remanufacturing	California Management Review	46(2)	74-89	2004	1-1	B
163	Jorjani S, Leu J, Scott C	Model for the allocation of electronics components to reuse options	International Journal of Production Research	42(6)	1131-1145	2004	1-6	E
164	Bufardi A, Gheorghe R, Kiritsis D, Xirouchakis P	Multicriteria decision-aid approach for product end-of-life alternative selection	International Journal of Production Research	42(16)	3139-57	2004	1-6	E
165	Inderfurth K	Optimal policies in hybrid manufacturing/remanufacturing systems with product substitution	International Journal of Production Economics	90(3)	325-43	2004	2-2	D
166	Krikke HR, le Blanc HM, van de Velde SL	Product modularity and the design of closed-loop supply chains	California Management Review	46(2)	23-39	2004	1-1	B
167	Baumgarten H, Klinkner R, Sommer-Dittrich T	Reconfigurable logistics systems in production and disassembly networks	International Journal of Production Research	42(17)	3647-3655	2004	1-1	※
168	le Blanc HM, Fleuren HA, Krikke HR	Redesign of a recycling system for LPG-tanks	OR Spektrum	26(2)	286-304	2004	1-2	A
169	Mukhopudhyay SK, Setoputro R	Reverse logistics in e-business: optimal price & return policy	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	34(1)	70-89	2004	1-5	B
170	Beullens P	Reverse logistics in effective recovery of products from waste materials	Reviews in Environmental Science & Bio/Technology	3(4)	283-306	2004	1-6	D
171	Richey RG, Daugherty PJ, Genchev SE, Autry CW	Reverse logistics: the impact of timing and resource	Journal of Business Logistics	25(2)	229-250	2004	1-4	B
172	Blackburn JD, Guide Jr. VDR, Souza GC, Van Wassenhove LN	Reverse supply chains for commercial returns	California Management Review	46(2)	6-22	2004	3	D
173	Realff MJ, Ammons JC, Newton DJ	Robust reverse production system design for carpet recycling	IIE Transactions	36(8)	767-776	2004	1-1	A
174	Toffel MW	Strategic management of product recovery	California Management Review	46(2)	120-141	2004	3	B
175	Tibben-Lembke RS	Strategic Use of the Secondary Market for Retail Consumer Goods	California Management Review	46(2)	90-104	2004	1-5	B
176	Roland G, Jackson T	Supply loops and their constraints: The industrial ecology of recycling and reuse	California Management Review	46(2)	55-73	2004	1-4	B
177	Beamon BM, Fernandes C	Supply-chain network configuration for product recovery	Production Planning & Control	15(3)	270-281	2004	1-1	A
178	Aras N, Boyaci T, Verter V	The effect of categorizing returned products in remanufacturing	IIE Transactions	36(4)	319-331	2004	2-3	C
179	Georgiadis P, Vlachos D	The effect of environmental parameters on product recovery	European Journal of Operational Research	157(2)	449-464	2004	1-4	D

180	Tang O, Naim MM	The impact of information transparency on the dynamic behaviour of a hybrid manufacturing/remanufacturing system	International Journal of Production Research	42(19)	4135–4152	2004	2–3	C
181	Matthews HS	Thinking outside 'the box': Designing a packaging take-back system	California Management Review	46(2)	105–119	2004	1–2	B
182	Ferrer G, Ketzenberg ME	Value of information in remanufacturing complex products	IIE Transactions	36(3)	265–278	2004	2–3	D
183	Yang J, Golany B, Yu G	A concave-cost production planning problem with remanufacturing options	Naval Research Logistics	52(5)	443–458	2005	2–2	C
184	DeCroix G, Song JS, Zipkin P	A series system with returns: Stationary analysis	Operations Research	53(2)	350–362	2005	2–2	C
185	Listeş O, Dekker R	A stochastic approach to a case study for product recovery network design	European Journal of Operational Research	160(1)	268–287	2005	1–1	A
186	Dowlatshahi S	A strategic framework for the design and implementation of remanufacturing operations in reverse logistics	International Journal of Production Research	43(16)	3455–3480	2005	3	B
187	Sheu JB, Chou YH, Hu CC	An integrated logistics operational model for green-supply chain management	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	41(4)	287–313	2005	1–1	A
188	Yalabik B, Petruzzzi NC, Chhajer D	An integrated product returns model with logistics and marketing coordination	European Journal of Operational Research	161(1)	162–82	2005	1–5	B
189	Ravi V, Shankar R	Analysis of interactions among the barriers of reverse logistics	Technology Forecasting Social Change	72(8)	1011–1029	2005	1–8	B
190	Ravi V, Shankar R, Tiwari MK	Analyzing alternatives in reverse logistics for end-of-life computers: ANP and balanced scorecard approach	Computers & Industrial Engineering	48(2)	327–356	2005	1–3	B
191	Bayındır ZP, Erkip N, Güllü R	Assessing the benefits of remanufacturing option under one-way substitution	Journal of the Operational Research Society	56(3)	286–96	2005	2–2	C
192	Aksoy HK, Gupta SM	Buffer allocation plan for a remanufacturing cell	Computers & Industrial Engineering	48(3)	657–677	2005	2–3	E
193	Wells P, Seitz M	Business models and closed-loop supply chains: a typology	Supply Chain Management: An International Journal	10(4)	249–51	2005	1–4	B
194	Tang O, Grubbström RW	Considering stochastic lead times in a manufacturing/remanufacturing system with deterministic demands and returns	International Journal of Production Economics	93–94(8)	285–300	2005	2–2	C
195	Yao Z, Wu Y, Lai KK	Demand uncertainty and manufacturer returns policies for style-good retailing competition	Production Planning & Control	16(7)	691–700	2005	1–5	G
196	Amini MM, Retzlaff-Roberts D, Bienstock CC	Designing a reverse logistics operation for short cycle time repair services	International Journal of Production Economics	96(3)	367–380	2005	1–1	B
197	Richey RG, Chen H, Genchev SE, Daugherty PJ	Developing effective reverse logistics programs	Industrial Marketing Management	34(8)	830–840	2005	1–8	B
198	Autry CW	Formalization of reverse logistics programs: A strategy for managing liberalized returns	Industrial Marketing Management	34(7)	749–757	2005	1–4	B
199	Inderfurth K	Impact of uncertainties on recovery behavior in a remanufacturing environment: A numerical analysis	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	35(5)	318–36	2005	2–3	D
200	Walther G, Spengler T	Impact of WEEE-directive on reverse logistics in Germany	International Journal of Retail and Distribution Management	35(5)	337–361	2005	1–1	B
201	Chouinard M, D'Amours S, Ait-Kadi D	Integration of reverse logistics activities within a supply chain information system	Computers in Industry	56(1)	105–124	2005	1–1	B
202	DeCroix GA, Zipkin PH	Inventory management for an assembly system with product or component returns	Management science	51(8)	1250–1265	2005	2–2	C
203	Horvath PA, Autry CW, Wilcox WE	Liquidity implications of reverse logistics for retailers: A Markov chain approach	Journal of Retailing	81(3)	191–203	2005	1–8	B

204	Inderfurth K, Lindner G, Rachaniotis NP	Lot sizing in a production system with rework and product deterioration	International Journal of Production Research	43(7)	1355-1374	2005	2-2	C
205	Sundin E, Bras B	Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing	Journal of Cleaner Production	13(9)	913-925	2005	1-5	D
206	Debe LG, Toktay LB, Van Wassenhove LN	Market segmentation and product technology selection for remanufacturable products	Management science	51(8)	1193-1205	2005	2-2	D
207	Ray S, Boyaci T, Aras N	Optimal prices and trade-in rebates for durable, remanufacturable products	Manufacturing & Service Operations Management	7(3)	208-228	2005	1-5	D
208	Mukhopadhyay SK, Setoputro R	Optimal return policy and modular design for build-to-order products	Journal of Operations Management	23(5)	496-506	2005	1-5	D
209	Guide Jr. VDR, Souza GC, van der Laan E	Performance of static priority rules for shared facilities in a remanufacturing shop with disassembly and reassembly	European Journal of Operational Research	164(2)	341-353	2005	1-5	E
210	Srivastava SK	Profit driven reverse logistics	International Journal of Business Research	4(1)	53-61	2005	1-4	E
211	Fassoula ED	Reverse logistics as a means of reducing the cost of quality	Total Quality Management & Business Excellence	16(5)	631-643	2005	1-4	B
212	Daugherty PJ, Richey RG, Genchev SE, Chen H	Reverse logistics: superior performance through focused resource commitments to information technology	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	41(2)	77-92	2005	1-8	B
213	Nagurney A, Toyasaki F	Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	41(1)	1-28	2005	1-1	D
214	Robotis A, Bhattacharya S, Van Wassenhove LN	The effect of remanufacturing on procurement decisions for resellers in secondary markets	European Journal of Operational Research	163(3)	688-705	2005	1-5	D
215	Fernández I, Kekäle T	The influence of modularity and industry clockspeed on reverse logistics strategy: Implications for the purchasing function	Journal of Purchasing and Supply Management	11(4)	193-205	2005	1-1	E
216	Dhanda KK, Hill RP	The role of information technology and systems in reverse logistics: a case study	International Journal of Technology Management	31(1-2)	140-151	2005	1-8	B
217	Richey RG, Genchev SE, Daugherty PJ	The role of resource commitment and innovation in reverse logistics performance	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	35(4)	233-257	2005	1-4	B
218	Tan AWK, Kumar A.	A decision-making model for reverse logistics in the computer industry	The International Journal of Logistics Management	17(3)	331-354	2006	1-6	B
219	Min H, Ko HJ, Ko CS	A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns	Omega	34(1)	56-69	2006	1-1	A
220	Mont O, Dalhammar C, Jacobsson N	A new business model for baby prams based on leasing and product remanufacturing	Journal of Cleaner Production	14(17)	1509-1518	2006	2-1	C
221	Dobos I, Richter K	A production/recycling model with quality consideration	International Journal of Production Economics	104(2)	571-579	2006	2-2	C
222	Salema MI, Povaia APB, Novais AQ	A warehouse-based design model for reverse logistics	Journal of the Operational Research Society	57(6)	615-629	2006	1-1	A
223	Zhou L, Disney SM	Bullwhip and inventory variance in a closed loop supply chain	OR Spektrum	28(1)	127-149	2006	2-3	C
224	Mondal S, Mukherjee K	Buy-back policy decision in managing reverse logistics	International Journal of Logistics Systems and Management	2(3)	255-264	2006	1-7	B
225	Guide Jr. VDR, Van Wassenhove LN	Closed-loop supply chains – An introduction to the feature issue (Part 1)	Production and Operations Management	15(3)	345-350	2006	3	D
226	Guide Jr. VDR, Van Wassenhove LN	Closed-loop supply chains – An introduction to the feature issue (Part 2)	Production and Operations Management	15(4)	471-472	2006	3	D

227	French ML, LaForge RL	Closed-loop supply chains in process industries: An empirical study of producer re-use issues	Journal of Operations Management	24(3)	271-286	2006	1-1	E
228	Aras N, Verter V, Boyaci T	Coordination and priority decisions in hybrid manufacturing/remanufacturing systems	Production and Operations Management	15(4)	528-43	2006	2-2	C
229	Zanoni S, Ferretti I, Tang O	Cost performance and bullwhip effect in a hybrid manufacturing and remanufacturing system with different control policies	International Journal of Production Research	44(18-19)	3847-3862	2006	2-2	C
230	Bayindir ZP, Dekker R, Porras E	Determination of recovery effort for a probabilistic recovery system under various inventory control policies	Omega	34(6)	571-584	2006	2-2	C
231	Teunter RH, Bayindir ZP, Van Den Heuvel W	Dynamic lot sizing with product returns and remanufacturing	International Journal of Production Research	44(20)	4377-4400	2006	2-2	C
232	Zhou L, Naim MM, Tang O, Towill DR	Dynamic performance of a hybrid inventory system with a Kanban policy in remanufacturing process	Omega	34(6)	585-98	2006	2-2	C
233	Tang O, Teunter R	Economic lot scheduling problem with returns	Production and Operations Management	15(4)	488-497	2006	2-2	C
234	Bakal IS, Akcali E	Effects of random yield in remanufacturing with price-sensitive supply and demand	Production and Operations Management	15(3)	407-20	2006	2-3	D
235	Breen L	Give me back my empties or else! A preliminary analysis of customer compliance in reverse logistics practices (UK)	Management Research News	29(9)	532-551	2006	1-4	B
236	Logozar K., Radonjic G, Bastic M	Incorporation of reverse logistics model into in-plant recycling process: a case of aluminium industry	Resources, Conservation and Recycling	49(1)	49-67	2006	1-1	B
237	Debo LG, Toktay LB, Van Wassenhove LN	Joint life-cycle dynamics of new and remanufactured products	Production and Operations Management	15(4)	498-513	2006	1-5	D
238	Atasu A, C, etinkaya S	Lot sizing for optimal collection and use of remanufacturable returns over a finite life-cycle	Production and Operations Management	15(4)	473-87	2006	2-3	D
239	Konstantaras I, Papachristos S	Lot-sizing for a single product recovery system with backordering	International Journal of Production Research	44(10)	2031-2045	2006	2-2	C
240	Ferrer G, Swaminathan J	Managing new and remanufactured products	Management science	52(1)	15-26	2006	1-5	D
241	Srivastava SK, Srivastava RK	Managing product returns for reverse logistics	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	36(7)	524-546	2006	1-1	B
242	Schultmann F, Zunkeller M, Rentz O	Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry	European Journal of Operational Research	171(3)	1033-1050	2006	1-2	A
243	Ahluwalia PK, Nema AK	Multi-objective reverse logistics model for integrated computer waste management	Waste Management & Research	24(6)	514-527	2006	1-1	C
244	Galbreth MR, Blackburn JD	Optimal acquisition and sorting policies for remanufacturing	Production and Operations Management	15(3)	384-92	2006	2-3	D
245	Bhattacharya S, Guide Jr. VDR, Van Wassenhove LN	Optimal order quantities with remanufacturing across new product generations	Production and Operations Management	15(3)	421-31	2006	1-1	D
246	DeCroix GA	Optimal policy for a multiechelon inventory system with remanufacturing	Operations Research	54(3)	523-543	2006	2-2	C
247	Hong IH, Assavapokee T, Ammons J, Boelkins C, Gilliam K, Oudit D, Realff MJ, Vannicola JM, Wongthatsanekorn W	Planning the e-scrap reverse production system under uncertainty in the State of Georgia: A case study	IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing	29(3)	150-162	2006	1-1	E
248	Jayaraman V	Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: an analytical approach	International Journal of Production Research	44(5)	981-998	2006	2-1	A
249	Franke C, Basdere B, Ciupek M, Seliger S	Remanufacturing of mobile phones- Capacity, program and facility adaptation planning	Omega	34(6)	562-570	2006	2-1	D
250	Savaskan C, van Wassenhove E	Reverse channel design: the case of competing retailers	Management science	52(1)	1-14	2006	1-1	D

251	Wu YCJ, Cheng WP	Reverse logistics in the publishing industry: China, Hong Kong, and Taiwan	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	36(7)	507-523	2006	1-8	B
252	Kumar S, Malegeant P	Strategic alliance in a closed-loop supply chain, a case of manufacturer and eco-non-profit organization	Technovation	26(10)	1127-1135	2006	1-8	A
253	Ferguson M, Guide Jr. VDR, Souza GC	Supply chain coordination for false failure returns	Manufacturing & Service Operations Management	8(4)	376-393	2006	1-8	D
254	Kim K, Song I, Kim J, Jeong B	Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment	Computers & Industrial Engineering	51(2)	279-287	2006	2-1	A
255	Geyer R, Van Wassenhove LN, Atasu A	The economics of remanufacturing under limited component durability and finite product life cycles	Management science	53(1)	88-100	2006	2-3	D
256	Ferguson ME, Toktay LB	The effect of competition on recovery strategies	Production and Operations Management	15(3)	351-368	2006	1-5	D
257	Georgiadis P, Vlachos D, Tagaras G	The impact of product lifecycle on capacity planning of closed-loop supply chains with remanufacturing	Production and Operations Management	15(4)	514-27	2006	2-1	D
258	Mostard J, Teunter R	The newsboy problem with resalable returns: A single period model and case study	European Journal of Operational Research	169(1)	81-96	2006	2-2	C
259	Mukhopadhyay SK, Setaputra R	The role of 4PL as the reverse logistics integrator: Optimal pricing and return policies	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	36(9)	716-729	2006	1-8	B
260	Min H, Ko CS, Ko HJ	The spatial and temporal consolidation of returned products in a closed-loop supply chain network	Computers & Industrial Engineering	51(2)	309-320	2006	1-1	A
261	Ketzenberg ME, van der Laan E, Teunter RH	The value of information in closed loop supply chains	Production and Operations Management	15(3)	393-406	2006	2-3	D
262	Guide Jr. VDR, Souza G, Van Wassenhove LN, Blackburn J	Time value of commercial product returns	Management science	52(8)	1200-114	2006	2-3	D
263	Reimer B, Sodhi M, Jayaraman V	Truck sizing models for recyclables pick-up	Computers & Industrial Engineering	51(4)	621-36	2006	1-2	A
264	le Blanc I, van Krieken M, Krikke H, Fleuren H	Vehicle routing concepts in the closed-loop container network of ARN—a case study	OR Spektrum	28(1)	53-71	2006	1-2	A
265	Kim BI, Kim S, Sahoo S	Waste collection vehicle routing problem with time windows	Computers & Operations Research	33(12)	3624-42	2006	1-2	A
266	He W, Li G, Ma X, Wang H, Huang J, Xu M, Huang C	WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China	Journal of Hazardous Materials	136(3)	502-512	2006	3	A
267	Sheu JB	A coordinated reverse logistics system for regional management of multi-source hazardous wastes	Computers & Operations Research	34(5)	1442-1462	2007	1-1	A
268	Seitz MA	A critical assessment of motives for product recovery: the case of engine remanufacturing	Journal of Cleaner Production	15(11-12)	1147-1157	2007	2-1	B
269	Lu Z, Bostel N	A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities	Computers & Operations Research	34(2)	299-323	2007	1-1	A
270	Choi DW, Hwang H, Koh SG	A generalized ordering and recovery policy for reusable items	European Journal of Operational Research	182(2)	764-774	2007	2-2	C
271	Liste O	A generic stochastic model for supply-and-return network design	Computers & Operations Research	34(2)	417-442	2007	1-1	A
272	Ko HJ, Evans GW	A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs	Computers & Operations Research	34(2)	346-366	2007	1-1	A
273	Serrato MA, Ryan SM, Gaytan J	A Markov decision model to evaluate outsourcing in reverse logistics	International Journal of Production Research	45(18-19)	4289-4315	2007	1-8	B
274	Jun HB, Cusin M, Kiritsis D, Xirouchakis P	A multi-objective evolutionary algorithm for EOL product recovery optimization: turbocharger case study	International Journal of Production Research	45(18-19)	4573-4594	2007	1-4	E
275	Wang Z, Yao DQ, Huang P	A new location-inventory policy with reverse logistics applied to B2C e-markets of China	International Journal of Production Economics	107(2)	350-363	2007	1-1	A
276	Chan HK	A proactive and collaborative approach to reverse logistics—a case study	Production Planning & Control	18(4)	350-360	2007	1-8	B

277	Presley A, Meade L, Sarkis J	A strategic sustainability justification methodology for organizational decisions: a reverse logistics illustration	International Journal of Production Research	45(18-19)	4595-4620	2007	1-3	B
278	Vlachos D, Georgiadis P, Iakovou E	A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains	Computers & Operations Research	34(2)	367-396	2007	2-1	D
279	Karakayali I, Emir-Farinas H, Akcali E	An analysis of decentralized collection and processing of end-of-life products	Journal of Operations Management	25(6)	1161-83	2007	1-1	D
280	Verstrepen S, Cuijssen F, de Brito M, Dullaert W	An exploratory analysis of reverse logistics in Flanders	European Journal of Transport and Infrastructure Research	7(4)	301-316	2007	1-4	B
281	Bernon M, Cullen J	An integrated approach to managing reverse logistics	International Journal of Logistics: Research and Applications	10(1)	41-56	2007	1-4	B
282	Salema MIG, Barbosa-Povoa AP, Novais AQ	An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty	European Journal of Operational Research	179(3)	1063-1077	2007	1-1	A
283	Biehl M, Prater E, Realff MJ	Assessing performance and uncertainty in developing carpet reverse logistics systems	Computers & Operations Research	34(2)	443-463	2007	1-4	A
284	Bayindir ZP, Erkip N, Gullu R	Assessing the benefits of remanufacturing option under one-way substitution and capacity constraint	Computers & Operations Research	34(2)	487-514	2007	2-2	C
285	Sharma M, Ammons JC, Hartman JC	Asset management with reverse product flows and environmental considerations	Computers & Operations Research	34(2)	464-486	2007	1-8	A
286	Anzi FS, Allahverdi A, Kovalyov MY	Batching deteriorating items with applications in computer communication and reverse logistics	European Journal of Operational Research	182(3)	1002-1011	2007	1-8	A
287	Üster H, Easwaran G, Akçali E, Çetinkaya S	Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model	Naval Research Logistics	54(8)	890-907	2007	1-1	A
288	Talbot S, Lefebvre É, Lefebvre LA	Closed-loop supply chain activities and derived benefits in manufacturing SMEs	Journal of Manufacturing Technology Management	18(6)	627-658	2007	1-1	B
289	Hammond D, Beullens P	Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation	European Journal of Operational Research	183(2)	895-908	2007	1-1	D
290	Webster S, Mitra S	Competitive strategy in remanufacturing and the impact of take-back laws	Journal of Operations Management	25(6)	1123-40	2007	1-5	D
291	Wadhwa S, Madaan J	Conceptual framework for knowledge management in reverse enterprise system	Journal of Knowledge Management Practice	8(2)	1-22	2007	1-8	B
292	Jayaraman V, Luo Y	Creating competitive advantages through new value creation: A reverse logistics perspective	Academy of Management Perspectives	21(2)	56-73	2007	3	B
293	Morana R, Seuring S	End-of-life returns of long-lived products from end customer—insights from an ideally set up closed-loop supply chain	International Journal of Production Research	45(18-19)	4423-4437	2007	1-7	E
294	Li Y, Chen J, Cai X	Heuristic genetic algorithm for capacitated production planning problems with batch processing and remanufacturing	International Journal of Production Economics	105(2)	301-317	2007	2-1	C
295	Zikopoulos C, Tagaras G	Impact of uncertainty in the quality of returns on the profitability of a single-period refurbishing operation	European Journal of Operational Research	182(1)	205-225	2007	2-3	D
296	Kocabasoglu C, Prahinski C, Klassen RD	Linking forward and reverse supply chain investments: The role of business uncertainty	Journal of Operations Management	25(6)	1141-1160	2007	1-1	B
297	Karaer O, Lee HL	Managing the reverse channel with RFID-enabled negative demand information	Production and Operations Management	16(5)	625-645	2007	2-1	C
298	Chen HK, Chou HW, Chiu YC	On the modeling and solution algorithm for the reverse logistics recycling flow equilibrium problem	Transportation Research Part C: Emerging Technologies	15(4)	218-234	2007	1-1	A

299	Vadde S, Kamarthi SV, Gupta SM	Optimal pricing of reusable and recyclable components under alternative product acquisition mechanisms	International Journal of Production Research	45(18-19)	4621-4652	2007	1-5	D
300	DePuy GW, Usher JS, Walker RL, Taylor GD	Production planning for remanufactured products	Production Planning & Control	18(7)	573-583	2007	2-1	C
301	Jun HB, Kiritsis D, Xirouchakis P	Research issues on closed-loop PLM	Computers in Industry	58(8-9)	855-868	2007	1-1	※
302	Mitra S	Revenue management for remanufactured products	Omega	35(5)	553-62	2007	1-5	C
303	Lieckens K, Vandaele N	Reverse logistics network design with stochastic lead times	Computers & Operations Research	34(2)	395-416	2007	1-1	A
304	Alvarez J, Berrone P, Husillos F, Lado N	Reverse logistics, stakeholders' influence, organizational slack, and managers' posture	Journal of Business Research	60(5)	463-473	2007	1-8	B
305	Alshamrani A, Mathur K, Ballou RH	Reverse logistics: simultaneous design of delivery routes and returns strategies	Computers & Operations Research	34(2)	595-619	2007	1-2	A
306	Corbacioglu U, Van der laan E	Setting the holding cost rates in a two product system with remanufacturing	International Journal of Production Economics	109(1-2)	185-94	2007	2-2	C
307	Kara S, Rugrungruang F, Kaebnick H	Simulation modelling of reverse logistics networks	International Journal of Production Economics	106(1)	61-69	2007	1-4	A
308	Zhou L, Naim M, Wang Y.	Soft systems analysis of reverse logistics battery recycling in China	International Journal of Logistics Research and Applications	10(1)	57-70	2007	1-8	B
309	Johansson O, Hellström D	The effect of asset visibility on managing returnable transport items	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	37(10)	799-815	2007	1-2	C
310	Mollenkopf D, Russo I, Frankel R	The returns management process in supply chain strategy	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	37(7)	568-592	2007	3	B
311	Meade L, Sarkis J, Presley A	The theory and practice of reverse logistics	International Journal of Logistics Systems and Management	3(1)	56 - 84	2007	3	B
312	Field JM, Sroufe RP	The use of recycled materials in manufacturing: Implications for supply chain management and operations strategy	International Journal of Production Research	45(18-19)	4439-4463	2007	2-1	D
313	Du F, Evans GW	A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service	Computers & Operations Research	35(8)	2617-2634	2008	1-1	A
314	Tan A, Kumar A	A decision making model to maximise the value of reverse logistics in the computer industry	International Journal of Logistics Systems and Management	4(3)	297-312	2008	1-4	A
315	Pati RK, Vrat P, Kumar P	A goal programming model for paper recycling system	Omega	36(3)	405-417	2008	1-1	A
316	Lee DH, Dong M	A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	44(3)	455-474	2008	1-1	A
317	Efendigil T, Önüt S, Kongar E	A holistic approach for selecting a third-party reverse logistics provider in the presence of vagueness	Computers & Industrial Engineering	54(2)	269-287	2008	1-3	B
318	Gou Q, Liang L, Huang Z, Xu C	A joint inventory model for an open-loop reverse supply chain	International Journal of Production Economics	116(1)	28-42	2008	2-2	C
319	Demirel NÖ, Gökçen H	A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	39(11)	1197-1206	2008	1-1	A
320	Mansour S, Zarei M	A multi-period reverse logistics optimisation model for end-of-life vehicles recovery based on EU Directive	International Journal of Computer Integrated Manufacturing	21(7)	764-777	2008	1-1	A
321	Konstantaras I, Papachristos S	A note on: developing an exact solution for an inventory system with product recovery	International Journal of Production Economics	111(2)	707-712	2008	2-2	C
322	Wikner J, Tang O	A structural framework for closed-loop supply chains	The International Journal of Logistics Management	19(3)	344-366	2008	1-8	D
323	Chan FTS, Chan HK	A survey on reverse logistics system of mobile phone industry in Hong Kong	Management Decision	46(5)	702-708	2008	1-4	B

324	Kannan G, Haq A, Sasikumar P	An application of the Analytical Hierarchy Process and Fuzzy Analytical Hierarchy Process in the selection of collecting centre location for the reverse logistics Multicriteria Decision-Making supply chain model	International Journal of Management and Decision Making	9(4)	350-365	2008	1-1	A
325	Miemczyk J	An exploration of institutional constraints on developing end-of-life product recovery capabilities	International Journal of Production Economics	115(2)	272-282	2008	1-8	B
326	Li X, Olorunniwo F	An exploration of reverse logistics practices in three companies	Supply Chain Management: An International Journal	13(5)	381-386	2008	1-4	B
327	Shankar R, Ravi V, Tiwari MK	Analysis of interaction among variables of reverse logistics: a System Dynamics approach	International Journal of Logistics Systems and Management	4(1)	1-20	2008	1-4	B
328	Fernandez I, Kekale T	Better models with Delphi and Analytic Hierarchy Process approaches: the case of Reverse Logistics	International Journal of Logistics Systems and Management	4(3)	282-296	2008	1-4	B
329	Mitra S, Webster S	Competition in remanufacturing and the effects of government subsidies	International Journal of Production Economics	111(2)	287-298	2008	1-5	D
330	Flygansvør BM, Gadde LE, Haugland SA	Coordinated action in reverse distribution systems	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	38(1)	5-20	2008	1-4	B
331	Kumar S, Putnam V	Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors	International Journal of Production Economics	115(2)	305-315	2008	1-8	B
332	Chandiran P, Rao KSP	Design of reverse and forward supply chain network: a case study	International Journal of Logistics Systems and Management	4(5)	574-595	2008	1-1	B
333	de Figueiredo JN, Mayerle SF	Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	44(5)	731-752	2008	1-1	A
334	Marsillac EL	Environmental impacts on reverse logistics and green supply chains: similarities and integration	International Journal of Logistics Systems and Management	4(4)	411-422	2008	1-4	B
335	Tuzkaya G, Gulsun B	Evaluating centralized return centers in a reverse logistics network: An integrated fuzzy multi-criteria decision approach	International Journal of Environmental Science and Technology	5(3)	339-352	2008	1-1	A
336	Queiruga D, Walther G, Gonzalez-Benito J, Spengler T	Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain	Waste Management	28(1)	181-190	2008	1-4	B
337	Skinner LR, Bryant PT, Richey RG	Examining the impact of reverse logistics disposition strategies	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	38(7)	518-539	2008	1-4	B
338	Zhou Y, Wang S	Generic model of reverse logistics network design	Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology	8(3)	71-78	2008	1-1	A
339	Zhu Q, Sarkis J, Lai KH	Green supply chain management implications for "closing the loop"	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	44(1)	1-18	2008	1-8	B
340	Sheu JB	Green supply chain management, reverse logistics and nuclear power generation	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	44(1)	19-46	2008	1-1	A
341	Chung CJ, Wee HM	Green-component life-cycle value on design and reverse manufacturing in semi-closed supply chain	International Journal of Production Economics	113(2)	528-545	2008	2-2	C
342	Banomyong R, Veerakachen V, Supatn N	Implementing leagility in reverse logistics channels	International Journal of Logistics: Research and Applications	11(1)	31-47	2008	1-8	B
343	Östlin J, Sundin E, Björkman M	Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing	International Journal of Production Economics	115(2)	336-348	2008	1-7	D
344	de la Fuente MV, Ros L, Cardós M	Integrating Forward and Reverse Supply Chains: Application to a metal-mechanic company	International Journal of Production Economics	111(2)	244-260	2008	1-1	A

345	Aras N, Aksent D	Locating collection centers for distance- and incentive-dependent returns	International Journal of Production Economics	111(2)	316-333	2008	1-1	A
346	Aras N, Aksent D, Tanuğur AG	Locating collection centers for incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles	European Journal of Operational Research	191(3)	1223-40	2008	1-1	A
347	Barba-Gutiérrez Y, Adenso-Díaz B, Gupta SM	Lot sizing in reverse MRP for scheduling disassembly	International Journal of Production Economics	111(2)	741-51	2008	2-1	E
348	Krikke H, le Blanc I, van Krieken M, Fleuren H	Low-frequency collection of materials disassembled from end-of-life vehicles: On the value of on-line monitoring in optimizing route planning	International Journal of Production Economics	111(2)	209-228	2008	1-2	D
349	Teunter R, Kaparis K, Tang O	Multi-product economic lot scheduling problem with separate production lines for manufacturing and remanufacturing	European Journal of Operational Research	191(3)	1241-1253	2008	2-1	C
350	Srivastava SK	Network design for reverse logistics	Omega	36(4)	535-548	2008	1-1	A
351	Tagaras G, Zikopoulos C	Optimal location and value of timely sorting of used items in a remanufacturing supply chain with multiple collection sites	International Journal of Production Economics	115(2)	424-432	2008	1-1	D
352	Rubio S, Corominas A	Optimal manufacturing-remanufacturing policies in a lean production environment	Computers & Industrial Engineering	55(1)	234-242	2008	2-2	C
353	Chung SL, Wee HM, Yang PC	Optimal policy for a closed-loop supply chain inventory system with remanufacturing	Mathematical and Computer Modelling	48(5-6)	867-881	2008	2-2	C
354	Amaro ACS, Barbosa-Póvoa APFD	Planning and scheduling of industrial supply chains with reverse flows: A real pharmaceutical case-study	Computers & Chemical Engineering	32(11)	2606-2625	2008	1-1	A
355	Gu QL, Ji JH, Gao TG	Pricing management for a closed-loop supply chain	Journal of Revenue and Pricing Management	7	45-60	2008	1-5	C
356	Kusumastuti RD, Piplani R, Lim GH	Redesigning closed-loop service network at a computer manufacturer: A case study	International Journal of Production Economics	111(2)	244-260	2008	1-1	A
357	Barker TJ, Zabinsky ZB	Reverse logistics network design: a conceptual framework for decision making	International Journal of Sustainable Engineering	1(4)	250-260	2008	1-6	E
358	Hanafi J, Kara S, Kaebnick H	Reverse logistics strategies for end-of-life products	The International Journal of Logistics Management	19(3)	360-377	2008	1-1	B
359	Ravi V, Shankar R, Tiwari MK	Selection of a reverse logistics project for end-of-life computers: ANP and goal programming approach	International Journal of Production Research	46(17)	4849-4870	2008	1-3	B
360	Zuidwijk R, Krikke H	Strategic response to EEE returns: Product eco-design or new recovery processes?	European Journal of Operational Research	191(3)	1206-1222	2008	1-6	B
361	Georgiadis P, Besiou M	Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: a system dynamics approach	Journal of Cleaner Production	16(15)	1665-1678	2008	1-4	D
362	Min H, Ko HJ	The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers	International Journal of Production Economics	113(1)	176-192	2008	1-1	A
363	El Saadany AMA, Jaber MY	The EOQ repair and waste disposal model with switching costs	Computers & Industrial Engineering	55(1)	219-233	2008	2-2	C
364	Srivastava S	Value recovery network design for product returns	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	38(4)	311-331	2008	1-1	A
365	Gupta A, Evans GW	A goal programming model for the operation of closed-loop supply chains	Engineering Optimization	41(8)	713-735	2009	1-4	A
366	Sasikumar P, Kannan G, Haq AN	A heuristic based approach to vehicle routing model for Third Party Reverse Logistics provider	International Journal of Services Technology and Management	12(1)	106-125	2009	1-2	A
367	Kannan G, Pokharel S, Kumar PS	A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS for the selection of reverse logistics provider	Resources, Conservation and Recycling	54(1)	28-36	2009	1-3	B

368	Li JGM, Zhu Y	A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing	International Journal of Production Economics	117(2)	286–301	2009	2–1	C
369	Nikolaidis Y	A modeling framework for the acquisition and remanufacturing of used products	International Journal of Sustainable Engineering	2(3)	154–170	2009	1–7	D
370	Pishvae MS, Jolai F, Razmi J	A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design	Journal of Manufacturing Systems	28(4)	107–114	2009	1–1	A
371	Salema MIG, Barbosa Póvoa AP, Q. Novais AQ	A strategic and tactical model for closed-loop supply chains	OR Spektrum	31(3)	573–599	2009	1–1	A
372	Liu N, Kim Y, Hwang H	An optimal operating policy for the production system with rework	Computers & Industrial Engineering	56(3)	874–887	2009	2–2	C
373	Mitra S	Analysis of a two-echelon inventory system with returns	Omega	37(1)	106–115	2009	2–2	C
374	Kannan G, Haq AN, Devika M	Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation	International Journal of Production Research	47(5)	1175–1200	2009	1–1	C
375	Pan ZD, Tang JF, Liu O	Capacitated dynamic lot sizing problems in closed-loop supply chain	European Journal of Operational Research	198(3)	810–821	2009	2–2	C
376	Dehghanian F, Mansour S	Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm	Resources, Conservation and Recycling	53(10)	559–570	2009	1–1	A
377	Lee CKM, Chan TM	Development of RFID-based reverse logistics system	Expert Systems with Applications	36(5)	9299–9307	2009	1–1	A
378	Huang X, Yan N, Qiu R	Dynamic models of closed-loop supply chain and robust H_{∞} control strategies	International Journal of Production Research	47(9)	2279–2300	2009	2–3	D
379	Lee DH, Dong M	Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	45(1)	61–71	2009	1–1	A
380	Kannan G	Fuzzy approach for the selection of third party reverse logistics provider	Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics	21(3)	397–416	2009	1–3	B
381	Teunter R, Tang O, Kaparis K	Heuristics for the economic lot scheduling problem with returns	International Journal of Production Economics	118(1)	323–330	2009	2–1	C
382	de Brito MP, van der Laan EA	Inventory control with product returns: the impact of imperfect information	European Journal of Operational Research	194(1)	85–101	2009	2–1	C
383	Francas D, Minner S	Manufacturing network configuration in supply chains with product recovery	Omega	37(4)	757–769	2009	1–1	A
384	Pochampally KK, Gupta SM, Govindan K	Metrics for performance measurement of a reverse/closed-loop supply chain	International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling	1(1)	8 – 32	2009	1–4	A
385	Kannan G, Murugesan P, Senthil P, Haq AN	Multicriteria group decision making for the third party reverse logistics service provider in the supply chain model using fuzzy TOPSIS for transportation services	International Journal of Services Technology and Management	11(1)	162–181	2009	1–3	B
386	Lee JE, Gen M, Rhee KG	Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm	Computers & Industrial Engineering	56(3)	951–964	2009	1–1	A
387	Ordoobadi SM	Outsourcing reverse logistics and remanufacturing functions: a conceptual strategic model	Management Research News	32(9)	831–845	2009	1–3	B
388	Kumar S, Dieveney E, Dieveney A	Reverse logistic process control measures for the pharmaceutical industry supply chain	International Journal of Productivity and Performance Management	58(2)	188–204	2009	1–4	B
389	Nunes KRA, Mahler CF, Valle RA	Reverse logistics in the Brazilian construction industry	Journal of Environmental Management	90(12)	3717–3720	2009	3	B
390	Lau KH, Wang Y	Reverse logistics in the electronic industry of China: a case study	Supply Chain Management: An International Journal	14(6)	447 – 465	2009	1–4	B
391	Cruz–Rivera R, Ertel J	Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico	European Journal of Operational Research	196(3)	930–939	2009	1–1	A

392	Mutha A, Pokharel S	Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules	Computers & Industrial Engineering	56(1)	334–346	2009	1–1	A
393	Amaro ACS, Barbosa-Póvoa APFD	The effect of uncertainty on the optimal closed-loop supply chain planning under different partnerships structure	Computers & Chemical Engineering	33(12)	2144–2158	2009	2–3	A
394	Guide Jr. VDR, Van Wassenhove LN	The evolution of closed-loop supply chain research	Operations Research	57(1)	10–18	2009	3	D
395	Yang GF, Wang ZP, Li XQ	The optimization of the closed-loop supply chain network	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	45(1)	16–28	2009	1–1	D
396	Ketzenberg M	The value of information in a capacitated closed loop supply chain	European Journal of Operational Research	198(2)	491–503	2009	2–3	D
397	Tsai WH, Hung SJ	Treatment and recycling system optimization with activity-based costing in WEEE reverse logistics management: An environmental supply chain perspective	International Journal of Production Research	47(19)	5391–5420	2009	1–3	E
398	Hsu HS, Alexander CA, Zhu Z	Understanding the reverse logistics operations of a retailer: a pilot study	Industrial Management & Data Systems	109(4)	515–531	2009	1–4	B
399	Kim H, Yang J, Lee KD	Vehicle routing in reverse logistics for recycling end-of-life consumer electronic goods in South Korea	Transportation Research Part D: Transport and Environment	14(5)	291–299	2009	1–2	A
400	Wang HF, Hsu HW	A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm	Computers & Operations Research	37(2)	376–389	2010	1–1	A
401	Uster H, Easwaran G	A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions	IIE Transactions	42(11)	779–792	2010	1–1	A
402	Dowlatshahi S	A cost-benefit analysis for the design and implementation of reverse logistics systems: case studies approach	International Journal of Production Research	48(5)	1361–1380	2010	1–4	B
403	Kannan G, Sasikumar P, Devika K	A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling	Applied Mathematical Modelling	34(3)	655–670	2010	1–1	A
404	Pishvae MS, Farahani RZ, Dullaert W	A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design	Computers & Operations Research	37(6)	1100–1112	2010	1–1	A
405	Melacini M, Salgaro A, Brognoli D	A model for management of WEEE reverse logistics	International Journal of Logistics Systems and Management	7(1)	1–18	2010	1–1	B
406	Sasikumar P, Kannan G, Ha A	A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery—a case of truck tire remanufacturing	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	49(9)	1223–1234	2010	1–1	E
407	de la Fuente MV, Ros L, Ortiz A	A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media	Resources, Conservation and Recycling	66	702–710	2010	1–2	B
408	Saen RF	A new model for selecting third-party reverse logistics providers in the presence of multiple dual-role factors	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	46(1–4)	405–410	2010	1–3	B
409	El Saadany AMA, Jaber MY	A production/remanufacturing inventory model with price and quality dependant return rate	Computers & Industrial Engineering	58(3)	352–362	2010	2–2	C
410	Janse BJ, Schuur P, de Brito MP	A reverse logistics diagnostic tool: the case of the consumer electronics industry	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	47(5)	495–513	2010	1–4	B
411	El-Sayed M, Afia N, El-Kharbotly A	A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk	Computers & Industrial Engineering	58(3)	423–431	2010	1–1	A
412	Kara SS, Onut S	A two-stage stochastic and robust programming approach to strategic planning of a reverse supply network: The case of paper recycling	Expert Systems with Applications	37(9)	6129–6137	2010	1–1	A

413	Weeks K, Gao HM, Alidaec B, Rana DS	An empirical study of impacts of production mix, product route efficiencies on operations performance and profitability: a reverse logistics approach	International Journal of Production Research	48(4)	1087–1104	2010	1–4	B
414	Achillas C, Vlachokostas C, Moussiopoulos N, Banias G	Decision support system for the optimal location of electrical and electronic waste treatment plants: A case study in Greece	Waste Management	30(5)	870–879	2010	1–1	A
415	de la Fuente MV, Ros L, Ortiz A	Enterprise modelling methodology for forward and reverse supply chain flows integration	Computers in Industry	61(7)	702–710	2010	1–1	B
416	Georgiadis P, Besiou M	Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: A system dynamics analysis	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	47(5)	475–493	2010	1–4	A
417	Erol I, Velioglu MN, Serifoglu FS, Büyükoçkan G, Aras N, Çakar ND, Korugan A	Exploring reverse supply chain management practices in Turkey	Supply Chain Management: An International Journal	15(1)	43 – 54	2010	1–4	B
418	Neto JQF, Walther G, Bloemhof J, van Nunen JAE, Spengler T	From closed-loop to sustainable supply chains: The WEEE case	International Journal of Production Research	48(15)	4463–4481	2010	1–4	E
419	Trappey AJC, Trappey CV, Wu CR	Genetic algorithm dynamic performance evaluation for RFID reverse logistic management	Expert Systems with Applications	37(11)	7329–7335	2010	1–4	B
420	Antai I, Mutshinda CM	Health status assessment using reverse supply chain data	Management Research Review	33(2)	111–122	2010	1–4	B
421	Hans C, Hribernik KA, Thoben KD	Improving reverse logistics process using item-level product life cycle management	International Journal of Product Lifecycle Management	4(4)	338–359	2010	1–8	B
422	Kaya O	Incentive and production decisions for remanufacturing operations	European Journal of Operational Research	201(2)	442–453	2010	1–7	D
423	Olorunniwo FO, Li X	Information sharing and collaboration practices in reverse logistics	Supply Chain Management: An International Journal	15(6)	454–462	2010	1–4	B
424	Nenes G, Panagiotidou S, Dekker R	Inventory control policies for inspection and remanufacturing of returns: A case study	International Journal of Production Economics	125(2)	300–312	2010	2–2	C
425	Yuan KF, Gao Y	Inventory decision-making models for a closed-loop supply chain system	International Journal of Production Research	48(20)	6155–6187	2010	2–2	C
426	Qin Z, Ji X	Logistics network design for product recovery in fuzzy environment	European Journal of Operational Research	202(2)	479–490	2010	1–1	A
427	Konstantaras I, Skouri K, Jaber MY	Lot sizing for a recoverable product with inspection and sorting	Computers & Industrial Engineering	58(3)	452–462	2010	2–2	C
428	Konstantaras I, Skouri K	Lot sizing for a single product recovery system with variable setup numbers	European Journal of Operational Research	203(2)	326–335	2010	2–2	C
429	Ferrer G, Swaminathan J	Managing new and differentiated remanufactured products	European Journal of Operational Research	203(2)	370–379	2010	1–5	D
430	Subramanian P, Ramkumar N, Narendran T	Mathematical model for multi-echelon, multi-product, single time-period closed loop supply chain	International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling	2(3–4)	216–236	2010	1–1	A
431	Sinha S, Shankar R, Taneerananon P	Modelling and case study of reverse logistics for construction aggregates	International Journal of Logistics Systems and Management	6(1)	39–59	2010	1–1	B
432	Denisel M, Ferguson M, Souza GC	Multiperiod remanufacturing planning with uncertain quality of inputs	IEEE Transactions on Engineering Management	57(3)	394–404	2010	2–3	D
433	Wongthatsanakorn W, Realf MJ, Ammons JC	Multi-time scale Markov decision process approach to strategic network growth of reverse supply chains	Omega	38(1–2)	20–32	2010	1–7	D
434	Gamberini R, Gebenini E, Manzini R, Ziveri A	On the integration of planning and environmental impact assessment for a WEEE transportation network – a case study	Resources, Conservation and Recycling	54(11)	937–51	2010	1–4	A
435	Galbreth MR, Blackburn JD	Optimal acquisition quantities in remanufacturing with condition uncertainty	Production and Operations Management	19(1)	61–69	2010	1–7	C

436	Shulman JD, Coughlan AT, Savaskan RC	Optimal reverse channel structure for consumer product returns	Marketing Science	29(6)	1071–1085	2010	1–1	D
437	Achillas C, Vlachokostas C, Aidonis D, Moussiopoulos N, Iakovou E, Banias G	Optimising reverse logistics network to support policy-making in the case of Electrical and Electronic Equipment	Waste Management	30(12)	2592–2600	2010	1–1	A
438	Cheng YH, Lee F	Outsourcing reverse logistics of high-tech manufacturing firms by using a systematic decision-making approach: TFT-LCD sector in Taiwan	Industrial Marketing Management	39(7)	1111–1119	2010	1–3	B
439	Wang HF, Hsu HW	Resolution of an uncertain closed-loop logistics model: An application to fuzzy linear programs with risk analysis	Journal of Environmental Management	91(11)	2148–2162	2010	1–1	A
440	Sarkis J, Helms MM, Hervani AA	Reverse logistics and social sustainability	Corporate Social Responsibility and Environmental Management	17(6)	337–354	2010	1–4	B
441	Jack EP, Powers TL, Skinner L	Reverse logistics capabilities: antecedents and cost savings	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	40(3)	228–246	2010	1–4	B
442	Pishvaei MS, Kianfar K, Karimi B	Reverse logistics network design using simulated annealing	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	47(1)	269–281	2010	1–1	A
443	Tan AWK, Hosie P	Reverse logistics operations in Singapore to support Asia Pacific regions	International Journal of Electronic Customer Relationship Management	4(2)	196 – 208	2010	1–8	B
444	Yang PC, Wee HM, Chung SL, Ho PC	Sequential and global optimization for a closed-loop deteriorating inventory supply chain	Mathematical and Computer Modelling	52(1–2)	161–176	2010	2–2	C
445	Salema MIG, Barbosa-Povoa AP, Novais AQ	Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework	European Journal of Operational Research	203(2)	336–349	2010	1–1	A
446	Jayaraman V, Baker T, Lee YJ	Strategic end-of-life management of electronic assembly product recovery in sustainable supply chain systems	International Journal of Operational Research	7(1)	54–73	2010	1–4	A
447	Lee DH, Dong M, Bian W	The design of sustainable logistics network under uncertainty	International Journal of Production Economics	128(1)	159–166	2010	1–1	A
448	Chen KC, Huang SH, Lian IW	The development and prospects of the end-of-life vehicle recycling system in Taiwan	Waste Management	30(8–9)	1661–1669	2010	1–4	A
449	Piñeyro P, Viera O	The economic lot-sizing problem with remanufacturing and one-way substitution	International Journal of Production Economics	124(2)	482–488	2010	2–1	C
450	Geyer R	The economics of cell phone reuse and recycling	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	47(5)	515–525	2010	1–6	D
451	Hellström D, Johansson O	The impact of control strategies on the management of returnable transport items	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	46(6)	1128–1139	2010	1–2	C
452	Georgiadis P, Athanasiou E	The impact of two-product joint lifecycles on capacity planning of remanufacturing networks	European Journal of Operational Research	202(2)	420–433	2010	2–1	D
453	Guide Jr. VDR, Li J	The potential for cannibalization of new products sales by remanufactured products	Decision Sciences	41(3)	547–572	2010	1–5	D
454	Dowlatshahi S	The role of transportation in the design and implementation of reverse logistics systems	International Journal of Production Research	48(14,15)	4199–4215	2010	1–2	B
455	Parlikad AK, McFarlane DC	Value of information in product recovery decisions: a Bayesian approach	International Journal of Sustainable Engineering	3(2)	106–120	2010	1–4	D
456	Zhang J, Liu X, Tu YL	A capacitated production planning problem for closed-loop supply chain with remanufacturing	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	54(5)	757–766	2011	2–1	D

457	Saen RF	A decision model for selecting third-party reverse logistics providers in the presence of both dual-role factors and imprecise data	Asia-Pacific Journal of Operational Research	28(2)	239-254	2011	1-3	B
458	Alimoradi A, Yussuf RM, Zulkifli RM	A hybrid model for remanufacturing facility location problem in a closed-loop supply chain	International Journal of Sustainable Engineering	4(1)	16-23	2011	1-1	A
459	Wilcox W, Horvath PA, Griffis SE, Autry CW	A Markov model of liquidity effects in reverse logistics processes: The effects of random volume and passage	International Journal of Production Economics	129(1)	86-101	2011	1-5	B
460	Tuzkaya G, Gülsün B, Onsel S	A methodology for the strategic design of reverse logistics networks and its application in the Turkish white goods industry	International Journal of Production Research	49(15)	4543-71	2011	1-1	A
461	Barker TJ, Zabinsky ZB	A multicriteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process	Omega	39(5)	558-573	2011	1-1	A
462	Azadi M, Saen RF	A new chance-constrained data envelopment analysis for selecting third-party reverse logistics providers in the existence of dual-role factors	Expert Systems with Applications	38(10)	12231-12236	2011	1-3	B
463	Feng Y, Viswanathan S	A new lot-sizing heuristic for manufacturing systems with product recovery	International Journal of Production Economics	133(1)	432-438	2011	2-2	C
464	Schulz T	A new silver-meal based heuristic for the single-item dynamic lot sizing problem with returns and remanufacturing	International Journal of Production Research	49(9)	2519-2533	2011	2-1	C
465	Lambert S, Riopel D, Abdul-Kader W	A reverse logistics decisions conceptual framework	Computers & Industrial Engineering	61(3)	561-581	2011	3	C
466	Pishvae MS, Rabbani M, Torabi SA	A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty	Applied Mathematical Modelling	35(2)	637-649	2011	1-1	A
467	Baenas JMH, de Castro R, Battistelle RAG, Junior JAG	A study of reverse logistics flow management in vehicle battery industries in the midwest of the state of São Paulo (Brazil)	Journal of Cleaner Production	19(2-3)	168-172	2011	3	B
468	Kumar VW, Chan FTS	A superiority search and optimisation algorithm to solve RFID and an environmental factor embedded closed loop logistics model	International Journal of Production Research	49(16)	4807-4831	2011	1-4	A
469	Toyasaki F, Boyaci T, Verter V	An analysis of monopolistic and competitive take-back schemes for WEEE recycling	Production and Operations Management	20(6)	805-823	2011	1-1	D
470	Jaber MY, El Saadany AMA	An economic production and remanufacturing model with learning effects	International Journal of Production Economics	131(1)	115-127	2011	2-2	C
471	Zhang YM, Huang GH, He L	An inexact reverse logistics model for municipal solid waste management systems	Journal of Environmental Management	92(3)	522-530	2011	1-1	A
472	Hsueh CF	An inventory control model with consideration of remanufacturing and product life cycle	International Journal of Production Economics	133(2)	645-652	2011	2-2	C
473	Ramos TRP, Oliveira RC	Delimitation of service areas in reverse logistics networks with multiple depots	Journal of the Operational Research Society	62(7)	1198-1210	2011	1-2	D
474	Zarandi MHF, Sisakht AH, Davari S	Design of a closed-loop supply chain (CLSC) model using an interactive fuzzy goal programming	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	56(5)	809-821	2011	1-1	A
475	Mar-Ortiz J, Adenso-Diaz B, Gonzalez-Velarde JL	Design of a recovery network for WEEE collection: the case of Galicia, Spain	Journal of the Operational Research Society	62(8)	1471-1484	2011	1-2	A
476	El korch A, Millet D	Designing a sustainable reverse logistics channel: the 18 generic structures framework	Journal of Cleaner Production	19(6-7)	588-597	2011	1-1	A
477	Gobbi C	Designing the reverse supply chain: the impact of the product residual value	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	41(8)	768-796	2011	1-4	B

478	Hong IH, Ke JS	Determining advanced recycling fees and subsidies in “E-scrap” reverse supply chains	Journal of Environmental Management	92(6)	1495–1502	2011	1–8	D
479	Azadi M, Saen RF	Developing an output-oriented super slacks-based measure model with an application to third-party reverse logistics providers	Journal of Multi-Criteria Decision Analysis	18(5–6)	267–277	2011	1–3	B
480	Hazen BT, Cegielski C, Hanna JB	Diffusion of green supply chain management: Examining perceived quality of green reverse logistics	The International Journal of Logistics Management	22(3)	373–389	2011	1–5	B
481	Eltayeb TK, Zailani SHM	Drivers on the reverse logistics: evidence from Malaysian certified companies	International Journal of Logistics Systems and Management	10(4)	375 – 397	2011	1–4	B
482	Genchev SE, Richey RG, Gabler CB	Evaluating reverse logistics programs: a suggested process formalization	International Journal of Logistics Management	22(2)	242–263	2011	1–4	B
483	Ravi V, Shankar R, Tripathi NK	Evaluation of market scenarios in automobile reverse logistics: a system dynamics approach	International Journal of Logistics Systems and Management	10(4)	437–460	2011	1–4	B
484	Krikke H	Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case study in copiers	Resources, Conservation and Recycling	55(12)	1196–1205	2011	1–4	A
485	Sasikumar P, Haq AN	Integration of closed loop distribution supply chain network and 3PRLP selection for the case of battery recycling	International Journal of Production Research	49(11)	3363–3385	2011	1–3	A
486	Shulman JD, Coughlan A, Savaskan RC	Managing consumer returns in a competitive environment	Management science	57(2)	347–362	2011	1–7	D
487	Mondragon AEC, Lalwani C, Mondragon CEC	Measures for auditing performance and integration in closed-loop supply chains	Supply Chain Management: An International Journal	16(1)	43 – 56	2011	1–4	B
488	Gomes MI, Barbosa-Póvoa AP, Novais AQ	Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal	Waste Management	31(7)	1645–1660	2011	1–1	A
489	Faccio M, Persona A, Sgarbossa F, Zanin G	Multi-stage supply network design in case of reverse flows: a closed-loop approach	International Journal of Operational Research	12(2)	157–191	2011	1–1	A
490	Paksoy T, Bektaş T, Özceylan E	Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	47(4)	532–546	2011	1–4	A
491	Zhou X, Tao Z, Chao X	Optimal control of inventory systems with multiple types of remanufacturable products	Manufacturing & Service Operations Management	13(1)	20–34	2011	2–2	C
492	Zhou SX, Yu Y	Optimal product acquisition, pricing, and inventory management for systems with remanufacturing	Operations Research	59(2)	514 – 521	2011	1–5	C
493	Shi J, Zhang G, Sha J	Optimal production and pricing policy for a closed loop system	Resources, Conservation and Recycling	55(6)	639–647	2011	1–5	D
494	Shi J, Zhang G, Sha J	Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return	Computers & Operations Research	38(3)	641–650	2011	2–1	D
495	Wang J, Zhao J, Wang X	Optimum policy in hybrid manufacturing/remanufacturing system	Computers & Industrial Engineering	60(3)	411–419	2011	2–1	C
496	Qiaolun G, Jianhua J, Tiegang G	Pricing decisions for reverse supply chains	Kybernetes	40(5/6)	831–841	2011	1–2	※
497	Vadde S, Zeid A, Kamarthi SV	Pricing decisions in a multi-criteria setting for product recovery facilities	Omega	39(2)	186–193	2011	1–5	D
498	Wei J, Zhao J	Pricing decisions with retail competition in a fuzzy closed-loop supply chain	Expert Systems with Applications	38(9)	11209–11216	2011	1–5	D
499	Liu H, Zhang Q, Wang W	Research on location-routing problem of reverse logistics with grey recycling demands based on PSO	Grey Systems: Theory and Application	1(1)	97–104	2011	1–2	A
500	Bernon M, Rossi S, Cullen J.	Retail reverse logistics: a call and grounding framework for research	International Journal of Physical Distribution & Logistics management	41(5)	484–510	2011	3	B
501	Govindan K, Murugesan P	Selection of third-party reverse logistics provider using fuzzy extent analysis	Benchmarking: An International Journal	18(1)	149 – 167	2011	1–3	B

502	Chung CJ, Wee HM	Short life-cycle deteriorating product remanufacturing in a green supply chain inventory control system	International Journal of Production Economics	129(1)	195–203	2011	2–2	C
503	Hazen BT	Strategic reverse logistics disposition decisions: from theory to practice	International Journal of Logistics Systems and Management	10(3)	275–292	2011	1–8	B
504	Abraham N	The apparel aftermarket in India – a case study focusing on reverse logistics	Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal	15(2)	211–227	2011	1–5	B
505	Alamri AA	Theory and methodology on the global optimal solution to a General Reverse Logistics Inventory Model for deteriorating items and time-varying rates	Computers & Industrial Engineering	60(2)	236–247	2011	2–2	C
506	Kannan D, Diabat A, Alrefaei M, Govindan K, Yong G	A carbon footprint based reverse logistics network design model	Resources, Conservation and Recycling	67	75–79	2012	1–1	A
507	Dowlatshahi S	A framework for the role of warehousing in reverse logistics	International Journal of Production Research	50(5)	1265–1277	2012	1–4	B
508	Chan FTS, Chan HK, Jain V	A framework of reverse logistics for the automobile industry	International Journal of Production Research	50(5)	1318–1331	2012	1–4	B
509	Zhang ZH, Jiang H, Pan XZ	A Lagrangian relaxation based approach for the capacitated lot sizing problem in closed-loop supply chain	International Journal of Production Economics	140(1)	249–255	2012	1–1	A
510	Pokharel S, Liang Y	A model to evaluate acquisition price and quantity of used products for remanufacturing	International Journal of Production Economics	138(1)	170–176	2012	1–7	C
511	Mishra N, Kumar V, Chan FTS	A multi-agent architecture for reverse logistics in a green supply chain	International Journal of Production Research	50(9)	2396–2406	2012	1–4	A
512	Nenes G, Nikolaidis Y	A multi-period model for managing used product returns	International Journal of Production Research	50(5)	1360–1376	2012	1–4	D
513	Amin SH, Zhang G	A proposed mathematical model for closed-loop network configuration based on product life cycle	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	58(5)	791–801	2012	1–1	A
514	Shi W, Min KJ	A study of product weight and collection rate in closed-loop supply chains with recycling	IEEE Transactions on Engineering Management	60(2)	409 – 423	2012	1–7	D
515	Zeballos LJ, Gomes MI, Barbosa-Povoa AP, Novais AQ	Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains	Computers & Chemical Engineering	47	237–247	2012	1–1	A
516	Quariguasi-Frota-Neto J, Bloemhof J	An analysis of the eco-efficiency of remanufactured personal computers and mobile phones	Production and Operations Management	21(1)	101–114	2012	1–4	D
517	Adenso-Díaz B, Moreno P, Gutiérrez E, Lozano S	An analysis of the main factors affecting bullwhip in reverse supply chains	International Journal of Production Economics	135(2)	917–928	2012	2–3	C
518	Amin SH, Zhang G	An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach	Expert Systems with Applications	39(8)	6782–6791	2012	1–1	A
519	Govindan K, Palaniappan M, Zhu Q, Kannan D	Analysis of third party reverse logistics provider using interpretive structural modeling	International Journal of Production Economics	140(1)	204–211	2012	1–3	B
520	Kissling R, Fitzpatrick C, Boeni H, Luepschen C, Andrew S, Dickenson J	Definition of generic re-use operating models for electrical and electronic equipment	Resources, Conservation and Recycling	65	85–99	2012	1–8	B
521	Das K, Chowdhury AH	Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning	International Journal of Production Economics	135(1)	209–221	2012	1–1	D
522	Minner S, Kiesmüller GP	Dynamic product acquisition in closed loop supply chains	International Journal of Production Research	50(11)	2836–2851	2012	1–7	D
523	Ravi V	Evaluating overall quality of recycling of e-waste from end-of-life computers	Journal of Cleaner Production	20(1)	145–151	2012	2–1	B
524	Rahman S, Subramanian N	Factors for implementing end-of-life computer recycling operations in reverse supply chains	International Journal of Production Economics	140(1)	239–248	2012	1–6	B

525	Ho GTS, Choy KL, Lam CHY, Wong DWC	Factors influencing implementation of reverse logistics: a survey among Hong Kong businesses	Measuring Business Excellence	16(3)	29–46	2012	1–4	B
526	Chen YM, Sheu JB, Lirn TC	Fault tolerance modeling for an e-waste recycling supply chain	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	48(5)	897–906	2012	2–2	E
527	Clotney T, Benton WC, Srivastava R	Forecasting product returns for remanufacturing operations	Decision Sciences	43(4)	589–614	2012	2–1	C
528	Nativi JJ, Lee S	Impact of RFID information-sharing strategies on a decentralized supply chain with reverse logistics operations	International Journal of Production Economics	136(2)	366–377	2012	2–2	C
529	Mitra S	Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns	Computers & Industrial Engineering	62(4)	870–879	2012	2–2	C
530	Gu QL, Gao TG	Management of two competitive closed-loop supply chains	International Journal of Sustainable Engineering	5(4)	325–337	2012	1–5	D
531	Lee CKM, Lam JSL	Managing reverse logistics to enhance sustainability of industrial marketing	Industrial Marketing Management	41(4)	589–598	2012	1–4	B
532	Hong IH, Yeh JS	Modeling closed-loop supply chains in the electronics industry: A retailer collection application	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	48(4)	817–829	2012	1–3	D
533	Özkır V, Başlıgil H	Modelling product-recovery processes in closed-loop supply-chain network design	International Journal of Production Research	50(8)	218–2233	2012	1–1	A
534	Liu H, Wang W, Zhang Q	Multi-objective location-routing problem of reverse logistics based on GRA with entropy weight	Grey Systems: Theory and Application	2(2)	249–258	2012	1–2	A
535	Alumur SA, Nickel S, Saldanha-da-Gama F, Verter V	Multi-period reverse logistics network design	European Journal of Operational Research	220(1)	67–78	2012	1–1	A
536	Zanoni S, Segerstedt A, Tang O	Multi-product economic lot scheduling problem with manufacturing and remanufacturing using a basic period policy	Computers & Industrial Engineering	62(4)	1025–1033	2012	2–1	C
537	Dat LQ, Linh DTT, Chou SY, Yu VF	Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products	Expert Systems with Applications	39(7)	6380–6387	2012	1–1	A
538	Shaik M, Abdul-Kader W	Performance measurement of reverse logistics enterprise: a comprehensive and integrated approach	Measuring Business Excellence	16(2)	23–34	2012	1–4	B
539	Wei J, Zhao J, Li Y	Pricing decisions for a closed-loop supply chain in a fuzzy environment	Asia-Pacific Journal of Operational Research	29(1)	1–30	2012	1–5	D
540	Ramírez AM	Product return and logistics knowledge: Influence on performance of the firm	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	48(6)	1137–1151	2012	1–4	B
541	Kenné JP, Dejax P, Gharbi A	Production planning of a hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain	International Journal of Production Economics	135(1)	81–93	2012	2–1	D
542	Lundin JF	Redesigning a closed-loop supply chain exposed to risks	International Journal of Production Economics	140(2)	596–60	2012	1–1	D
543	Lee YJ, Baker T, Jayaraman V	Redesigning an integrated forward–reverse logistics system for a third party service provider: an empirical study	International Journal of Production Research	50(19)	5615–5635	2012	1–1	A
544	Vahdani B, Tavakkoli-Moghaddam R, Modarres M, Baboli A	Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust–M/M/c queuing model	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	48(6)	1152–1168	2012	1–1	A
545	Hazen BT, Hall DJ, Hanna JB	Reverse logistics disposition decision-making: developing a decision framework via content analysis	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	42(3)	244–274	2012	3	B
546	Škapa R, Klapalová A	Reverse logistics in Czech companies: increasing interest in performance measurement	Management Research Review	35(8)	676–692	2012	1–4	B
547	Yan QX, Yong H, Qinli D, Stokes P	Reverse logistics network design model based on e-commerce	International Journal of Organizational Analysis	20(2)	251 – 261	2012	1–1	A

548	Alinovi A, Bottani E, Montanari R	Reverse Logistics: a stochastic EOQ-based inventory control model for mixed manufacturing/remanufacturing systems with return policies	International Journal of Production Research	50(5)	1243-1264	2012	2-2	C
549	Assavapokee T, Wongthatsanekorn W	Reverse production system infrastructure design for electronic products in the state of Texas	Computers & Industrial Engineering	62(1)	129-140	2012	1-1	A
550	Hasani A, Zegordi SH, Nikbakhsh E	Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty	International Journal of Production Research	50(16)	4649-4669	2012	1-1	A
551	Piplani R, Saraswat A	Robust optimisation approach to the design of service networks for reverse logistics	International Journal of Production Research	50(5)	1424-1437	2012	1-1	A
552	Zhang R, Zhang H, Liu B	Selection of reverse-logistics servicer for electronic products with fuzzy comprehensive evaluation method	Grey Systems: Theory and Application	2(2)	207-216	2012	1-3	B
553	Jacobs BW, Subramanian R	Sharing responsibility for product recovery across the supply chain	Production and Operations Management	21(1)	85-100	2012	1-4	D
554	Diabat A, Abdallah T, Al-Refaie A, Svetinovic D, Govindan K	Strategic closed-loop facility location problem with carbon market trading	IEEE Transactions on Engineering Management	60(2)	398 - 408	2012	1-1	A
555	Abdallah T, Diabat A, Simchi-Levi D	Sustainable supply chain design: a closed loop formulation and sensitivity analysis	Production Planning & Control	23(2-3)	120-133	2012	2-2	A
556	Chen JM, Chang CI	The co-opetitive strategy of a closed-loop supply chain with remanufacturing	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	48(2)	387-400	2012	1-5	D
557	Chen JM, Chang CI	The economics of a closed-loop supply chain with remanufacturing	Journal of the Operational Research Society	63(10)	1323-1335	2012	1-5	D
558	Keyvanshokoh E, Fattahi M, Seyed-Hosseini SM, Tavakkoli-Moghaddam R	A dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design	Applied Mathematical Modelling	37(24)	10182-10202	2013	1-1	A
559	Roghianian E, Kamandanipour K	A fuzzy-random programming for integrated closed-loop logistics network design by using priority-based genetic algorithm	International Journal of Industrial Engineering Computations	4(1)	139-154	2013	1-1	A
560	Tajik G, Azadnia AH, Ma'aram AB, Hassan SAH	A hybrid fuzzy MCDM approach for sustainable third-party reverse logistics provider selection	Advanced Materials Research	845	521-526	2013	1-3	B
561	Katharina S, Ramin S	A hybrid tabu search approach for the design of a paper recycling network	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	50	98-119	2013	1-1	A
562	Özceylan E, Paksoy T	A mixed integer programming model for a closed-loop supply-chain network	International Journal of Production Research	51(3)	718-734	2013	1-1	A
563	Amin SH, Zhang G	A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return	Applied Mathematical Modelling	37(6)	4165-4176	2013	1-1	A
564	Ramezani M, Bashiri M, Tavakkoli-Moghaddam R	A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level	Applied Mathematical Modelling	37(1-2)	328-344	2013	1-1	A
565	Kim JS, Lee DH	A restricted dynamic model for refuse collection network design in reverse logistics	Computers & Industrial Engineering	66(4)	1131-1137	2013	1-1	A
566	Nikolaou IE, Evangelinos KI, Allan S	A reverse logistics social responsibility evaluation framework based on the triple bottom line approach	Journal of Cleaner Production	56	173-184	2013	1-4	B
567	Ramezani M, Bashiri M, Tavakkoli-Moghaddam R	A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	66(5)	825-843	2013	1-1	A

568	Das D, Dutta P	A system dynamics framework for integrated reverse supply chain with three way recovery and product exchange policy	Computers & Industrial Engineering	66(4)	720–733	2013	2–3	D
569	Amin SH, Zhang G	A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty	International Journal of Production Research	51(5)	1405–1425	2013	1–1	A
570	Wang HF, Huang YS	A two-stage robust programming approach to demand-driven disassembly planning for a closed-loop supply chain system	International Journal of Production Research	51(8)	2414–2432	2013	1–7	E
571	Govindan K, Sarkis J, Palaniappan M	An analytic network process-based multicriteria decision making model for a reverse supply chain	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	68(1)	863–880	2013	1–4	B
572	Giannetti BF, Bonilla SH, Almedia CMVB	An emergy-based evaluation of a reverse logistics network for steel recycling	Journal of Cleaner Production	46	48–57	2013	1–4	A
573	Jonrinaldi, Zhang DZ	An integrated production and inventory model for a whole manufacturing supply chain involving reverse logistics with finite horizon period	Omega	41(3)	598–620	2013	2–2	C
574	Diabat A, Kannan D, Kaliyan M, Svetinovic D	An optimization model for product returns using genetic algorithms and artificial immune system	Resources, Conservation and Recycling	74	156–169	2013	1–1	A
575	Huang M, Song M, Lee LH, Ching WK	Analysis for strategy of closed-loop supply chain with dual recycling channel	International Journal of Production Economics	144(2)	510–520	2013	1–5	D
576	Veiga MM	Analysis of efficiency of waste reverse logistics for recycling	Waste Management & Research	31(10)	26–34	2013	1–4	B
577	Choi TM, Li Y, Xu L	Channel leadership, performance and coordination in closed loop supply chains	International Journal of Production Economics	146(1)	371–380	2013	1–3	D
578	Yang PC, Chung SL, Wee HM, Zahara E, Peng CY	Collaboration for a closed-loop deteriorating inventory supply chain with multi-retailer and price-sensitive demand	International Journal of Production Economics	143(2)	557–566	2013	2–2	C
579	Silva DAL, Renó GWS, Sevegnani G, Sevegnani TB, Truzzi OMS	Comparison of disposable and returnable packaging: a case study of reverse logistics in Brazil	Journal of Cleaner Production	47	377–387	2013	1–2	B
580	Cardoso SR, Barbosa-Póvoa APFD, Relvas S	Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty	European Journal of Operational Research	226(3)	436–451	2013	1–1	A
581	Soleimani H, Seyyed-Esfahani M, Shirazi MA	Designing and planning a multi-echelon multi-period multi-product closed-loop supply chain utilizing genetic algorithm	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	68(1)	917–931	2013	1–1	A
582	Lai KH, Wu SJ, Wong CWY	Did reverse logistics practices hit the triple bottom line of Chinese manufacturers?	International Journal of Production Economics	146(1)	106–117	2013	1–4	B
583	Xiong Y, Zhou Y, Li G, Chan HK, Xiong Z	Don't forget your supplier when remanufacturing	European Journal of Operational Research	230(1)	15–25	2013	1–5	D
584	Ma WM, Zhao Z, Ke H	Dual-channel closed-loop supply chain with government consumption-subsidy	European Journal of Operational Research	226(2)	221–227	2013	1–5	D
585	Chen JM, Chang CI	Dynamic pricing for new and remanufactured products in a closed-loop supply chain	International Journal of Production Economics	146(1)	153–160	2013	1–5	D
586	Bai C, Sarkis J	Flexibility in reverse logistics: a framework and evaluation approach	Journal of Cleaner Production	47	306–318	2013	1–4	B
587	Georgiadis P, Athanasiou E	Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing	European Journal of Operational Research	225(1)	44–58	2013	2–1	D
588	Krapp M, Nebel J, Sahamie R	Forecasting product returns in closed-loop supply chains	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	43(8)	614 – 637	2013	1–7	C
589	Lehr C, Thun J, Milling PM	From waste to value —a system dynamics model for strategic decision-making in closed loop supply chains	International Journal of Production Research	51(13)	4105–4116	2013	1–4	D

590	Özceylan E, Paksoy T	Fuzzy multi-objective linear programming approach for optimising a closed-loop supply chain network	International Journal of Production Research	51(8)	2443–2461	2013	1–1	A
591	Atasu A, Toktay LB, Van Wassenhove LN	How collection cost structure drives a manufacturer's reverse channel choice	Production and Operations Management	22(5)	1089–1102	2013	1–7	D
592	El Saadany AMA, Jaber MY, Bonney M	How many times to remanufacture?	International Journal of Production Economics	143(2)	598–604	2013	2–2	C
593	Huang SM, Su JCP	Impact of product proliferation on the reverse supply chain	Omega	41(3)	626–639	2013	1–5	D
594	Turrise M, Bruccoleri M, Cannella S	Impact of reverse logistics on supply chain performance	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	43(7)	564 – 585	2013	1–4	B
595	García-Rodríguez FJ, Castilla-Gutiérrez C, Bustos-Flores C	Implementation of reverse logistics as a sustainable tool for raw material purchasing in developing countries: The case of Venezuela	International Journal of Production Economics	141(2)	582–592	2013	1–4	B
596	Zerhouni H, Gayon JP, Frein Y	Influence of dependency between demands and returns in a reverse logistics system	International Journal of Production Economics	143(1)	62–71	2013	2–2	C
597	Kim E, Saghaian S, Van Oyen MP	Joint control of production, remanufacturing, and disposal activities in a hybrid manufacturing–remanufacturing system	European Journal of Operational Research	231(2)	337–348	2013	2–1	C
598	Alfonso-Lizarazo EH, Montoya-Torres JR, Gutiérrez-Franco E	Modeling reverse logistics process in the agro-industrial sector: The case of the palm oil supply chain	Applied Mathematical Modelling	37(23)	9652–9664	2013	1–1	A
599	Gofębiewski B, Trajer J, Jaros M, Winiczenko R	Modelling of the location of vehicle recycling facilities: A case study in Poland	Resources, Conservation and Recycling	80	10–20	2013	1–1	A
600	Wei J, Zhao J	Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment	Journal of Cleaner Production	41	1502–1513	2013	1–1	A
601	Vercraene S, Gayon JP	Optimal control of a production–inventory system with product returns	International Journal of Production Economics	142(2)	302–310	2013	2–2	C
602	Benedito E, Corominas A	Optimal manufacturing policy in a reverse logistic system with dependent stochastic returns and limited capacities	International Journal of Production Research	51(1)	189–201	2013	2–1	C
603	Panagiotidou S, Nenes G, Zikopoulos C	Optimal procurement and sampling decisions under stochastic yield of returns in reverse supply chains	OR Spektrum	35(1)	1–32	2013	2–3	D
604	Hu ZH, Sheu JB	Post-disaster debris reverse logistics management under psychological cost minimization	Transportation Research Part B: Methodological	55	118–141	2013	1–4	B
605	Subramanian R, Ferguson M, Toktay LB	Remanufacturing and the component commonality decision	Production and Operations Management	22(1)	36–53	2013	1–5	D
606	Guo Y, Ma J	Research on game model and complexity of retailer collecting and selling in closed-loop supply chain	Applied Mathematical Modelling	37(7)	5047–5058	2013	1–7	D
607	Krikke H, Hofenk D, Wang Y	Revealing an invisible giant: A comprehensive survey into return practices within original (closed-loop) supply chains	Resources, Conservation and Recycling	73	239–250	2013	1–7	B
608	Mafakheri F, Nasiri F	Revenue sharing coordination in reverse logistics	Journal of Cleaner Production	59	185–196	2013	1–8	D
609	Wei J, Zhao J	Reverse channel decisions for a fuzzy closed-loop supply chain	Applied Mathematical Modelling	37(3)	1502–1513	2013	1–3	D
610	Hall DJ, Huscroft JR, Hazen BT, Hanna JB	Reverse logistics goals, metrics, and challenges: perspectives from industry	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	43(9)	768–785	2013	1–4	B
611	Khor KS, Udin ZM	Reverse logistics in Malaysia: Investigating the effect of green product design and resource commitment	Resources, Conservation and Recycling	81	71–80	2013	1–4	B
612	Huscroft JR, Hazen BT, Hall DJ, Skipper JB, Hanna JB	Reverse logistics: past research, current management issues, and future directions	The International Journal of Logistics Management	24(3)	304–327	2013	3	B
613	Mahmoudzadeh M, Sadjadi SJ, Mansour S	Robust optimal dynamic production/pricing policies in a closed-loop system	Applied Mathematical Modelling	37(16–17)	8141–8161	2013	1–5	C

614	Santibanez-Gonzalez EDR, Diabat A	Solving a reverse supply chain design problem by improved Benders decomposition schemes	Computers & Industrial Engineering	66(4)	889-898	2013	1-1	A
615	Aitken J, Harrison A	Supply governance structures for reverse logistics systems	International Journal of Operations & Production Management	33(6)	745 - 764	2013	1-4	B
616	Huscroft JR, Hazen BT, Hall DJ, Hanna JB	Task-technology fit for reverse logistics performance	The International Journal of Logistics Management	24(2)	230-246	2013	1-4	B
617	Zhou Y, Xiong Y, Li G, Xiong Z, Beck M	The bright side of manufacturing-remanufacturing conflict in a decentralised closed-loop supply chain	International Journal of Production Research	51(9)	2639-2651	2013	1-5	D
618	Qiang Q, Ke K, Anderson T, Dong J	The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties	Omega	41(2)	186-194	2013	1-1	D
619	Fahimnia B, Sarkis J, Dehghanian F, Banihashemi N, Rahman S	The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: an Australian case study	Journal of Cleaner Production	59	210-225	2013	1-4	E
620	Ye F, Zhao X, Prahinski C, Li Y	The impact of institutional pressures, top managers' posture and reverse logistics on performance—Evidence from China	International Journal of Production Economics	143(1)	132-143	2013	1-4	B
621	Toyasaki F, Wakolbinger T, Kettinger W	The value of information systems for product recovery management	International Journal of Production Research	51(4)	1214-1235	2013	2-3	D
622	Mahmoudzadeh M, Mansour S, Karimi B	To develop a third-party reverse logistics network for end-of-life vehicles in Iran	Resources, Conservation and Recycling	78	1-14	2013	1-1	A
623	Bogataj M, Grubbström RW	Transportation delays in reverse logistics	International Journal of Production Economics	143(2)	395-402	2013	1-4	B
624	de Souza CDR, de Almeida D'Agosto M	Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain: An applied study of co-processing in the cement industry	Resources, Conservation and Recycling	78	15-25	2013	1-8	※
625	Dhouib D	An extension of MACBETH method for a fuzzy environment to analyze alternatives in reverse logistics for automobile tire wastes	Omega	42(1)	25-32	2014	1-4	A
626	Shaik MN, Abdul-Kader W	Comprehensive performance measurement and causal-effect decision making model for reverse logistics enterprise	Computers & Industrial Engineering	68	87-103	2014	1-4	B
627	Kim T, Glock CH, Kwon Y	A closed-loop supply chain for deteriorating products under stochastic container return times	Omega	43	30-40	2014	2-2	C
628	Temur GT, Balcilar M, Bolat B	A fuzzy expert system design for forecasting return quantity in reverse logistics network	Journal of Enterprise Information Management	27(3)	316-328	2014	2-1	B
629	Lin C, Choy KL, Ho GTS, Ng TW	A Genetic Algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations	Expert Systems with Applications	41(7)	3284-3296	2014	1-2	A
630	Zolfagharinia H, Hafezi M, Farahani RZ, Fahimnia B	A hybrid two-stock inventory control model for a reverse supply chain	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	67	141-161	2014	2-2	C
631	Kumar S	A knowledge based reliability engineering approach to manage product safety and recalls	Expert Systems with Applications	41(11)	5323-5339	2014	1-4	※
632	Raj R, Kaliraman NK, Chandra S, Chaudhary H	A production inventory model with exponential demand rate and reverse logistic	International Journal of Industrial Engineering Computations	5(4)	521-542	2014	2-2	A
633	Matar N, Jaber MY, Searcy C	A reverse logistics inventory model for plastic bottles	The International Journal of Logistics Management	25(2)	315-333	2014	2-2	C
634	Li X, Baki F, Tian P, Chaouch BA	A robust block-chain based tabu search algorithm for the dynamic lot sizing problem with product returns and remanufacturing	Omega	42(1)	75-87	2014	2-1	C

635	Senthil S, Srirangacharyulu B, Ramesh A	A robust hybrid multi-criteria decision making methodology for contractor evaluation and selection in third-party reverse logistics	Expert Systems with Applications	41(1)	50–58	2014	1–3	B
636	De Giovanni P, Zaccour G	A two-period game of a closed-loop supply chain	European Journal of Operational Research	232(1)	22–40	2014	1–3	D
637	Toyasaki F, Daniele P, Wakolbinger T	A variational inequality formulation of equilibrium models for end-of-life products with nonlinear constraints	European Journal of Operational Research	236(1)	340–350	2014	1–4	D
638	Sheu JB, Gao XQ	Alliance or no alliance—Bargaining power in competing reverse supply chains	European Journal of Operational Research	233(2)	313–325	2014	1–5	D
639	Li X, Li Y, Govindan K	An incentive model for closed-loop supply chain under EPR Law	Journal of the Operational Research Society	65(1)	88–96	2014	1–4	D
640	Roghianian E, Pazhoeshfar P	An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment by using genetic algorithm	Journal of Manufacturing Systems	33(3)	348–356	2014	1–1	A
641	Chuang C, Wang C, Zhao Y	Closed-loop supply chain models for a high-tech product under alternative reverse channel and collection cost structures	International Journal of Production Economics	156	108–123	2014	1–7	D
642	Ramezani M, Kimiagari AM, Karimi B	Closed-loop supply chain network design: A financial approach	Applied Mathematical Modelling	38(15–16)	4099–4119	2014	1–1	A
643	Bogh MB, Mikkelsen H, Wehlk S	Collection of recyclables from cubes – A case study	Socio-Economic Planning Sciences	48(2)	127–134	2014	1–2	A
644	Bulmus SC, Zhu SX, Teunter R	Competition for cores in remanufacturing	European Journal of Operational Research	233(1)	105–113	2014	1–4	D
645	Ma J, Wang H	Complexity analysis of dynamic noncooperative game models for closed-loop supply chain with product recovery	Applied Mathematical Modelling	38(23)	5562–5572	2014	1–4	D
646	Vercraene S, Gayon JP, Flapper SD	Coordination of manufacturing, remanufacturing and returns acceptance in hybrid manufacturing/remanufacturing systems	International Journal of Production Economics	148	62–70	2014	2–2	C
647	Abdulrahman MD, Gunasekaran A, Subramanian N	Critical barriers in implementing reverse logistics in the Chinese manufacturing sectors	International Journal of Production Economics	147(B)	460–471	2014	1–8	B
648	Choi JK, Fthenakis V	Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives	Journal of Cleaner Production	66	443–449	2014	2–1	※
649	Devika K, Jafarian A, Nourbakhsh V	Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques	European Journal of Operational Research	235(3)	594–615	2014	1–1	A
650	Helmrich MJR, Jans R, Den Heuvel W, Wagelmans APM	Economic lot-sizing with remanufacturing: Complexity and efficient formulations	IIE Transactions	46(1)	67–86	2014	2–1	C
651	Kumar D, Soleimani H, Kannan G	Forecasting return products in an integrated forward/reverse supply chain utilizing an ANFIS	International Journal of Applied Mathematics and Computer Science	24(3)	669–682	2014	2–3	A
652	Suyabatmaz AÇ, Altekin FT, Şahin G	Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a third-party logistics provider	Computers & Industrial Engineering	70	74–89	2014	1–1	A
653	Ylä-Mella J, Poikela K, Lehtinen U, Keiski RL, Pongrácz E	Implementation of Waste Electrical and Electronic Equipment Directive in Finland: Evaluation of the collection network and challenges of the effective WEEE management	Resources, Conservation and Recycling	86	38–46	2014	1–2	A
654	Soleimani H, Seyyed-Esfahani M, Kannan G	Incorporating risk measures in closed-loop supply chain network design	International Journal of Production Research	52(6)	1843–1867	2014	1–1	A
655	Sadjadi SJ, Soltani R, Eskandarpour A	Location based treatment activities for end of life products network design under uncertainty by a robust multi-objective memetic-based heuristic approach	Applied Soft Computing	23	215–226	2014	1–1	A

656	Ruiz-Benítez R, Ketzenberg M, van der Laan EA	Managing consumer returns in high clockspeed industries	Omega	43	54-63	2014	1-7	D
657	Ahiska SS, Kurtul E	Modeling and analysis of a product substitution strategy for a stochastic manufacturing/remanufacturing system	Computers & Industrial Engineering	72	1-11	2014	2-1	C
658	Özceylan E, Paksoy T, Bektas T	Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	61	142-164	2014	1-1	A
659	Zeballos LJ, Méndez CA, Barbosa-Póvoa AP, Novais AQ	Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand	Computers & Chemical Engineering	66	151-164	2014	1-1	A
660	Kim T, Glock CH	On the use of RFID in the management of reusable containers in closed-loop supply chains under stochastic container return quantities	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	64	12-27	2014	2-1	C
661	Cai X, Lai M, Li X, Li Y, Wu X	Optimal acquisition and production policy in a hybrid manufacturing/remanufacturing system with core acquisition at different quality levels	European Journal of Operational Research	233(2)	374-382	2014	1-7	C
662	Niknejad A, Petrovic D	Optimisation of integrated reverse logistics networks with different product recovery routes	European Journal of Operational Research	238(1)	143-154	2014	2-1	D
663	Ramos TRP, Gomes MI, Barbosa-Póvoa AP	Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns	Omega	48	60-74	2014	1-4	A
664	Kaya O, Bagci F, Turkay M	Planning of capacity, production and inventory decisions in a generic reverse supply chain under uncertain demand and returns	International Journal of Production Research	52(1)	270-282	2014	1-4	A
665	Jsená SK, Sarmah SP	Price competition and co-operation in a duopoly closed-loop supply chain	International Journal of Production Economics	156	346-360	2014	1-5	D
666	Low JSC, Lu WF, Song B	Product Structure-Based Integrated Life Cycle Analysis (PSILA): a technique for cost modelling and analysis of closed-loop production systems	Journal of Cleaner Production	70	105-117	2014	1-4	D
667	Ondemir O, Gupta SM	Quality management in product recovery using the Internet of Things: An optimization approach	Computers in Industry	65(3)	491-504	2014	2-3	D
668	Narayana SA, Elias AA, Pati RK	Reverse logistics in the pharmaceuticals industry: a systemic analysis	The International Journal of Logistics Management	25(2)	379-398	2014	1-4	B
669	Hazen BT, Huscroft J, Hall DJ, Weigel FK, Hanna JB	Reverse logistics information system success and the effect of motivation	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	44(3)	201-220	2014	1-4	B
670	Huang YC, Yang ML	Reverse logistics innovation, institutional pressures and performance	Management Research Review	37(7)	615-641	2014	1-4	B
671	Soleimani H, Govindan K	Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk	European Journal of Operational Research	237(2)	487-497	2014	1-1	A
672	Barrera MMM, Cruz-Mejia O	Reverse logistics of recovery and recycling of non-returnable beverage containers in the brewery industry: A "profitable visit" algorithm	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	44(7)	577-596	2014	1-4	B
673	Govindan K, Popiuc MN	Reverse supply chain coordination by revenue sharing contract: A case for the personal computers industry	European Journal of Operational Research	233(2)	326-336	2014	1-8	D
674	Hatefi SM, Jolai F	Robust and reliable forward-reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions	Applied Mathematical Modelling	38(9-10)	2630-2647	2014	1-1	A
675	Hong IH, Lee YT, Chang PY	Socially optimal and fund-balanced advanced recycling fees and subsidies in a competitive forward and reverse supply chain	Resources, Conservation and Recycling	82	75-85	2014	1-4	D

676	Faccio M, Persona A, Sgarbossa F, Zanin G	Sustainable SC through the complete reprocessing of end-of-life products by manufacturers: A traditional versus social responsibility company perspective	European Journal of Operational Research	233(2)	359-373	2014	1-4	A
677	Feng Z, Zhiping W, Chen Y	The equilibrium of closed-loop supply chain supernetwork with time-dependent parameters	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	64	1-11	2014	1-4	D
678	Eskandarpour M, Nikbaksh E, Zegordi SH	Variable neighborhood search for the bi-objective post-sales network design problem: A fitness landscape analysis approach	Computers & Operations Research	52(B)	300-314	2014	1-1	A
679	Bing X, de Keizer M, Bloemhof-Ruwaard JM, van der Vorst JGAJ	Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic waste	Waste Management	34(4)	719-729	2014	1-2	A
680	Xie Y, Breen L	Who cares wins? A comparative analysis of household waste medicines and batteries reverse logistics systems: The case of the NHS (UK)	Supply Chain Management: An International Journal	19(4)	455-474	2014	1-4	B
681	Hu ZH, Sheu JB, Zhao L, Lu CC	A dynamic closed-loop vehicle routing problem with uncertainty and incompatible goods	Transportation Research Part C: Emerging Technologies	55	273-297	2015	1-2	B
682	Choudhary A, Sarkar S, Settur S, Tiwari MK	A carbon market sensitive optimization model for integrated forward-reverse logistics	International Journal of Production Economics	164	433-444	2015	1-1	A
683	Diabat A, Abdallah T, Henschel A	A closed-loop location-inventory problem with spare parts consideration	Computers & Operations Research	54	245-256	2015	1-1	A
684	Cline A, LeMay S, Helms MM	A framework for reverse logistics: the case of post-consumer carpet in the US	International Journal of Commerce and Management	25(4)	466-489	2015	1-4	B
685	Garg K, Kannan D, Diabat A, Jha PC	A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design	Journal of Cleaner Production	100	297-314	2015	1-1	A
686	Gönsch J	A note on a model to evaluate acquisition price and quantity of used products for remanufacturing	International Journal of Production Economics	169	277-284	2015	1-7	C
687	He YJ	Acquisition pricing and remanufacturing decisions in a closed-loop supply chain	International Journal of Production Economics	163	48-60	2015	1-7	D
688	Avci M, Topaloglu S	An adaptive local search algorithm for vehicle routing problem with simultaneous and mixed pickups and deliveries	Computers & Industrial Engineering	83	15-29	2015	1-2	A
689	Kim JS, Lee DH	An integrated approach for collection network design, capacity planning and vehicle routing in reverse logistics	Journal of the Operational Research Society	66(1)	76-85	2015	1-1	A
690	Hazen BT, Overstreet RE, Hall DJ, Huscroft JR, Hanna JB	Antecedents to and outcomes of reverse logistics metrics	Industrial Marketing Management	46	160-170	2015	1-4	B
691	Chileshe N, Rameezdeen R, Hosseini MR, Lehmann S	Barriers to implementing reverse logistics in South Australian construction organisations	Supply Chain Management: An International Journal	20(2)	179-204	2015	1-4	B
692	Shaharudin MR, Zailani S, Tan KC	Barriers to product returns and recovery management in a developing country: investigation using multiple methods	Journal of Cleaner Production	96	220-232	2015	1-4	B
693	Khatami M, Mahootchi M, Farahani RZ	Benders' decomposition for concurrent redesign of forward and closed-loop supply chain network with demand and return uncertainties	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	79	1-21	2015	2-3	A
694	Rezapour S, Farahani RZ, Fahimnia B, Govindan K, Mansouri Y	Competitive closed-loop supply chain network design with price-dependent demands	Journal of Cleaner Production	93	251-272	2015	1-1	D
695	Schenkel M, Krikke H, Caniels MCJ, van der Laan E	Creating integral value for stakeholders in closed loop supply chains	Journal of Purchasing and Supply Management	21(3)	155-166	2015	1-4	B

696	Dai Z, Zheng X	Design of close-loop supply chain network under uncertainty using hybrid genetic algorithm: A fuzzy and chance-constrained programming model	Computers & Industrial Engineering	88	444-457	2015	1-1	A
697	Zhou X, Zhou Y	Designing a multi-echelon reverse logistics operation and network: A case study of office paper in Beijing	Resources, Conservation and Recycling	100	58-69	2015	1-1	A
698	Subulan K, Taşan AS, Baykasoglu A	Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming	Applied Mathematical Modelling	39(9)	2661-2702	2015	1-1	A
699	Ghayebloo S, Tarokh MJ, Venkatadri U, Diallo C	Developing a bi-objective model of the closed-loop supply chain network with green supplier selection and disassembly of products: The impact of parts reliability and product greenness on the recovery network	Journal of Manufacturing Systems	36	76-86	2015	1-1	A
700	Jindal A, Sangwan KS	Evaluation of collection methods in reverse logistics by using fuzzy mathematics	Benchmarking: An International Journal	22(3)	393 - 410	2015	1-7	B
701	Moghaddam KS	Fuzzy multi-objective model for supplier selection and order allocation in reverse logistics systems under supply and demand uncertainty	Expert Systems with Applications	42(15-16)	6237-6254	2015	2-3	A
702	Bing X, Bloemhof-Ruwaard J, Chaabane A, van der Vorst J	Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme	Journal of Cleaner Production	103	28-39	2015	1-1	E
703	Vahabzadeh AH, Asiaei A, Zailani S	Green decision-making model in reverse logistics using FUZZY-VIKOR method	Resources, Conservation and Recycling	103	125-138	2015	1-4	B
704	Hong X, Xu L, Du P, Wang W	Joint advertising, pricing and collection decisions in a closed-loop supply chain	International Journal of Production Economics	167	12-22	2015	1-7	D
705	Aras N, Korugan A, Büyükoçkan G, Şerifoğlu FS, Erol I, Velioglu MN	Locating recycling facilities for IT-based electronic waste in Turkey	Journal of Cleaner Production	105	324-336	2015	1-1	A
706	Parsopoulos KE, Konstantaras I, Skouri K	Metaheuristic optimization for the Single-Item Dynamic Lot Sizing problem with returns and remanufacturing	Computers & Industrial Engineering	83	307-315	2015	2-2	C
707	John ST, Sridharan R	Modelling and analysis of network design for a reverse supply chain	Journal of Manufacturing Technology Management	26(6)	853-867	2015	1-1	A
708	Ene S, Öztürk N	Network modeling for reverse flows of end-of-life vehicles	Waste Management	38	284-296	2015	1-1	A
709	Accorsi R, Manzini R, Pini C, Penazzi S	On the design of closed-loop networks for product life cycle management: Economic, environmental and geography considerations	Journal of Transport Geography	48	121-134	2015	1-1	A
710	Kalaitzidou MA, Longinidis P, Georgiadis MC	Optimal design of closed-loop supply chain networks with multifunctional nodes	Computers & Chemical Engineering	80	73-91	2015	1-1	A
711	Wei J, Govindan K, Li Y, Zhao J	Pricing and collecting decisions in a closed-loop supply chain with symmetric and asymmetric information	Computers & Operations Research	54	257-265	2015	1-7	D
712	Hashemi V, Chen M, Fang L	Process planning for closed-loop aerospace manufacturing supply chain and environmental impact reduction	Computers & Industrial Engineering	75	87-95	2015	2-2	C
713	Li X, Li Y, Cai X	Remanufacturing and pricing decisions with random yield and random demand	Computers & Operations Research	54	195-203	2015	2-3	D
714	Zhang Q, Segerstedt A, Tsao YC, Liu B	Returnable packaging management in automotive parts logistics: Dedicated mode and shared mode	International Journal of Production Economics	168	234-244	2015	1-7	C
715	Peretti U, Tatham P, Wu Y, Sgarbossa F	Reverse logistics in humanitarian operations: challenges and opportunities	Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management	5(2)	253 - 274	2015	1-4	B

716	Ferri GL, de Lorena Diniz Chaves G, Ribeiro GM	Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement	Waste Management	40	173-191	2015	1-1	A
717	Kinobe JR, Gebresenbet G, Niwagaba CB, Vinnerås B	Reverse logistics system and recycling potential at a landfill: A case study from Kampala City	Waste Management	42	82-92	2015	1-6	B
718	Kilic HS, Cebeci U, Ayhan MB	Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey	Resources, Conservation and Recycling	95	120-132	2015	1-1	A
719	Zikopoulos C, Tagaras G	Reverse supply chains: Effects of collection network and returns classification on profitability	European Journal of Operational Research	246(2)	435-449	2015	1-4	D
720	Huang YC, Rahman S, Wu YCJ, Huang CJ	Salient task environment, reverse logistics and performance	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	45(9-10)	979-1006	2015	1-4	B
721	Chen W, Kucukyazici B, Verter V, Sáenz MJ	Supply chain design for unlocking the value of remanufacturing under uncertainty	European Journal of Operational Research	247(3)	804-819	2015	2-3	D
722	Ravi V, Shankar R	Survey of reverse logistics practices in manufacturing industries: an Indian context	Benchmarking: An International Journal	22(5)	874 - 899	2015	1-4	B
723	Golroudbary SR, Zahraee SM	System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain	Simulation Modelling Practice and Theory	53	88-102	2015	1-4	A
724	Guarnieri P, Sobreiro VA, Nagano MS, Serrano ALM	The challenge of selecting and evaluating third-party reverse logistics providers in a multicriteria perspective: a Brazilian case	Journal of Cleaner Production	96	209-219	2015	1-3	B
725	Ashayeri J, Ma N, Sotirov R	The redesign of a warranty distribution network with recovery processes	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	77	184-197	2015	1-1	A
726	Ishikawa M	A logistic model for post-consumer waste recycling	Journal of Packaging Science & Technology	5(2)	119-130	1996	1-2	F
727	Tsukui H	On primary functions for green-logistics	Journal of Japan Logistics Society	6	19-20	1997	3	※
728	Morioka T, Yoshida N, Shimoda Y	Take back and recycling of information technology and electronic appliances consumed in homes towards cyclic economy	Environmental System Research	25	391-396	1997	1-2	※
729	Morioka T, Yoshida N, Kida A, Shimoda Y, Miichi A	Evaluation of tack back system for post-consumed IT equipments	Environmental System Research	26	533-541	1998	1-2	※
730	Ishikawa M	Theoretical analysis of the environmental and economic impacts of sorted collection system for used packaging considering the inconvenience of consumers	Journal of Packaging Science & Technology	8(5)	233-246	1999	1-2	F
731	Nakashima K, Arimitsu H, Nose T, Kuriyama S	Analysis of a product recovery system	International Journal of Production Research	40(15)	3849-3856	2002	2-2	C
732	Tabata T, Goto N, Fujie K, Imura H, Usui T	Study on waste transportation and appropriate allocation of recycling facility by spatial distribution of waste discharge	Environmental System Research	30	315-322	2002	1-2	F
733	Okada A, Shiomi E	Transition and review of concept for reverse logistics	Journal of Japan Logistics Society	11	49-56	2003	3	F
734	Shinoda T, Reikan F, Fukuchi N	Harmonized transportation system to support the recycle-based society	Journal of the Society of Naval Architects of Japan	196	9-16	2004	1-2	※
735	Kondo S	Issues on a closed-loop manufacturing system	Journal of The Society of Instrument and Control Engineers	43	401-406	2004	2-1	※
736	Nakashima K, Arimitu H, Nose T, Kuriyama S	Optimal control of a remanufacturing system	International Journal of Production Research	42(17)	3619-3625	2004	2-2	C
737	Mizomoto G, Tsukai M, Okumura M	Optimal location of waste recycling plants by network-based facility location model	City planning review. Special issue, Papers on city planning	39	565-570	2004	1-1	F
738	Yoshinaga Y, Okawa T, Tanabe M, Nishina Y, Inoko M	Planning system of inverse logistics networks	Tetsu-to-Hagane	90	977-982	2004	1-2	※

739	Arai Y, Koizumi A, Inakazu T, Maeda M	Study on the optimal planning of reverse logistics using genetic algorithms for the collection system of electric household appliance recycling	Environmental System Research	32	225-233	2004	1-1	F
740	Fujii M	Advantages and disadvantages in regional waste management	Waste Management Research	16(6)	328-333	2005	1-2	F
741	Yoshida N, Kawabata H, Kaneko Y, Kusaka M	Analysis of influence on ton kilometers and energy consumption according to the transportation of used paper for paper recycling between regions	Environmental System Research	33	259-266	2005	1-2	F
742	Hayashi K, Nakao T, Yamaguchi T	Systematization of collecting used items for reuse and recycle in the Kinki area	Journal of Japan Logistics Society	13	139-146	2005	1-2	F
743	Yamamoto M, Hosoda E, Miyauchi T	A basic analysis of the end-of-life product logistics in Japan - with the view of further extension to East Asia -	Keio Economic Studies	99	217-235	2006	1-8	F
744	Kumar S, Yamaoka T	Closed loop supply chains - A study of US and Japanese car industries	Human Systems Management	25(1)	51-70	2006	1-4	B
745	Kawasaki J	Eco-town project and international materials recycling	Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan	13(325)	436-440	2006	3	C
746	Murayama T, Yoda M, Eguchi T, Oba F	Production planning and simulation for reverse supply chain	JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing	49(2)	281-286	2006	2-1	F
747	Fujikawa H	Proposal of the consumer-oriented logistics strategy. A success condition under on-demand SCM environment	Production Management	12(2)	174-178	2006	1-8	※
748	Hosoda E	An economic analysis of the 3Rs and international material circulation	Waste Management Research	17(2)	49-59	2007	3	F
749	Yoon JJ	Analysing current reverse logistics and system-wise approach towards efficiency improvement	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)	63(4)	332-344	2007	1-2	F
750	Pochanipallyi KK, Gupta SM	Approaches for Strategic Planning of a Reverse Supply Chain	Office Automation	27(4)	75-82	2007	2-1	A
751	Fukuhara Y	Cement manufacturing and recycling of waste material	Journal of MMIJ	123(12)	855-859	2007	1-6	※
752	Kumar S, Yamaoka T	Systems dynamics study of the Japanese automotive industry closed-loop supply chain	Journal of Manufacturing Technology Management	18(2)	115-138	2007	1-4	B
753	Lee JE, Gen M, Rhee KG	A multi-stage reverse logistics network problem by using hybrid priority-based genetic algorithm	IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	128(3)	450-455	2008	1-1	A
754	Lee JE, Gen M, Rhee KG	Reverse logistics network problem using priority-based genetic algorithm	International Journal of Information Systems for Logistics and Management	4(1)	61-71	2008	1-1	A
755	Ito Y, Managi S, Terazono A	Accomplishment and prospect of research on environmental economics	Environmental Science	22(2)	103-112	2009	1-4	F
756	Lee JE, Gen M, Rhee KG	Hybrid Priority-based Genetic Algorithm for Multi-stage Reverse Logistics Network	Industrial Engineering and Management Systems	8(1)	14-21	2009	1-1	A
757	Yoon JJ	Trends and issues of the study on reverse logistics : A review	Transport Policy Studies	12(3)	2-12	2009	3	F
758	Fujiyama A, Matsumoto T	Analysis of formative factors of sound material-cycle blocks in relation to industrial waste and waste PET bottles	Environmental Science	23(2)	115-125	2010	1-2	F
759	Hosoda E	Construction of high-Quality reverse logistics in a materials-circulating society	Material Cycles and Waste Management Research	21(4)	205-214	2010	3	F
760	Hu H, Onoda H, Nakajima K, Nagata K	Development of a traceability system for international resource recycling	Resources Processing	57(2)	53-60	2010	1-4	※
761	Miyahara S, Miyazaki T, Nachi Y, Nakazawa K	Venous physical distribution of construction byproducts in building taking down process	AJJ Journal of Technology and Design	16(32)	367-371	2010	1-1	※

762	Lee JE, Gen M, Rhee KG, Lee HH	Building of reusable reverse logistics model and its optimization considering the decision of backorder or next arrival of goods	IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	131(5)	1009-1019	2011	1-1	A
763	Fujiyama A, Matsumoto T	Structural analysis of wide-area transportation of recyclable resources with a focus on containers and packaging	Environmental Science	24(2)	103-113	2011	1-2	F
764	Arai Y, Kawamura H, Koizumi A, Mogi S	Transport planning model for wide area recycling system of industrial waste plastic	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)	67(6)	II_449-II_45	2011	1-2	※
765	Okubo K, Okumura M	Fluctuations and responses in used product collection systems	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)	68(5)	I_1013-I_1024	2012	2-3	D
766	Yoon JJ, Le Y	Analysis of the transport efficiency of reverse logistics in Japan	International Journal of Urban Sciences	17(3)	399-413	2013	1-2	A
767	Karakama T, Kainuma Y	Design of a Global Closed-Loop Supply Chain Model	Journal of Japan Industrial Management Association	64(2)	366-375	2013	1-4	C
768	Fang S, Fang Y, Sun H, Yu Y	Research on the sustainable economy development mode of automobile parts companies based on reverse logistics	Innovation and Supply Chain Management	7(2)	46-51	2013	1-4	E
769	Kainuma Y	Sustainable Operations and Closed-Loop Supply Chain	Journal of Japan Industrial Management Association	64(2)	348-355	2013	1-4	C
770	Tanimizu Y, Shimizu Y	A study on closed-loop supply chain model for parts reuse with economic efficiency	Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	8(5)	JAMDSM 0068	2014	1-4	B
771	Jose D, Matsukawa H	An optimal closed-loop supply chain scheduling with reverse flow of repackaging material	Innovation and Supply Chain Management	8(3)	99-113	2014	1-4	B
772	Alqahtani AY, Gupta SM, Nakashima K	Performance analysis of advanced remanufacture-to-order, disassembly-to-order and refurbishment-to-order system	Innovation and Supply Chain Management	8(4)	140-149	2014	1-4	D
773	Sugimura Y, Murakami S, Ukai T	Significances of the cost-effectiveness analysis in establishing recycling system of small home appliances	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)	70(6)	II_183-II_19	2014	1-4	※
774	Joshi AD, Gupta SM, Yamada T	Selection of supplier for end-of-life products based on the optimum profit, quality level, material sales revenue and disposal weight	Innovation and Supply Chain Management	8(4)	134-139	2014	1-4	E
775	Yamamoto M	The importance of reverse logistics in system planning of recycling	Review of Environmental Economics and Policy Studies	1	81-84	2014	3	F

第2章参考文献

- 1) 金子慎治・西谷公孝・藤井秀道・小松悟：環境経営時代における環境政策と企業行動の関係に関する研究，環境経済・政策研究，Vol8(1)，pp.61-73，2015.
- 2) Agrawal S, Singh R K, Murtaza Q: A literature review and perspectives in reverse logistics, Resources, Conservation and Recycling, 97, pp. 76-92, 2015.
- 3) Govindan K, Soleimani H, Kannan D: Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future, European Journal of Operational Research, 240, pp.603-626, 2015.
- 4) 中央環境審議会：小型電気電子機器リサイクル制度の在り方について（第一次答申），2011.
- 5) 津久井英喜：環境適応型ロジスティクスが具備すべき要件についてーリバース・ロジスティクスの視点からの考察ー，日本物流学会誌，6，pp.19-20,1997.
- 6) 山本雅資：静脈物流の経済分析，慶応大学博士学位論文，2008.
- 7) 細田衛士：循環型社会における適正な静脈物流の構築，廃棄物資源循環学会誌，4，pp.205-214，2010.
- 8) （社）日本経済団体連合会産業第三本部：産業界から見た廃棄物処理法を巡る現状と課題等，中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会廃棄物処理制度専門委員会（第3回）資料，2008.
- 9) 岡田啓・塩見英治：リバース・ロジスティクスの概念の変遷と再検討，日本物流学会誌，11，pp.49-56，2003.
- 10) Pokharel S, Mutha A: Perspectives in reverse logistics: A review”, Resources, Conservation and Recycling, 53(4), pp.175-182, 2009.
- 11) Ye T, Zhenhua Y: Reverse logistics network: A literature review, Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 6, pp.1916-1921, 2014.
- 12) Rubio S, Chamorro A, Miranda FJ: Characteristics of the research on reverse logistics (1995-2005), International Journal of Production Research, 46(4), pp.1099-1120, 2008.
- 13) Fleischmann M, Bloemhof-Ruwaard JM, Dekker R, van der Laan E, van Nunen JAEE, Van Wassenhove LN: Quantitative models for reverse logistics: A review, European Journal of Operational Research, 103, pp.1-17, 1997.
- 14) Carter CR, Ellrain LM: Reverse logistics: A review and framework for future investigation, Journal of Business Logistics, 19(1), pp. 85-102, 1998.
- 15) Stock J.R.: Reverse logistics, Council of Logistics Management, Oak Brook, 1992.
- 16) Fleischmann M.: Quantitative Model for Reverse Logistics, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Ch.5, 2001.
- 17) Pohlen TL, Farris TM: Reverse logistics in plastics recycling, Physical Distribution & Logistics Management, 22(7), pp.35-47, 1992.
- 18) Rogers DS, Tibben-Lembke R.: Going backward: Reverse logistics trends and practices, Reverse Logistics Executive Council, 1999.
- 19) de Brito M., Dekker R.: A framework for reverse logistics, In Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains, edited by R. Dekker, M. Fleischmann, K. Inderfurth and L.N. Van Wassenhove, pp.3-27, 2004.
- 20) Council of Supply Chain Management Professional: <http://www.cscmp.org>, 2008.
- 21) Fahimnia B, Sarkis J, Davarzani H: Green supply chain management: A review and bibliometric analysis, International Journal of Production Economics, 162, pp.101-114, 2015.
- 22) Ahi P, Searcy C: An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains, Journal of Cleaner Production, 86, pp.360-377, 2015.
- 23) Ahi P, Searcy C: A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management, Journal of Cleaner Production, 52, pp.329-341, 2013.
- 24) Srivastava S: Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review, International Journal of Management Review, 9(1), pp. 53-80, 2007.
- 25) 国土交通省：CSRの見地からのグリーン物流推進企業マニュアル，2006.
- 26) Ilgin MA, Gupta SM: Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art, Journal of Environmental Management, 91, pp. 563-591, 2010.
- 27) Prahinski C, Kocabasoglu C: Empirical research opportunities in reverse supply chains, Omega, 34, pp. 519-532, 2006.
- 28) Akçali E, Çetinkaya S: Quantitative models for inventory and production planning in closed-loop supply chains, International Journal of Production Research, 49, pp. 2373-2407, 2011.

- 29) Mero MT, Nickel S, Saldanha-da-Gama F: Facility location and supply chain management - A review", *European Journal of Operational Research*, 196, pp.401-412, 2009.
- 30) 国土交通省ホームページ：用語解説ページ，<http://www.mlit.go.jp/yougo/j-s2.html>.
- 31) 国土交通省港湾局ホームページ：http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr6_000007.html.
- 32) 尹鐘進：静脈物流に関する研究の動向と課題－論文レビュー－，*運輸政策研究*, Vol.12, No.3, pp.2-12, 2009.
- 33) 浜崎章洋：「物流」と「ロジスティクス」の違いについての一考察－その定義と日本に紹介された時代背景－，*ロジスティクスレビュー*，第 57 号，2004.
- 34) Ishikawa M: A logistic model for post-consumer waste recycling, *Journal of Packaging Science & Technology*, 5, pp. 119-130, 1996.
- 35) 盛岡通・吉田登・下田吉之：循環経済化に沿った情報家電の製品廃棄物の回収システムの枠組みに関する研究，*環境システム研究論文集*，25，pp. 391-396，1997.
- 36) 盛岡通・吉田登・喜田昌・下田吉之・見市晃：情報家電製品の回収システムの評価に関する研究，*環境システム研究論文集*，26，pp. 533-541，1998.
- 37) Ishikawa M: Theoretical Analysis of the environmental and economic impacts of sorted collection system for used packaging considering the inconvenience of consumers, *Journal of Packaing Science & Technoloty*, 8, pp. 233-246, 1998.
- 38) Nakashima K, Arimitsu H, Nose T, Kuriyama S: Analysis of a product recovery system, *International Journal of Production Research*, 40, pp. 3849-3856, 2002.
- 39) 田畑智博・後藤尚弘・藤江幸一・井村秀文・薄井智貴：発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適正配置に関する研究，*環境システム研究論文集*，Vol.30，pp.315-322，2002.
- 40) Nakashima K, Arimitu H, Nose T, Kuriyama S: Optimal control of a remanufacturing system, *International Journal of Production Research*, 42, pp. 3619-3625, 2004.
- 41) 荒井康裕・小泉明・稲員とよの・前田雅史：遺伝的アルゴリズムによる静脈物流の最適化計画に関する研究-家電リサイクルにおける回収システムを対象として-，*環境システム研究論文集*，Vol.32，pp.225-233，2004.
- 42) 近藤伸亮：循環型生産システム構築のための課題，計測と制御，43，pp. 401-406，2004.
- 43) 篠田岳思・令官史子，福地信義：循環型社会を支援する調和型物流体系について，*日本造船学会論文*集，196，pp. 9-16，2004.
- 44) 溝本剛志・塚井誠人・奥村誠：ネットワーク型施設配置モデルによる廃棄物リサイクル施設計画の分析，*都市計画論文集*，39，pp. 565-570，2004.
- 45) 吉永陽一・大川登志男・田鍋実・西名慶晃・猪子正邦：静脈物流ネットワークの計画・評価，*鉄と鋼*，90，pp. 977-982，2004.
- 46) 林克彦・中尾健良・山口健俊：近畿圏におけるリユース・リサイクル品回収のシステム化について，*日本物流学会誌*，13，pp. 139-146，2005.
- 47) 藤井実：廃棄物処理・リサイクルの広域化のトレードオフについて，*廃棄物学会誌*，6，pp. 328-333，2005.
- 48) 吉田登・川端宏紀・金子泰純・日下正基：紙リサイクル原料古紙の地域間物流が輸送量及びエネルギー消費に及ぼす影響の分析，*環境システム研究論文集*，33，pp. 259-266，2005.
- 49) Kumar S, Yamaoka T: Closed loop supply chains – A study of US and Japanese car industries, *Human Systems Management*, 25, pp. 51-70, 2006.
- 50) Murayama T, Yoda M, Eguchi T, Oba F: Production planning and simulation for reverse supply chain, *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 49, pp. 281-286, 2006.
- 51) 川崎順一：エコタウン事業と国際資源循環，*Journal of the Society of Inorganic Materials*, 13, pp. 436-440, 2006.
- 52) 藤川裕晃：消費者起点のロジスティクスの提案，*生産管理*，12，pp.174-178，2006.
- 53) 山本雅資・細田衛士・宮内環：静脈物流に関する基礎的分析－東アジアへの展開を視野において，*三田学会雑誌*，99，pp. 217-235，2006.
- 54) Kishore K, Gupta M: Approaches for strategic planning of a reverse supply chain, *オフィス・オートメーション*，27，pp. 75-82，2007.
- 55) Kumar S, Yamaoka T: Systems dynamics study of the Japanese automotive industry closed-loop supply chain, *Journal of Management Technology Management*, 18, pp. 115 - 138, 2007.
- 56) 福原吉和：セメント製造プロセスにおける廃棄物処理，*Journal of MMIJ*，123，pp. 855-859，2007.

- 57) 細田衛士：3R と国際資源循環－経済学的視点からの検討－，廃棄物学会誌，17，pp. 49-59，2007.
- 58) 尹鍾進：静脈物流の現状分析に基づいた静脈物流の効率化方案に関する研究，土木学会論文集 G，63(4)，pp.332-344，2007.
- 59) Lee JE, Gen M, Rhee KG: A multi-stage reverse logistics network problem by using hybrid priority-based genetic algorithm, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 128, pp. 450-455, 2008.
- 60) Lee JE, Gen M, Rhee KG: Reverse logistics network problem using priority-based genetic algorithm, International Journal of Information Systems for Logistics and Management, 61, pp. 61-71, 2008.
- 61) Lee JE, Gen M, Rhee KG: Hybrid priority-based genetic algorithm for multi-stage reverse logistics network, Industrial Engineering and Management Systems, 8, pp. 14-21, 2009.
- 62) 伊藤豊・真奈木俊介・寺園淳：環境経済の到達点と今後，環境科学会誌，22，pp.103-112，2010.
- 63) 胡浩・小野田弘士・中島賢一・永田勝也：トレーサビリティを核とした国際資源循環管理システムの構築，環境資源工学，57，pp. 53-60，2010.
- 64) 藤山淳史・松本亨：産業廃棄物及び廃 PET ボトルを対象とした循環圏に関する要因分析，環境システム研究論文集，2，pp.39-50，2010.
- 65) 宮原俊介・宮崎隆昌・名知洋子・中澤公伯：建築解体プロセスにおける建設副産物の静脈物流に関する一考察，日本建築学会技術報告集，4，pp. 205-214，2010.
- 66) 李静銀・玄光男・李瓊球・李義頡：再発注・入荷待ち判断を考慮した再利用リバース・ロジスティクスのモデル構築と最適化，電気学会論文誌 C，131，pp. 1009-1019，2011.
- 67) 荒井康裕・河村永・小泉明・茂木敏：産業廃棄物の排出及び広域移動に関する分析－移動量変化の要因，地域間での移動構造，及び移動の効率性に着目して－，地域学研究，41，pp.969-983，2011.
- 68) 藤山淳史・松本亨：容器包装を対象とした循環資源の広域移動に関する構造分析，環境科学会誌，24，pp. 103-113，2011.
- 69) 大窪和明・奥村誠：使用済み製品回収システムの外生的回収量と需要の変動に対する反応，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，68，pp. I_1013-I_1024，2012.
- 70) Fang S, Fang Y, Sun H, Yu Y: Research on the sustainable economy development mode of automobile parts companies based on reverse logistics, Innovation and Supply Chain Management, 7, pp. 46-51, 2013.
- 71) Kainuma Y: Sustainable operations and closed-loop supply chain, Journal of Japan Industrial Management Association, 64, pp. 348-355, 2013.
- 72) Karakama T, Kainuma Y: Design of a global closed-loop supply chain model, Journal of Japan Industrial Management Association, 64, pp. 366-375, 2013.
- 73) Yoon JJ, Le Y: Analysis of the transport efficiency of reverse logistics in Japan, International Journal of Urban Sciences, 17, pp. 399-413, 2013.
- 74) Alqahtani Y, Gupta M, Nakashima K: Performance analysis of advanced remanufacture-to-order, disassembly-to-order and refurbishment-to-order system, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 8, pp.140-149, 2014.
- 75) Hoz JD, Matsukawa H: An optimal closed-loop supply chain scheduling with reverse flow of repackaging material, Innovation and Supply Chain Management, 8, pp. 99-113, 2014.
- 76) Joshi AD, GUPTA M, Yamada T: Selection of supplier for end-of-life products based on the optimum profit, quality level, materials Sales revenue and disposal weight, Innovation and Supply Chain Management, 9, pp. 134-139, 2014.
- 77) Tanimizu Y, Shimizu Y: A study on closed-loop supply chain model for parts reuse with economic efficiency, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, pp.1-12, 2014.
- 78) 杉村佳寿・村上進亮・鶴飼隆広：小型家電リサイクル制度創設における費用対効果分析の意義，土木学会論文集 G (環境)，70，pp. II_183-II_19，2014.
- 79) 山本雅資：リサイクルの制度設計における静脈物流の重要性，環境経済・政策研究，1，pp.81-84，2014.
- 80) 山縣延文・水谷誠・肥高俊明・高橋一則：マルチモーダルな静脈物流システムの構築に関する研究，国土交通政策研究，第 34 号，2004.
- 81) 松藤敏彦・神山桂一・田中信寿：都市ごみステーション収集のモデル作成に関する研究，土木学会論文集，377，pp. 61-69，1987.
- 82) 小泉明・戸塚昌久・稲貝とよの・川口士郎：都市ごみ収集輸送計画のためのファジィ線形計画モデル，土木学会論文集，443，pp. 101-107，1992.

- 83) 山中英生・青山吉隆・三谷哲雄：都市ごみの収集計画支援システムの開発とその応用，環境システム研究，21，pp. 300-308，1993.
- 84) 高山洋・大山達雄：ネットワークモデルによる都市ごみ収集輸送システムの最適化，オペレーションズ・リサーチ，39，pp.653-658，1994.
- 85) 田中勝：廃棄物リサイクルと収集運搬システム，廃棄物学会誌，7，pp. 422-433，1996.
- 86) 篠田岳思・福地信義・関和隆・令官史子：浮体型廃棄物処理プラントの計画と回収物流に関する研究，日本造船学会論文集，192，pp.439-452，2002.
- 87) 小泉明・稲員とよの・荒井康裕・河野裕和：ファジィ線形計画法による有害廃棄物の広域的輸送計画，環境システム研究論文集，31，pp. 447-454，2003.
- 88) 佐々木努・藤原健史・松岡譲：環境負荷と費用からみた廃棄物処理広域化の規模に関する研究，環境システム論文集，31，pp.277-285，2003.
- 89) 荒井康裕・稲員とよの・小泉明：ごみ処理システムの広域化計画に関する最適化モデル分析，環境システム研究論文集，31，pp. 267-276，2003.
- 90) 川畑隆常・大迫政浩・山田正人・田崎智宏・松井康弘・立尾浩一：建設廃棄物の排出量と中間処理能力の地理的な需給アンバランスの解析，廃棄物学会論文誌，16，pp. 151-162，2005.
- 91) 楊翠芬・志水草夫・玄地裕・匂坂正幸・稲葉敦：GISによる生ごみ分別収集システムの評価千葉市を事例として，GIS-理論と応用，13，pp. 51-58，2005.
- 92) 藤井実・村上進亮・南齋規介・橋本征二・森口祐一・越川敏忠・齋藤聡：家庭系容器包装プラスチックごみの収集と運搬に関する評価モデル，廃棄物学会論文誌，17，pp. 331-341，2006.
- 93) 岡崎誠・増田貴則・細井由彦・河野嘉範：人口低密地域における一般廃棄物の分別数が収集過程のコストに及ぼす影響，環境システム研究論文集，34，pp. 413-422，2006.
- 94) 荒井康裕・小泉明・稲員とよの・西出成臣：都市ごみの広域的処理システムの多目的最適化に関する研究，環境システム研究論文集，34，pp. 405-412，2006.
- 95) 藤井実・村上進亮・南齋規介・橋本征二・森口祐一・中村卓也・越川敏忠：家庭系ごみの収集分別に係わる収集車の走行距離・台数等の調査，廃棄物学会論文誌，18，pp. 443-453，2007.
- 96) 村上進亮・藤井実・南齋規介・橋本征二・大迫政浩・森口祐一：地理的特性を考慮した収集・運搬費用算定モデル，廃棄物学会論文誌，19，pp. 225-234，2008.
- 97) 藤山淳史・松本亨：産業廃棄物の広域移動に関する実態とその要因分析，環境システム研究論文集，37，pp. 331-338，2009.
- 98) 山本雅資：一般廃棄物の収集運搬費用の経済分析，環境経済・政策研究，2，pp. 39-50，2009.
- 99) 吉田登・佐藤雅俊・金子泰純：産業廃棄物の排出及び広域移動に関する分析－移動量変化の要因，地域間での移動構造，及び移動の効率性に着目して－，地域学研究，41，pp. 969-983，2011.
- 100) 石崎祥之：地球環境経営とロジスティックス，環境技術，23，pp. 643-651，1994.
- 101) 中野加都子・三浦浩之・和田安彦：情報家電製品の回収システムの評価に関する研究，環境システム研究論文集，26，pp. 533-541，1996.
- 102) 内田賢悦・佐藤馨一・唐澤豊：貨物鉄道システムを用いたグリーンロジスティックスの実現化方策に関する研究，日本物流学会誌，7，pp. 98-107，1999.
- 103) 金弘錫：経営診断の視点から見たグリーン・ロジスティックス・システムの構築，日本経営診断学会論集，3，pp. 76-88，2003.
- 104) 林克彦・矢野裕児・齊藤実：荷主企業による鉄道コンテナ輸送の評価とグリーンロジスティックスの可能性，日本物流学会誌，15，pp. 153-160，2007.
- 105) 加納寛之：グリーンロジスティックスを促進させる評価手法の構築，日本経営診断学会論集，11，pp. 48-54，2011.
- 106) 国土交通省：全国貨物純流動調査（物流センサス）報告書，2012.
- 107) 小島道一：国際資源循環の現状と課題，Journal of MMIJ，Vol.123，pp.591-596，2007.
- 108) Shinkuma T., Huong N.T.M.: The Flow of E-waste Material in the Asian Region and a Reconsideration of International Trade Policies on E-waste, Environmental Impact Assessment Review, vol. 29, pp.25-31, 2009.
- 109) 寺園淳・林誠一・吉田綾・村上進亮：有害物質管理と資源回収の観点からの金属スクラップ(雑品)発生・輸出の実態解明，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.22，pp.127-140，2011.
- 110) Fujimori T., Takigami H., Agusa T., Eguchi A., Bekki K., Yoshida A., Terazono A., Ballesteros Jr. F.C.: Impact of metals in surface matrices from formal and informal electronic-waste recycling around Metro Manila, the Philippines, and intra-Asian comparison, Journal of Hazardous Materials, 221-222, pp.139-146, 2012.

- 111) 寺園淳：循環資源の越境移動の実態と中古家電・金属スクラップの事例にみる適正管理方策，新世代法政策学研究，9，pp.77-104，2010.
- 112) Brass B, McIntosh M: Product, process, and organizational design for remanufacture - an overview of research, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 15, pp. 167-178, 1999.
- 113) Guide Jr. VDR, Jayaraman V, Srivastava VR: Production planning and control for remanufacturing: a state-of-the-art survey, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 15, pp. 221-30, 1999.
- 114) Gungor A, Gupta SM: Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey, Computers & Industrial Engineering, 36, pp. 811-853, 1999.
- 115) Fleischmann M, Krikke HR, Rommert Dekkerb, Douwe PFS: A characterisation of logistics networks for product recovery, Omega, 28, pp. 653-666, 2000.
- 116) Dowlatsahi S: Developing a thory of reverse logistics, Interfaces, 30(3), pp. 143-155, 2000.
- 117) Guide Jr. VDR: Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs, Journal of Operations Management, 18, pp. 467-483, 2000.
- 118) Ferguson N, Browne J: Issues in end-of-life product recovery and reverse logistics, Production Planning & Control, 12(5), pp. 534-547, 2001.
- 119) Sasikumar P, Kannan G: Issues in reverse supply chains, Part-I: End-of-life product recovery and inventory management-An overview, International Journal of Sustainable Engineering, 1(3), pp. 154-172, 2008a.
- 120) Sasikumar P, Kannan G: Issues in reverse supply chain, part II: reverse distribution issues – an overview, International Journal of Sustainable Engineering, 1(4), pp. 234-249, 2008b.
- 121) Akcali E, Centinkaya S, Uster H: Network design for reverse and closed-loop supply chains: an annotated bibliography of models and solution approaches, Networks, 53, pp. 231-248, 2009.
- 122) Chanintrakul P, Coronado Mondragon AE, Lalwani C, Won CY: Reverse logistics network design: a state - of - the art literature review, International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling, 1, pp.61-81, 2009.
- 123) Subramoniam R, Huisingh D, Chinnam RB: Remanufacturing for the automotive aftermarket - strategic factors: literature review and future research needs, Journal of Cleaner Production, 17, pp.1163-1174, 2009.
- 124) Sasikumar P, Kannan G: Issues in reverse supply chain, part III: Classification and simple analysis, International Journal of Sustainable Engineering, 2(1), pp. 2-27, 2009.
- 125) Chan HK, Yin SZ, Chan FTS: Implementing just-in-time philosophy to reverse logistics systems: a review, International Journal of Production Research, 48, pp. 6293–6313, 2010.
- 126) Olugu EU, Wong KY, Shaharoun AM: A comprehensive approach in assessing the performance of an automobile closed-loop supply chain, Sustainability, 2(4), pp.871-889, 2010.
- 127) Setaputra R, Mukhopadhyay SK: A framework for research in reverse logistics, International Journal of Logistics Systems and Management, 7, pp.19-55, 2010.
- 128) Carrasco-Gallego R, Ponce-Cueto E, Dekker R: Closed-loop supply chains of reusable articles: a typology grounded on case studies, International Journal of Production Research, 50, pp. 5582-5596, 2012.
- 129) Kinobe JR, Gebresenbet G, Vinnerås B: Reverse logistics related to waste management with emphasis on developing countries-a review paper, Journal of Environmental Science and Engineering, B1, pp. 1104-1118, 2012.
- 130) Sheriff KMM, Gunasekaran A, Nachiappan S: Reverse Logistics network design: a review on strategic perspective, International Journal of Logistics Systems and Management, 12, pp.171-194, 2012.
- 131) Bouzon M, Miguel PAC, Rodriguez CMT: Managing end of life products: a review of the literature on reverse logistics in Brazil, Management of Environmental Quality: An International Journal, 25, pp.564-584, 2013.
- 132) Govindan K, Popiuc MN, Diabat A: Overview of coordination contracts within forward and reverse supply chains, Journal of Cleaner Production, 47, pp. 319-334, 2013.
- 133) Souza GC: Closed-loop supply chains: a critical review, and future research, Decision Sciences, 44, pp. 7-38, 2013.
- 134) Steeneck DW, Sarin SC: Pricing and production planning for reverse supply chain: a review,

- International Journal of Production Research, 51, pp. 6972-6989, 2015.
- 135) Aravendan M, Panneerselvam R: Literature review on network design problems in closed loop and reverse supply chains, *Scientific Research*, 6, pp. 104-117, 2014.
 - 136) Gan JW, He ZG: Literature Review and Prospect on the End-of-Life Vehicles Reverse Logistics, *Advanced Materials Research*, 878, pp. 66-74, 2014.
 - 137) Ye T, Zhenhua Y: Reverse logistics network: A literature review, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6, pp. 1916-1921, 2014.
 - 138) Bhakthavatchalam S, Diallo C, Venkatadri U, Khatab A: Quality, Reliability, Maintenance Issues in Closed-Loop Supply Chains: A Review, *IFAC-PapersOnLine*, 48, pp. 460-465, 2015.
 - 139) Hosseini MR, Chileshe N, Rameezdeen R, Lehmann S: Integration of design for reverse logistics and harvesting of information: a research agenda, 20, pp.480- 515, 2015.
 - 140) Schenkel M, Krikke H, Caniëls MCJ, van der Laan E: Creating integral value for stakeholders in closed loop supply chains, *Journal of Purchasing and Supply Management*, 21, pp. 155-166, 2015.
 - 141) Srivastava S: Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review, *International Journal of Management Review*, 9(1), pp. 53-80, 2007.
 - 142) Linton JD, Klassen R, Jayaraman V: Sustainable supply chains: An introduction, *Journal of Operations Management*, 25(6), pp. 1075-1082, 2007.
 - 143) Eskandarpour M, Dejax P, Miemczyk J, Péton O: Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review, *Omega*, 54, pp.11-32, 2015.
 - 144) Yu C, Davis C, Dijkema GPJ: Understanding the evolution of industrial symbiosis research, A bibliometric and network analysis (1997-2012), *Journal of Industrial Ecology*, 18(2), pp.280-293, 2014.
 - 145) 渡辺俊: 科学研究費助成事業に見る建築学研究の社会ネットワーク分析, *日本建築学会計画系論文集*, Vol78(683), pp.281-288, 2013.
 - 146) Barker TJ, Zabinsky ZB: Reverse logistics network design: A conceptual framework for design making, *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4), pp. 250-260, 2008.
 - 147) Bai C, Sarki J: Flexibility in reverse logistics: a framework and evaluation approach, *Journal of Cleaner Production*, 47, pp. 306-318, 2013.
 - 148) Diabat A, Kannan D, Kaliyanc M, Svetinovic D: An optimization model for product returns using genetic algorithms and artificial immune system, *Resources, Conservation and Recycling*, 74, pp. 156-169, 2013.
 - 149) Barros A, Dekker R, Scholten V: A two-level network for recycling sand: A case study, *European Journal of Operational Research*, 110, pp.199-214, 1998.
 - 150) Santibanez-Gonzalez EDR, Diabat A: Solving a reverse supply chain design problem by improved Benders decomposition schemes, *Computers & Industrial Engineering*, 66, pp. 889-898, 2013.
 - 151) Realff MJ, Ammous JC, Newton DJ: Strategic design of reverse production systems, *Computers & Chemical Engineering*, 24, pp. 991-996, 2000.
 - 152) Ramezani M, Bashiri M, Tavakkoli-Moghaddam R: A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level, *Applied Mathematical Modelling*, 37, pp. 328-344, 2013.
 - 153) Krikke H, le Blanc I, van Krieken M, Fleuren H: Low-frequency collection of materials disassembled from end-of-life vehicles: on the value of on-line monitoring in optimizing route planning, *International Journal of Production Economics*, 111, pp. 209-228, 2008.
 - 154) Kim H, Yang J, Lee KD: Vehicle routing in reverse logistics for recycling end-of-life consumer electronic goods in South Korea, *Transportation Research Part D*, 14, pp. 291-299, 2009.
 - 155) Alshamrani A, Mathur K, Ballou RH: Reverse logistics: simultaneous design of delivery routes and returns strategies, *Computers & Operations Research*, 34, pp. 595-619, 2007.
 - 156) Hellström D, Johansson O: The impact of control strategies on the management of returnable transport items, *Transportation Research Part E*, 46, pp. 1128-1139, 2010.
 - 157) Silva DAL, Renó GWS, Sevegnani G, Sevegnani TB, Truzzi OMS: Comparison of disposable and returnable packaging: a case study of reverse logistics in Brazil, *Journal of Cleaner Production*, 47, pp. 377-387, 2013.
 - 158) Efendigil T, O`nu` t S, Kongar E: A holistic approach for selecting a third-party reverse logistics provider in the presence of vagueness, *Computers & Industrial Engineering*, 54, pp.269-287, 2008.

- 159) Ravi V, Shankar R, Tiwari MK: Analyzing alternatives in reverse logistics for end-of-life computers: ANP and balanced scorecard approach, *Computers & Industrial Engineering*, 48, pp. 327-356, 2005.
- 160) Kannan G, Pokharel S, Kumar PS: A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS for the selection of reverse logistics provider, *Resources, Conservation and Recycling*, 54, pp. 28-36, 2009.
- 161) Azadi M, Saen RF: A new chance-constrained data envelopment analysis for selecting third-party reverse logistics providers in the existence of dual-role factors, *Expert Systems with Applications*, 38, pp. 12231-12236, 2011.
- 162) Kara S, Rugrungruang F, Kaebernick H: Simulation modelling of reverse logistics networks, *International Journal of Production Economics*, 106, pp. 61-69, 2007.
- 163) Georgiadis P, Besiou M: Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: a system dynamics approach, *Journal of Cleaner Production*, 16, pp. 1665-1678, 2008.
- 164) Fahimnia B, Sarkis J, Dehghanian F, Banihashemi N, Shams Rahman S: The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: an Australian case study, *Journal of Cleaner Production*, 59, pp. 210-225, 2013.
- 165) Lai KH, Wu SJ, Wong CWY: Did reverse logistics practices hit the triple bottom line of Chinese manufacturers?, *International Journal of Production Economics*, 146, pp. 106-117, 2013.
- 166) Majumder P, Groenevelt H: Competition in remanufacturing, *Production and Operations Management*, 10, pp. 125-141, 2001.
- 167) Guide Jr. VDR, Teunter RH, van Wassenhove LN: Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing, *Manufacture & Service Operations Management*, 5(4), pp. 303-316, 2003.
- 168) Chen JM, Chang CI: Dynamic pricing for new and remanufactured products in a closed-loop supply chain, *International Journal of Production Economics*, 146, pp. 153-160, 2013.
- 169) Ma WM, Zhao Z, Ke H: Dual-channel closed-loop supply chain with government consumption - subsidy, *European Journal of Operational Research*, 226, pp. 221-227, 2013.
- 170) Krikke HR, Van Harten A, Schuur PC: On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products, *International Journal of Production Research*, 36, pp. 111-139, 1998.
- 171) Tan AWK, Kumar A: A decision making model for reverse logistics in the computer industry, *International Journal of Logistics Management*, 27, pp. 331-354, 2006.
- 172) Bufardi A, Gheorghe R, Kiritsis D, Xirouchakis P: Multicriteria decision-aid approach for product end-of-life alternative selection, *International Journal of Production Research*, 42(16), pp. 3139-3157, 2004.
- 173) Zuidwijk R, Krikke H: Strategic response to EEE returns: Product eco-design or new recovery processes?, *European Journal of Operational Research*, 191(3), pp. 1206-1222, 2008.
- 174) Rahman S, Subramanian N: Factors for implementing end-of-life computer recycling operations in reverse supply chains, *International Journal of Production Economics*, 140, pp. 239-248, 2012.
- 175) Guide Jr. VDR, van Wassenhove L: Managing product returns for remanufacturing, *Production and Operations Management*, 10(2), pp. 142-155, 2001.
- 176) Kaya O: Incentive and production decisions for remanufacturing operations, *European Journal of Operational Research*, 201, pp. 442-453, 2010.
- 177) Minner S, Kiesmüller GP: Dynamic product acquisition in closed loop supply chains, *International Journal of Production Research*, 50, pp. 2836-2851, 2012.
- 178) Pokharel S, Liang Y: A model to evaluate acquisition price and quantity of used products for remanufacturing, *International Journal of Production Economics*, 138, pp. 170-176, 2012.
- 179) Ferrer G, Whybark DC: Material planning for a remanufacturing facility, *Production and Operations Management*, 10, pp. 112-124, 2001.
- 180) Kim K, Song I, Kim J, Jeong B: Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment, *Computers & Industrial Engineering*, 51, pp. 279-287, 2006.
- 181) Kenné JP, Dejax P, Gharbi A: Production planning of a hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain, *International Journal of Production Economics*, 135, pp. 81-93, 2012.
- 182) Guide Jr. VDR: Scheduling using drum-buffer-rope in a remanufacturing environment,

- International Journal of Production Research, 34, pp. 1081-1091, 1996.
- 183) Teunter R, Tang O, Kaparis K: Heuristics for the economic lot scheduling problem with returns, International Journal of Production Economics, 118, pp. 323-330, 2009.
 - 184) Guide Jr. VDR, Spencer MS: Rough-cut capacity planning for remanufacturing firms, Production Planning & Control, 8(3), pp. 237-244, 1997.
 - 185) Georgiadis P, Athanasiou E: Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing, European Journal of Operational Research, 225, pp. 44-58, 2013.
 - 186) de Brito MP, van der Laan EA: Inventory control with product returns: the impact of imperfect information, European Journal of Operational Research, 194, pp. 85-101, 2009.
 - 187) Richter K: The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers, European Journal of Operational Research, 95(2), pp. 313-324, 1996a.
 - 188) Jonrinaldi, Zhang DZ: An integrated production and inventory model for a whole manufacturing supply chain involving reverse logistics with finite horizon period, Omega, 41, pp. 598-620, 2013.
 - 189) van der Laan E, Dekker R, Salomon M, Ridder A: An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal, International Journal of Production Economics, 46-47, pp. 313-324, 1996.
 - 190) Mitra S: Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns, Computers & Industrial Engineering, 62, pp. 870-879, 2012.
 - 191) van der Laan E: An NPV and AC analysis of a stochastic inventory system with joint manufacturing and remanufacturing, International Journal of Production Economics, 81-82(11), pp. 317-331, 2003.
 - 192) Indurfurth K, van der Laan E: Leadtime effects and policy improvement for stochastic inventory control with remanufacturing, International Journal of Production Economics, 71(1-3), pp. 381-390, 2001.
 - 193) Guide Jr. VDR, Srivastava R: Inventory buffers in recoverable manufacturing, Journal of Operations Management, 16, pp. 551-568, 1998.
 - 194) Zikopoulos C, Tagaras G: Impact of uncertainty in the quality of returns on the profitability of a single-period refurbishing operation, European Journal of Operational Research, 182, pp. 205-225, 2007.
 - 195) Atas A, Çetinkaya S: Lot sizing for optimal collection and use of remanufacturable returns over a finite life-cycle, Production and Operations Management, 15(4), pp. 473-487, 2006.
 - 196) Ketzenberg ME, van der Laan E, Teunter RH: Value of information in closed loop supply chains, Production and Operations Management, 15(3), pp. 393-406, 2006.
 - 197) 内閣府経済社会総合研究所: 「イノベーション政策及び政策分析手法に関する国際共同研究」報告論文 第4章学術俯瞰とウェブからの情報抽出, 2009.
 - 198) Klavans R., Boyack KW: Identifying a Better Measure of Relatedness for Mapping Science, Journal of the American Society for Information Science and Technology, 57, pp. 251-263, 2006.
 - 199) Page L, Sergey B, Rajeev M, Terry A: The PageRank citation ranking: Bringing order to the Web, Technical Report, Stanford InfoLab, 1999.
 - 200) 鈴木努: Rで学ぶデータサイエンス8 ネットワーク分析, 共立出版, 2009.
 - 201) Thierry M, Salomon M, van Nunen J.A.E.E, van Wassenhove L.N.: Strategic issues in product recovery management, California Management Review, 37, pp. 114-135, 1995.
 - 202) Fleischmann M, Beullens P, Bloemhof-Ruwaard JM, Van Wassenhove LN: The impact of product recovery on logistics network design, Production and Operations Management, 10, pp. 156-173, 2001.
 - 203) Jayaraman V., Guide VDR, Srivastava R: A closed-loop logistics model for remanufacturing, The Journal of the Operation Research Society, 50, pp. 497-508, 1999.
 - 204) Savaskan RC, Bhattacharya S, Wassenhove LNV: Closed-loop supply chain models with product remanufacturing, Management science, 50, pp. 239-252, 2004.
 - 205) Rogers DS, Tibben-Lembke R: An examination of reverse logistics practices, Journal of Business Logistics, 22, pp. 129-148, 2001.
 - 206) van der Laan E, Salomon M, Dekker R, Van Wassenhove LN: Inventory control in hybrid systems with remanufacturing, Management Science, 45, pp. 733-747, 1999.
 - 207) Toktay B, Wein I, Zenios S: Inventory management of remanufacturable products, Management Science, 46, pp. 1412-1426, 2000.

- 208) Jayaraman V, Patterson RA, Rolland E: The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures, *European Journal of Operational Research*, 150, pp. 128-149, 2003.
- 209) Kroon L, Vrijens G: Returnable containers: An example of reverse logistics, *International Journal of Physical Distribution & Logistics management*, 25, pp.56-58, 1995.
- 210) Guide Jr VDR, Jayaraman V, Srivastava R, Benton W: Supply chain management for recoverable manufacturing systems, *Interfaces*, 30, pp. 125-142, 2000.
- 211) Inderfurth K: Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with leadtimes, *OR Spektrum*, 19, pp.111-122, 1997.
- 212) Salema MIG, Barbosa-Povoa AP, Novais AQ: An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 179, pp. 1063-1077, 2007.
- 213) van der Laan E, Salomon M: Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal, *European Journal of Operational Research*, 102, pp.264-278, 1997.
- 214) Guide Jr. VDR, Teunter RH, Van Wassenhove LNV: Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing, *Manufacture & Service Operations Management*, 5, pp. 303-316, 2003a.
- 215) Krikke HR, van Harten A, Schuur PC: Business case Océ: Reverse logistics network re-design for copies, *OR Spektrum*, 21, pp. 381-409, 1999.
- 216) Guide VDR, Van Wassenhove LN: The evolution of closed-loop supply chain research, *Operation Research*, 57, pp.10-18, 2009.
- 217) Shih LH: Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan, *Resources, Conservation and Recycling*, 32, pp. 55-72, 2001.
- 218) Listes O, Dekker R: A stochastic approach to a case study for product recovery network design, *European Journal of Operational Research*, 160, pp. 268-287, 2005.
- 219) Srivastava SK: Network design for reverse logistics, *Omega*, 36, pp.535-548, 2008.
- 220) Srivastava S, Srivastava R: Management product returns for reverse logistics, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 36(7), pp.524-546, 2006.
- 221) Kannan G, Sasikumar P, Devika K: A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling, *Applied Mathematical Modelling*, 34, pp. 655-670, 2010.
- 222) Shi J, Zhang G, Sha J: Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return, *Computers & Operations Research*, 38, pp.641-650, 2011.
- 223) Galbreth MR, Blackburn JD: Optimal acquisition and sorting policies for remanufacturing, *Production and Operations Management*, 15, pp.384-392, 2006.
- 224) Mutha A, Pokharel S: Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules, *Computers & Industrial Engineering*, 56, pp.334-346, 2009.
- 225) Hasani A, Zegordi SH, Nikbakhsh E: Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty, *International Journal of Production Research*, 50, pp. 4649-4669, 2012.
- 226) Lee DH, Dong M: A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery, *Transportation Research Part E*, 44, pp. 455-474, 2008.
- 227) Pishvaei MS, Farahani RZ, Dullaert W: A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design, *Computers & Operations Research*, 37, pp.1100-1112, 2010.
- 228) Das K, Chowdhury AH: Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning, *International Journal of Production Economics*, 135, pp. 209-221, 2008.
- 229) Amin SH, Zhang G: A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return, *Applied Mathematical Modelling*, 37, pp. 4165-4176, 2013.
- 230) Dowlatshahi SA: A strategic framework for the design and implementation of remanufacturing operations in reverse logistics, *International Journal of Production Research*, 43, pp. 3455-3480, 2005.
- 231) Pishvaei MS, Rabbani M, Torabi SA: A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty, *Applied Mathematical Modelling*, 35, pp. 637-649, 2011.
- 232) Meade L, Sarkis J, Presley A: The theory and practice of reverse logistics, *International Journal of*

- Logistics Systems and Management, 3, pp.56-87, 2007.
- 233) Johnson MR, Wang MH: Planning product disassembly for material recovery opportunities, *International Journal of Production Research*, 33, pp.3119-3142, 1995.
 - 234) Jahre M: Household waste collection as a reverse logistics channel: a theoretical perspective, *International Journal of Physical Distribution & Logistics management*, 25, pp.39-55, 1995.
 - 235) Klausner M, Hendrickson CT: Reverse-logistics strategy for product take-back, *Interfaces*, 30, pp. 156-165, 2000.
 - 236) Richter T: The extended EOQ repair and waste disposal model, *International Journal of Production Economics*, 45, pp.443-447, 1996b.
 - 237) Ayres R, Ferrer G, van Leynseele T: Eco-efficiency, asset recovery and remanufacturing, *European Management Journal*, 15, pp.557-574, 1997.
 - 238) van der Laan E, Dekker R, Salomon M: Product remanufacturing and disposal: A numerical comparison of alternative control strategies, *International Journal of Production Economics*, 45, pp.489-498, 1996b.
 - 239) Ferrer G: The economics of tire remanufacturing, *Resources, Conservation and Recycling*, 19, pp. 221-255, 1997.
 - 240) Jacomy M, Venturini T, Heymann S, Bastian M: ForceAtlas2, a continuous graph algorithm for handy network visualization for the Gephi software, *PLOS ONE*, 9(6), 2014.
 - 241) Realff MJ, Ammons JC, Newton D: Carpet recycling: determining the reverse production system design, *The Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 38, pp. 547-567, 1999.
 - 242) Louwers D, Kip BJ, Peters E, Souren F, Flapper SDP: A facility location allocation model for reusing carpet materials, *Computers & Industrial Engineering*, 36, pp. 855-869, 1999.
 - 243) Wang CH, Even JC, Adams Jr. SK: A mixed-integer linear model for optimal processing and transport of secondary materials, *Resources, Conservation and Recycling*, 15, pp. 65-78, 1995.
 - 244) Huscroft JR, Hazen BT, Hall DJ, Skipper JB, Hanna JB: Reverse logistics: past research, current management issues, and future directions, 24, pp. 304 – 327, 2013.
 - 245) Tibben-Lembke RS, Rogers DS: Difference between forward and reverse logistics in a retail environment, *Supply Chain Management: An International Journal*, 7, pp.271-282, 2002.
 - 246) Hazen BT, Overstreet RE, Hall DJ, Huscroft JR, Hanna JB: Antecedents to and outcomes of reverse logistics metrics, *Industrial Marketing Management*, 46, pp. 160-170, 2015.
 - 247) González-Torre PL, Adenso-Díaz B, Artiba H: Environmental and reverse logistics policies in European bottling and packaging firms, *International Journal of Production Economics*, 88, pp. 95-104, 2004.
 - 248) Gobbi C: Designing the reverse supply chain: the impact of the product residual value, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41, pp. 768 – 796, 2011.
 - 249) Hall DJ, Huscroft JR, Hazen BT, Hanna JB: Reverse logistics goals, metrics, and challenges: perspectives from industry, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 43, pp. 768-785, 2013.
 - 250) Blumberg DF: Strategic examination of reverse logistics & repair service requirements, needs, market size, and opportunities, *Journal of Business Logistics*, 20, pp.141-159, 1999.
 - 251) Daugherty PJ, Atry CW, Ellinger AE: Reverse logistics: The relationship between resource commitment and program performance, *Journal of Business Logistics*, 22, pp. 107-123, 2001.
 - 252) Zhang R, Zhang H, Liu B: Selection of reverse - logistics servicer for electronic products with fuzzy comprehensive evaluation method, *Grey Systems: Theory and Application*, 2, pp.207 – 216, 2012.
 - 253) Daugherty PJ, Myers MB, Rickey RG: Information support for reverse logistics: The influence of relationship commitment, *Journal of Business Logistics*, 23, pp. 85-106, 2002.
 - 254) Atry CW, Daugherty PJ, Richey GR: The challenge of reverse logistics in catalog retailing, 31, pp. 26-37, 2000.
 - 255) Krumwiede DW, Sheu C: A model for reverse logistics entry by third-party providers, *Omega*, 30, pp. 325-333, 2002.
 - 256) de Brito MP, Dekker R: Modelling product returns in inventor control—exploring the validity of general assumptions, *International Journal of Production Economics*, 81-82, pp.225-241, 2003.
 - 257) Rubio S, Corominas A: Optimal manufacturing–remanufacturing policies in a lean production environment, *Computers & Industrial Engineering*, 55, pp.234-242, 2008.

- 258) Mahadevan B, Pyke DF, Fleischmann M: Periodic review, push inventory policies for remanufacturing, *European Journal of Operational Research*, 151, pp.536-551, 2003.
- 259) Kannan G, Haq AN, Devika M: Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimization, *International Journal of Production Research*, 47, pp. 1175-1200, 2009.
- 260) Lambert S, Riopel D, Abdul-Kader W: A reverse logistics decisions conceptual framework, *Computers & Industrial Engineering*, 61, pp. 561-581, 2011.
- 261) Mitra S: Revenue management for remanufactured products, *Omega*, 35, pp.553-362, 2007.
- 262) Fleischmann M, van Numen J, Grave B: Integrating closed-loop supply chains and spare-parts management at IBM, *Interfaces*, 33, pp. 44-56, 2003.
- 263) Teunter RH, Vlachos D: On the necessity of a disposal option for returned items that can be remanufactured, *International Journal of Production Economics*, 75, pp.257-266, 2002.
- 264) Teunter R, van der Laan E: On the non-optimality of the average cost approach for inventory models with remanufacturing, *International Journal of Production Economics*, 79, pp.67-73, 2002.
- 265) van der Laan E, Dekker R, Salomon M, Ridder A: An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal, *International Journal of Production Economics*, 46-47, pp. 313-324, 1996.
- 266) Ferrer G, Swaminathan J: Managing new and remanufactured products, *Management science*, 52, pp. 15-26, 2006.
- 267) Guide Jr. VDR, Jayaraman V, Linton JD: Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery, *Journal of Operations Management*, 21, pp. 259-279, 2003b.
- 268) Ferrer G, Ketzenberg ME: Value of information in remanufacturing complex products, *IIE Transactions*, 36, pp. 265-278, 2004.
- 269) Georgiadis P, Vlachos D: The effect of environmental parameters on product recovery, *European Journal of Operational Research*, 157, pp. 449-464, 2004.
- 270) Klausner M, Grimm WM, Hendrickson C: Reuse of electric motors in consumer products, *Journal of Industrial Ecology*, 2, pp. 89-102, 1998.
- 271) Blackburn JD, Guide Jr. VDR, Souza GC, Van Wassenhove LN: Reverse supply chains for commercial returns, *California Management Review*, 46, pp. 6-22, 2004.
- 272) Debe LG, Toktay LB, Van Wassenhove LN: Market segmentation and product technology selection for remanufacturable products, *Management science*, 51, pp. 1193-1205, 2005.
- 273) Nagurney A, Toyasaki F: Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41, pp. 1-28, 2005.
- 274) Krikke HR, van Harten A, Schuur PC: Business case Roteb: recovery strategies for monitors, *Computers & Industrial Engineering*, 36, pp. 739-757, 1999.
- 275) Sasikumar P, Kannan G, Ha A: A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery—a case of truck tire remanufacturing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49, pp. 1223-1234, 2010.
- 276) Barker TJ, Zabinsky ZB: Reverse logistics network design: a conceptual framework for decision making, *International Journal of Sustainable Engineering*, 1, pp. 250-260, 2008.
- 277) Guide Jr. VDR, Srivastava R: Buffering from material recovery uncertainty in a recoverable manufacturing environment, *Journal of the Operational Research Society*, 48, pp.519-559, 1997a.
- 278) Jorjani S, Leu J, Scott C: Model for the allocation of electronics components to reuse options, *International Journal of Production Research*, 42, pp. 1131-1145, 2004.
- 279) Guide Jr. VDR, Srivastava R, Kraus ME: Product structure complexity and scheduling of operations in recoverable manufacturing, *International Journal of Production Research*, 35, pp. 3179-99, 1997a.
- 280) Wang HF, Huang YS: A two-stage robust programming approach to demand-driven disassembly planning for a closed-loop supply chain system, *International Journal of Production Research*, 51, pp. 2414-2432, 2013.
- 281) Guide Jr. VDR, Spencer M, Srivastava R: An evaluation of capacity planning techniques in a remanufacturing environment, *International Journal of Production Research*, 35, pp.67-82, 1997.
- 282) Krikke HR, van Harten A, Schuur PC: On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products, *International Journal of Production Research*, 36, pp. 111-139,

- 1997.
- 283) Guide Jr. VDR, Srivastava R: An evaluation of order release strategies in a remanufacturing environment, *Computers & Operations Research*, 24, pp. 37-47, 1997b.
 - 284) Guide Jr. VDR, Kraus ME, Srivastava R: Scheduling policies for remanufacturing, *International Journal of Production Economics*, 48, pp. 187-204, 1997b.
 - 285) Fandel G, Stammen M: A general model for extended strategic supply chain management with emphasis on product life cycles including development and recycling, *International Journal of Production Economics*, 89, pp. 293-308, 2004.
 - 286) Kusumastuti RD, Piplani R, Lim GH: Redesigning closed-loop service network at a computer manufacturer: A case study, *International Journal of Production Economics*, 111, pp. 244-260, 2008.
 - 287) Piplani R, Saraswat A: Robust optimisation approach to the design of service networks for reverse logistics, *International Journal of Production Research*, 50, pp. 1424-1437, 2012.
 - 288) Bing X, Bloemhof-Ruwaard J, Chaabane A, van der Vorst J: Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme, *Journal of Cleaner Production*, 103, pp. 28-39, 2015.

第3章 静脈物流の効率化を組込んだ社会システムの設計

3.1 はじめに

これまで静脈物流のあり方は、すでに設計された社会システムを所与としてきた側面が強い。例えば家電リサイクル法に基づくリサイクルにおいては、費用のうち静脈物流に要する費用が約6割を占めている¹⁾。家電リサイクル法という社会システム上、小売業者に排出者からの引取義務と製造業者等への引渡義務、製造業者等には再商品化等実施義務が課されているが、法律上収集運搬費用とリサイクル費用を排出者から徴収することが認められている。このように義務的制度という枠組みの下で料金徴収が法律上認められていることから、法律上義務を負うステークホルダーに静脈物流を効率化するインセンティブは働かない。社会システムの設計が、静脈物流の効率化を前提としていないのである。

しかし第2章で明らかにしたとおり、静脈物流をマネジメント概念として捉え、社会システムの前提として組み込む方が企業経営あるいは社会厚生最適化に繋がる可能性がある。ビジネスベースではあるが、良い事例がある。多くの非鉄金属企業は図3-1に示すとおり臨海部に製錬所を配置している。これは陸上輸送コストを省略することで輸入する原材料の物流コストを抑え、企業の競争力を確保するためだが、唯一DOWA鉱業系列の製錬所は内陸に立地している。この企業は物流コスト面でのビハインドを逆手に取って、リサイクル原料に特化することで他社とは異なる競争力を身に付けることに成功している。この事実は物流が企業の競争力を支えていることを示す事例であるとともに、物流のあり方を経営の前提とすることで経営を最適化している事例でもある。



図3-1 我が国における銅製錬所の配置

社会システムでも同様のことが言えるはずで、特に社会システムと密接に関わることが多い静脈物流については、そのあり方を前提として設計されるほうが望ましい社会システムになる可能性がある。そこで、本章では効率的な静脈物流を前提として社会システムが設計された事例である小型家電リサイクル制度について、その制度創設において導入された費用対効果分析における静脈物流の位置づけを見ながら、静脈物流の効率化が社会システムの設計にどのように影響したのかを整理する。

3.2 制度創設の経緯と先行研究の整理

平成 24 年 8 月 3 日に「使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律」（通称「小型家電リサイクル法」）が成立、平成 25 年 4 月 1 日には施行され、これにより新たな個別リサイクル法がスタートしている。この法律の基になっているのが、平成 24 年 1 月 31 日に中央環境審議会から出された「小型電気電子機器リサイクル制度の在り方について（第一次答申）」²⁾ である。答申は、中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品の有用金属の再生利用に関する小委員会（以下、「小委員会」と呼ぶ。）における審議の結果であるが、審議過程では否定的なものも含め様々な意見が出された³⁾。これまでの個別リサイクル法が明らかな外部性を有していたこともあって、制度創設に対して暗黙のうちに社会的コンセンサスが得られていたのに対し、そういった社会問題が顕在化していない使用済小型家電については、リサイクルの必要性、制度の必要性から議論を開始する必要があった。小委員会の議事録が示すとおり、リサイクルの必要性自体は総論として大きな反対がなかったが、制度の必要性については慎重な意見が多かった。制度がない状況でも先行的なリサイクルの取組事例が存在していたことが表面的な理由として挙げられることが多かったが、過去の義務的な制度を踏まえた、過度な負担を強いられることへの関係業界の懸念が実質的な要因であろう。このように当初は前途多難に見えた小委員会での審議であるが、実際は比較的短期間で制度の必要性について関係者間の合意が得られ、制度の在り方についての結論が示された。このような審議の流れに大きな影響を与えたのが費用対効果分析である。そして費用対効果分析において大きな鍵を握ったのが、静脈物流の効率化である。なお、費用対効果分析は狭義には費用便益分析と同じ意味で捉えられる場合があるが、ここでは費用便益分析結果とともに、その中で便益として計測対象とされなかった効果及び貨幣換算値ではなく物理的単位等を用いて表現することが望ましい効果を定量的・定性的に分析する手法を指している。

本章では、小型家電リサイクル制度の創設に当たり、費用対効果分析がリサイクルの必要性・制度の必要性の判断材料としてどのような意義を持ち、制度の在り方に対してどのような示唆を与えたか、特にその中で静脈物流の効率化が社会システムの設計にどのように影響をしたのかを明らかにする。小委員会では時間的な制約等から費用対効果分析は大まかな傾向を把握することに重点が置かれ精緻な分析までには至っていないため、本章で

は便益等の算出過程も含めて精緻な費用対効果分析を展開する。すなわち本研究における費用対効果分析はあくまでも制度創設に向けた検討の中で行われたものという位置づけであるが、基本的な考え方を変えることなく精度と手法を改善して新たに実施するものであり、静脈物流の効率化を前提としたリサイクル政策の費用対効果分析として分析自体に学術的価値を持たせることも目的としている。

リサイクル政策の費用便益分析を中心とした経済性評価については海外を中心にいくつかの先行研究が存在する。全般的な問題としては、Pickin⁴⁾ が環境問題に関連する文献レビューにより、廃棄物リサイクル分野の意思決定ツールとしての費用便益分析の価値を検証する中で、分析を委任する側の意向に沿った結果に導く余地を許しているとしている。Tonjes and Mallikarjun⁵⁾ は、多くの研究において外部性が考慮されない限りリサイクルは費用対効果的ではないとの結論を得ていることや、逆の結論を得る研究もあるとのレビューを実施した上で、回収方法次第では経済効率性の観点からリサイクルを推進できる場合があることを示している。使用済電気電子機器に係るリサイクルについては、Kang and Schoenung⁶⁾ が e-waste のリサイクルの経済分析として、静脈物流費用を含めたリサイクルシステムに係る費用と収益を計算している。また Achillas et al.⁷⁾ は使用済電気電子機器のリサイクルのための分解の程度について、利益を最大化するための費用便益分析を用いた意思決定のフレームワークを提案している。Gregory and Kirchain⁸⁾ は北米 4 州の電子機器のリサイクルシステムの経済的な成果の評価のフレームワークを提示し、ステークホルダー毎にどのリサイクル活動で費用と収益が発生しているかを便益帰着構成表に類似した形で示している。ただし、これらの研究はフレームワークの提案を主題にしているため、経済評価自体は精緻になされておらず、静脈物流についても部分的に触れられる程度である。国内では、栗山⁹⁾ が評価手法や事例について体系的に整理しており、環境政策の経済的評価について国内で実施されているのは個別公共事業評価と環境会計という限定的な範囲であることを示している。政策立案主体が実施したリサイクル政策の経済的評価については、産業構造審議会¹⁰⁾ や、経済産業省¹¹⁾ の事例は存在するが、いずれも事後的な効果分析であり政策導入の是非を問う形での評価とはなっていない。同様に、事後的なリサイクル政策の評価としては Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)¹²⁾ による拡大生産者責任によるプログラムの評価や、United Nations University¹³⁾ の WEEE 指令のレビューがあり、国内でも宇多¹⁴⁾ や田崎ら¹⁵⁾ がある。

一方で、平成 14 年 4 月に施行された行政機関が行う政策の評価に関する法律（平成 13 年法律第 86 号）に基づいた事前評価についての制度的な枠組み自体は既に存在している。この枠組みの下で、環境省¹⁶⁾ は容器包装リサイクル法の効果や負担を分析しており、また環境省¹⁷⁾ は、家電リサイクル法施行令の改正により発生する費用と便益について分析しているが、いずれも定性的な評価のみが行われている。Regulatory Impact Analysis (RIA) に関しては例えばアメリカでは本格的な経済分析ガイダンスが整備される¹⁸⁾ など充実した環境整備が進んでいるが、リサイクル制度の詳細な評価事例は見当たらない。また、便益

帰着構成表については公共事業分野を中心に多くの既往研究が蓄積されており（例えば、上田ら¹⁹⁾）、環境政策についても高木ら²⁰⁾ などがあるが、リサイクル政策については著者の知る限り存在しない。以上のことから、本章の内容はリサイクル政策導入の是非を事前評価する目的で精緻に実施する費用対効果分析を対象とし、かつ静脈物流にも注目した内容となっている点、さらに便益帰着構成表をリサイクル制度の在り方に活用する点に特徴があると言える。中央環境審議会答申と比較して深化している点としては、対象品目を精緻に設定し金属含有量も個々の品目のものを使用していること、制度がない場合のリサイクル状況を踏まえて便益対象を設定していること、便益帰着構成表を精緻に作成していることが挙げられる。以下、3.3 では小型家電リサイクル制度創設における費用対効果分析の方法、結果及び制度への示唆について整理する。3.4 では中間処理施設の配置問題と絡めた感度分析を実施する。3.5 では便益帰着構成表を提示し、そこから関係者の役割分担がどのように導かれるかを整理する。3.6 では導かれた制度の経済学的意味を考察するとともに、すでに施行された制度の現状を踏まえた考察を行う。3.7 は本章のまとめである。

3.3 費用対効果分析と制度への示唆

3.3.1 評価対象便益の設定

費用便益分析においては政策の有無による社会状況の比較を行う必要があり、その目的は政策の効果を経済厚生観点から計測し評価することである²¹⁾。費用便益分析の基幹となっているのは補償原理であり、厚生経済学の理論的根拠から見た便益の尺度は効用である。効用変化を所得変化として捉えることにより貨幣換算したものが便益であるため、リサイクルを実施した際に発生するリサイクルシステムの関係者の会計上の利潤が便益となる。したがって、リサイクルが実施される場合（「with ケース」と呼ぶ。）に発生する関係者の利潤を便益として捉え、リサイクル制度を導入するための費用（更新費用も含む）を費用として捉えることが最適である。ただし、損失が発生する場合も含めて費用便益比を計算することを考慮し、ここでは関係者の収益の増分を便益として捉え、初期投資に加えて会計上の費用を含めて関係者の費用として捉えることとする。これにより費用便益比を常に正の値にすることができ、複数のリサイクルシステムの比較が容易となる。

中央環境審議会のフロー推計²²⁾によるとリサイクル制度がない現状（「without ケース」と呼ぶ。）における使用済小型家電（携帯電話、パソコン、カー用品を除く）の処分先割合は、製錬所での国内リサイクル（以下、「製錬所」と呼ぶ。）19.6%、最終処分55.5%、スクラップとしての輸出（以下、「海外スクラップ」と呼ぶ。）13.7%、リユース名目での輸出（以下、「海外リユース」と呼ぶ。）11.2%となっており、最終処分、海外スクラップ、海外リユースの合計である80.4%分だけが制度創設によりリサイクルに回ることになる。この80.4%分がwith ケースではリサイクルされることで、自治体、中間処理業者、金属製錬事業者に利潤（又は損失）が発生し、それを便益として捉えることになる。仮に30%の回収率（発

生ずる使用済台数のうち制度内のリサイクルルートに乗ることで追加的にリサイクルされる量) の場合は、 $30\% \times 80.4\% = 24\%$ の使用済小型家電が便益発生対象になる。考え方として、製錬所 19.6% 分については **without** ケースでもリサイクルされており、リサイクル費用は **with** ケースと同等と仮定した (実際はリサイクルが効率化されたため費用が低下するはずであるが、ここでは安全側評価としている)。最終処分 55.5% 分については、**without** ケースで最終処分されていたものが **with** ケースでリサイクルされることにより、自治体、中間処理業者、金属製錬事業者に利潤又は損失が発生する。海外スクラップ・リユース 24.8% 分については **without** ケースで海外に輸出されていたものが **with** ケースでリサイクルされることにより、輸出関連業者、自治体、中間処理業者、金属製錬事業者に利潤又は損失が発生する。ただし海外での不適正処理に繋がる輸出が多いと想定され、それに伴う不便益を便宜的に帰着させるために、本来はプラスと想定される **without** ケースの輸出関連業者の利潤を 0 と仮定した。なお、既にリサイクルシステムの存在するパソコン、携帯電話と、自動車と一体的に排出されるカー用品については使用済となった後のフローが他の小型家電と異なる。パソコンについては資源の有効な利用の促進に関する法律に基づくリサイクルが行われている割合が 7.9%、携帯電話はモバイルリサイクルネットワークに排出されるのが 35.2%、カー用品は自動車として排出されるのが 58.9% あるため¹⁾、これらを便益発生対象から除くこととした。

リサイクルシステムとしては図 3-1 のシステムを想定した²²⁾。すなわち、使用済小型家電の回収、中間処理、金属回収の 3 つの段階とそれらを繋ぐ静脈物流からなるシステムで、それぞれ別の主体 (市町村、中間処理業者、金属回収業者、静脈物流業者) が実施する。使用済小型家電は市町村から中間処理業者へは無料で引渡し、中間処理成果物は金属回収業者へは有価で売却することとしている。また、リサイクルシステム全体を管理するための費用の発生も想定した。なお、中間処理業者への無料での引渡しについては、有償及び逆有償取引の場合でも使用済小型家電回収段階と中間処理段階の間で利潤の変動が相殺されるだけで重視すべきシステム全体の採算性は変化しないこと、また結果次第では引渡し方法の検証が行えることを踏まえた便宜的な設定である。

なお、使用済小型家電の回収は狭義の (経済機能としての) 静脈物流の一部であり、またこのシステム全体は、マネジメント概念としての静脈物流システムに相当する。

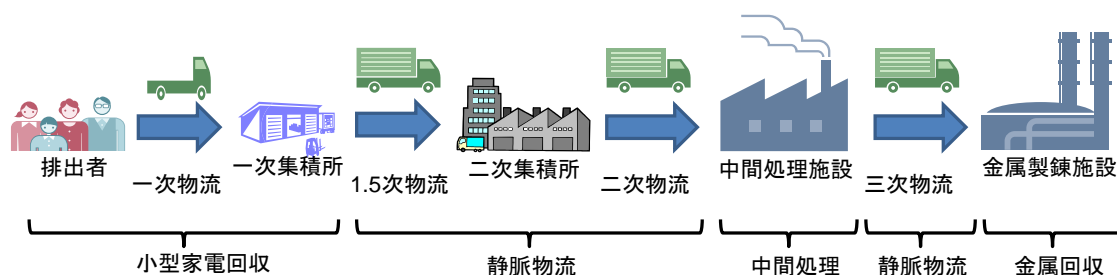


図 3-1 想定するリサイクルシステム

3.3.2 分析ケース

リサイクルシステムの内容を決定する要素のうち、便益と費用に影響を及ぼすものが複数存在する。それらの要素の条件を変化させることは異なるリサイクルシステムを意図することになり、費用対効果分析の結果がリサイクルの必要性を判断する材料となるとともに、条件設定自体が制度の必要性や強度（例えば義務型の制度にすれば回収率は上がる）を示唆することにもなる。ここでは複数のケースを設定することで、システムの内容とリサイクル及び制度の必要性を対応させることを試みた。変動させるべき要素は以下のとおりである。

【広域回収の有無】現行の廃棄物処理法では自区内処理を原則としているが、新制度の創設等により広域回収が可能となれば、静脈物流と中間処理で規模の経済が働き費用が変化する。

【回収対象品目】資源性の高い品目から低い品目まで幅広く存在し、どこまでを対象品目とするかで金属売却益とリサイクル費用の双方が変化する。資源性の高い品目のみを対象とすることで、回収した使用済小型家電の単位重量当たりの金属売却益は増加するが、中間処理と静脈物流で規模の経済が働きにくくなる点には留意が必要である。

【特定レア金属の回収有無】タンタル、ネオジウムといった特定のレア金属を回収する場合、中間処理段階で当該金属を含む特定の部品・部位を分離選別する必要がある。中間処理方法として、特定レア金属の回収がない場合は機械破碎を想定し、特定レア金属を回収する場合は機械破碎前に手作業による特定部品・部位の分離選別を想定するため、特定レア金属の回収の有無により中間処理費用が変化する。

【対象地域】過疎地を含むと経済効率的な静脈物流体制の構築が困難となるため、対象地域として過疎地を含むかどうかで静脈物流費用が変化する。

【回収率】静脈物流や中間処理では輸送車両や施設の容量から最低処理ロット（それ以下の量でも同額の固定費用が発生する閾値）が存在する他、固定費の存在から規模の経済が働きやすい。

以上の要素を変化させて、表 3-1 の 8 ケースの **with** ケースと **without** ケースのそれぞれについて計算を行った。表 3-1 ではケース 1 と異なる要素を色掛けしている。なお、資源価格は有識者へのヒアリングを参考に安全側を見てデータ入手時点（2011 年 3 月）の 2/3 倍を基本ケースとするが、入手時点のままとする感度分析も実施した。

対象品目は表 3-2 に示す。小委員会で特定対象品目²³⁾が示されているため本研究でもそれを参考にし、金属含有量が把握可能なもののうち資源性の高い 30 番までが「30 品目」、残り 24 品目を加えたものが「54 品目」である。回収対象としている鉱種は、銅、鉛、金、銀、亜鉛、パラジウム、アンチモン、ビスマスであり、特定レア金属としてタングステン、タンタル、ネオジウム、ジスプロシウム、インジウム、コバルトを設定している。

表 3-1 費用対効果分析のケース

	対象品目	特定レアメタルの回収	回収率	対象地域
ケース1	30品目	なし	30%	全国
ケース2	30品目	あり	30%	全国
ケース3	30品目	なし	5%	全国
ケース4	30品目	なし	10%	全国
ケース5	30品目	なし	20%	全国
ケース6	30品目	なし	50%	全国
ケース7	54品目	なし	30%	全国
ケース8	30品目	なし	30%	過疎地除き

表 3-2 対象品目

番号	品目	番号	品目
1	PC(ノートブック型)	28	カーナビゲーションシステム
2	携帯電話	29	CSデジタルチューナ
3	PC(デスクトップ型)	30	DVD-ビデオ
4	デジタルカメラ	31	補聴器
5	据置型ゲーム機	32	キーボードユニット
6	ビデオカメラ	33	ゲーム用コントローラ
7	デジタルオーディオプレーヤー(フラッシュメモリ)	34	カーDVD
8	公衆用PHS端末	35	BDレコーダ/プレーヤー
9	デッキを除くテープレコーダ	36	電動歯ブラシ
10	携帯型ゲーム機	37	ハイテク系トレンドイ
11	電子辞書	38	電子体温計
12	デジタルオーディオプレーヤー(HDD)	39	カーMD
13	CDプレーヤー	40	カーチューナ
14	MDプレーヤー	41	カーカラーテレビ
15	ICレコーダ	42	カーラジオ
16	ETC車載ユニット	43	カーステレオ
17	VICSユニット	44	電子血圧計
18	カメラ	45	ヘッドホン及びイヤホン
19	ハンドヘルドゲーム(ミニ電子ゲーム)	46	カーアンプ
20	プラグ・ジャック	47	電気カミソリ
21	地上デジタルチューナ	48	ヘアードライヤー
22	リモコン	49	カーCDプレーヤー
23	ラジオ放送用受信機	50	ファクシミリ
24	ACアダプタ	51	時計
25	電話機	52	ビデオテープレコーダ(セット)
26	電卓	53	カースピーカ
27	ケーブルテレビ用STB	54	モニター(電子計算機用)

3.3.3 計算方法

a) 使用済小型家電の回収

使用済小型家電の回収については、without ケースで一般廃棄物として収集されているこ

とを踏まえ、with ケースでも市町村単位で実施し、集積所に保管することを想定した。収益として最終処分費用の削減、鉛処理費用の削減を計上し、費用として使用済小型家電を回収し集積場所まで輸送する燃料費増分、車両購入費増分、人件費増分を計上した。

回収の方法については、都市タイプ別に望ましい回収方式案がモデル事業の結果²⁴⁾から提示されていることを踏まえ、5万人未満、5万人以上～30万人未満の半数の自治体はステーション回収で混載あり（他の既存の区分の資源ゴミと混載して回収）、それ以外はボックス回収で混載なしと想定した。以上より使用済小型家電の回収段階で発生する収益及び費用は以下のとおりとなる。使用データは付録に示す。

$$P^c = cut^{fd} + cut^{pb} \quad (3-1)$$

$$cut^{fd} = \sum_{i,j} m_i^{sa} r_j^{fd} u_j^{fd} \quad (3-2)$$

$$cut^{pb} = r_d^{fd} r^{fa} u_{pb}^{fa} \sum_i m_i^{sa} Pb_i \quad (3-3)$$

$$C^c = \sum_i m_i^{sa} \left\{ r^s u_{st}^s + \frac{r^m}{2} (u_{st}^m + u_{bx}^m) + r^b u_{bx}^b \right\} \quad (3-4)$$

ただし、 P^c ：使用済小型家電回収段階の収益（円/年）、 cut^{fd} ：最終処分コスト削減額（円/年）、 cut^{pb} ：薬剤処理コスト削減額（円/年）、 m_i^{sa} ：使用済小型家電 i の重量（kg）、 r_j^{fd} ：処分内容 j （破碎、焼却、埋立）の割合（%）、 u_j^{fd} ：処分内容 j の費用削減原単位（円/kg）、 r_d^{fd} ：焼却が行われる割合（%）、 r^{fa} ：焼却時における鉛の飛灰への分配率（%）、 u_{pb}^{fa} ：飛灰中鉛重量当たり薬剤処理原単位（円/鉛 kg）、 Pb_i ：小型家電 i 中の鉛含有量（kg）、 C^c ：使用済小型家電回収段階の費用（円/年）、 r^s ：小規模自治体（人口 5 万人未満）人口の比率（%）、 r^m ：中規模自治体（人口 5～30 万人）人口の比率（%）、 r^b ：大規模自治体（人口 30 万人以上）人口の比率（%）、 u_{st}^s ：小規模自治体ステーション回収原単位（円/kg）、 u_{st}^m ：中規模自治体ステーション回収原単位（円/kg）、 u_{bx}^m ：中規模自治体ボックス回収原単位（円/kg）、 u_{bx}^b ：大規模自治体ボックス回収原単位（円/kg）である。

表 3-3 に示す各回収方式での回収費用原単位の計算には既存モデル²⁵⁾を用いている。

表 3-3 回収費用原単位

		(円/kg)					
都市タイプ		小規模自治体		中規模自治体		大規模自治体	
回収量(トン/年)		1,323	10,582	1,323	10,582	1,323	10,582
ステーション	燃料費	0.1	0.1	0.6	0.3		
	人件費	142.5	136.2	136.3	62.6		
ボックス	燃料費			21.6	2.8	19.6	2.5
	人件費			604.7	88.5	461.7	66.0

シミュレーションに用いるパラメータはモデル事業実施自治体の実際の値を用いており、

小規模自治体は水俣市，大館市，高萩市の平均を，中規模自治体は日立市，江東区の平均を，大規模自治体は京都市の実際のデータを用いている．表 3-3 には実際に計算した大小二種類の回収量での原単位が示されているが，費用の計算では回収量に応じて線形補完した原単位を用いることとしている．

b) 静脈物流

ここでは一次集積所から二次集積所，二次集積所から中間処理施設，中間処理施設から金属製錬施設までの専ら輸送に係る機能のみを便宜的に静脈物流と呼んでいる．制度がない場合では使用済小型家電の輸送には廃棄物処理法が適用される可能性が高いため，自区内処理を前提にする必要がある．すなわち，中間処理は 1 次集積所で行われると想定し，図 3-1 における 1.5 次物流費用及び 2 次物流費用は発生せず，3 次物流費用のみが発生する．したがって，広域回収が不可の場合の静脈物流費用は以下のとおり計算される．使用データは付録に示す．

$$RL^{without} = \sum_{i,j} m_i^{sa} r_j^y \cdot l_{3rdj} \cdot unit_{3rd}^{without} \quad (3-5)$$

$$unit_{3rd}^{without} = \frac{unit_{truck} cap_{truck} x_c f}{\sum_{i,j} m_i^{sa} r_j^y} \quad (3-6)$$

ただし， $RL^{without}$ ：広域回収不可な静脈物流費用（円/年）， r_j^y ：中間処理成果物 j （基板，特定部位）の歩留（%）， l_{3rdj} ：部材 j に関する三次物流の距離（km）， $unit_{3rd}^{without}$ ：部材 j に関する without ケースの 3 次物流の輸送原単位（円/トンキロ）， $unit_{truck}$ ：トラックの輸送原単位（円/トンキロ）， cap_{truck} ：トラックの積載容量（t）， x_c ：一次集積所の数（箇所）， f ：一次集積所からの搬出頻度（回/年）である．

新制度の創設等により広域回収が可能となれば，通常は静脈物流で規模の経済が働き費用が削減されることになる．静脈物流については既存ネットワークや施設を有効活用して既存物流企業が担うことが最も効率的だと考えられたため，某大手物流企業の協力の下，実際に受託可能となる費用を算定し，静脈物流費用として使用することとした．ただし，実勢運賃ではなく標準運賃を使用することで企業機密には配慮している．ここでは汎用性を持たせるため輸送費用原単位を設定し，使用済小型家電が 5,000t/年発生する場合と 30,000t/年発生する場合を想定して輸送費用原単位を計算し，線形補完により発生量に応じた輸送原単位を設定することとした．このような方法を取ったのは，発生量が多くなることで一括大量輸送が可能となり，規模の経済が働くことを表現するためである．広域回収が可能な場合の静脈物流費用については以下のように計算される．

$$RL^{with} = \sum_i m_i^{sa} (unit_{1.5th}^{with} + unit_{SY}^{with} + unit_{2nd}^{with}) + \sum_{i,j} m_i^{sa} r_j^y unit_{3rd}^{with} \quad (3-7)$$

ただし， RL^{with} ：広域回収可能な静脈物流費用（円/年）， $unit_{1.5th}^{with}$ ：広域回収可能な 1.5

次物流原単位 (円/kg), $unit_{SY}^{with}$: 広域回収可能なストックヤード (以下, 「SY」と呼ぶ.)
 原単位 (円/kg), $unit_{2nd}^{with}$: 広域回収可能な 2 次物流原単位 (円/kg), $unit_{3rd\ j}^{with}$: with ケース
 の中間処理成果物 j の 3 次物流原単位 (円/kg) である.

費用原単位の計算は以下のような条件で行った.

- ・各市町村に発生する使用済小型家電の重量は年間発生量を人口比率で配分し, 365 で除して 1 日あたりの発生量とする. 全国に 964 箇所存在するクリーンセンターを一次集積所として設定し, 各市町村で回収された使用済小型家電はそこに保管されているものとする.
- ・中間処理施設は, 大規模な機械破砕が可能な施設を有する施設の立地状況を踏まえ全国 8 箇所 (各地域ブロックにひとつ) とし, モデル事業²³⁾ に関係した企業等の実際の住所を設定. 管理上 SY が必要との大手物流企業へのヒアリング結果を踏まえ, SY を中間処理施設近傍に 8 箇所配置し, ヒアリングを実施した大手物流企業の倉庫の実際の住所を設定.
- ・輸送モードとして, トラック, 鉄道を想定するが, 都道府県単位で輸送モードは統一されるとし, 最も安価な輸送モードが選択されると仮定. ただし離島は例外で, 発生量に応じてコンテナ, フェリー, 路線トラック, 宅配を選択.
- ・1.5 次物流がトラック輸送の場合, 都道府県内の発生量からトラック必要台数を割り出す. 一箇所の一次集積所における発生量がトラック積載重量を超える場合はピストン輸送, 越えない場合はルート回収とする. 一次集積所からの回収は 1 回/月以上の頻度で, 使用トラックは発生量に応じて 4t, 10t, 14t の中から選択. 走行速度は都市部で SY と一次集積所の間は 35km/時間, ルート回収時の一次集積所間が 30km/時間, 地方部ではそれぞれ 45km/時間, 40km/時間と設定. 集荷に必要な作業時間は 1t までが 15 分, 2t までが 20 分, 4t までが 25 分, 4t 以上は 30 分と設定. 一日の作業時間を 11 時間以内, 集荷可能時間が 8 時から 17 時までの制約条件で最大走行可能距離を走るものとする. 走行距離から距離帯別の認可運賃を適用し輸送費用とする.
- ・1.5 次物流が鉄道輸送 (沖縄は海上輸送も含む) の場合は, 一次集積所から最寄りの集荷駅までと SY 近郊駅から SY まではトラックで輸送. 鉄道は 5t コンテナ, 海上は発生量に応じて 10t, 12t, 20t のコンテナを選択. トラック又は車単位でのピストン輸送を基本とするが, 非効率な場合はルート回収も採用. 遠隔地及び集荷ロットが小さく (1t 未満/回) トラックや鉄道による輸送が非効率な場合は 1.5 次物流で路線又は宅配を利用.
- ・SY 費用については, 保管費, 入出庫費, 検品費を見込む. 鉄道, 海上輸送におけるサブ SY ではメッシュパレットの管理費, 回送費も見込む. 2 次, 3 次物流については 20 t トラックを利用. 金属回収業者は実在する銅製錬所 3 箇所を想定し, 3 次物流では最寄りの製錬所に輸送するものとし, 中間処理施設からの実際の距離を設定. レア金属専門メーカーとして全国で実在する 1 箇所に対してのみ輸送すると想定し, 実際の距離を設定. 以上の考え方にに基づき, 表 3-4 の数値が得られている. 特に固定費の割合が高い SY にお

いて規模の経済が強く働くことになる。

表 3-4 輸送原単位（広域回収可能な場合の静脈物流）

(円/kg)		
	30,000トン/年	5,000トン/年
1.5次物流	11.4	15.5
ストックヤード	5.9	14.0
2次物流	2.1	2.4
3次物流		
非鉄製錬まで	5.6	5.7
レアメタル専門メーカーまで	12.5	13.4

c) 中間処理

各市町村の集積所で保管された使用済小型家電は、全国 8 箇所の中間処理施設に輸送されるが、ここでは便宜的に中間処理施設数で除すことで、一施設当たりの処理重量とした。破碎選別費については中間処理業者へのヒアリングに基づき、最低ロットの処理費用が固定費的に発生し、それ以上の処理量分については変動費的に増加することで規模の経済を表現することとした。広域回収が不可能な場合には、一次集積所で中間処理を施すものとして、固定費的に発生する最低ロットを設定するとともに、非効率な手選別を前提に処理単価も割高とした。

中間処理工程については、効率的な中間処理を念頭に図 3-2 に示すプロセスを想定した。すなわち、特定レアメタルを回収しない場合は電池等の取り外しを行う前処理を除いて機械破碎を行うこととし、特定レアメタルを回収する場合は前処理に加えて特定レアメタルを多く含有するモーター、スピーカー、液晶パネルを手選別で分離した後に機械破碎を行うこととしている。図 3-2 に示される中間処理成果物の重量割合については各プロセスの分離効率を設定して算定した。分離効率とは「主産物における着目成分の分配率－非着目成分の分配率」であり、ここでは有識者へのヒアリングに基づき、手選別 100%、基板の機械選別 70%、その他の機械選別 50%としている。

以上を前提に、中間処理段階の収益及び費用については次のとおり計算される。使用データは付録に示す。ただし、基板破碎物の単価については品目によって変化し、付録に示す値は 30 品目の場合の数値である。

$$P^r = \sum_{i,j} m_i^{sa} r_{ij}^p p_j^r \quad (3-8)$$

$$C^{r-without} = \sum_{i,j} m_i^{sa} u_j^r + x_r^{without} \cdot \max \left[FC^{without}, \sum_i \frac{m_i^{sa} u_{cr}^{without}}{x_r^{without}} \right] \quad (3-9)$$

$$C^{r-with} = \sum_{i,j} m_i^{sa} u_j^r + x_r^{with} \cdot \max \left[FC^{with}, \sum_i \frac{m_i^{sa} u_{cr}^{with}}{x_r^{with}} \right] \quad (3-10)$$

ただし、 P^r ：中間処理段階の収益（円/年）， r_{ij}^p ：小型家電 i から得られる中間処理成果物 j （基板等，鉄等，アルミ等，プラスチック等．特定レアメタルを回収する場合は，さらにボディ等，タンタルコンデンサ，モーター，スピーカー，液晶パネル）の重量割合（％）， p_j^r ：中間処理成果物 j の売却単価（円/kg）， $C^{r-without}$ ：広域回収不可な中間処理費用（円）， u_j^r ：破碎選別以外の中間処理工程 j （仕分け，保管，残渣・廃棄物処理．特定レアメタルを回収する場合は手解体工程を追加）の処理原単位（円/kg）， $x_r^{without}$ ：広域回収不可な中間処理施設数（箇所）， $FC^{without}$ ：広域回収不可な破碎選別固定費（円/年）， $u_{cr}^{without}$ ：広域回収不可な破碎選別原単位（円/kg）， C^{r-with} ：広域回収可能な中間処理費用（円/年）， x_r^{with} ：広域回収可能な中間処理施設数（箇所）， FC^{with} ：広域回収可能な破碎選別固定費（円/年）， u_{cr}^{with} ：広域回収可能な破碎選別原単位（円/kg）である。

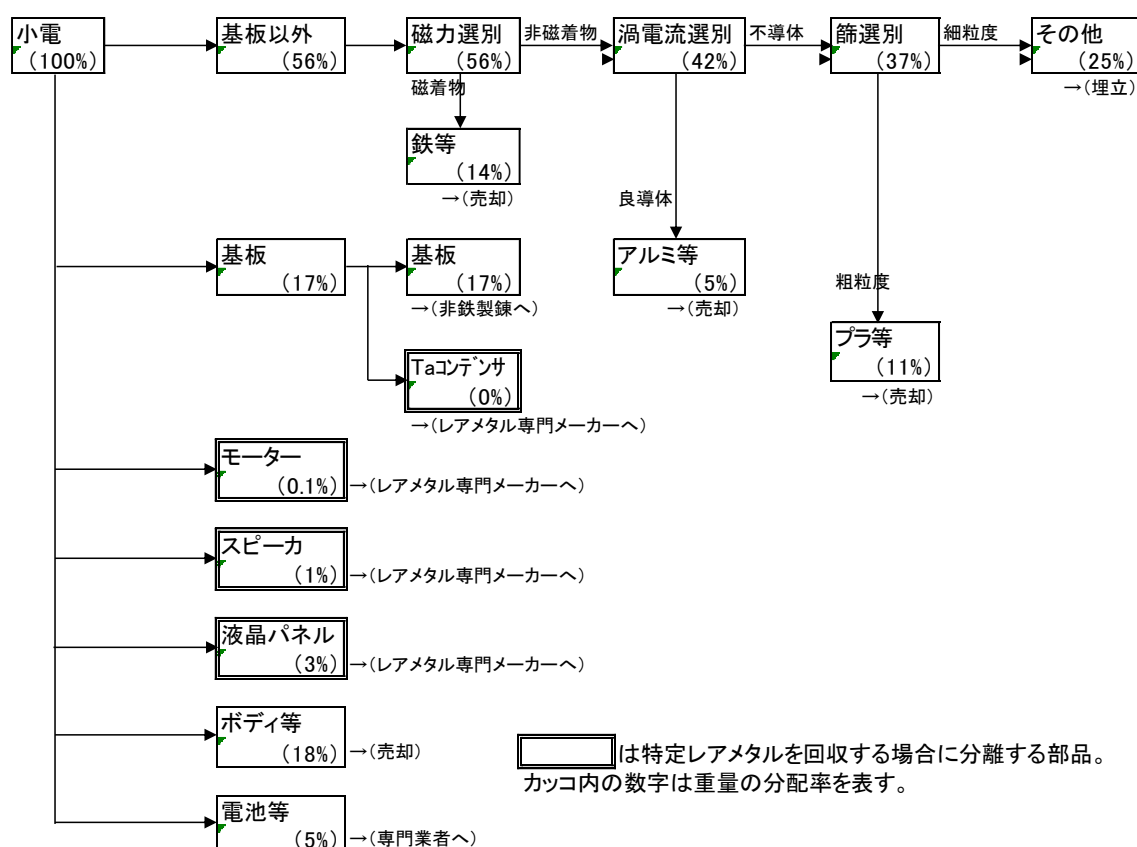


図 3-2 中間処理工程

d) 金属回収

金属製錬事業者の費用構造についてはモデル事業等からは入手できず，かつ企業間競争の根幹でもあるため，製錬費用は売上高から逆算する方法を採用した．金属回収段階の収益及び費用については次のとおり計算される．使用データは付録に示す．

$$P^m = \sum_i me_i^r r_i^m p_i^m \quad (3-11)$$

$$C^m = (1-t) \sum_i me_i^r r_i^m p_i^m \quad (3-12)$$

ただし、 P^m ：金属回収段階の収益（円/年）、 me_i^r ：中間処理成果物に含まれる金属 i の含有量（kg）、 r_i^m ：金属回収段階の金属 i 採取率（%）、 p_i^m ：金属 i の売却単価（円/kg）、 C^m ：金属回収段階の費用（円/年）、 t ：金属回収段階の売上高利益率（%）である。

e) 管理費用

家電リサイクル制度等を参考にすると、数量管理などリサイクルシステム全体を管理するための会社（あるいは部署）の設立費用を計上する必要がある。ここでは以下のとおり想定し、使用データについては付録に示す。

$$C^{mg} = c^o + c^d + c^b + c^l \quad (3-13)$$

ただし、 C^{mg} ：管理費用（円/年）、 c^o ：事務所・設備関連費用（円/年）、 c^d ：会社設立諸経費の減価償却額（円/年）、 c^b ：管理業務・ユーティリティ関連費用（円/年）、 c^l ：人件費（円/年）である。

3.3.4 分析結果と制度の在り方への示唆

以上より採算性分析及び費用便益分析を実施でき、まず採算性分析については以下のとおりとなる。

$$\pi^{with} = P^c + P^r + P^m - C^c - RL^{with} - C^{r-with} - C^m - C^{mg} \quad (3-14)$$

$$\pi^{without} = P^c + P^r + P^m - C^c - RL^{without} - C^{r-without} - C^m - C^{mg} \quad (3-15)$$

ただし、 π^{with} ：with ケースの利潤（損失）（円/年）、 $\pi^{without}$ ：without ケースの利潤（損失）（円/年）である。

費用便益分析については、以下のとおりとなる。

$$TB_t = P^c + P^r + P^m \quad (3-16)$$

$$TC_t = C^c + RL^{with} + C^{r-with} + C^m + C^{mg} + IC + RC_t \quad (3-17)$$

$$B = \sum_{t=1}^T \frac{TB_t}{(1+r)^t} \quad (3-18)$$

$$C = \sum_{t=1}^T \frac{TC_t}{(1+r)^t} \quad (3-19)$$

$$CBR = B / C \quad (3-20)$$

ただし、 TB_t ： t 年次における便益（円）、 TC_t ： t 年次における費用（円）、 IC ：初期投資

費用（円）， RC_t ： t 年次における再投資費用（円）， CBR ：費用便益比である．初期投資，再投資については，付録に示す数値を初期投資として 1 年目に，コンテナ，ボックスの耐用年数をそれぞれ 5 年，10 年として耐用年数ごとに再投資を行うものとする．計算期間 T は 20 年，社会的割引率 r は 4%としている．

なお，採算性分析では制度維持を主眼として年間の採算性を検討し，費用対効果分析では制度創設の是非を主眼として初期投資を制度創設のための社会的費用という位置づけで捉えている．両分析ともキャッシュフローの発生時に費用を計上しているため減価償却は考慮せず，採算性分析では経常的ではない初期投資は含めていない．

表 3-5 に with ケースの採算性分析結果，図 3-3 は回収率及び広域回収の有無による採算性の変化に加え，資源価格が現状のままの場合を想定した感度分析結果を示している．図 3-4 には表 3-1 の 8 ケースと，ケース 1 で資源価格がデータ入手時点のままであったケースの費用便益比を示す．

表 3-5 採算性分析結果

(百万円/年)										
ケース		小型家電回収		静脈物流	中間処理		金属回収		管理	利潤
		収益	費用	費用	収益	費用	収益	費用	費用	
1	基本ケース	1,129	2,113	569	3,714	1,415	3,934	3,717	88	875
2	レアメ回収	1,128	2,110	578	5,462	3,705	6,372	6,105	88	375
3	回収率5%	188	630	138	619	362	656	620	88	-374
4	回収率10%	376	782	258	1,238	532	1,311	1,239	88	27
5	回収率20%	753	1,409	448	2,476	944	2,623	2,478	88	485
6	回収率50%	1,882	3,522	825	6,189	2,359	6,556	6,195	88	1,640
7	品目拡大	2,144	4,045	937	4,004	2,830	4,142	3,914	88	-1,522
8	過疎部除き	903	1,440	454	2,971	1,132	3,147	2,974	88	934

これらの分析結果が示唆する内容は次のとおりである．

- ・ $B/C > 1$ のケースは，リサイクルを実施することが経済効率的である．ここでは関係者の利潤のみを便益として捉えているため， $B/C > 1$ の場合はリサイクルシステム全体として採算性を有していることにもなる．図 3-4 から，回収率を上げること，レアメタルを回収しないこと，対象品目を資源性の高い品目に限定すること，対象地域から過疎地を除くことで経済効率は（ここでは採算性も）向上する．
- ・ 図 3-3 より，広域回収を伴わずにリサイクルを実施しても経済効率的ではない．広域回収を伴わない場合リサイクルは市場原理では実現しないが，広域回収を伴えばリサイクルが市場原理で実現できる場合がある．すなわち，効率的な静脈物流と中間処理を前提とすれば，市場原理の下でのリサイクルが実現される可能性がある．
- ・ 仮にリサイクルシステム全体で $B/C > 1$ の場合でも，各段階の実施主体が異なる場合，小

型家電回収段階では損失が出ることから市場原理に委ねるとリサイクルは実現しないが、使用済小型家電の有償引渡しや中間処理段階以降の利潤の小型家電回収段階へ補填が解決策になる可能性がある。また図 3-4 から、特定レアメタルを回収すると採算性が低下するので、市場原理に委ねるとレアメタルは回収されない。ただし表 3-5 から分かるように特定レアメタルを回収しても採算性は確保されるケースがある上、回収率や回収範囲次第ではシステム全体で $B/C > 1$ を確保できる可能性もあり、制度的に担保すれば採算性を確保しながらレアメタルを回収することは可能な場合もある。

- $B/C < 1$ のケースは、リサイクルシステム全体として採算性を有していないが、資源の安定供給や環境改善などの社会的便益を貨幣換算して加味すると $B/C > 1$ となる可能性はある。リサイクルの実施により、貨幣換算できない効果も含めて考えると効果が費用を上回る可能性はある。

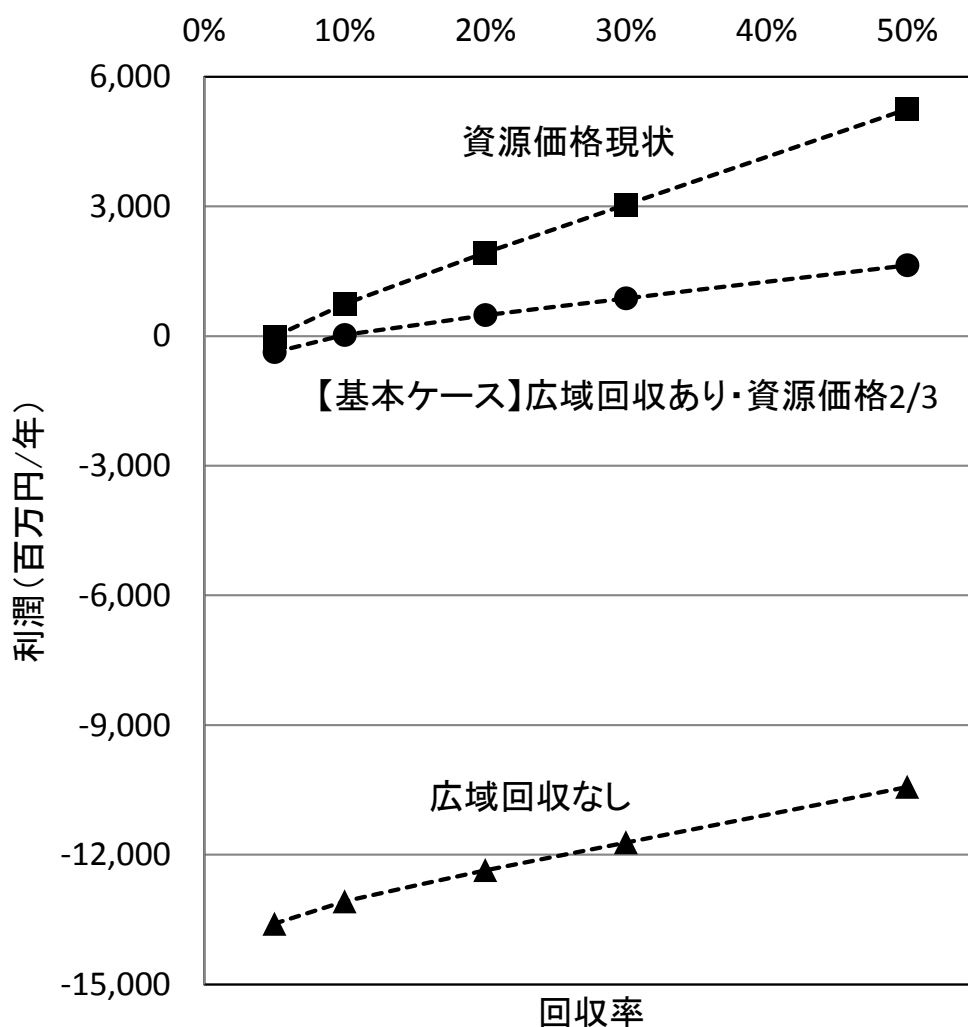


図 3-3 広域回収の有無による利潤の変化

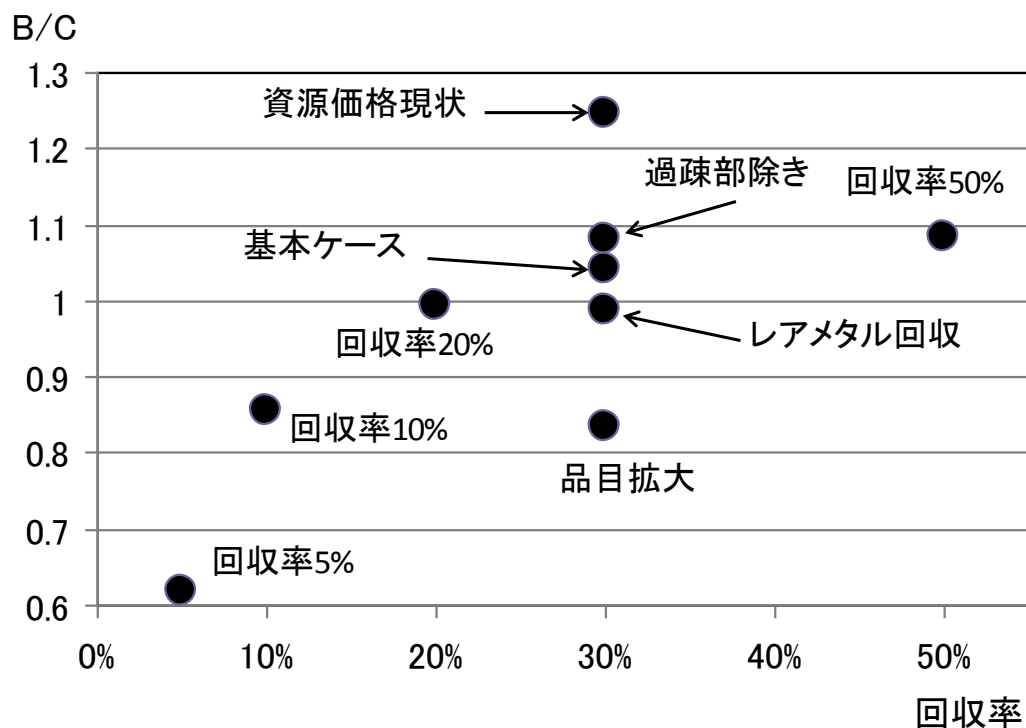


図 3-4 費用便益分析結果

費用対効果分析の結果が制度の在り方について示唆することは次のとおりである。まず、経済効率性の面からも広域回収を前提とすべきこと、段階別に見ると使用済小型電気電子機器回収段階では損失が発生し、制度がない状態ではリサイクルが実現しないことから、これらを解決するため制度の必要性が導かれる。対象品目や対象地域をどこまで広げるかについてやレアメタルを回収するか否かは、便益以外の定量的・定性的効果を加味することで採算性は低下しても費用対効果が増加する可能性があるため、政策判断が必要となる。また、リサイクルシステム全体で採算性が確保される可能性があることから、誰かに義務を課して強制的に実施せずとも、促進型の制度により市場原理を活用しながらリサイクルが実現できる可能性を示唆している。このことから、リサイクル実施強度との関係で、多大な社会コストを要する義務型（例えば自動車リサイクル法創設時の初期コストは 142 億円²⁶⁾）より、促進型の制度から開始することの優位性が導かれる。具体的には、関係者が協働するフレームワークを提示し、廃棄物処理法の規制を緩和することで、リサイクルの実施を促進させる制度である。ただし、促進型の制度でリサイクルを行うことは、同時にリサイクルシステムの採算性が回収率等で変動するためにシステムの実効性にはリスクが伴うことになる。そのリスクの取扱いが制度における役割分担との関係で問題となる。

このように静脈物流や中間処理という静脈物流システムに含まれる機能の効率化が制度の必要性に繋がり、さらに促進型という制度の内容に密接に関わっていることになる。

3.4 感度分析

本章で想定したリサイクルシステムは、静脈物流と中間処理段階で規模の経済を働かせることにより経済効率的なリサイクルが行われる可能性があるというものである。なお、中間処理の場所や方法についてもマネジメント概念としての静脈物流システムには含まれる。今回の分析では、with ケースにおける中間処理段階では、大量一括処理を前提とした中間処理施設数と最低ロットを与条件として費用の計算を行っている。静脈物流段階においても規模の経済を意図的に表現している。中間処理段階における前提条件が変化した場合、規模の経済の働き方が変動し、リサイクルシステムの採算性に影響する。中間処理施設数の変化は静脈物流費用にも大きく影響し、通常はトレードオフの関係にある。

ここでは、表 3-1 のケース 1 (回収率 30%; 基本ケースとする)、ケース 5 (回収率 20%)、ケース 6 (回収率 50%) について、8 箇所としている中間処理施設数が 16, 32, 48 箇所になった場合の中間処理費用の変化、さらにケース 1 については 5t としている最低ロットが 1/2 (2.5t)、2 倍 (10t) となった場合の中間処理費用の変化について感度分析を実施する。システムへの影響を見る意味で、システム全体の利潤への影響を図 3-5 に示す。

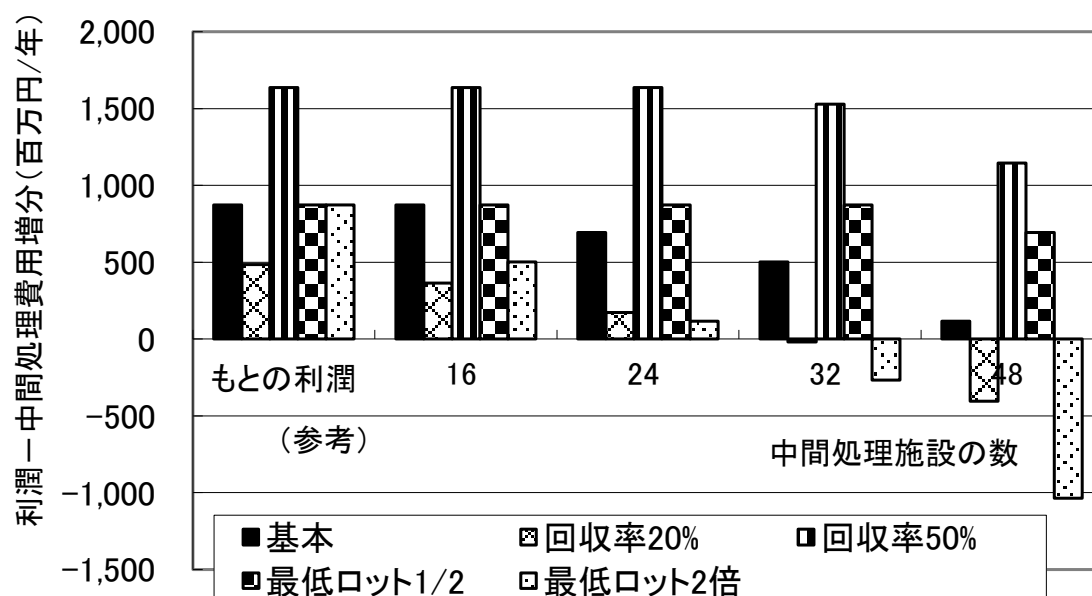


図 3-5 感度分析 (システムの採算性への影響)

図 3-5 に示すとおり、基本ケースでは 16 箇所になっても中間処理費用は変化しないが、24 箇所では静脈物流費用の 32%、32 箇所では 64%、48 箇所では 133%に相当する中間処理費用の増加になり、利潤を減少させる要因になる。静脈物流費用については、輸送距離が短くなることで減少する要素と、少量輸送に伴い規模の経済が働きにくくなることで増

加する要素の両方の影響を見る必要があるが、少なくとも中間処理施設の数が増えすぎると、静脈物流費用の削減分を大きく上回るような中間処理費用の増加に繋がることが分かる。回収率 20%と 50%の場合の結果と比較すれば、この傾向は回収率が少ないほど大きくなる。最低ロットが変化した場合の分析結果を見ると、最低ロットが大きくなることで中間処理施設数の増加が及ぼす影響が当然大きくなる。そしてシステム全体の利潤を失うケースがあるなど、採算性や経済効率性に大きく影響を与えるほどのオーダーになる。

このように、本章の分析で前提条件としている中間処理施設の数と最低ロットの設定次第でシステム全体の採算性や経済効率性は変化し、特に静脈物流費用とのトレードオフ関係が重要になる。施設配置を含む最適な静脈物流ネットワークが促進型の制度の下で実現可能かどうかは慎重に見極める必要がある。そしてこういったことも含めシステム全体の最適化を目指すものがマネジメント概念としての静脈物流システムであると言える。

3.5 便益帰着構成表と役割分担の導出

費用対効果分析の結果、促進型の制度を創設して、関係者が協働したリサイクルを市場原理の下で実現させる方向性が導かれた。次に問題となるのが、①受ける便益・効果に応じた関係者の役割分担をどうするか、②採算性が確保できない場合のリスクを誰が負うのかである。これらを明確にするため便益帰着構成表の作成を行った。

便益帰着構成表とは、政策により生じる便益（不利益）の波及的影響を、評価の対象とする項目に対し関係主体毎にまとめたものであり、政策影響の波及メカニズムを含めた便益の帰着構造を明らかにすることが可能となる¹⁹⁾。ここでは、関係主体として、国、排出主体としての国民、排出事業者、使用済小型家電の収集主体としての自治体、小売店、中間処理・金属回収主体としてのリサイクル事業者、静脈物流担当主体としての物流事業者、金属使用主体としてのメーカー（素材、部品、組立）に加え、リサイクルシステム全体の管理を行い、リスクを負う者を「全体管理者」として想定し（法律上の「認定事業者」に該当するが、制度創設に向けた検討であるとの位置づけを踏まえて別の呼称とした）、システムの関係者から受益主体としては独立させている。

リサイクルシステムが創設された場合に、効果がどのように波及するかについて図 3-6 に示す。図 3-6 ではどの範囲が便益、金銭的外部効果、技術的外部効果を判別しやすくするためそれぞれの範囲を点線で囲っている。このフローに基づいて、便益帰着構成表を作成した結果を表 3-6 に示す。表 3-6 は第 2 節のケース 1 の便益帰着構成表であり、各セルの数字の考え方・計算方法は以下のとおりである。

- ・ 定量的に把握でき、システムが機能する上で確実に発生する便益又は費用については数値を記入。システムが機能する上で必須ではない便益・費用、定性的な効果、その主体のシステムへの参画は不確実であるが参画した場合に発生する可能性のある便益・費用については定性的に便益の増加を（+）、便益の減少（費用の発生）を（-）として表示

し、どちらもあり得る場合は（＋／－）として表示する。

- ・リサイクルシステム機能中に各関係者に発生する年間の経常的な便益又は費用と、自治体に発生する初期投資や再投資費用は性格の異なるものであるため切り分けて記載。
- ・中間処理、金属回収はリサイクル事業者として一括りとし、中間処理及び金属回収に係る費用に5%の利益率を上乗せして認定事業者が委託するものとする。したがって、リサイクル事業者には委託料収入、認定事業者には委託料支出が発生する。中間処理、金属回収により得られる有用金属の販売収入（表 3-6 における 3,714+3,934=7,638 を表 3-6 に表示）は全体管理者に帰着する。静脈物流についても同様に全体管理者より物流事業者へ委託し、全体管理者には委託料支出、物流事業者には委託料収入が発生する。

便益帰着構成表から以下のことが明らかとなる。

- ・排出者である国民には複数の便益が帰着する。
- ・排出事業者については産業廃棄物処理費用が不要となれば便益を受ける。
- ・市町村には、経常的には収集運搬費用が最終処分コスト削減便益を上回るため不便益が発生する。加えて初期投資も発生する。
- ・業務を受託するリサイクル事業者、物流事業者委には便益（適正利潤）が発生する。特に、リサイクル事業者の便益が大きい。

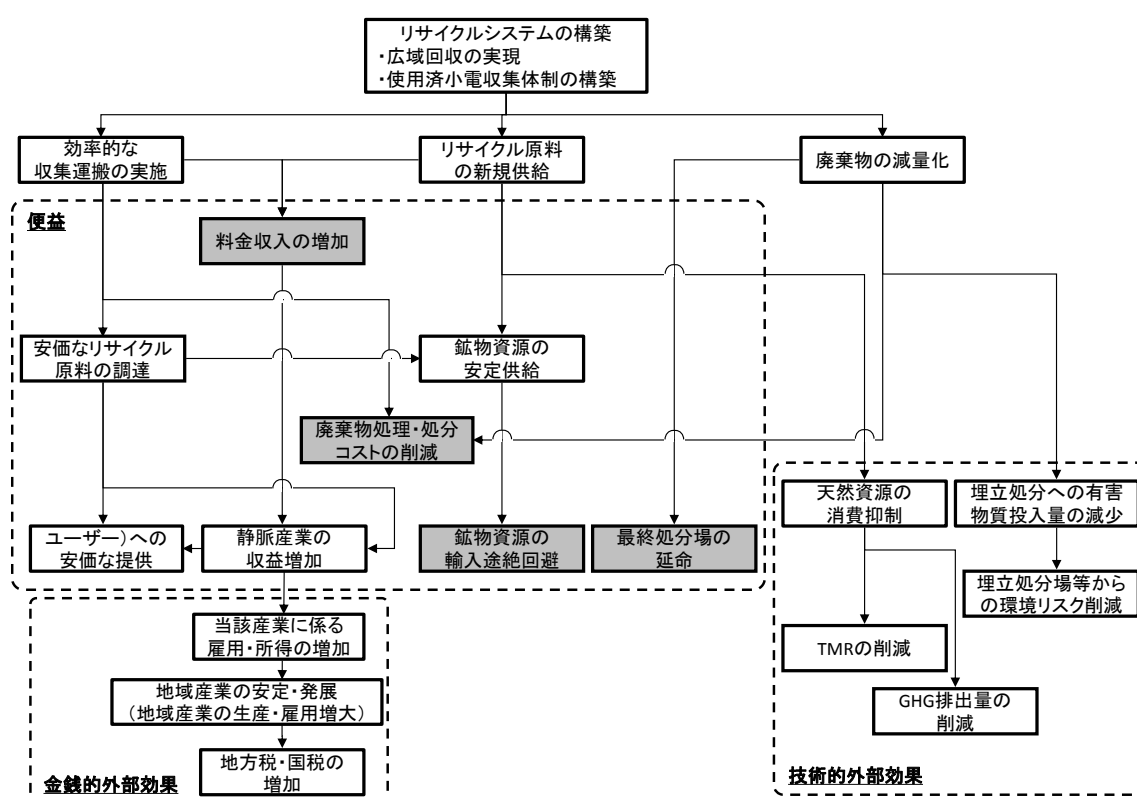


図 3-6 効果の波及フロー

表 3-6 便益帰着構成表 (回収率 30%)

項目		主体		国		排出者・製品ユーザー		事業所	自治体	家電販売店	中間処理・金属回収	物流	金属ユーザー		全体管理	合計
費用の変化						国民					リサイクル事業者	物流事業者	素材メーカー	組立メーカー	認定事業者	
リサイクル制度準備費											※設備投資は減価償却費として計上	※設備投資は減価償却費として計上			事務所・設備運賃、会費等経費発生(－)	初期投資 -1,914
普及啓発・広報費		普及啓発・広報費発生(－)							-1,914						普及啓発・広報費発生(－)	初期投資 -391
収集運搬費									-2,110							-2,110
輸送費												-418				-418
保管費										保管費用発生(－)		-150				-150
中間処理費・有用金属回収費											-5,126					-5,126
システム運営・管理費															-88	-88
委託料支出															-6,004	-6,004
研究開発費													研究開発(島解体設計・増産資源利用の実施(－))	研究開発(島解体設計・増産資源利用の実施(－))		(－)
便益の変化 (直接的便益)	廃棄物処理・処分コスト削減 (有害物質処理コスト削減も含む)						廃棄物処理委託費削減(＋)		1,128	廃棄物処理委託費削減(＋)						1,128
	中間処理費(解体費用等)削減									新たな販売機会の発生(＋)	中間処理費削減(＋)					(＋)
	販売収入														7,638	7,638
	委託料収入										5,408	596	金属の安定供給効果(＋)	金属の安定供給効果(＋)		6,004
(定量的効果)	金属資源の安定供給効果					金属の安定供給効果(＋)							金属の安定供給効果(＋)	金属の安定供給効果(＋)		(＋)
	最終処分場延命効果					最終処分場延命効果(＋)										(＋)
	TMR削減効果					TMR削減効果(＋)										(＋)
(定性的効果)	有害物質による環境・健康影響改善効果					環境リスク削減効果(＋)										(＋)
	雇用創出による所得の変化					所得の増加(＋)				賃金支出の増加(－)	賃金支出の増加(－)	賃金支出の増加(－)			賃金支出の増加(－)	0
補助金の変化		補助金(－)							補助金(＋)		補助金(＋)					0
税金の変化		法人税(＋) 所得税(＋)							法人住民税(＋) 所得税(＋)	法人税(－) 法人住民税(－)	法人税(－) 法人住民税(－)	法人税(－) 法人住民税(－)			法人税(－) 法人住民税(－)	0
合計		(－)		(＋)		(＋)	(＋)		初期投資:-2,305 経常:-982	(＋／－)	282	28	(＋／－)	(＋／－)	1,546	(＋)

凡例：＋便益の増加　－便益の減少　＋／－増加も減少もあり得る場合　斜体はシステムが機能する上で必須ではない便益・費用　※合計欄には数値化(金額換算)された項目の合計を記載

表 3-7 便益帰着構成表（回収率 5%）

項目	主体	国	排出者・製品ユーザー		小型電気電子機器回収		中間処理・金属回収		静脈物流	金属ユーザー	全体管理	合計
			国民	事業所	自治体	家電販売店	リサイクル事業者	物流事業者	素材メーカー	組立メーカー	全体管理者	
費用の変化	リサイクル制度準備費				-1,914		※設備投資は減価償却費として計上				事務所・設備運賃、会社設立経費発生(－)	初期投資 -1,914
	普及啓発・広報費	普及啓発・広報費発生(－)			-391						普及啓発・広報費発生(－)	初期投資 -391
	収集運搬費				-1,337							-1,337
	輸送費							-126				-126
	保管費					保管費用発生(－)		-121				-121
	中間処理費・有用金属回収費						-770					-770
	システム運営・管理費										-88	-88
	委託料支出										-1,071	-1,071
	研究開発費								研究開発(島解体設計・再生資源利用の実施(－))	研究開発(島解体設計・再生資源利用の実施(－))		(－)
	便益の変化(直接的便益)				354	廃棄物処理委託費削減(＋)	中間処理費削減(＋)					354
(定量的効果)	金属資源の安定供給効果					新たな販売機会の発生(＋)					1,016	1,016
	最終処分場延命効果											
	TMR削減効果											
	環境リスク削減効果											
	雇用創出による所得の変化					資金支出の増加(－)	資金支出の増加(－)	資金支出の増加(－)	金属の安定供給効果(＋)	金属の安定供給効果(＋)	資金支出の増加(－)	0
	補助金の増加	補助金(－)			補助金(＋)		補助金(＋)					0
	税金の変化	法人税(＋) 所得税(＋)			法人住民税(＋) 所得税(＋)	法人税(－) 法人住民税(－)	法人税(－) 法人住民税(－)	法人税(－) 法人住民税(－)			法人税(－) 法人住民税(－)	0
	合計	(－)	(＋)	(＋)	初期投資:-2,305 経常:-982	(＋／－)	41	13	(＋／－)	(＋／－)	-143	(＋)

凡例:＋便益の増加　－便益の減少　＋／－増加も減少もあり得る場合　斜体はシステムが機能する上で必須ではない便益・費用　※合計欄には数値化(金額換算)された項目の合計を記載

- ・小売店は現在下取り品として受け入れている使用済小型家電の産業廃棄物としての処理費用が削減され、新たな販売機会が生じることから便益を受けるが、保管費用が発生するため、トータルで便益を受けるかどうかは定量的には把握できない。
- ・メーカーは金属の安定供給効果を享受できるが、研究開発の実施により費用が発生するため、トータルで便益を受けるかどうかは定量的には把握できない。すなわち、システム参加によりメーカーに経済的メリットが見込めず、システムへの参加や費用負担を強いるのは困難である。
- ・全体管理者は表 3-6 のケースでは便益を受けるが、3.3 で示すとおりシステム全体で採算性が確保できないケースもあり、その場合はリサイクル事業者等との通常の委託契約を想定すれば不便益を受けることになる。すなわち、このシステムにはリスクが内在する。便益帰着構成表が制度の在り方について示唆することは次のとおりである。

まず、国民には複数の便益が帰着するため、排出に伴う費用発生の可能性も含め、リサイクルに協力することが望ましい。全体で便益（利潤）が発生する場合は、不便益を受ける市町村への還元を行う方が公平性の観点からは望ましいが、制度的に担保しない限り難しい。そこで、システム全体での不採算性のリスクを全体管理者が負うことでシステムが機能させる方法が現実的となる。関係者の中で最大の受益者であるリサイクル事業者が負うことの可能性が公平性の観点から導かれるが、商慣習的にリスク負うことに抵抗の少ない業界の参入も排除するものではない。

家電リサイクル制度のようにメーカーにシステムに参画させる方法はあるが、促進型の制度を前提とすれば、便益帰着構成表からはメーカーに経済的メリットが見込めないため、システムへの参加を強いるのは困難である。受益者でもある国民を窓口として料金を徴収する方法はあるが、その場合には全体の管理コストが増加するなどの問題が生じる。システムに内在するリスクが顕在化した場合に、システムが維持できるか否かのシステムの安定性が最大の課題となるため、システムに採算性を持たせてリスクを顕在化させないか、誰かに費用負担を義務づけてシステム自体からリスクを排除するかのいずれかの対応が必要となる。

3.6 制度の経済学的意味と現状を踏まえた考察

3.5 までで費用便益分析結果や便益帰着構成表が小型家電リサイクル制度のスキームを導いたことが明らかとなったが、ここではその経済学的意味を考察する。

促進型の制度のイメージは、図 3-7 に示すとおりである。すなわち、制度がない状態では使用済小型家電の需要曲線と供給曲線が交わっていないが、制度創設により供給曲線を下方にシフトさせることで Q_1 において市場原理によるリサイクルが実現可能となる。広域回収を可能とし、回収率を確保して規模の経済を働かせることで供給曲線は下方にシフトするが、採算性分析により、少なくとも需要曲線と供給曲線が交わるレベルまでシフトする

可能性があることが示唆されている。

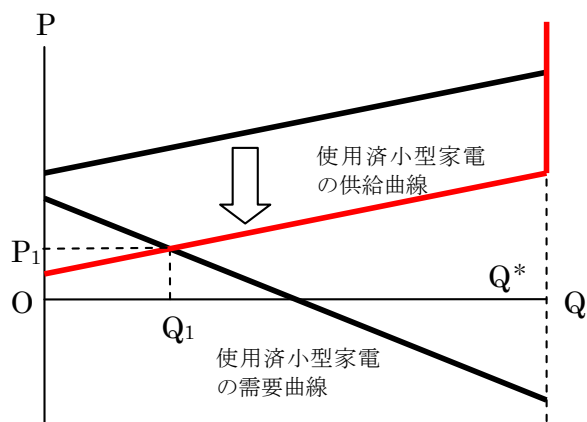


図 3-7 促進型制度のイメージ

問題は、仮に交点ができるまでシフトするとしても、それが社会的に最適なリサイクル量であるかどうかである。社会的に最適なリサイクルの量は図 3-8 に示すとおり、リサイクルの社会的限界費用と環境改善等の社会的限界費用が交わる Q_2 となる。環境改善等の社会的限界費用とは、リサイクルされないことで失われる環境や資源等を回復するための費用であるが、今回の分析ではそれを貨幣換算できていないため、 Q_1 と Q_2 がどれだけ乖離しているかは把握できない。

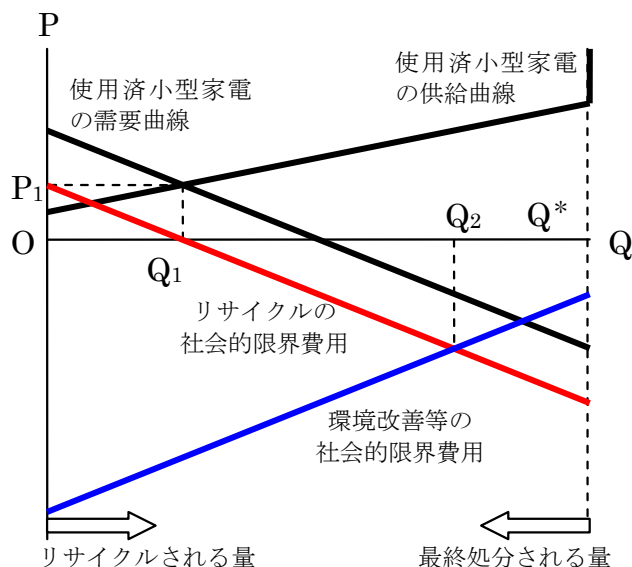


図 3-8 社会的に最適なリサイクル量

費用便益分析あるいは費用対効果分析により環境改善等の効果を明確に定量化できれば、

違う制度のスキームが導かれた可能性がある。例えば、図 3-8 において環境改善等の社会的限界費用の傾きが小さければ Q_1 と Q_2 の乖離は小さく促進型のスキームでも大差はないことになるが、傾きが大きければ Q_1 と Q_2 の乖離が大きくなり、社会的に望ましいリサイクル量とは言えないことになる。そういった場合には、市場原理に委ねて過小なりサイクル量を実現させるよりも、図 3-9 に示すような①～③の対応により社会的に望ましいリサイクル量を確保する必要が生じる場合もある。

すなわち、①供給曲線を下方にシフトさせる、②需要曲線を上方にシフトさせる、③価格弾力性ゼロの供給曲線を作る、といった対応であり、①は例えば自治体に交付金を与えてリサイクルを促進する場合、②は例えばリサイクル産業に補助金を与える場合、③は例えば自治体に分別収集を義務付ける場合が該当し、義務型のスキームの一例である。

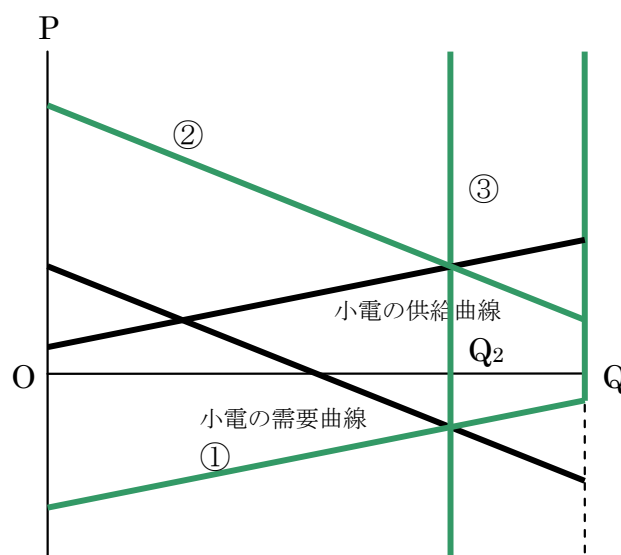


図 3-9 最適なりサイクル量を達成するための方策

小型家電リサイクル制度は図 3-7 に示すように、静脈物流と中間処理の効率化により供給曲線を下方にシフトさせる制度である。これまで述べてきたような分析が行わなければ、静脈物流の効率化が注目されることはなく、料金徴収を伴った義務型の制度となっていた可能性も否めない。促進型の制度として成功するか否かは、供給曲線の下方へのシフトがどれだけ実現するかによる。現状としては静脈物流の効率化を前提とした社会システムではあるが、社会的に最適なりサイクル量と制度の運用結果次第では静脈物流の効率化を義務的に組込んだ社会システムへと変更する必要性が生じる可能性もある。特に費用対効果分析で前提とした静脈物流と中間処理で規模の経済が働くか否かは運用に大きく委ねられている。

に認定を受けた事業者は表 3-7 のとおりである.

表 3-7 法施行後の認定事業者

[illegible]

出所：環境省ホームページ

実に 45 社もの事業者が認定を受けており、かつ同一地域に多くの認定事業者が乱立している状況で、規模の経済が働くか否かについては不透明な状況と言わざるを得ない。制度の前提となった、すなわち促進型を導いた静脈物流の効率化が行われるためには、金属価格の上昇等の周辺環境の変化を除けば輸送方法の工夫が認定企業の淘汰が現実的な解となると思われる。制度の創設趣旨を踏まえて、認定事業者による費用効率的な中間処理・静脈物流のロットや場所の管理、すなわち静脈物流システムの管理が必要となる。

3.7 まとめ

本章では小型家電リサイクル制度の費用対効果分析の方法と結果，それに対する静脈物流の位置付けを示すとともに，結果が制度の在り方に与える示唆について整理した．具体的には，広域回収が伴わなければ採算性が確保できないことや段階別には採算性が確保できないという分析結果から制度の必要性が導かれること，システム全体で採算性が確保できる分析結果の存在から制度のスキームとして促進型が示唆されることを示した．また，費用便益分析結果が変動するという複数の分析結果により，システムの課題がその安定性であることを明らかにした．

これまで経済的な観点での議論があまり行われていないリサイクル政策について，特にその創設の是非を問うための事前評価手法として小委員会において費用対効果分析が活用されたことには大きな意義があり，今後のリサイクル政策のあり方に影響するアプローチであったと言える．特に社会システムとして制度を創設する場合に，これまで制度を所与としてきた静脈物流の効率化を制度に組込んだことには非常に大きな意味を持つ．そのことを踏まえると，本章の内容の貢献は精緻な分析結果を根拠とすることで説得力を持たせた形で費用対効果分析結果から制度のスキーム構築に至る過程を描写していること，また分析における重要な前提条件については感度分析を加えることで今後の効率的な制度運用に対して示唆を与えていることにある．

現状を踏まえた今後の課題としては大きくは二つ挙げられる．まず一つ目として，感度分析で触れたように中間処理施設の配置と静脈物流コストの関係がリサイクルシステムの鍵になることから，本章では与条件としている中間処理施設の数と配置について，どうすれば社会厚生を最大化する施設配置や輸送方法になるかを検討する必要性である．仮に，認定事業者の数が多すぎて規模の経済が働かないといった状況が現実になれば，制度の継続が危ぶまれるため，理想的な施設配置や静脈物流システムを制度的に担保することも視野に入れる必要がある．最適な施設配置については，第 2 章で整理したようにすでに多くの先行研究があり，第 2 章を参照することで容易に学術的な解は用意できるだろう．しかし，制度自体の変更については関係者との調整が発生し，単純な話ではなくなる．調整の際の学術的な基礎資料作成に本研究が寄与することに期待したい．

二つ目としては，今回の評価は定性的な効果も加味した費用対効果分析と言いながらも，全ての評価軸について定量化あるいは指標化ができていないこと，また評価軸間の重み付けが明確でないことから，実質的には経済効率性の評価軸が評価の大勢を占めたものとなっている点である．したがって，社会システムの評価として十分に社会的なコンセンサスを得られるかどうかについては依然として課題が残る．今後は，経済効率性以外の評価軸も加えた中立的かつ普遍的な社会システムの評価体系の確立が望まれ，この点については第 6 章で発展させる．

第3章付録 使用データと根拠（表中式番号には本文中式番号「3-○」の○のみを記載）

式番号	項目	値	根拠
(2), (5), (7), (8), (9), (10)	m_i^{sa}	品目毎に設定	製品重量×年間排出台数×回収率. 製品重量と年間排出台数は小委員会資料参照
(2)	r_j^{fd}	破碎 67	平成21年度使用済小型家電からのレア金属の回収及び適正処理に関する研究会とりまとめ
		焼却 41	
		埋立 21	
(2)	u_j^{fd}	破碎 36	モデル事業実施自治体の数値
		焼却 23	
		埋立 47	
(3)	r^{fa}	32.8	某市での実測値
(3)	u_{pb}^{fa}	5,000	有識者へのヒアリング
(3)	Pb_i	品目毎に設定	小委員会資料参照
(4)	r^s	20.5	平成17年度国勢調査. 「過疎部除き」は小規模都市から人口20%分を減じてから割合を再計算
		過疎部除き 0.6	
	r^m	38.0	
		過疎部除き 47.5	
	r^b	41.6	
		過疎部除き 52.0	
(5), (7)	r_j^y	部材毎に設定	「中間処理される品目別の部材重量の総和/想定回収量の総重量」で計算. 品目毎の部材重量は小委員会資料参照
(5)	l_{3rdj}	基板 300	基板の引渡先である銅製錬所が全国に3箇所. 特定部品の引渡先であるレアメタル専門メーカーが全国1箇所として平均的な距離を想定
		特定部品 500	
(6)	$unit_{truck}$	4tトラック 71.5	社団法人日本建設機械工業会「平成15年度廃ゴムクロウの広域リサイクルシステム報告書」
		10tトラック 43	
(6)	cap_{truck}	4 or 10	物流業者へのヒアリングにより2種類を設定
(6)	x_c	964	全国のクリーンセンターの数
(6)	f	12	自治体の現状を踏まえて設定
(8)	r_{ij}^p	品目毎に設定	小委員会資料参照
(8)	p_j^r	基板破碎物 852	非鉄製錬事業者へのヒアリングに基づきAu, Ag, Pd, Cuの含有量から見た精錬評価額を計算
		ボディ等 67	モデル事業の実績データを使用
		鉄等 20	
		アルミ等 67	
		プラスチック等 0	中間処理業者へのヒアリングにより設定
(9)	u_j^r	仕分け作業 30	モデル事業データにおける仕分け時間数に賃金単価を乗じて設定. 賃金単価は平成21年度賃金構造基本統計調査より設定
		保管ヤード 7	モデル事業の実績データを使用
		残渣・廃棄物処理 20	
		手解体 248	基板までの解体時間はモデル事業実績の半分とし（熟練することを想定）、特定部位までは手解体には基板までの1.5倍の時間を要すると想定. 賃金単価は平成21年度賃金構造基本統計調査より設定
(9)	$x_r^{without}$	964	全国のクリーンセンターの数
(9)	$FC^{without}$	12,000,000	中間処理業者へのヒアリングにより, 最低ロット1t, 処理原単位50円/kg, 稼働日数240日/年を設定
(9)	$u_{cr}^{without}$	50	中間処理業者へのヒアリング
(10)	x_r^{with}	8	大規模に機械破碎が可能となるような施設を有する中間処理施設の立地状況を踏まえて設定
(10)	FC^{with}	24,000,000	中間処理業者へのヒアリングにより, 最低ロット5t, 処理原単位20円/kg, 稼働日数240日/年を設定
(10)	u_{cr}^{with}	20	中間処理業者へのヒアリング
(11), (12)	me_i^r	品目毎に設定	小委員会資料参照

式番号	項目	値	根拠
(11) (12)	r_i^m	パラジウム 60	有識者へのヒアリング
		アンチモン 60	
		ビスマス 60	
		銅 90	
		亜鉛 60	
		銀 90	
		金 90	
		鉛 90	
		タンタル 60	
		タングステン 60	
		ネオジム 60	
		ジスプロシウム 60	
		インジウム 60	
		コバルト 60	
(11) (12)	p_i^m	パラジウム 1,273,333	レアメタルニュース, パラジウム, 2011年3月24日
		アンチモン 930	レアメタルニュース, アンチモン普通品, 2011年3月24日
		ビスマス 1,367	レアメタルニュース, ビスマス99.99%, 大口, 2010年3月末
		銅 507	レアメタルニュース, 電気銅t建値, 2011年3月24日
		亜鉛 156	レアメタルニュース, 電気亜鉛t建値, 2011年3月24日
		銀 60,633	レアメタルニュース, 銀(鉱山建値), 2011年3月24日
		金 2,447,333	レアメタルニュース, 金(鉱山建値), 2011年3月24日
		鉛 169	レアメタルニュース, 鉛t建値, 2011年3月24日
		タンタル 103,333	レアメタルニュース, タンタルキャパシター・グレード中低圧用, 2011年3月24日
		タングステン 5,367	レアメタルニュース, タングステンメタル粉, 99%, tロット以上, 2011年3月24日
		ネオジム 5,229	レアメタルニュース, 金属ネオジム, 2011年3月24日
		ジスプロシウム 2,453	貿易統計(希土類金属, スカンジウム及びイットリウム(これらの相互の混合物又は合金にしてあるかないかを問わない。))2010年度
		インジウム 43,667	レアメタルニュース, インジウム99.99%, 2010年3月末
		コバルト 2,667	レアメタルニュース, コバルトメタル市中輸入品(99.8%), 2011年3月24日
(12)	t	5.5	売上上位4社の有価証券報告書(セグメント情報より)
(13)	c^o	34,000,000	家電リサイクル制度の管理コスト(産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会電気・電子機器リサイクルワーキンググループ中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会家電リサイクル制度評価検討小委員会合同会合資料から引用)を参考に, 管理件数を比例配分して算出
	c^d	2,700,000	
	c^b	25,000,000	
	c^l	26,000,000	
(14)	IC	コンテナ設置 497,000,000	モデル事業より購入費用5,915円/個, 設置密度300人/個とし, ステーション回収を想定する都市の人口から算出
		ボックス設置 1,418,000,000	モデル事業より購入費用88,000円/個, 設置費用3,586円, 設置密度5,000人/個とし, ボックス回収を想定する都市の人口から算出
		普及啓発・広報費用 391,000,000	モデル事業の排出に対する普及啓発・広報費用であるコンテナ1,676円/個, ボックス7,042円/個から算出
	RC_t	コンテナ設置 497,000,000	モデル事業より購入費用5,915円/個, 設置密度300人/個とし, ステーション回収を想定する都市の人口から算出
		ボックス設置 1,418,000,000	モデル事業より購入費用88,000円/個, 設置費用3,586円, 設置密度5,000人/個とし, ボックス回収を想定する都市の人口から算出

第3章参考文献

- 1) 中央環境審議会：廃棄物・リサイクル部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会（第2回）資料，2011.
- 2) 中央環境審議会：小型電気電子機器リサイクル制度の在り方について（第一次答申），2011.
- 3) 環境省 HP： <http://www.env.go.jp/council/03haiki/yoshi03-24.html>
- 4) Pickin J.: Representation of environmental concern in cost-benefit analyses of solid waste recycling, *Resources, Conservation and Recycling*, 53, pp.79-85, 2008.
- 5) Tonjes D.J., Mallikarjun S.: Cost effectiveness of recycling: A systems model, *Waste Management*, 33, pp.2548-2556, 2013.
- 6) Kang H.Y., Schoenung J.M.: Economic analysis of electronic waste recycling: Modeling the cost and revenue of a materials recovery facility in California, *Environmental Sciences and Technology*, 40(5), pp.1672-1680, 2006.
- 7) Achillas Ch., Aidonis D., Vlachokostas Ch., Karagiannidis A., Moussiopoulos N., Loulos V.: Depth of manual dismantling analysis: A cost-benefit approach, *Waste Management*, 33, pp.948-956, 2013.
- 8) Gregory J., Kirchain R.: A framework for evaluating the economic performance of recycling systems: a case study of North American electronics recycling systems, *Environmental Sciences and Technology*, 42(18), pp.6800-6808, 2007.
- 9) 栗山浩一：環境政策の費用便益分析，フィナンシャルレビュー，第3号(通巻第77号) (特集『財政支出の費用便益分析』)，pp.149-163, 2005.
- 10) 産業構造審議会：産業構造審議会環境部会廃棄物リサイクル小委員会第17回容器包装リサイクルワーキンググループ（平成17年3月29日）容器包装リサイクル法の効果分析（経済産業省試算），2005.
- 11) 経済産業省：経済産業省委託調査「家電リサイクル法の施行による費用・便益の分析」，2005.
- 12) Organisation for Economic Co-operation and Development: Analytical Framework for Evaluating the Costs and Benefits of Extended Producer Responsibility Programmes, 2007.
- 13) United Nations University: 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Final Report, 2007.
- 14) 宇多賢治郎：容器包装リサイクル費用負担制度のCGE分析，エコノミア，第55巻第2号，横浜国立大学経済学会，pp.31-58, 2004.
- 15) 田崎智宏・森口祐一・寺園淳・大迫政浩：家電リサイクル法の実態効力の評価，国立環境研究所研究報告第191号，2006.
- 16) 環境省：規制影響分析書（容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律の一部を改正する法律），2006.
- 17) 環境省：規制に係る事前評価書（特定家庭用機器再商品化法施行令），2008.
- 18) United States Environmental Protection Agency: Guidelines for Preparing Economics Analysis, <http://yosemite.epa.gov/ee/epa/eed.nsf/pages/guidelines.html>, 2000.
- 19) 上田孝行・高木朗義・森杉壽芳・小池淳司：便益帰着構成表アプローチの現状と発展方向について，運輸政策研究，Vol.2, No.2, pp.2-12, 1999.
- 20) 高木朗義・武藤慎一・上田孝行・稲垣貴政：閉鎖性水域における水質改善政策の便益帰着分析と汚濁負荷削減量配分，土木学会論文集，No.702, IV-55, pp.51-63, 2002.
- 21) 常木淳：費用便益分析の基礎，東京大学出版社，2000.
- 22) 中央環境審議会：廃棄物・リサイクル部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会（第3回）資料，2011
- 23) 環境省・経済産業省：使用済小型電子機器等の回収に係るガイドライン（ver.1.0），2013.
- 24) 環境省・経済産業省：使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会とりまとめ参考資料，2011.
- 25) 村上進亮・藤井実・南齋規介・橋本征二・大迫政浩・森口祐一：地理的特性を考慮した収集・運搬費用算定モデル，廃棄物学会論文誌，vol.19(3), pp.225-234, 2008.
- 26) 産業構造審議会，中央環境審議会：産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会自動車リサイクルWG 中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会自動車リサイクル専門委員会第22回合同会議資料4-1-1，2009.

第4章 国際資源循環に係る我が国社会システムの課題と解決方策

4.1 はじめに

経済のグローバル化の急激な進展と四面を海に囲まれた島国であるという我が国の地政学的特徴を踏まえれば、適切な国際静脈物流システム構築の重要性は諸外国よりも相対的に高い。静脈物流で支えるものが貿易となれば、国内で閉じていた場合よりも関連する社会システムも実務上要する手間も大きく増加する。

国際静脈物流システムが支えるものは国際資源循環である。20世紀の経済成長は天然資源の採取・消費の増加や環境劣化と密接に結び付いてきたが、この課題を踏まえ、国際的にもデカップリングが注目されている¹⁾。この問題の議論のために一般的に使われる指標が資源生産性であるが²⁾、各国の経済成熟度が異なり、経済のグローバル化が進んだ現在、その最大化のためには国際資源循環が重要な鍵となる。国際静脈物流を介して行われる国際資源循環は、世界的な資源生産性を高めるとはいえ、一方で途上国における環境問題に繋がる危険性も孕んでいる。そのため、国際資源循環を促進させるか否かについては、必然的に意見が分かれる。静脈資源の持つ潜在汚染性故に、国境を越えた移動、すなわち貿易が制限されるべきケースがある³⁾。一方で、各国の経済発展あるいはグローバルな循環型社会の形成のために、静脈資源の貿易は容認ひいては促進されるべきとの意見もある⁴⁾。あるいは第3章で述べた小型家電リサイクル制度創設時の議論のように、制度の実効性確保のために使用済小型家電の海外流出を防止すべきとの意見もある⁵⁾。ただし、静脈資源の海外流出については国内リサイクル制度の形骸化という問題も孕んでいるとはいえ、自由貿易の原則を踏まえれば e-waste 問題⁶⁾ に代表される環境問題として認識され、必要に応じ防止されるべきである。

我が国及び貿易相手国の国際資源循環に対するスタンス次第で国際資源循環の今後の進展が左右されるため、まずは国際資源循環に関連する我が国の社会システムの方向性を詳細に把握する必要がある。さらに、我が国社会システムの方向性の阻害に繋がる課題と解決方策を検討することは、今後の我が国の国際静脈物流システムのあり方に大きな示唆を与えることになる。

静脈資源については細田³⁾が指摘するとおり潜在資源性と潜在汚染性の両面の性格を有するが、この両性格が貿易の規制か促進かという論点に大きく影響する。特に静脈資源のうちこの両性格を持ち合わせる使用済み電気電子機器の貿易についてはいくつかの先行研究が行われているが、貿易の実態を把握するもの、潜在汚染性に注目して貿易の課題を論じるもの、政策として評価するものに分類できる。

使用済み電気電子機器やそれ由来の金属スクラップの海外流出実態については、把握が困難である故に推計が行われているが、過少評価の可能性が高いものや^{5),7)} 幅の広い推計

8) が目立つ。リユース輸出に関する実態把握として、実際には違法再輸出に繋がっていることを明らかにしている研究もある⁹⁾。使用済み電気電子機器が輸出先で引き起こす諸問題を中心とした貿易の課題について論ずる先行研究としては、輸入の違法性や現地における環境影響、健康被害に言及したものが多く^{10), 11), 12), 13), 14), 15), 16), 17)}、そこに介在するインフォーマルセクターに注目する研究も多い^{13), 18), 19)}。国内でも使用済み電気電子機器に起因する輸出先での環境問題について示した研究は存在するが^{3), 20)}、我が国から輸出された使用済み電気電子機器が輸出先でどのような処理が行われているかについて詳細に言及した既往研究は筆者らの知る限り存在しない。すなわち、使用済み電気電子機器の不適正処理に起因する現地での環境汚染と我が国からの輸出との因果関係は明らかになっておらず、不適正な海外流出の防止対策を遅らせている一因となっている可能性もある。政策的な観点では、寺園ら²¹⁾は使用済み電気電子機器の海外流出実態とその管理方策に言及しており、細田³⁾は海外流出が惹起する問題の解決策を提案している。リサイクル向け廃棄物の国際移動に関わる各種政策理念とその相互関係については大熊⁴⁾が分析しており、本稿に関連する指摘として、環境ガバナンスの空間スケール（国毎）と経済活動の空間スケール（グローバル）との間のギャップに対処するために、有害廃棄物の取引を禁止して空間を閉鎖しようとする戦略は、処分目的の廃棄物には有効だが、リサイクル目的の廃棄物については弊害も指摘されうるとし、閉鎖か開放かという二者択一の枠組みで対応する中で、中間的領域への対応に問題が生じているとしている。さらに、鶴田²²⁾は使用済み電気電子機器の海外流出を防止しうる法律である特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律（平成4年法律第108号）（以下、「バーゼル法」と呼ぶ。）に係る課題を整理している。

こういった既往研究は潜在汚染性に注目した適正処理や海外流出防止の観点からの研究が多く、中立的な立場での静脈資源の貿易に係る社会システムの評価や、潜在資源性に注目した貿易の是々非々の論調での研究は行われていない。そこで本章では、国際資源循環、すなわち静脈資源の貿易に関する我が国の社会システムについて、それを構成する各要素が理念的にどのような方向性を向いており、全体として不一致がないのかという点と明らかにした上で、課題とその解決策を検討する。本研究では、議論に具体性を持たせるため、潜在資源性と潜在汚染性の両面を持ち、最も判断が分かれるであろう使用済み電気電子機器を検討対象とする。以下、第2節では静脈資源の貿易に係る社会システムの現状と理念的方向性について整理し、第3節では静脈資源の貿易状況と社会システムの課題を整理する。第4節は本章のまとめである。

4.2 国際資源循環に係る社会システム

国際資源循環に係る社会システムは、貿易及び静脈資源に係る法制度にそれに関連する各種制度を加えたパッケージとして捉えられる。具体的には、貿易に係る法制度として、外国為替及び外国貿易法（昭和24年法律第228号）、関税法（明治32年法律第61号）や

世界貿易機関を設立するマラケシュ協定（以下、「WTO 協定」と呼ぶ.），静脈資源に係る法制度として循環基本法，資源の有効な利用の促進に関する法律（平成 3 年法律第 48 号），廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年法律第 137 号）（以下、「廃掃法」と呼ぶ.），バーゼル法，各種個別リサイクル法，関連制度としてリサイクルポート政策等が挙げられる．日本の国際資源循環に係る社会システムの課題を考える際，それが理念的に静脈資源の貿易，特に輸出を促進しているのか規制しているのかという点が最も基本的な論点となる．ここでは，全体として社会システムを構成している主要な要素の各々が，理念的にどのような方向性となっているかを確認し，システム全体の方向性について整理する．

① WTO 協定

我が国は自由貿易が原則である WTO に加盟しており，基本的には貿易上の制限は許されない．例えば，輸出先国での環境汚染を防止するために静脈資源の輸出を制限する措置を講じる場合でも WTO との整合性は慎重に検討される必要がある．WTO 協定を構成する付属書に「関税及び貿易に関する一般協定」が含まれており，その第 11 条に「数量制限の一般的廃止」が規定されている．第 20 条に規定される一般的例外（人，動物又は植物の生命又は健康の保護のために必要な措置や有限天然資源の保存に関する措置など）に該当しない限り，国内産業と外国産業の差別的な扱いに繋がる輸出制限を伴う措置は WTO 違反を問われる可能性が高い．静脈資源を外国産業が入手しにくくなることが WTO と不整合になるためである．2012 年 1 月には中国の資源輸出制限が協定違反との判決が WTO 上級委員会から出されており²³⁾，またレアアース・タングステン及びモリブデンに関して行っている輸出規制について，我が国は中国に対し WTO 協定に基づく協議を要請している²⁴⁾ ことから，静脈資源とはいえその貿易については WTO 協定との整合性は十分に留意する必要がある．

なお，1994 年までのガット時代では環境保護のためにガットの例外を認めることは厳しく判断されていたが，WTO 設立以降は厳格な解釈は緩和されるようになってきていることには留意が必要である．ガットの前文にはなかった環境への配慮が WTO 協定の前文には規定されており，環境に対する解釈の変更に大きく貢献している²⁵⁾．

②循環基本法

国際資源循環に関連して，循環基本法に規定される循環型社会推進基本計画においては，第二次計画（平成 20 年 3 月 25 日閣議決定）で「各国内での循環利用を補完するものとして，循環資源の国際的な移動の円滑化を図ることも重要」という表現に留まっていたものが，第三次循環型社会推進基本計画（平成 25 年 5 月 31 日閣議決定）では，「循環資源の性質に応じて，国際的な循環資源の移動が環境負荷の低減や資源の有効利用に資する場合には，国際的な移動の円滑化を図ることが重要」とされている．さらには，円滑化の具体的方法として，「バーゼル条約の枠内での手続の簡素化等により，手続に要する期間の短縮に努める」，「輸出先での再生利用等において環境汚染が生じないことが担保できる場合については，物品に応じた必要な輸出後の処理手続の確認を行いつつ，手続の迅速化を講じることなどにより，輸出の円滑化を図る」，「国

際的な循環資源の移動に当たっては、玄関口としての港湾が果たす役割の重要性に鑑み、円滑な資源輸送に必要な港湾施設の整備や受入体制の確保を図る」ことが挙げられている。このように、廃掃法やバーゼル法に係る貿易手続きの円滑化にまで言及していることから、循環基本法における国際資源循環に対する考え方は、容認する方向へ変化しつつある。

② 廃掃法

廃棄物の輸出に関連しては、平成 5 年改正で国内処理原則が明記され、環境大臣の輸出確認制度が導入された。ただし法制的には、当該輸出規制の目的は海外における環境汚染防止ではなく、あくまでも排出事業者責任の空洞化の防止であることに留意が必要である。当該制度における確認の具体的要件は「一般廃棄物又は産業廃棄物の輸出の確認に係る審査基準等」（平成 14 年 8 月 29 日、環境省廃棄物・リサイクル対策部長通知）で定められており、①国内における当該廃棄物の処理に関する設備および技術に照らし適正な国内処理が困難であること、または輸出の相手国において再生利用されることが確実であること、②国内の処理基準を下回らない方法で処理されることが確実であること、③申請者が法的な処理責任を持った者（一般廃棄物は市町村、産業廃棄物は排出事業者等）であること、である。この確認を受けるためには、手続きに時間がかかる（標準手続期間は 60 日と定められているが、資料準備に相当の時間を要する）上、海上輸送時、相手国到着後も含めて国内における廃掃法の規制と同等の規制を受けることになり、現実的には輸出主体にとってはハードルの高い規制となっている²⁶⁾。すなわち、廃掃法に基づく環境大臣の輸出確認手続きは、国内処理原則を掲げている故にあくまでも輸出を止めることを前提とした基準となっていると考えられる。

廃棄物の輸入についても平成 5 年改正で規定され、環境大臣の許可制度が導入されている。平成 22 年の改正により許可申請者を他人に処理を委託して行うものにまで拡大しており、これにより途上国等で処理が困難な自社の製品（商社等も含む）や、自社の工場から生じた廃棄物などが輸入対象となっている。輸出の場合と同様に手続き的には厳格であることは否めないが、理念的には国際資源循環を促進する方向に移行しつつある。

④ バーゼル法

有害廃棄物の輸出時の許可制や事前通告制、不適正な輸出や処分行為が行われた場合の再輸入の義務などを規定した「有害廃棄物の越境移動及びその処分の規制に関するバーゼル条約」の国内担保法がバーゼル法である。バーゼル法に規定する特定有害廃棄物等に該当する貨物を輸出入する場合には、外為法に基づき経済産業大臣に対して承認申請が必要となる。そしてその承認には、特定有害廃棄物等の処分について環境の汚染を防止するために必要な措置が講じられているかどうかの環境大臣の確認が必要となる。

法の対象となる「特定有害廃棄物等」は法第 2 条 1 項第 1 号に「条約附属書Ⅳに掲げる処分作業を行うために輸出され、又は輸入される物」であり、イ 条約附属書Ⅰに掲げる物であって、条約附属書Ⅲに掲げる有害な特性のいずれかを有するもの、ロ 条約附属書Ⅱに掲げる物、ハ 政令で定めるところにより、条約第三条 1 又は 2 の規定により我が国が条約

の事務局へ通報した物、ニ 条約第三条 3 の規定により条約の事務局から通報された物であって、当該通報に係る地域を仕向地若しくは経由地とする輸出又は当該地域を原産地、船積地域若しくは経由地とする輸入に係るものとして環境省令で定めるもののいずれかに該当するものである。

まず、処分作業を行うための輸出入であるため、リユースのための輸出は適用外となる。イに該当するかどうかは「特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律第 2 条第 1 項第 1 号イに規定するもの」（平成 10 年 11 月 6 日環境庁・厚生省・通商産業省告示第 1 号）に示される別表第一（規制対象外）、別表第二（規制対象）、別表第三（有害特性）から判断することになる。別表第一に「鉄くず」が掲げられており、適正な中間処理を施された鉄スクラップは規制対象外となるが、使用済み電気電子機器を含む雑品スクラップについては別表第三に定める有害特性から該非判断がなされ、通常は鉛含有量が 0.1 重量%を超過するか否かで判断されている。ロは家庭系廃棄物を意味しているが、実態としてこれを根拠に規制対象物とされることはない。ハは条約の廃棄物の定義を超える我が国独自の廃棄物について越境の手続きの要件を条約事務局に通報するものであるが、現在のところ通報が行われたことはない。ニは他の条約締約国で条約における定義を超える廃棄物について条約事務局から通報を受けた物である。これまで複数の国から条約事務局を通じて条約第 3 条に基づく通報を受けているが、ニで規定される環境省令は現在のところ作られていない。

その他特に留意が必要な点として、条約第 4 条に基づく通報が挙げられる。輸入国において輸入を絶対的に禁止する物は条約事務局に通報され、条約事務局より締約国に通報されることになっているが、この条約第 4 条に基づく通報を我が国は複数の国より受けている²⁷⁾。この通報を受けた場合、条約に基づき該当物については輸出が禁止されることになるが、このことは「特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律第三条の規定に基づく同条第一号から第四号までに掲げる事項」（平成 5 年 10 月 7 日環境庁・厚生省・通商産業省告示第 1 号）の中に「輸入国が輸入を禁止している特定有害廃棄物等の輸出ではないこと」と明記されることで法律上担保されている。ただし、例えば中国が電気電子機器廃棄物の輸入を禁止するとの条約第 4 条に基づく通報を受けているにも関わらず、本事実環境省のホームページに英語で掲載されているのみであり、余程の注意を払わない限り輸出者が知ることは想定されにくい。実際、諸外国における使用済み電気電子機器の輸入規制について見ると、中古電気電子機器の輸入に関しては中国、ベトナム（再輸出目的での輸入を除く）、マレーシア、インドネシア、タイで一部又は全部の品目について輸入が禁止されており、他にも政府の許可制となっている国も多い。リサイクル目的での使用済み電気電子機器の輸入は中国やタイで明確に禁止している。各国の輸入規制はバーゼル条約 4 条に基づく通報として通報されるケースもあり、この場合は条約締結国は輸出を行うことは出来なくなる。

以上のように、バーゼル法上は、使用済み電気電子機器を含む雑品スクラップに関しては、法第 2 条 1 項第 1 号イ、ニ及び条約第 4 条に基づく通報に関連して、輸出が規制されることになる。

バーゼル法については、環境上適正にリサイクルされる場合には越境移動を許容する考え方の上に立っているが、実際は環境大臣が確認を取る手続きが極めて厳格で手続きに時間がかかり、それに伴い企業が負担する追加的コストがリサイクルを阻害する場合があるとの指摘もある²⁶⁾。すなわち、経済的観点からは実質的には輸出を前提としたシステムとはなっているとは言えず、むしろ追加的コストを避けるためにもバーゼル法の対象とせずに貿易を行うことへのインセンティブが働きやすく、このことがシステムを複雑化させている。バーゼル法の規制対象となるか否か（該非判断）については事前相談システムが存在し、これで非該当との回答を得ることが実質的には円滑な輸出入に繋がっている。

さらに、バーゼル条約に関しては 1995 年に採択された BAN 改正への日本のスタンスには留意が必要である。本改正が発効すれば OECD 諸国から非 OECD 諸国への有害廃棄物の輸出が全面禁止となる。我が国は、資源の有効利用を阻害する可能性があるとして、この改正の批准には消極的な立場を取っている。理由として、廃掃法及びバーゼル法の厳しい輸出規制を根拠としているとの国会答弁も行われている²⁸⁾。

⑤個別リサイクル法

特定家庭用機器再商品化法（平成 10 年法律第 97 号）（以下、「家電リサイクル法」と呼ぶ。）は、製造業者等（輸入品の場合は輸入業者）に引取義務と再商品化等（再商品化か熱回収）実施義務が課されている。これにより製造業者等は自ら又は委託して再商品化を実施する義務があるが、その方法については主務省令に定められる基準に適合することを主務大臣から認定を受けなければならない。再商品化の実施場所は国内に限定されてはいないが、輸出時に廃掃法及びバーゼル法上の手続きが必要となり、海外における再商品化は現実的ではない。

さらに、「再商品化」とは、「機械器具が廃棄物となったものから部品及び材料を分離し、自らこれを製品の部品又は原材料として利用する行為、又はこれを製品の部品又は原材料として利用する者に有償又は無償で譲渡し得る状態にする行為」であり、再商品化後の再生資源の譲渡先は国内である必要はない。すなわち、家電リサイクル法のルートに乗って中間処理を施された金属スクラップは、合法的に海外に輸出することができる。

使用済自動車の再資源化等に関する法律（平成 14 年法律第 87 号）（以下、「自動車リサイクル法」と呼ぶ。）では、法律の対象がエアバック、フロン、ASR（Automobile Shredder Residue）となっており、それ以外に使用済自動車から取り出された部品や素材は市場原理に委ねるとして法律の枠外となっている。したがって、使用済自動車由来の金属系静脈資源の海外輸出は自動車リサイクル法上何の問題もない。

小型家電リサイクル法でも同様に、主務大臣により認定を受けた再資源化事業計画に基づき認定事業者が自ら又は委託して再資源化を実施することとされており、主務省令に定められる認定基準では海外でのリサイクルを否定はしていないが、現実的には廃掃法やバーゼル法との整合性で、事業計画のフィージビリティが疑問視されることが予想される。また、本法律でも再資源化後の再生資源の譲渡先は国内である必要はない。製造業者には

再資源化後の再生資源を使用する責務がかかっているが、サプライチェーンの状況を踏まえれば、海外製錬でリサイクルされた金属を海外工場で調達することも法律上問題ない。法律に基づいて定められた基本方針には海外流出防止のニュアンスでの記述があるが、あくまでも環境汚染の防止の観点からとなっている。

以上のように、個別リサイクル法では、法律で規定された再資源化あるいは再商品化後成果物の輸出は市場原理に委ねられている。リサイクルの実施場所としては、廃掃法やバーゼル法の規制により現実的には国内に限定されるが、それらの手続きをクリアできるのであれば、海外でのリサイクル実施も法律上は可能となっており、資源確保面からの海外流出防止の理念も存在していない。

⑥リサイクルポート政策

リサイクルポート政策は、循環資源の広域的流動の拠点となる港湾をリサイクルポートとして指定し、港湾を活用した静脈物流の促進による循環型社会の構築を目指すという国土交通省港湾局の政策である。政策の推進のため、岸壁等の港湾施設の確保、積替え・保管施設等の整備に対する支援、循環資源の取扱に関する運用等の改善、官民連携の促進などが行われる。静脈資源の潜在汚染性のため、通常の港湾では港湾管理上公共埠頭で取扱われることが不相当である場合もあり、リサイクルポートでは静脈資源をより円滑に取扱えることが事業者期待されていることが背景にある²⁷⁾。第三次循環基本計画においても、「静脈物流の拠点となる港湾をリサイクルポートに指定し、広域的なリサイクル関連施設の臨海部への立地を推進するとともに、官民連携の推進、港湾施設の整備など総合的な支援を講じることにより国内外の資源循環を促進する」とあり、現実的に多くのリサイクルポートから静脈資源が輸出されている事実からも、リサイクルポート政策は基本的には静脈資源の輸出入を促進するための政策であるといえる。

以上を踏まえると、我が国の国際資源循環に係る社会システムは図 4-1 のようになるが、社会システムを構成する各要素の国際資源循環に対する方向性は容認あるいは促進する立場へと変化しつつあると捉えることができる。しかし一方で、静脈資源の貿易の手続きを規定している廃掃法、バーゼル法については実態として貿易を促進する枠組みとはなり切っていない。環境汚染を惹起する貿易を規制しようとする余り、本来促進されるべき貿易までも阻害している可能性はある。

国際資源循環に関しては政府内不一致があるとの見解があるが³⁰⁾、それは環境省に権限のある廃掃法やバーゼル法の手続きの厳格さを指しているものであり、この見解は正確ではない。事実、産業構造審議会の WG で、「①廃棄物等に係る不適正処理を如何にして根絶するか、という課題（汚染性の問題）と、②資源有効利用を如何にして促進するか、という課題（資源性の問題）の両立をいかに図っていくかが問題であり、環境汚染の防止は資源有効利用の前提である」との報告書が出され³¹⁾、中央環境審議会の専門委員会の報告書にも同様の内容を含んでおり³²⁾、両省のスタンスは一致している。

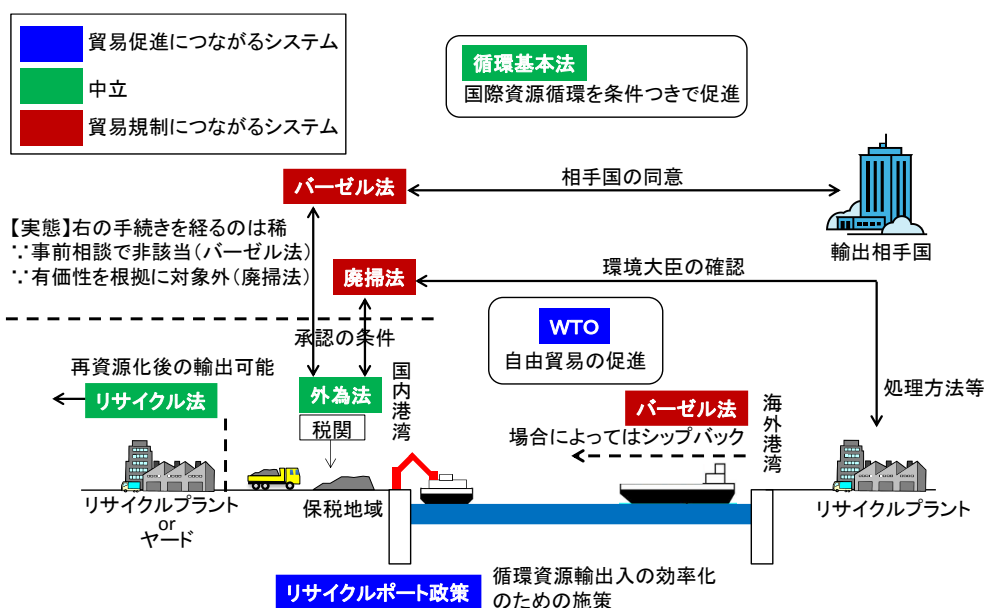


図 4-1 我が国の国際資源循環に係る社会システム

このように国際資源循環に係る我が国の社会システム全体として、理想的には環境汚染に繋がる貿易は防ぐという前提で適正な貿易を容認あるいは促進する方向にあるが、それを支える手続き面を規定する社会システムがその理念に追いついていないのが現状であると言える。

4.3 使用済み電気電子機器貿易の社会システム上の課題

使用済み電気電子機器の貿易実態の正確な把握や、輸出先での環境汚染等との因果関係の把握は非常に困難となっているため、既往研究のレビューに加え、筆者らはリユース業者、資源回収業者、資源販売問屋、通関代行業者等計 20 企業へのヒアリングを実施した。得られた結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ・鉄のみ、銅のみに分別されたスクラップは国内に流通するが、雑多なものが含まれる場合や解体に手間が掛かる雑品系のスクラップは通常は中国に輸出される。
- ・金属スクラップについては中国輸出を行う企業は国内処理を実施する企業よりかなり高い値を付けることが可能（4 倍程度）。市町村が実施する入札でも中国輸出を行う企業が落札するケースも多い。
- ・金属スクラップの中には使用済み電気電子機器がそのままあるいは潰された形で混入されている場合が多い。
- ・リユース品として輸出しているが、実際はリサイクル原料である場合もある。

以上を踏まえると、使用済み電気電子機器を含む雑品系の金属スクラップが国内で流通する経済的インセンティブは存在せず、既往推計以上に海外、特に中国へ流出していると

考える方が自然である。さらに、輸出されるものこそ廃棄物該当性が高そうな、ぞんざいに扱われがちなものであることも明らかとなった。さらには、偽装リユース輸出の存在も裏付けられた。

一方で、廃掃法やバーゼル法の施行状況を見てみると、廃掃法の施行状況としては、環境大臣の確認制度導入後、当該制度に基づいて輸出された廃棄物はセメント製造における粘土代替利用を目的とした韓国向けの石炭灰のみである³³⁾。また、バーゼル法の施行状況として特定有害廃棄物等の輸出の大部分が鉛回収を目的とする韓国向けの鉛蓄電池の輸出であり、使用済電気電子関係ではシンガポール向けの電子部品スクラップがわずかに(平成24年度では653トン)輸出されているだけである³⁴⁾。既存の推計、本研究でのヒアリングに加え、実際に港湾ヤードに野積みされている事例が散見されることから、使用済み電気電子機器を含んだ雑品スクラップの輸出が行われていることは明らかだが、廃掃法の環境大臣の確認手続きは経ず、かつ事前相談システムを通過してバーゼル非該当となった上で輸出されていると想定される。

このように、輸出先で生じている使用済み電気電子機器に起因する環境汚染・健康被害に、我が国からの輸出が関与している蓋然性が高い一方で、静脈資源の潜在汚染性を防止できるはずの社会システムが十分に機能しているとは言い難いのが現状である。使用済み電気電子機器の輸出に関しては、厳しい手続きを経る追加的コストが発生することを避けるために、法の網の目を潜ろうとするインセンティブが働き、いわば「正直者が損をする」状態になっている。

以上のことを踏まえると、我が国の国際資源循環に係る社会システムの理念的方向性となりつつある貿易の容認あるいは促進の前提となるべき環境汚染の防止が、使用済み電気電子機器の違法・脱法的な輸出により達成できていない蓋然性が高く、その状況が輸出手続きの緩和を一層困難とし、それにより脱法的な輸出へのインセンティブが働き、却って環境汚染防止が達成できないという負のスパイラルとも言える状態に陥っている。環境汚染を防止することを前提に静脈資源の輸出を促進するためには、①まずは法の網に掛け、②適正なリサイクルを前提とする場合は輸出手続きを緩和する、という二段階の課題をクリアしなければならない。潜在汚染性が顕在化する恐れがない場合は、社会システムの網を掛けた上で手続きを緩和することにより、適正な貿易を拡大できる可能性もある。すなわち、社会システムの理念をより明確に具現化するためには、脱法的な輸出を防止することが試金石的な意味を持つ。②の輸出手続きを緩和することに関しては、違法・脱法的な輸出が無くなれば比較的容易に達成できるものと思われるため、以下では脱法的な輸出を防止するための制度的課題について検討する。

4.3.1 廃掃法に係る制度的課題

廃掃法に規定される輸出時の環境大臣の確認手続きはあくまでも廃掃法の対象である「廃棄物」のみに適応されるものであるため、有価物（ここでは廃棄物以外のものを有価

物としている）と称して環境大臣の確認手続きを経ない脱法的な輸出が問題となる。

廃掃法の廃棄物に該当するか否かは、物の性状、排出の状況、通常 of 取扱い形態、取引価値の有無及び占有者の意思を総合的に勘案して判断される。国際資源循環が進展している現状では、国内で適正処理を行う場合には逆有償物となるものでも、海外で処理・リサイクルする場合には有償物となる場合があり、こういったものが廃棄物該当性については明確な見解が示されてきてはいない。平成 21 年度には、中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会廃棄物処理制度専門委員会がこの問題についての議論が行われている。出された意見具申には、「廃棄物処理法に基づく輸出確認の対象となる廃棄物の考え方としては、廃棄物処理法の排出事業者責任の徹底の観点から、国内における通常 of 取扱い形態や取引価値等から総合的に廃棄物と判断されるものについては、廃棄物処理法上の輸出確認の対象とすることを検討すべきである」といった記述はあるものの³⁵⁾、以後具体的な検討は行われていない。検討の過程では、「国内では実質的に無価値となっている品目が、輸出時に有価で取引される理由」として、①輸出先国でのみ市場が存在、②安い人件費による低コスト化、③相手国において環境規制が未整備又は法施行が不十分であることにより、環境上適正な処理にかかるコストが取引価格に適正に反映されていない、を挙げ、理由①及び②についてのみは輸出先国での市場の有無を見ることに一定の合理性があるものとしている³⁶⁾。筆者らのヒアリングによると、中国へ輸出される金属スクラップは最低でも 10 円/kg の値がつき、このことは国内輸送費に海上輸送費を加味しても有価性を有していることを意味している。輸送費の取扱いについては、「平成 17 年 3 月 25 日付環産廃発 050325002, 「規制改革・民間開放推進三か年計画」(平成 16 年 3 月 19 日閣議決定)において平成 16 年度中に講ずることとされた措置(廃棄物処理法の適用関係)について」で「輸送費が売却代金を上回る場合等当該産業廃棄物の引渡しに係る事業全体において引渡し側に経済的損失が生じている場合には、産業廃棄物の収集運搬に当たり、法が適用されること」とされており、逆に言うと輸送費を加味しても有価性を持たば法の適用はないとの解釈もされうる。中央環境審議会での議論のように、海外での安い人件費が理由であれば問題ないが、環境ダンピングの場合は問題となり、先述したようにその蓋然性は高いと見るべきだろう。このように、海外へ輸出される静脈資源の廃棄物該当性が廃掃法に係る制度的課題となる。

そこで、ここでは特に取引価値の有無に焦点を当てて海外へ輸出される静脈資源の廃棄物該当性について検討する。使用済電気電子機器の静脈資源としての価値は、以下のよう

に表される（詳細は第 3 章参照）。

$$V_i = P_i - TC \quad (4-1)$$

$$P_i = \sum_j p_{ij} \quad (4-2)$$

$$TC = \frac{C_c + C_{LR} + C_r + C_m}{r} \quad (4-3)$$

$$C_c = r_s u_{s-st} + \frac{r_m}{2} (u_{m-st} + u_{m-bx}) + r_b u_{b-bx} \quad (4-4)$$

$$C_{RL} = unit_{1.5th} + unit_{SY} + unit_{2nd} \quad (4-5)$$

$$C_r = \sum_k u_{rk} + \max \left[FC / \sum_i m_i, u_{cr} \right] \quad (4-6)$$

$$C_m = (1-t) \sum_j me_{rj} r_{mj} p_{mj} / \sum_i m_i \quad (4-7)$$

ただし、 V_i : 電気電子機器 i の資源価値、 P_i : 電気電子機器 i に含まれる金属の価値 (円)、 TC : 電気電子機器 i のリサイクル費用合計 (円)、 p_{ij} : 電気電子機器 i に含まれる金属 j の価値 (円)、 C_c : 電気電子機器 i の収集費用 (円)、 C_{RL} : 電気電子機器 i の静脈物流費用 (円)、 C_r : 電気電子機器 i の中間処理費用 (円)、 C_m : 電気電子機器 i の金属回収費用 (円)、 r : リサイクルにおける金属回収歩留まり (%), $r_s/r_m/r_b$: 小規模自治体 (人口 5 万人以下) / 中規模自治体 (人口 5 万～30 万) / 大規模自治体 (人口 50 万人以上) の人口比率 (%), u_{s-st}/u_{m-st} : 小規模/中規模自治体でのステーション回収費用原単位 (円/kg), u_{m-bx}/u_{b-bx} : 中規模/大規模自治体でのボックス回収費用原単位 (円/kg), $unit_{1.5th}/unit_{SY}/unit_{2nd}$: 1.5 次物流/ストックヤード/2 次物流費用原単位 (円/kg), u_{rk} : 中間処理 k (仕分け, 保管, 処分) の費用原単位 (円/kg), FC : 機械破碎の固定費用 (円), m_i : 電気電子機器 i の重量 (kg), u_{cr} : 機械破碎の費用原単位 (円/kg), t : 金属回収の営業利益率 (%), me_{rj} : 中間処理成果物中の金属 j の含有量 (kg), r_{mj} : 金属回収段階の歩留まり (%), p_{mj} : 金属 j の価値 (円/kg) である。

資源価値とは、歩留まりを考慮した経済的・技術的に回収可能な有用金属等の経済的価値であり、リサイクルに要する費用には輸送費用も含まれる。廃棄物該当性を判断する際、海外において安い人件費により安価に分離効率の高い中間処理を施すのであれば問題ないが、環境コストをかけない不適正なリサイクル (残渣の不適正処理等) により有償取引を実現しているのであれば、廃棄物の国内処理を原則とする廃掃法の理念から言えば、脱法的輸出といわざるを得ない。

ここでは、使用済み電気電子機器のうち小型家電リサイクル制度検討過程で検討対象品目とされた 96 品目⁵⁾ (法によるリサイクル制度の存在するパソコンは除く) について、国内処理する場合と中国でリサイクルする場合の使用済み電気電子機器の取引価値を計算し比較した。使用済み電気電子機器に含まれる金属の資源価値やリサイクル費用は中央環境審議会 (2011)⁵⁾ のデータを使用しており、表 4-1 の条件で費用計算を行っている。

使用済み電気電子機器の輸出時の有価性に係る分析結果を図 4-2 に示す。図 4-2 は資源価値の上位 50 品目まで示している。国内で適正処理する場合には図 4-2 の上の実線が有価性のボーダーラインで PHS と携帯電話のみが有償物となり、それ以外の使用済み電気電子機器は逆有償物となる。年間に使用済となる電気電子機器 57 万トンのうち、この 2 品目で約 6 千

トン、割合で約 1%となる。すなわち、使用済電気電子機器のうち重量ベースで 99%は逆有償物となる。逆に中国で処理する場合は図 4-2 の点線が有価性のボーダーラインで、96 品目中 24 品目が有償物となる。この判別ラインの安定性を見るために、資源価格が 5 割増加、中間処理費用が 2 倍になった場合を想定すると、国内での有価性のボーダーラインは図 4-2 の下の実線に移り有償物は 11 品目となる。廃掃法に規定された国内処理原則に加え、環境ダンピングの蓋然性も高いことを踏まえると、国内での適正処理を前提とした逆有償物は廃棄物に該当するとして環境大臣の輸出時確認手続きを経ることが現実的な対策となり得るが、判別ラインの安定性が十分ではないことに留意が必要となる。

表 4-1 計算の条件

項目	国内 (円/kg)	海外 (円/kg)	根拠
収集費用	86	86	中央環境審議会3)における費用便益分析(45品目、回収率30%)における一次物流費用を使用
静脈物流費用	42	42	中央環境審議会3)における費用便益分析(45品目、回収率30%)における1.5次物流費用を使用
海外輸送費用	0	4	横浜→香港の海上輸送(40ftコンテナ)費を計上(実在船社のレートタリフに基づく)
中間処理費用	779	20	国内については中央環境審議会における費用便益分析における中間処理費用を使用。海外の場合は、全て手選別による分解とし(機械等による破碎はしない)、手選別に必要な人員の人件費は106円/hrと設定し(ILO, LABORSTA Internet(労働統計データベース)における2008年製造業賃金の日本と中国の比率に基づき設定)、中間処理の保管ヤード費は国内リサイクルの1/10、廃棄物処理費は計上しない
金属製錬費用	6	3	中央環境審議会における費用便益分析の数値を使用。海外の場合は有識者へのヒアリングにより国内リサイクルの1/2と設定
合計(①)	913	155	
歩留まり(②)	0.63	0.90	有識者へのヒアリングにより設定
結果(①÷②)	1,449	172	

さらに問題なのは、資源性の相対的に高い使用済製品に多くの単体逆有償物を混入させた場合、全体として有価性を持つということである。総体有価の混合物については、一体不可分の場合は総体として有償物とされ、廃掃法の適用外とる運用がなされてきているが(昭和 54 年 11 月 26 日付環整 128 号、環産 42 号、有価物に関する疑義解釈)、雑品スクラップの場合は、含まれる単体逆有償物の選別は不可能ではない。廃棄物該当性に加え、廃棄物であると判断された場合に金属スクラップを「総体有価」と捉えるか、「廃棄物の混入」と捉えるかがもうひとつの廃掃法の制度的課題と言える。

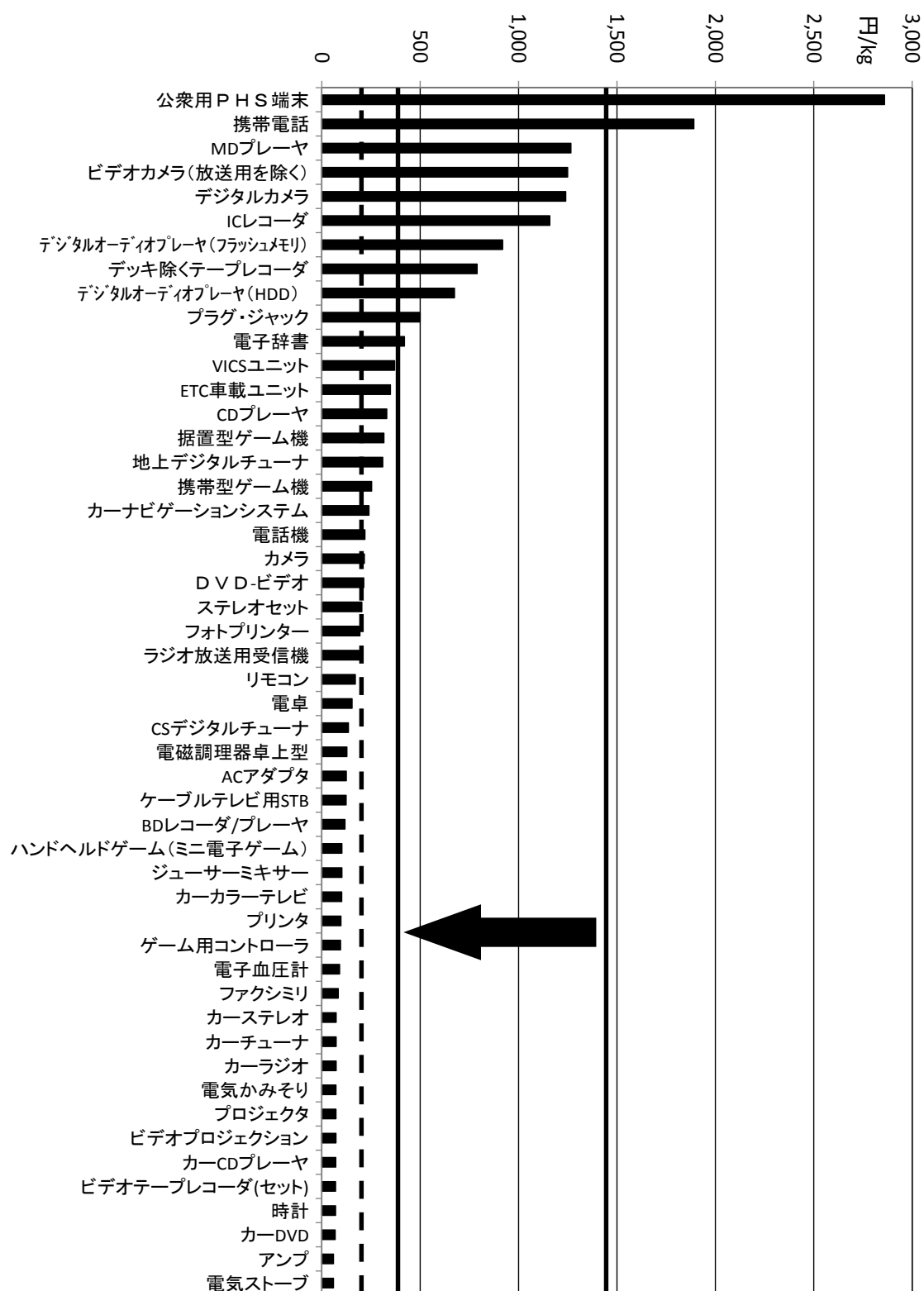


図 4-2 使用済電気電子機器の輸出時の有価性

使用済み電気電子機器から構成される雑品スクラップの買取りを行っている企業の取引価格をインターネットで調査したところ 8 社で把握でき、1～30 円/kg の範囲、特に 20 円/kg 程度の企業が多かった。このように雑品スクラップは有価で取引されており、これまでの分析を踏まえれば、輸出を前提とした価格であることは明らかであろう。しかも企業のホームページ上のサンプルの写真を見ると個別には逆有償物となるものも混合している可能性は極めて高く、雑品スクラップの廃掃法上の扱いが環境汚染防止の観点からは重要な要素となる。

こういった課題の解決策として、廃掃法に基づく輸出時の環境大臣確認手続きに実効性を持たせることが挙げられる。具体的には、以上のような使用済み電気電子機器に含まれる資源価値を根拠として法的に廃棄物として位置づけることが考えられる。法技術的には、廃掃法に規定することの他、個別リサイクル法に廃棄物みなし規定を置くことも選択肢のひとつとなる。ただし、WTO 協定との整合性には留意が必要となる。

4.3.2 バーゼル法に係る制度的課題

バーゼル法に係る制度的課題は偽装リユースと該非判断基準にある。バーゼル法の対象となる輸出は、処分作業を行うための輸出であるため、リユースのための輸出は適用外となる。したがって、リユースと称して輸出することにより、法の規制から逃れることが可能となる。筆者らのヒアリングでもリユースと称してリサイクル原料を輸出しているケースを確認しており、偽装リユースが制度的課題のひとつである。

家電リサイクル法対象品目の中古品として輸出状況は貿易統計から把握できる（表 4-2）。中古ブラウン管テレビや中古洗濯機を多くしているベトナムは再輸出を除いて中古家電の輸出を禁止しているため、第三国でのリユースが目的となる輸出以外は認められるべきではないが、ベトナム輸入後の不適正処理について報告されている⁹⁾。マカオも人口規模等から考えて再輸出の蓋然性が高く、アラブ首長国連邦は輸出入関税がないため貿易の中継点としてのみ利用されている可能性が高い。

表 4-2 中古家電の輸出状況（2012 年）

中古テレビ			中古エアコン		
順位	国名	台数	国名	台数	
1	フィリピン	460,698	ベトナム	10,327	
2	ベトナム	458,140	ブルガリア	6,442	
3	タイ	178,401	カンボジア	3,117	
4	マカオ	105,214	フィリピン	2,904	
5	ミャンマー	55,224	台湾	2,454	

中古冷蔵庫			中古洗濯機		
順位	国名	台数	国名	台数	
1	フィリピン	9,033	ベトナム	3,962	
2	香港	4,390	カンボジア	620	
3	ベトナム	4,271	フィリピン	227	
4	アラブ首長国連邦	2,393	アラブ首長国連邦	142	
5	ミャンマー	2,224	台湾	120	

実際、環境省³⁷⁾では、香港の輸入事業者5業者のうち全ての業者が日本から輸入したブラウン管テレビの90～100%を中国へ再輸出している、マカオの輸入事業者3事業者のうち1事業者が80%を中国へ再輸出している、日本からアラブ首長国連邦に輸入（直接、または香港経由と推察される）される中古家電は、イラン、イラク、ヨルダン、パキスタン、アフガニスタン、アフリカ諸国に再輸出されているとのヒアリング結果が得られている。我が国だけの責任とは言えないが、リユース輸出先国からの再輸出についてもバーゼル条約の理念を踏まえれば問題を孕んでいる可能性は高い。

この課題に対する対策として環境省は平成25年9月に「使用済み電気・電子機器の中古品判断基準」を策定、平成26年4月より運用を開始することとしている³⁸⁾。年式・外観、正常作動性、梱包・積載状態、中古取引の事実関係、中古市場の5つの基準のうちひとつでも満たさなければ処分作業目的の輸出とみなされるという厳しい基準であるが、脱法的な輸出を防止する観点からは社会システムの理念とも合致するものである。特に、通電検査を基本とする正常作動性について代替手段を否定するものではないが、その際には厳しい審査をクリアする必要がある、「使用済みブラウン管テレビの輸出時における中古品判断」における曖昧さが払拭されていることは評価されるべきである。制度的には偽装リユース防止の環境整備は整いつつあるが、今後は実質的にこの基準の運用する水際での実効性が問題となる。

さらに、バーゼル法の対象外となるリユースと対象となるリサイクルの間の境界の曖昧さが制度運用の課題になる。我が国では、循環基本法にあるように再使用と再生利用とに区別されることが一般的であるが、海外における使用済み製品の処理方法の分類については、Srivastava³⁹⁾によれば、原材料→製作→組立→流通→消費者→埋立の流れをClosed-Loop Supply Chainとして、消費者から消費者に戻すことをsecondary markets、流通に戻すことをrefurbish、組立に戻すことをremanufacture、製作に戻すことをリサイクルとしている。第2章で述べたとおり、近年のRL研究の基礎的な論文となっているThierry et al.⁴⁰⁾でも同様の区分を行っている。このように特にrefurbishとremanufactureをリユースとするか否かの明確な基準がバーゼル法の運用上必要となる。

該非判断については、先述したとおり、実態としては現在のところ鉛含有量が0.1重量%を超過するかどうかで判断されることが多い。ただし、鉛含有量の測定方法、特に金属スクラップのサンプリング方法と分析において鉛含有割合の分母を何にするかについては法令等には規定されていない。このため、鉛含有量の低い部分をサンプリングすることで脱法的にバーゼル法の規制を逃れることは可能である。これがバーゼル法に係る最大の制度的課題である。また、使用済み電気電子機器については、同一製品をまとめて、あるいは金属スクラップの一部としてリサイクル目的で輸出されるケースは多い。そういった場合にバーゼル法の規制対象となるか否かについても合わせて検証が必要である。

これらの課題についての検討は既に開始されているため⁴¹⁾、明確な基準を策定し、実効性を持たせることが必要となる。そこでの検討結果が示すとおり、基板重量当たりの鉛含

有量を基準とすれば大部分の使用済電気電子機器がバーゼル法の規制対象となり、仮に金属スクラップの中にこのような使用済電気電子機器が混入している場合は、それを取り除かない限りは規制対象からは外されるべきではないという基準が策定されれば、脱法的な輸出が防止される可能性が高まる。

さらに、バーゼル法については、条約第 3 条の規定に基づく通報に対応する環境省令の整備と第 4 条通報への厳格な対応により、我が国の責任で輸出を止める必要性が明確化される。特に、中国からの第 4 条に基づく通報には廃電気電子機器が含まれているため、リサイクル原料として製品の姿そのままの形での輸出は容易に防止できる。

4.4 欧州と比較した我が国の社会システムの課題

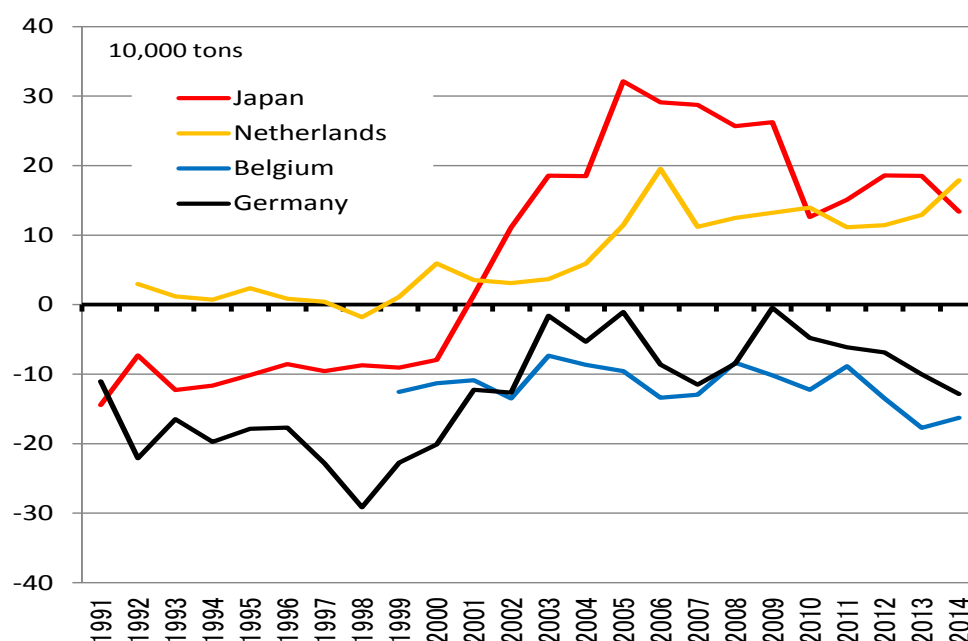
ここまで見てきたとおり、日本においては静脈資源の潜在汚染性を防止できるはずの廃掃法とバーゼル法が十分に機能しているとは言い難い。違法・脱法的輸出の防止は先述した負のスパイラルを断ち切ることになるため、静脈資源の適正な貿易の促進に繋がる。ここでは、日本と欧州の関連する制度を比較することで静脈資源貿易の促進環境について考察する。

適正な国際資源循環や国内循環へのインセンティブが働きやすいか、制度的に違法・脱法的輸出防止の可能性を有しているかの 2 点で見た欧州における静脈資源の貿易に関するガバナンス制度と我が国の制度の違いは以下のとおりである。

- ・日本でも欧州でも静脈資源の輸出を規制する制度としてバーゼル条約と廃棄物関連法の 2 系統が存在することは共通している。欧州では両系統ともに対象となるか否かが有害性で決まっているのに対し、日本ではバーゼル法では有害性、廃掃法では有価性が主な判断基準となっており、両制度で乖離がある。また、欧州では廃棄物法令の中で、規制対象物を相当量以上含む廃棄物は明確に「混合廃棄物」として総体規制されるが、我が国の廃掃法では曖昧となっている。そのため、有害性のある有価物に対しては、日本における規制は欧州と比較して脆弱となっている。
- ・国内循環へのインセンティブの観点では、日本のリサイクル産業は、廃棄物処理法に基づく厳格な許可制度の存在により新規参入が容易ではない上、都道府県、市町村毎、廃棄物種類毎の細分化された許可取得が必要であり事業の広域化大規模化が難しい。また、廃掃法やバーゼル法に基づく規制対象物の輸入手続も厳しいため、国内リサイクル産業の育成環境が整っていない。一方、欧州では一般廃棄物・産業廃棄物の区分に関係なく一括して収集運搬・処理処分が可能で細分化した許可制度がない場合が多く、域内での有害廃棄物の輸入手続も簡素化されているため産業の育成環境が整っている⁴²⁾。そのため、日本より相対的に域内循環のインセンティブが働き、途上国への輸出インセンティブが小さい。

使用済み電気電子機器、さらには e-waste の貿易状況を把握できる統計データはない。

そこで使用済み電気電子機器が多く含まれると考えられる銅スクラップの貿易状況から上で述べた点に考察を加える。欧州各国と日本の銅スクラップの純輸出量を図 4-3 に 2012 年の銅スクラップの世界貿易ネットワークを図 4-4 に示す。図 4-3 より我が国は輸出超過に転じているが、欧州ではドイツやベルギーが輸入超過となっている。詳細は第 5 章で展開するが、貿易ネットワークに対してクラスタリングを行うと表 4-3 のようなコミュニティが形成されていることが分かる。

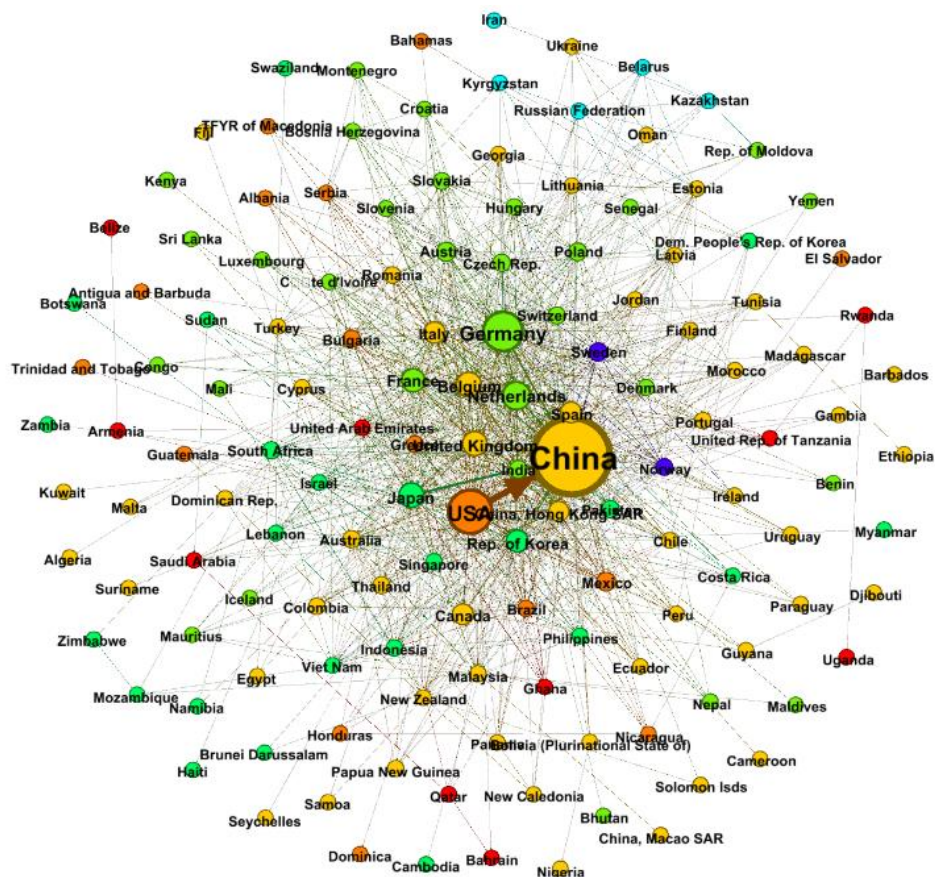


出典：United Nations Commodity Trade Statics Database

図 4-3 欧州各国と日本の銅スクラップの純輸出量

運賃負担力の低い静脈資源であるため、クラスタリング結果からも欧州やアジアといった距離的に近い国々でコミュニティが形成されている。ただし、日本にとっての最大の輸出相手国である中国は世界中から輸入しているため、最大の輸入国であるアメリカと同じコミュニティに属している。このように、欧州では経済原則から考えても選択されることになる近距離国際循環が、制度的にも支えられている。アジアにおいては適正なリサイクルを担保する日本への輸入を中心とした近距離域内循環が望ましい中、過度な輸入手続きや産業の未発達から逆に日本からの輸出が行われている。

中国を中心とするコミュニティは世界規模で形成されているが、域内循環が進んでいる中で遠距離貿易が併存していることは、輸送コストの増加を凌駕するだけの環境ダンピングが存在していることを示唆している。欧州における輸入超過国であるドイツやベルギーからも中国への輸出は行われており、これらに **e-scrap** が含まれている可能性は否定できない。欧州においても制度の実施面では課題を残していると考えられる。



出典：United Nations Commodity Trade Statics Database

図 4-4 銅スクラップの世界貿易ネットワーク（2012 年）

表 4-3 クラスタリング結果

代表的な国（貿易量5万トン以上）	備考
China, USA, UK, Italy, Canada, Spain, Hong Kong, Mexico, Australia, Switzerland, Thailand, Bulgaria, Greece, Romania, Colombia	世界全体
Germany, Netherlands, Belgium, France, Austria, India, Poland, Czech, Slovakia	欧州中心
Japan, Korea, Pakistan, South Africa, Singapore, Indonesia	アジア中心
Norway, Sweden	北欧

以上のように、欧州では適正な国際資源循環（欧州域内での循環）を促進させるという理念に合致した制度が整っているが、日本では理念と制度に乖離があるのは否めない。さらに、欧州と比較して日本では有害性のある有価物に対する規制が曖昧で、廃棄物法制面で違法・脱法的輸出に対する脆弱性を有している。これらの点は欧州の制度を参考にしながら修正が加えられるべきであろう。ただし、制度面では差があるとはいえ、貿易データから見ても実効性の課題があるのは共通だと捉えるべきであろう。

違法・脱法的輸出を防止するためには、制度の修正と実効性の確保、適正な国際資源循環や国内循環へのインセンティブを高めるアプローチがある。近距離に中国という不適正処理を問題とする輸入超過国が存在することを踏まえれば、日本が欧州以上に違法・脱法的輸出への対策を講じる必要がある。国内循環と日本を輸入国とするアジア域内循環が短期目標となり、アジア域内循環を適正化するためには、欧米で進んでいる国際的なリサイクル認証制度をアジア地域レベルで導入し、認証費業者が関与した国際資源循環をアジア域内で実現することが中期的な目標なるだろう。

違法・脱法的輸出を防止するためには、制度の修正と実効性の確保、適正な国際資源循環や国内循環へのインセンティブを高めるアプローチがある。近距離に中国という不適正処理を問題とする輸入超過国が存在することを踏まえれば、日本が欧州以上に違法・脱法的輸出への対策を講じる必要がある。国内循環と日本を輸入国とするアジア域内循環が短期目標となり、アジア域内循環を適正化するためには、欧米で進んでいる国際的なリサイクル認証制度⁴²⁾をアジア地域レベルで導入し、認証費業者が関与した国際資源循環をアジア域内で実現することが中期的な目標なるだろう。

4.5 まとめ

本章では、国際資源循環に関する社会システムについて、システムを構成する各要素の理念的な方向性について整理した。国際資源循環に関しては、理念的には環境汚染に繋がる貿易は防ぐという前提で適正な貿易を容認あるいは促進する方向にあるが、それを支える手続き面を規定する社会システムがその理念に迫っていないのが現状であることを明らかにした。

潜在汚染性を有した使用済み電気電子機器を対象として検討した結果、輸出先で生じている使用済み電気電子機器に起因する環境汚染・健康被害に、我が国からの輸出が関与している蓋然性が高い一方で、静脈資源の潜在汚染性を防止できるはずの社会システムが十分に機能しているとは言い難く、むしろ厳しい手続きを経る追加的コストが発生することを避けるために、法の網の目を潜ろうとするインセンティブが働いている。厳しい規制が却って環境汚染に繋がる可能性があるという負のスパイラル状態にあるとも言え、環境汚染を防止することを前提に静脈資源の輸出を促進するためには、違法・脱法的な輸出を防止することが試金石的な意味を持ち、そのために解決すべき廃掃法、バーゼル法の制度的課題について整理した。なお、本稿で挙げた課題や解決策は制度面での対応であり、これと併せて輸出者への周知徹底、制度の運用に関わる関係者のノウハウの蓄積といった取組も車の両輪として認識していく必要がある。

こういった国際資源循環に関連する社会システムの方向性と課題を踏まえることで、国際静脈物流システムのあり方が見えてくる。国際資源循環の促進を支えるべく機能するためには、マネジメント概念としての国際静脈物流システムとしては、課題を持った社会シ

システムを所与とするのではなく、課題の解決をも視野に入れる必要がある。次章では、別のアプローチとして、望ましい国際静脈物流システムのあり方の検討に繋がる静脈資源貿易ネットワークの現状分析を行う。

第4章参考文献

- 1) United Nations Environment Programme: Decoupling2: technologies, opportunities and policy options, 2014.
- 2) 環境省：平成 26 年版環境・循環型社会・生物多様性白書，2014.
- 3) 細田衛士：資源循環型社会－制度設計と政策展望－，慶應義塾大学出版会，2008.
- 4) 大熊一寛：リサイクル向け廃棄物の国際移動に関わる各種政策理念とその関係，廃棄物学会論文誌，Vol.16, pp.141-150, 2005.
- 5) 中央環境審議会：小型電気電子機器リサイクル制度の在り方について（第一次答申），2011.
- 6) The Basel Action Network (BAN) and Silicon Valley Toxic Coalition (SVTC): Exporting Harm, The High-Tech Trashing of Asia, 2002.
- 7) 中央環境審議会・産業構造審議会：中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会家電リサイクル制度評価検討小委員会，産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会電気・電子機器リサイクルWG 合同会合（第 20 回）資料，2011.
- 8) 寺園淳・林誠一・吉田綾・村上進亮：有害物質管理と資源回収の観点からの金属スクラップ(雑品)発生・輸出の実態解明，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.22, pp.127-140, 2011.
- 9) Shinkuma T., Huong N.T.M.: The Flow of E-waste Material in the Asian Region and a Reconsideration of International Trade Policies on E-waste, Environmental Impact Assessment Review, vol. 29, pp.25-31, 2009.
- 10) Ni H, Zeng E.Y.: Law enforcement and global collaboration are the keys to containing e-waste tsunami in China, Environmental Science and Technology, 43, pp.3991-3994, 2009.
- 11) Unep: Urgent need to prepare developing countries for surge in E-waste, 2010.
- 12) Ongondo F.O., Williams I.D., Cherrett T.J.: How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes, Waste Management, 31, pp.714-730, 2011.
- 13) Yu J., Ju M., Williams E.: Waste electrical and electronic equipment recycling in China: practice and strategy. In: 2009 WEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology. ISSST, Temple, Arizona, USA, May, pp.18-20, 2009.
- 14) Yang, J., Kayaga S., Smout I.: Regulating for e-waste in China: progress and challenges. Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Municipal Engineer 162(2), pp.79-85, 2009.
- 15) Wei L., Liu Y.: Present status of e-waste disposal and recycling in China, Procedia Environmental Science 16, pp.506-514, 2012.
- 16) Sothun C.: Situation of e-waste management in Cambodia, Procedia Environmental Sciences, 16, pp.535-544, 2012.
- 17) Fujimori T., Takigami H., Agusa T., Eguchi A., Bekki K., Yoshida A., Terazono A., Ballesteros Jr. F.C.: Impact of metals in surface matrices from formal and informal electronic-waste recycling around Metro Manila, the Philippines, and intra-Asian comparison, Journal of Hazardous Materials, 221-222, pp.139-146, 2012.
- 18) Li R.C., Tee T.J.C.: A reverse logistics model for recovery option of e-waste considering the Integration of the formal and informal waste sectors, Procedia – Social and Behavioral Sciences, 40(2012), pp.788-816, 2012.
- 19) Wilson D.C., Velis C., Cheeseman C.(2006): Role of informal sector recycling in waste management in developing countries, Habitat International, 30(4), pp.797-808, 2006.
- 20) 小島道一：国際資源循環の現状と課題，Journal of MMIJ, Vol.123, pp.591-596, 2007.
- 21) 寺園淳：循環資源の越境移動の実態と中古家電・金属スクラップの事例にみる適正管理方策，新世代法政策学研究，9, pp.77-104, 2010.
- 22) 鶴田順：バーゼル条約とバーゼル法，新見育文・松村弓彦・大塚直編「環境法大系」，商事法務，2012.
- 23) World Trade Organization: Panel reports out on China's export measures on various raw materials, 2011.
- 24) 経済産業省：「中国による原材料 3 品目の輸出規制について WTO 協定に基づく協議を要請」，平成 24 年 3 月 13 日ニュースリリース資料
- 25) 山下一仁：環境と貿易，日本評論社，2011.
- 26) 小島道一：アジアにおける資源循環貿易－現状と課題，「アジアにおける資源循環貿易」第 1 章，アジア経済研究所，2005.
- 27) 環境省 H P：有害廃棄物の輸出入に関する各国の規制（バーゼル条約事務局による通報），http://www.env.go.jp/recycle/yugai/basel_info/index.html

- 28) 鶴田順：パーゼル条約 95 年改正をめぐる法的課題，「国際リサイクルをめぐる制度変容」第 8 章，アジア経済研究所，2010.
- 29) 国土交通省港湾局：港湾における循環資源の取扱に関する指針，2010.
- 30) 石渡正佳：リサイクルアンダーワールド，WAVE 出版，2004.
- 31) 産構審環境部会廃棄物・リサイクル小委員会国際資源循環 WG：持続可能なアジア循環型経済社会圏の実現に向けて，2004.
- 32) 中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会国際循環型社会形成と環境保全に関する専門委員会：国際的な循環型社会形成に向けた我が国の今後の取組について－東アジア循環型社会ビジョンの共有へー，2006.
- 33) 環境省 H P：廃棄物処理法に基づく廃棄物の輸出確認及び輸入許可について，<http://www.env.go.jp/recycle/yugai/index4.html>
- 34) 環境省 H P：特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律の施行状況について，<http://www.env.go.jp/recycle/yugai/index4.html>
- 35) 中央環境審議会：廃棄物処理制度の見直しの方向性（意見具申），2010
- 36) 中央環境審議会：中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会廃棄物処理制度専門委員会（第 8 回）参考資料 4「廃棄物処理法に基づく輸出確認対象廃棄物の考え方について」，2009.
- 37) 環境省：平成 20 年度パーゼル法規制対象基準作成等調査報告書（平成 21 年 3 月），2009.
- 38) 環境省：使用済み電気・電子機器の輸出時における中古品判断基準について（お知らせ），平成 25 年 9 月 20 日
- 39) Srivastava S.K.: Network design for reverse logistics, Omega, 36, pp. 535-548, 2008.
- 40) Thierry M., Salomon M., van Nunen J.A.E.E, van Wassenhove L.N.: Strategic issues in product recovery management, California Management Review, 37, pp. 114-135, 1995.
- 41) 中央環境審議会・産業構造審議会：中央環境審議会循環型社会部会家電リサイクル制度評価検討小委員会，産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会電気・電子機器リサイクルWG 合同会合（第 22 回）資料「雑品スクラップに含まれる電気電子部品の有害性分析方法の検討」，2013.
- 42) 経済産業省：平成 26 年度地球温暖化問題等対策調査（資源循環高度化・効率化事業）報告書～廃棄物処理・リサイクル産業及び資源循環の在り方に関する今後の方向性，2015.
- 43) 堀田康彦・マグナス・ベングソン・十時義明・林志浩・栗生木千佳・村上（鈴木）理映：アジア地域大におけるリサイクル認証制度の導入可能性に関する研究，2015.

第5章 静脈資源貿易ネットワーク構造から見た我が国における国際静脈物流システムのあり方

5.1 はじめに

前章で国際資源循環に係る我が国の社会システムの理念的方向性とその課題について整理した。前章で整理したとおり、我が国の国際資源循環に対するスタンスとしては、例えば第二次循環型社会推進基本計画で「各国内での循環利用を補完するもの」とされていたものが、第三次計画では「国際的な循環資源の移動が環境負荷の低減や資源の有効利用に資する場合には、国際的な移動の円滑化を図ることが重要」とされるなど、理念的には促進する方向へ変化している。

国際静脈物流システムの望ましいあり方を検討するに当たり、前章では国際資源循環に係る社会システムに焦点を当てたが、本章では前章の結果を踏まえつつ、実際の貿易ネットワーク構造から望ましいあり方を模索するアプローチを取る。

静脈資源は経済成熟度や工業発展度により各国内での供給量や需要量が変化するため、それらを調整する形で世界全体の貿易需給バランスが決定される。事実、我が国も経済成長に伴い、鉄スクラップや銅スクラップの貿易は輸入超過から輸出超過へと変化している。さらに、静脈資源は運賃負担力が低いため¹⁾、価格と輸送コスト次第では経済的に優位となる埋立処分が選択される可能性もある。このように、世界全体の需給バランスと輸出可能相手国次第では、我が国の国際資源循環は進展しなくなる可能性もある。

静脈資源の貿易に関しては、絶対量が増加傾向であることを前置きした上で、その潜在汚染性に着目した環境面での課題を論じた研究が多く蓄積されている（寺園²⁾など）。静脈資源の貿易構造に着目した先行研究としては、橋³⁾が鉄スクラップの貿易構造について、所得水準と工業化路線から世界各国を4つのカテゴリーに分類し、それぞれが輸入と輸出のいずれに特化しているかを明らかにしている。国際的な流動のネットワーク構造をマクロに評価する先行研究としては、国際航空ネットワーク構造から得られる連結性やネットワーク性指標からネットワークの中心や連結体系を評価したもの⁴⁾や、効率性と代替性の間のバランスとしての頑健性指標により動脈資源6品目の貿易ネットワーク全体を評価したもの⁵⁾などがある。しかし、静脈資源の貿易ネットワーク構造を全体として評価するもの、あるいはそこから我が国の国際資源循環の状況を相対的に評価した先行研究は存在しない。

本章では、ネットワークの構造的特徴をマクロな視点から分析する手法である社会ネットワーク分析^{6) 7)}により、静脈資源貿易ネットワークの構造的な特徴や中心性の高い国の経年変化を明らかにし、得られる指標等から我が国の国際資源循環の状況・特徴を相対的

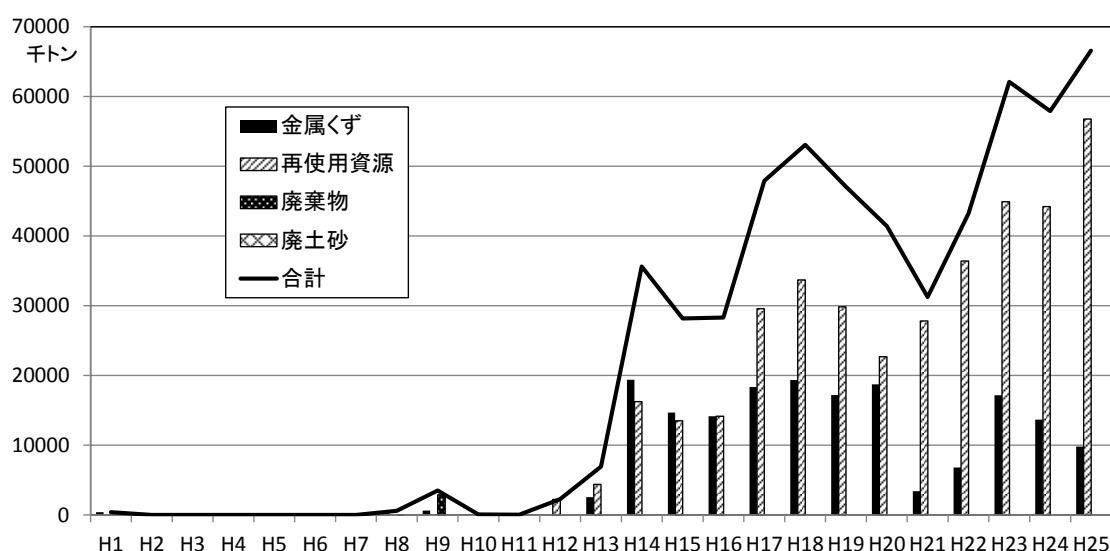
に評価する．さらに，それを踏まえて関連する社会のシステムの課題を明らかにする．

本章の構成は以下のとおりである．第 2 節では分析方法と結果を示し，第 3 節で我が国社会システムの課題を述べる．第 4 節は本研究のまとめである．

5.2 社会ネットワーク分析による静脈資源貿易ネットワークの評価

5.2.1 使用データ

まず，我が国の静脈資源の貿易状況を港湾統計から概観すると，輸出が殆どとなっている．輸出の経年変化を図 5-1 に示すが，再使用資源が最も多く，次に金属くずであり，この 2 品目で大宗を占める．



出所：港湾統計

図 5-1 我が国の静脈資源の輸出状況

次に社会ネットワーク分析により貿易ネットワークを評価する場合，使用データが問題となる．例えば，海上輸送の詳細なデータを提供するLloyd'sデータ⁸⁾の場合，船種毎船型毎の寄港実績から港湾間流動が把握できるため，輸送ルートを含む詳細なネットワーク構造が表現できる．しかし品目毎の輸送量や積み卸し量は把握できないため，港湾をノードとした品目毎の重み付きグラフの作成には至らない．さらに，静脈資源の輸送モードは船舶だけに限らず，網羅性に問題がある．一方で，貿易統計では輸送モードは限定されないため品目毎の貿易量を網羅的に把握できるが，純流動であるため経由地が把握できず⁹⁾，輸送ルートを考慮しない国と国との繋がりに重点を置いたネットワークとして表現される．

ここで，Lloyd'sデータを用いて，コンテナ船，バルク船，タンカーの寄港実績から港湾をノードとした社会ネットワーク分析を実施しているKaluza et al.¹⁰⁾を参考にすると，海

上輸送ネットワークは航空ネットワークと比較して低い平均最短経路距離，高い次数である密なネットワークであり，特にバルク船でその特徴が強いことが示されている．このことから，静脈資源の海上輸送に用いられることの多いバルク船¹¹⁾のネットワークは，最終目的地への直行リンクが多く，輸送ルートを加味した港湾間流動データでも事実上国間流動データとネットワーク構造に近いことが示唆されている．

このように海上輸送を中心に行われる静脈資源貿易では直行リンクが多く輸送ルートがネットワーク構造に大きな影響を及ぼさないと考えられることから，本研究では使用データとして，品目毎の分析が可能で大半の国連加盟国の貿易統計データが収録された**United Nations Commodity Trade Statics Database**を用いることとした．分析の対象としては，我が国の代表的な静脈資源である鉄スクラップ（HSコード7204），銅スクラップ（HSコード7404），廃プラスチック（HSコード3915）とした．また，外的要因がネットワーク構造に与えた影響ではなく，ネットワーク構造の経年による変化を見ることを目的とするため，各国統計を網羅的に入手出来る最新年である2012年と，これまでの世界経済の情勢変化等から見て静脈資源貿易構造が現在とは異なっていたと考えられる1992年の2断面の分析とする．なお，本来であれば輸出データと輸入データのいずれを用いても作成される隣接行列は同一になるべきであるが，輸出国と輸入国で別のHSコードを用いる場合があるなど実際には一致しない⁹⁾．我が国の静脈資源貿易が輸出超過であることを踏まえて，本研究では輸出データを用いて分析を行う．

5.2.2 分析方法

本研究では，静脈資源貿易ネットワークの構造的特徴と中心性指標について計測する．静脈資源貿易ネットワークを，国をノードとする有向グラフとして捉え，構造的特徴としてノード数，リンク数，グラフ密度，平均クラスター係数を測定し，モジュラリティ指標を用いてクラスタリングも行う．また，ネットワーク構造上の中心性指標として次数中心性の他にPageRank¹²⁾を測定する．各指標の目的と特徴を表5-1に示す．

グラフ密度 d ，平均クラスター係数 C は以下のとおり表され，クラスタリングは以下の式で表されるモジュラリティ Q が最大となるように行われる．また，PageRankは以下の式で表される行列 M の第一固有ベクトルとして計算される．

$$d = \frac{m}{n(n-1)} \quad (5-1)$$

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{k_i(k_i-1)} \quad (5-2)$$

$$Q = \sum_p (e_{pp} - a_p^2) \quad (5-3)$$

$$M' = cM + (1-c) \begin{bmatrix} 1 \\ n \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (5-4)$$

ただし、 n ：全ノード数、 m ：全リンク数、 k_i ：ノード i に近接するノード数、 m_i ：近接するノード間のリンク数、 e_{pp} ：コミュニティ p に属するノード間のリンク数の全リンク数に占める割合、 a_p ：コミュニティ p に属するノードに繋がるリンク数の全リンク数に占める割合の期待値、 M ：推移確率行列、 c ：グラフを強連結にするためのパラメータ（通常0.85）、 $[1/n]_{n \times n}$ ：要素が $1/n$ の $n \times n$ の正方行列である。

表5-1 各指標の目的と特徴

指標	目的	特徴
ノード数	貿易ネットワークを構成している国の数であり、ネットワークの規模の大きさを示す指標。	直接繋がっているノードを隣接ノードと呼び、貿易相手国を表す。貿易量の大小は考慮されない。
リンク数	ネットワークを構成する国同士が貿易を行っている数を示す指標。国の数との比較の中でネットワークの疎密を示すことにもなる指標。	有向グラフの場合リンクの向きがノード間の関係を表し、本研究ではリンクの向きに輸出されることとしている。
グラフ密度	ネットワーク内の国同士がどれだけ貿易しているかを表し、ネットワーク全体の疎密や貿易相手の代替性の高さ、すなわち頑健性を示す指標。	すべてのノード間に辺のある完全グラフで最大値1、辺が全く存在しない空グラフで最小値0となる。
平均クラスター係数	ネットワーク全体の凝集性を表すため、ある国の貿易相手国同士が貿易を行っている割合を示すと同時に潜在的な貿易相手国とも言える構造的空隙の割合も示す指標。	0から1の間の値をとり、大きい程あるノードに隣接しているノード間にも密なリンクが存在するネットワークとなる。0.3～0.7ならクラスター性が高いと言われる。
モジュラリティ指標	ネットワーク内部のより密度の高い部分構造であるコミュニティに分割する方法であるクラスタリングにおいて、ネットワーク全体の分割の質を表す指標。	数値が大きいほど高い質で分割されていることを表し、0.3より大きければ、そのネットワークはコミュニティ構造を持つと見なせる。
次数中心性	ある国がネットワーク内で貿易を行っている相手国の多寡によりその国のネットワークにおける重要性を評価する指標。	最も基本的な中心性指標で、あるノードの次数（張られているリンクの数）であり、大きい程中心性が高いことになる。ただし、リンクの重みは考慮されない。
PageRank	ある国の重要性の高い国との繋がりを重視する中心性指標であり、その国のネットワークで中心的役割を果たしている国々との繋がりが具合から重要性を評価する指標。	値が大きい程中心性が高く、出次数よりも入次数と高い相関を持つと言われている。このことは本研究の場合、輸入国が高く評価されることを意味する。

さらに、量的な要素も加えた中心性を見るため、二国間の貿易量による重み付き無向グラフとして捉え、Lee⁴⁾の方法により局所中心性、ネットワーク性を測定し、さらにネットワーク距離から重要リンクの特定を行う。 i 国の局所中心性 L_i 、二つの国の連結性 C_{ij} 、ネットワーク性 N_i 、ネットワーク距離 d_{ij} 以下のように表される。

$$L_i = \frac{l_i}{n-1} \times \sqrt{\frac{F_i}{T_n}} \quad (5-5)$$

$$C_{ij} = \frac{f_{ij}}{t} \times L_i \times L_j \quad (5-6)$$

$$N_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \quad (5-7)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{\sqrt{C_{ij}/C_{\max}}} \quad (5-8)$$

ただし、 l_i : ノード i に繋がるリンク数、 T_n : 全てのノードの平均貿易量、 F_i : ノード i の貿易量、 t : 全てのリンクの平均貿易量、 f_{ij} : ノード i とノード j の間の貿易量、 C_{\max} : C_{ij} の最大値である。

このように、局所中心性はその国の次数中心性と相対的な貿易量の大きさの積であり、連結性は二つの国の局所中心性とその間の貿易量で表され、ネットワーク性は全貿易相手国との連結性の合計となる。また、ネットワーク距離が短いほど、二国間の関係は強いことを示す。

5.2.3 分析結果

まず視覚的に理解するために、1992 年と 2012 年の各品目について、貿易量をノードの大きさで表したネットワークを図 5-2～図 5-7 に示す。これらの図では、クラスタリングにより分割されたコミュニティ毎にノードの色を変えている。

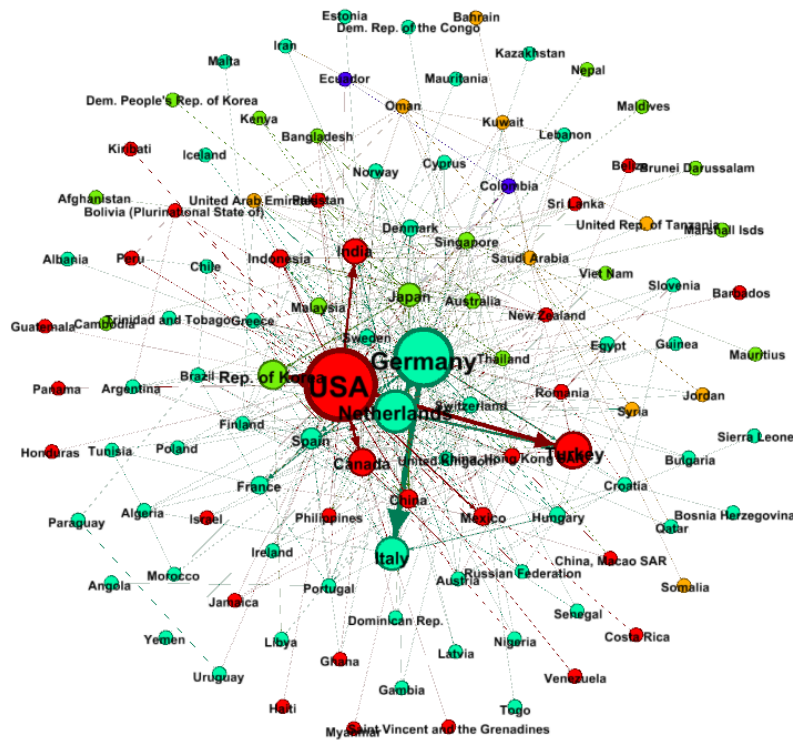


図 5-2 鉄スクラップの貿易ネットワーク（1992 年）

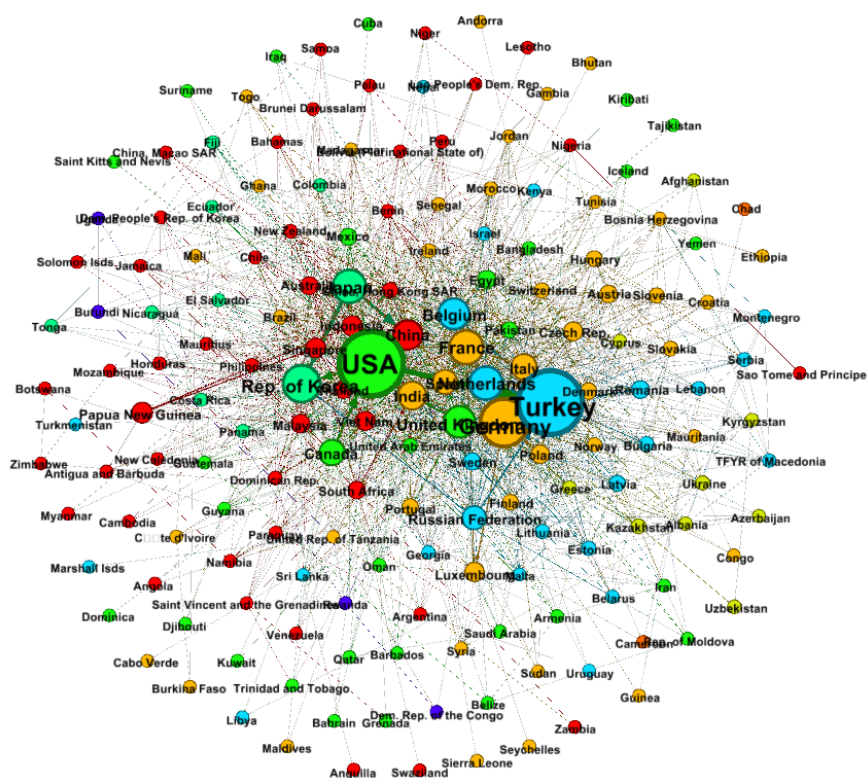


図 5-3 鉄スクラップの貿易ネットワーク（2012 年）

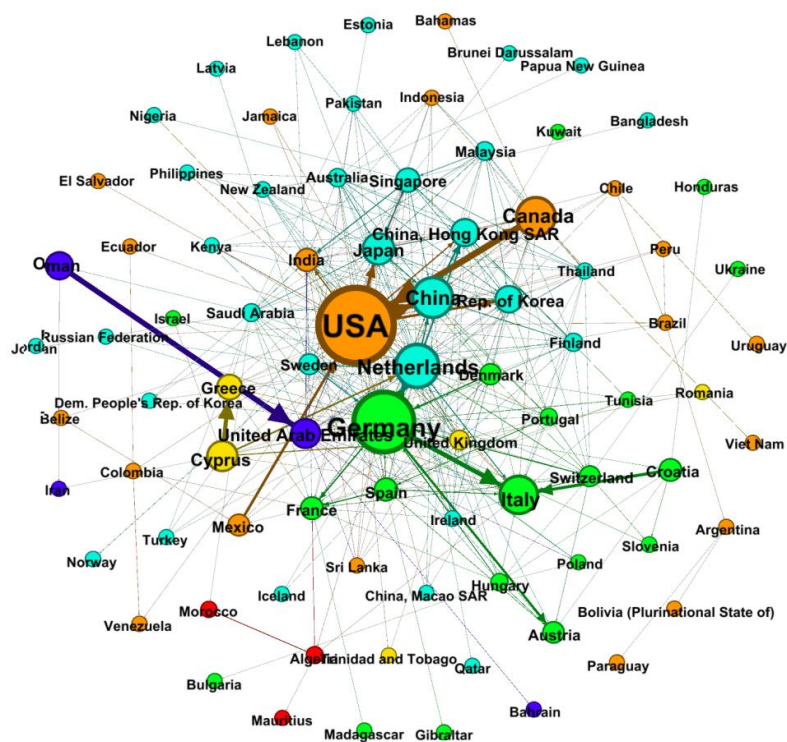


図 5-4 銅スクラップの貿易ネットワーク（1992 年）

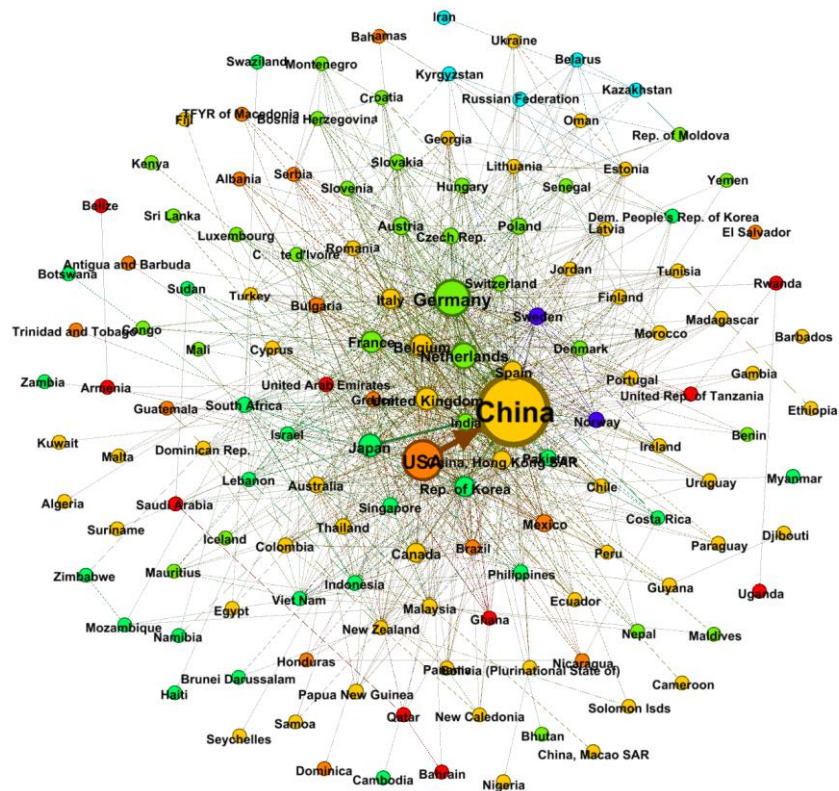


図 5-5 銅スクラップの貿易ネットワーク（2012 年）

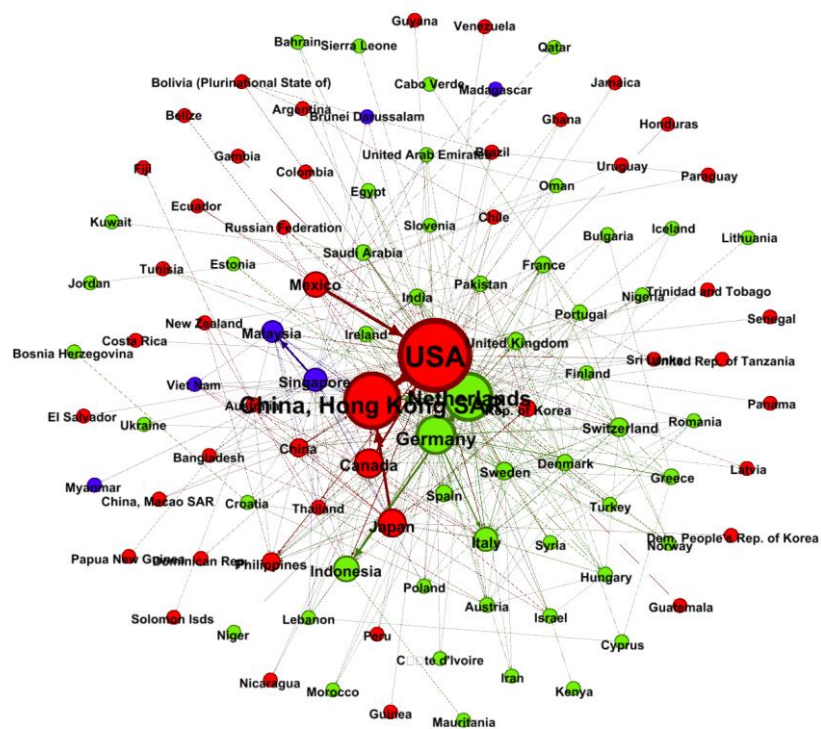


図 5-6 廃プラスチックの貿易ネットワーク（1992 年）

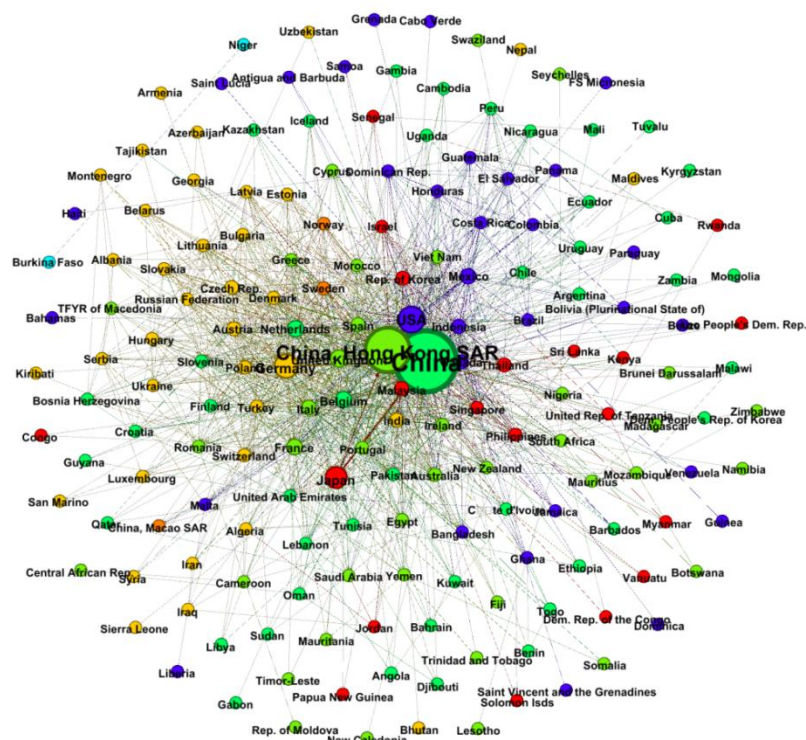


図 5-7 廃プラスチックの貿易ネットワーク（2012 年）

ネットワーク全体の構造的な特徴の変化を評価するための指標を表 5-2 に示す。いずれの品目についてもノード数，リンク数が増加していることから，ネットワークの規模が増大し，より複雑化していることになるが，これには使用データにおける捕捉率上昇の影響も含まれている。グラフ密度は上昇しており，より密で代替性の高いネットワークとなっている。平均クラスター係数が高くなっていることから，それぞれの貿易相手国同士の関係性が高まっており，構造的な空隙は小さくなっている。2012 年の鉄スクラップや 1992 年の銅スクラップでは大きなモジュラリティとなっており，効果的に貿易コミュニティに分割されている。それ以外でもモジュラリティ指標から見るとある程度有意に分割されている。

表 5-2 ネットワーク構造の各指標

	鉄スクラップ		銅スクラップ		廃プラスチック	
	1992	2012	1992	2012	1992	2012
貿易量(千t)	22,987	102,126	1,215	5,745	684	14,665
ノード数	112	175	85	141	104	178
リンク数	498	2,094	440	1,361	443	1,942
グラフ密度	0.040	0.069	0.062	0.069	0.041	0.062
平均クラスター係数	0.314	0.430	0.324	0.421	0.367	0.478
モジュラリティ	0.380	0.503	0.568	0.271	0.329	0.366

次に、ネットワークにおいて重要な役割を果たしている国と我が国の相対的地位を中心性指標から評価する。社会ネットワーク分析に依らない場合は貿易量で評価することが一般的である。社会ネットワーク分析において、最も基本的な指標は次数中心性であるが、評価におけるこの指標の有効性を確認するために、各国の貿易量と次数中心性の関係が冪乗関数で表されるとして回帰分析を行った結果を表 5-3 に示す。

表 5-3 貿易量と次数中心性の関係

	1992		2012	
	相関係数	指数	相関係数	指数
鉄スクラップ	0.883	3.018	0.916	2.714
銅スクラップ	0.880	2.370	0.910	2.132
廃プラスチック	0.861	2.018	0.922	2.231

表 5-3 より両者には強い相関があり、貿易量が多い国ほど次数中心性が高いことが分かる。すなわち、次数中心性による評価は貿易量による評価と類似する傾向にあることを意味している。したがって、ネットワーク構造に起因する特徴を含めた全体的な評価を行うには不十分であるとも言えるが、一方でこのような傾向から外れることは当該国の構造上の特徴としても捉えることができる。なお、PageRank と貿易量の間には程強い相関関係は存在しない。

表 5-4、表 5-5 に 1992 年と 2012 年の各品目の貿易量と次数中心性に加えて PageRank、局所中心性、ネットワーク性上位国を、表 5-6 にはネットワーク距離の小さい貿易リンクの変化を示す。なお、両国間で輸出・輸入ともに行っている場合、表 5-5 では輸出が多い方の国を左側に示している。また、表 5-7 には、モジュラリティの比較的高い 2012 年の鉄スクラップと 1992 年の銅スクラップのクラスタリング結果例を示す。

最初に貿易量の上位国を概観すると、鉄スクラップでは 1992 年でも 2012 年でもアメリカが最上位であり、その他ドイツやトルコなどの欧米諸国が両断面で上位にいるが、アジア諸国では日本、韓国、中国が 2012 年に順位を上げ、インドは下げている。銅スクラップについては 1992 年ではアメリカ、ドイツ、オランダが上位 3 カ国であったものが、2012 年には中国が最上位でこれらの国が後に続く形となり、日本や韓国も順位を上げている。廃プラスチックについては、1992 年は最上位のアメリカ等欧米諸国が上位を占める中、香港が第 2 位であったものが、2012 年には中国が最上位、香港が第 2 位となっている。こういったことを踏まえつつ、中心性指標から見た各ネットワークの特徴は以下のとおりとなる。

表 5-4、表 5-5 より、鉄スクラップについては 1992 年では貿易量・次数中心性で最上位のアメリカ、ネットワーク性で最上位のドイツ、PageRank で最上位のオランダからの輸出を中心としたネットワークであったものが、2012 年にはアメリカからの輸出がより卓越したネットワークとなっている。ただし、2012 年の PageRank では輸入超過国であるインド

が最上位となっている。ネットワーク距離は、2012 年ではアメリカトルコ間が 2 位以下を引き離して短い、2 位以下では 1992 年と比較して相対的に拮抗しており、世界中に関係性の強いリンクが登場していることも分かる。なお、いずれの年でも、先進国間での貿易が目立っている。

表 5-4 各指標の上位国（1992 年）

順位	1992				
	貿易量	次数中心性	PageRank	局所中心性	ネットワーク性
鉄 ス ク ラ ッ プ	1 USA	USA	Netherlands	USA	Germany
	2 Germany	Netherlands	Japan	Germany	USA
	3 Netherlands	Germany	Germany	Netherlands	Netherlands
	4 Turkey	Switzerland	UK	Canada	Canada
	5 Italy	Japan	USA	Japan	Italy
	6 Korea	Spain	Spain	Spain	Turkey
	7 Canada	Singapore	Hong Kong	India	India
	8 India	Canada	India	Italy	Korea
	9 Japan	Sweden	China	Switzerland	Spain
	10 Spain	China	Korea	Korea	Japan
	—	—	—	—	—
銅 ス ク ラ ッ プ	1 USA	USA	USA	USA	USA
	2 Germany	Netherlands	China	Germany	Germany
	3 Netherlands	Germany	Hong Kong	Netherlands	Netherlands
	4 China	Japan	Japan	China	China
	5 Canada	Singapore	Korea	Japan	Canada
	6 Italy	Sweden	UK	Italy	Italy
	7 Japan	China	India	Canada	Japan
	8 Cyprus	Spain	Netherlands	Korea	Korea
	9 UAE	Korea	Italy	Hong Kong	Hong Kong
	10 Hong Kong	Denmark	France	UAE	India
	—	—	—	—	—
廃 プ ラ ス チ ッ ク	1 USA	USA	Hong Kong	USA	USA
	2 Hong Kong	Netherlands	USA	Netherlands	Hong Kong
	3 Netherlands	Germany	Italy	Germany	Netherlands
	4 Germany	Sweden	Singapore	Hong Kong	Germany
	5 Canada	Singapore	UK	Canada	Canada
	6 Japan	Japan	Malaysia	Japan	Mexico
	7 Indonesia	Canada	Ireland	Singapore	Indonesia
	8 Mexico	Denmark	Netherlands	Italy	Italy
	9 Italy	India	Germany	Sweden	Japan
	10 Singapore	Spain	Indonesia	Indonesia	Singapore
	—	—	Japan(41)	—	—

銅スクラップについては、表 5-4 より 1992 年では先進国間の貿易と、各指標で最上位となるアメリカの他、ドイツ、オランダから中国、香港、日本といったアジアへの輸出が目立ち、PageRank では輸入超過国である中国、香港、日本がアメリカに次いで大きくなって

いる。表 5-5 より 2012 年には中国への輸入を中心としたネットワークへと変化しているが、次数中心性や PageRank ではドイツが最上位となっている。ネットワーク性上位国については最上位の中国以外は全て輸出超過国である。ネットワーク距離は、表 5-6 より 2012 年ではアメリカ-中国間が 2 位以下を大きく引き離して短く、2 位以下でも中国関係のリンクがほとんどで、1992 年とは異なり中国を中心として関係性の強いリンクが張られている。

表 5-5 各指標の上位国（2012 年）

順位	2012				
	貿易量	次数中心性	PageRank	局所中心性	ネットワーク性
鉄 ス ク ラ ッ プ	1 USA	USA	India	USA	USA
	2 Turkey	Germany	Netherlands	Germany	Turkey
	3 Germany	India	UAE	Turkey	Germany
	4 Korea	Netherlands	China	India	Netherlands
	5 France	UK	Germany	Netherlands	Korea
	6 Japan	Spain	UK	China	China
	7 Netherlands	Italy	Korea	UK	UK
	8 UK	China	USA	Korea	India
	9 Belgium	Belgium	Thailand	Belgium	Belgium
	10 China	France	Hong Kong	France	France
	—	Japan(22)	Japan(15)	Japan(13)	Japan(12)
銅 ス ク ラ ッ プ	1 China	Germany	Germany	China	China
	2 USA	Netherlands	China	Germany	USA
	3 Germany	UK	Korea	USA	Germany
	4 Netherlands	Italy	Hong Kong	Netherlands	Netherlands
	5 Belgium	USA	India	UK	UK
	6 Japan	Belgium	Japan	Belgium	Japan
	7 UK	India	USA	Korea	Belgium
	8 France	China	Belgium	Italy	Korea
	9 Korea	Korea	Netherlands	Japan	France
	10 Italy	Spain	UK	France	Italy
	—	Japan(13)	—	—	—
廃 プ ラ ス チ ッ ク	1 China	China	China	China	China
	2 Hong Kong	USA	Hong Kong	Hong Kong	Hong Kong
	3 USA	Germany	USA	USA	USA
	4 Germany	Belgium	Thailand	Germany	Germany
	5 Japan	Hong Kong	UAE	Belgium	Japan
	6 UK	Italy	Malaysia	UK	UK
	7 Netherlands	India	UK	France	Belgium
	8 Belgium	UK	Germany	Netherlands	Netherlands
	9 France	Spain	India	Italy	France
	10 Mexico	Malaysia	Viet Nam	Japan	Mexico
	—	Japan(28)	Japan(29)	—	—

廃プラスチックについては、表 5-4 より 1992 年ではアメリカ、オランダから香港やインドネシアへの輸出を中心とするネットワークだが、アメリカはカナダ、メキシコ、オ

ランダからの輸出の受け入れ先にもなっており、各中心性指標でほぼ最上位となっている。表 5-5 より 2012 年では概ね全世界から中国、香港へ輸出するというネットワークに変化しているが、一方で香港から中国への輸出が、ネットワーク距離が最も小さい。このことは、他で報告されているとおり¹³⁾、香港が中国への貿易の中継地となっていることを示唆している。すなわち、表 5-5 の各指標で最上位となる中国への輸入を中心としたネットワークと言っても過言ではない。表 5-6 のネットワーク距離の 2 位以下でも中国関係のリンクがほとんどで、銅スクラップと同様に中国を中心として関係性の強いリンクが張られている。

表 5-6 ネットワーク距離上位リンクの変化

順位	1992			2012		
	輸出	輸入	距離	輸出	輸入	距離
鉄 ス ク ラ ッ プ	1 Germany	Netherlands	1.00	USA	Turkey	1.00
	2 USA	Canada	1.47	USA	Korea	1.76
	3 Germany	Italy	1.93	Germany	Netherlands	1.98
	4 USA	Korea	2.17	USA	China	2.01
	5 USA	India	2.33	Canada	USA	2.11
	6 USA	Turkey	2.45	USA	India	2.39
	7 Netherlands	Turkey	3.78	UK	Turkey	2.44
	8 Germany	Spain	3.90	Netherlands	Turkey	2.61
	9 Netherlands	Spain	4.87	Japan	Korea	2.75
	10 Netherlands	India	5.54	Germany	Italy	3.07
銅 ス ク ラ ッ プ	1 Germany	Netherlands	1.00	USA	China	1.00
	2 Canada	USA	1.10	Germany	China	1.88
	3 USA	China	1.17	Japan	China	2.55
	4 Germany	Italy	1.69	UK	China	2.64
	5 USA	Japan	1.81	Netherlands	China	2.93
	6 USA	Korea	2.22	Germany	Netherlands	2.97
	7 USA	Hong Kong	3.30	Korea	China	4.01
	8 Netherlands	China	3.44	Belgium	China	4.42
	9 Netherlands	Hong Kong	3.75	Italy	China	4.93
	10 USA	India	4.25	Germany	Belgium	5.32
廃 プ ラ ス チ ッ ク	1 USA	Hong Kong	1.00	Hong Kong	China	1.00
	2 Germany	Netherlands	1.48	USA	China	2.18
	3 Canada	USA	1.54	Germany	China	3.00
	4 Netherlands	USA	1.93	Japan	China	4.03
	5 Mexico	USA	2.35	USA	Hong Kong	4.33
	6 Netherlands	Hong Kong	2.59	UK	China	5.82
	7 Netherlands	Indonesia	3.88	UK	Hong Kong	7.36
	8 Japan	Hong Kong	3.89	Germany	Hong Kong	7.62
	9 Germany	Italy	4.97	Japan	Hong Kong	7.72
	10 USA	Indonesia	5.06	Belgium	China	8.04

表 5-7 クラスタリングの例

2012年鉄スクラップ	
コミュニティを構成する国(貿易量100万トン以上)	備考
China, Papua New Guinea, Indonesia, Shingapore, Viet Nam, Malaysia, Australia, South Africa, Thailand	アジア中心
USA, UK, Canada, Egypt, Mexico, Pakistan	北米中心
Germany, France, India, Italy, Spain, Luxembourg, Czech, Poland, Austria, Denmark, Portugal, Finland, Hungary, Switzerland	欧州中心
Korea, Japan	日本・韓国
Turkey, Netherlands, Belgium, Russia, Romania, Sweden, Latvia	欧州中心
1992年銅スクラップ	
コミュニティを構成する国(貿易量1万トン以上)	備考
USA, Canada, India, Mexico	北米中心
Netherlands, China, Japan, Hong Kong, Korea, Singapore, Sweden, Malaysia, Australia, Finland	アジア・欧州中心
Germany, Italy, Spain, France, Croatia, Austria, Denmark, Switzerland, Hungary, Portugal	欧州中心
Cyprus, Greece, UK	欧州中心
UAE, Oman	アジア中心

以上のように、次数中心性、PageRank といったネットワーク構造上の中心性指標、あるいはそれにリンクの重みも加味した局所中心性・ネットワーク性といった中心性指標でネットワークにおける各国の中心性を評価すると、貿易量による上位国とは異なる結果となることも多い。事実、貿易量で最上位の国が各中心性指標で最上位となっているのは、1992年銅スクラップのアメリカ、2012年廃プラスチックの中国のみである。特に、輸出あるいは輸入に特化している国は構造上の中心性指標が低く評価される傾向にある。

また表 5-7 に示すとおり、クラスタリングの結果からは、備考欄にあるとおり地理的に近い国々でネットワーク構造上のコミュニティが形成されていることが分かる。ただし、欧州中心のコミュニティでも 2012年鉄スクラップではトルコへの輸出を中心としたコミュニティが、1992年銅スクラップではキプロスからの輸出を中心としたコミュニティが形成されるなど、同一地域内でもリンクの張られ方により複数のコミュニティが形成される場合もある。また、各コミュニティで中心性の高い国は、別のコミュニティの中心性の高い国と繋がっており、表 5-6 のリンクのうち概ね半分は表 5-7 の別コミュニティに属する国間のリンクとなっている。すなわち、量的な側面も加味すれば、コミュニティ内で閉じたネットワークであるとは言い難い。なお、モジュラリティの低い品目・年でも以上と概ね同様の傾向にある。

5.2.4 我が国の特徴

我が国の静脈資源貿易は、絶対量では増加し、かつ表 5-4、表 5-5 で示すとおり世界における順位も上昇あるいは横ばいであり、国際資源循環は量的には世界全体でも相対的に高いレベルで進んでいることを示している。一方で中心性指標を見ると、1992 年と比較して 2012 年では各品目で次数中心性の順位を下げっており、貿易量の順位より低い順位となっている。貿易量の大きさを緩和されるとは言え、次数中心性の順位の低さに伴い、局所中心性も貿易量と比較して低い順位となっている。これは、我が国が静脈資源貿易ネットワークにおいて構造的な中心性が低下していることを示している。PageRank についても次数中心性ほどではないが、2012 年で貿易量の順位と比較して相対的に低い順位となっている。ただし、次数中心性より PageRank の順位が高い傾向にあることは、相対的に少ない繋がりの中で、中心性の高い国とは一定程度繋がっていることを示している。

以上のような特徴は、我が国の静脈資源貿易が輸出特化であり、相対的に少ない輸出先となっていること、かつ一部の中心性の高い貿易相手国との貿易量が大宗を占めていることに起因すると解釈できる。そこで、こういったことを評価するために、本研究では一国依存度 R_i を以下のように定義する。

$$R_i = \frac{N_i - N'_i}{N_i} \quad (5-8)$$

ただし、 N'_i : i 国の最大貿易相手国のノードとリンクを除いた場合のネットワーク性である。

一国依存度は、値が 1 に近いほど最大輸出相手国への依存度が高く、逆に負の値を取る場合は最大輸出相手国への依存度が低く、当該相手国を除いたネットワークにおいて中心性が相対的に高まることを示す。ネットワーク性上位国について一国依存度を計算した結果を表 5-8 に示す。

表 5-8 一国依存度

2012年鉄スクラップ			2012年銅スクラップ		
国	相手国	一国依存度	国	相手国	一国依存度
USA	Turkey	0.000	China	USA	0.000
Turkey	USA	0.064	USA	China	0.607
Germany	Netherlands	0.392	Germany	China	-2.621
Netherlands	Germany	0.544	Netherlands	China	-3.329
Korea	USA	0.148	UK	China	-0.348
China	USA	0.110	Japan	China	0.706
UK	Turkey	-0.031	Belgium	China	-3.643
India	USA	-0.359	Korea	China	-0.057
Belgium	France	0.366	France	China	-4.464
France	Germany	0.376	Italy	China	-2.093
Japan(12)	Korea	0.649	—	—	—

表 5-8 より我が国はネットワーク性上位国の中で最大の一国依存度を示しており、この指標からも我が国の静脈資源貿易の特定の国への依存の強さが分かる。

5.3 静脈資源貿易における我が国の社会システムの課題

世界の静脈資源貿易ネットワークにおける我が国の特徴として、最近では貿易量での順位よりもネットワーク構造上の中心性指標の順位が低くなっていることが前章で明らかとなった。これは経済の成熟に伴い輸出に特化し、かつ中国・韓国といった特定の国に輸出先を特化していることに起因する。前章のクラスタリング結果から、世界的に近接地域内で貿易コミュニティが形成される傾向があると同時に、太いリンクは別コミュニティ間でも繋がっていることが示されたが、こういった点も踏まえても、我が国の場合は近隣に輸入特化国が位置していることで、現在のような輸出先を特化したネットワーク構造となっていると考えられる。本章では、このような静脈資源貿易ネットワークにおける我が国の現状を踏まえ、社会システム上の課題について述べる。

まず、ネットワーク全体で密度を高めている中、我が国が相対的に構造上の中心性を低下させていることは、我が国を中心とする貿易ネットワークの代替性が低いことを示している。特に表 5-8 で示すように輸出先を特定の国に特化することは、最大輸出相手国に何らかの状況変化が生じて貿易が止まった場合、大きな影響を受けることになる。静脈資源の場合、経済成熟度次第では相手国内発生資源で輸入代替が進むことや、相手国の環境規制の厳格化により輸入が瞬時に激減する可能性もあり、埋立処分以外にも国内保管や国内産業での受入増等による対応もありうるとは言え、国際資源循環の観点からは特定の国に依存した貿易には一定のリスクが存在する。

我が国の静脈資源貿易はネットワーク構造上から見て代替性が低く、量的な要素も加味すると特定の国への依存度は世界最高と言っても過言ではない。動脈資源の輸入に関しては、フローに対して緩衝的な役割を果たす国家備蓄等の対策が社会システム上確立しているが¹⁴⁾、静脈資源貿易に関してはそのような対策が社会システム上存在しない。このことは、我が国社会システム上のひとつの課題と言える。最終手段として埋立処分が可能となる輸出側で国内保管等の対策を講じることが難しいことを踏まえれば、頑健な構造であることの意味は輸入超過国よりも重要となる可能性がある。近年、災害のリスクに備えるべく企業に BCP (Business Continuity Plan ; 事業継続計画) の策定が求められているが¹⁵⁾、例えば静脈資源貿易についても同様に、国策として貿易継続計画 TCP (Trade Continuity Plan) を策定し、貿易代替国を常時から意識することが解決策のひとつとなろう。

次に、輸出先が変化することへの対応可能性についてであるが、表 5-4、表 5-5 で示すとおり、世界の静脈資源貿易ネットワークの中心はこの 20 年で大きく変化している。我が国に地理的に近い中国が銅スクラップや廃プラスチックの貿易ネットワークの中心となり、

同じく韓国は鉄スクラップの貿易ネットワークで中心性を高めている。現在の我が国の静脈資源貿易は、両国への輸出が大部分であり、近距離の輸出が大宗を占めていることが特徴と言える。

しかしこの 20 年の変化が示すとおり、今後の静脈資源貿易ネットワークの中心が他の国々に変化する可能性は大いにある。例えば中国は経済成長に伴い現在でこそ多くの資源を必要としているが、いずれその成長は鈍化し、また経済の成熟に伴い静脈資源の自国での発生が増加することで輸入代替も進む。雁行型経済発展論¹⁶⁾に基づけば、今後中心性を高めていく国としてはインド、東南アジア等が候補として挙げられ、いずれにしろ我が国にとっては、現在よりも遠距離の貿易となる。国際資源循環が量的に進展し、理念的にも相対的に促進の方向にある中で、遠距離の輸出になることは、静脈資源の性質や社会システム上の位置付けと相まって、二つの理由からこの流れを止める可能性がある。

一点目は、島国である我が国の静脈資源貿易は海上輸送が当然基本となるが、運賃負担力が低いという静脈資源の経済的性質から、輸送コスト次第で輸出が断念される可能性がある。距離の延長は必然的に輸送コストの増加要因となるが、それと相殺させるためには大型船舶での輸送によって規模の経済を働かせる必要がある。根拠例として、図 5-8 にバルク船で各国へ輸出する場合の単位重量当たりの海上輸送費用を示す。図 5-8 は船型毎の平均的な輸送原単位（円/日・隻）¹⁷⁾ と各国の代表的港湾までの距離から算出しており、中国向けに 1,000DWT 船舶で輸送するよりも、インド向け 10,000DWT 船舶で輸送するほうが海上輸送費用は安価となっている。

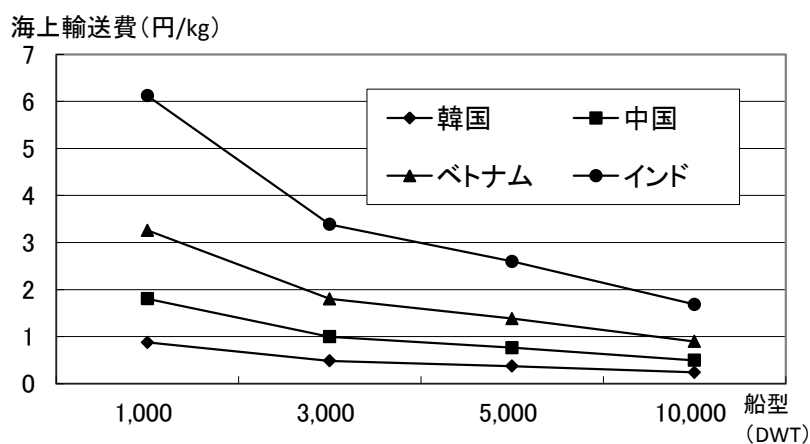


図 5-8 船型と海上輸送費用の関係

現在では輸出先が近距離であるため、我が国の静脈資源貿易に用いられる船舶は 5,000DWT クラス以下が一般的である。このために必要な岸壁は 7.5m であり¹⁸⁾、実際、最も喫水が必要となる金属スクラップの輸出岸壁でも全国平均で 8.5m 程度である¹⁹⁾。しかし、例えばインドへの輸出で最低必要となる 10,000DWT クラス船舶の必要岸壁水深は

9m であり¹⁸⁾、現行の金属スクラップ輸出岸壁のうちこのサイズの船舶に対応できる岸壁は少なくなる¹⁹⁾。遠距離になると航行上の安全性や海賊リスクといった技術的、社会的理由からも相対的に大型な船舶での輸出が必要となることも合わせ、輸出先の変化に伴う船舶の大型化に社会インフラを如何に対応させるかが課題となる。

二点目は、潜在汚染性を有する静脈資源が、逆有償化することでかかる社会システム上の規制により輸出が断念される可能性である。現在、本研究で対象とした静脈資源は有償物として輸出されているが、輸出先が遠距離になることや市場価格の低下により逆有償化する可能性は否定できない。通常、逆有償物の輸出には「廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年法律第 137 号）」（以下、「廃掃法」と呼ぶ。）の規制がかかり、輸出のための手続き、手続き期間中の保管、輸送時の規制等に伴い追加コストが発生し²⁰⁾、一層の逆有償化の原因となる。

静脈資源の資源としての価値は「リサイクル後の価格－リサイクル費用（輸送コスト含む）」であり²¹⁾、これが 0 より大きければ有償物として市場原理の下で取引されるが、0 以下の場合には逆有償物となる。静脈資源は動脈資源とは異なり需要に関係なく発生し、資源として経済的価値のない場合には埋立処分という選択肢が存在する。逆有償化すれば、規制に伴う追加コストが発生するため^{注)}、埋立処分が経済的に優位になる可能性が生じる。しかし、資源生産性向上の観点からは「リサイクル後の価格－リサイクル費用」が仮にマイナスでも、その絶対値が埋立費用よりも小さければ輸出してでもリサイクルされる方が経済的に有利となるべきである。輸出側にとっての輸出コストを含む「リサイクル後の価格－リサイクル費用」は CIF 価格（Cost, Insurance and Freight；輸入港で荷揚げするまでの海上輸送費用等を含むもの）であるが、静脈資源の輸出業者へのヒアリングによると FOB 価格（Free on Board；輸出港での積み込み費用までしか含まないもの）でマイナスとなった段階で、原則として先述した廃掃法の規制対象となり、追加コストの発生が輸出のハードルは高くなる。

このように、規制に伴う追加コストが国際資源循環を後退させる可能性を有しているという社会システム上の課題がある。この点に関しては、表 5-7 のとおり、運賃負担力の低い静脈資源でも遠距離貿易が成立していることを踏まえると、例えば FOB 価格がマイナスとなる輸出であっても、CIF 価格がプラスである限り、ひいては環境保全上の効果を含めてプラスである限り、規制の対象外とするような社会システムに変更することで、追加費用が発生せず、効果的な国際資源循環の促進に繋がる可能性はある。

5.4 まとめ

本章では、1992 年と 2012 年の静脈資源貿易ネットワークについて、社会ネットワーク分析により構造上の特徴となる指標や中心性指標を計測し、その変化について検証した。具体的には、次数中心性、PageRank、局所中心性、ネットワーク性といった指標で貿易量

だけでは把握できないネットワーク構造上で中心性の高い国を、ネットワーク距離により国間の繋がりを加味した重要リンクを抽出し、ネットワークの特徴とその変化について分析した。その結果、この20年でネットワーク構造や中心性の高い国が変化しており、銅スクラップや廃プラスチックの貿易ネットワークでは中国が台頭していること、アメリカ、ドイツ、オランダ等の先進国については世界的に見ても相対的に高いレベルで国際資源循環を続けていることが明らかとなった。

我が国については、貿易量から見れば世界において相対的に高いレベルで国際資源循環が進展している一方で、ネットワーク構造的にはこの20年で中心性を低下させ、かつ相対的に見ても近距離の輸入特化国に大きく依存した貿易ネットワークを有していることが明らかとなった。これを踏まえて、国際資源循環の観点から、ネットワーク上の代替性の低さと輸出相手国の変化への対応可能性について社会システム上の課題を挙げた。

本章の結果は、輸出先の代替性の低さ、輸出先の変更への対応という課題を示しているが、これらの課題は静脈物流システムにおけるアウトプットの不確実性への対応に関わるものである。すなわち、これらの課題を解決しうる、輸出先が多角化し、さらに輸出先の変化への対応柔軟な対応を可能とする国際静脈物流システムが必要となる。このためには社会システムによる担保も必要となる可能性が高い。

ただし、国際資源循環の進展度合いについては、各国の経済成長や工業化路線の程度から見た今後の需要見込み、経済成熟度から見た当該国内からの静脈資源の供給増、リサイクル技術の進展などが複雑に絡み合う上、静脈資源故に埋立処分という選択肢もあるため、今後の動向の予測は動脈資源以上に困難だと思われる。したがって、いかなる状況にも対応できるようなオプションを用意することが重要となる。さらに、現時点では我が国も環境面や資源面に配慮しながら国際資源循環を促進するスタンスを取っているが、将来的にどのような社会シナリオを目指すかによって我が国の国際資源循環の動向も大きく変動する可能性もある。確固たる将来の社会シナリオと、それに対応する、インフラを含めた社会システムの構築が求められている。

付録

注) 法律上の廃棄物であれば規制の対象になるが、廃棄物か否かは総合判断説によることとされており、かつ価格が0となる場合については統一した解釈はないため、ここでは便宜的にこのような表現としている。

第5章参考文献

- 1) 尹鍾進: 静脈物流の現状分析に基づいた静脈物流の効率化方案に関する研究, 土木学会論文集 G, 63(4), pp.332-344, 2007.
- 2) 寺園淳: 循環資源の越境移動の実態と中古家電・金属スクラップの事例にみる適正管理方策, 新世代法政策学研究, 9, pp.77-104, 2010.
- 3) 橋徹: 循環資源貿易構造と各国の循環型社会形成－鉄スクラップ貿易構造から見た循環資源貿易の課題－, ソシオサイエンス, 18, pp.65-80, 2012.
- 4) Lee H: The structure of the international air network through the social network analysis, Journal of Geography, 117(6), pp.985-996, 2008.
- 5) Kharrazi A, Rovenskaya E, Fath B D, Yarime M, Kraines S: Quantifying the sustainability of economic resource network: An ecological information-based approach, Ecological Economics, 90, pp.177-186, 2013.
- 6) 安田雪: 社会ネットワーク分析: その理論的背景と尺度, 行動計量学, 21(2), pp.32-39, 1994.
- 7) 金光淳: 社会ネットワーク分析の基礎－社会的関係資本論にむけて－, 勁草書房, 2003.
- 8) Lloyd's List Intelligence website: <http://www.lloydslistintelligence.com/llint/index.htm>.
- 9) 小坂浩之, 布施正暁, 鹿島茂: 貿易統計の不整合問題－既往研究の整理と数量データを用いた調整－, 運輸政策研究, 15(2), pp.20-31, 2012.
- 10) Kaluza P, Kölzsch A, Gastner MT, Blasius B: The complex network of global cargo ship movements, Journal of the Royal Society Interface 7, pp.1093-1103, 2010.
- 11) 日本内航海運組合総連合会基本政策推進小委員会: 循環資源の海上輸送実績報告(平成 25 年度実績), 2014.
- 12) Page L, Sergey B, Rajeev M, Terry A: The PageRank citation ranking: Bringing order to the Web, Technical Report, Stanford InfoLab, 1999.
- 13) 小島道一・吉田綾: 再生資源・中古品貿易の中継地としての香港, 「アジアにおける循環資源貿易」第 4 章, 2005.
- 14) 経済産業省資源エネルギー庁: 平成 25 年度エネルギーに関する年次報告, 2014.
- 15) 内閣府: 事業継続ガイドライン－あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応－(平成 25 年 8 月改訂), 2013.
- 16) 小島清: 雁行型経済発展論・再検討, 駿河台経済論集, 9(2), pp.75-136, 2000.
- 17) 港湾事業評価手法に関する研究委員会編: 港湾投資の評価に関する解説書, 2004.
- 18) 高橋宏直・後藤文子・安部智久: 統計解析による船舶諸元に関する研究－船舶の主要諸元の計画基準(案)－, 国土技術政策総合研究所報告, 2006.
- 19) 日刊市況通信社: 鉄スクラップ関連資料集(2006 年版)
- 20) 小島道一: アジアにおける資源循環貿易－現状と課題, 「アジアにおける資源循環貿易」第 1 章, アジア経済研究所, 2005.
- 21) 細田衛士: グッズとバズズの経済学, 東洋経済新報, 1999

第 6 章 静脈物流ネットワークの強靱性評価と国際静脈物流システムへの適用

6.1 はじめに

第 1 章，第 2 章で述べたとおり，Reverse logistics の実行要因は経済的，環境的，社会的ニーズであるが¹⁾，先行研究ではその経済的側面すなわち効率性が重視されてきた。

現在でも望ましい静脈物流ネットワークシステムの構築は，実務的及び社会的ニーズから要請されており，どのような静脈物流ネットワークを構築するかについては，通常何らかの評価軸に基づいて複数案が比較され，最も評価の高いものが選択される．あるいは評価軸を指標化しそれを最大化するネットワーク構造等を探索する最適化が行われる．定性的に複数の評価軸から総合的に評価する場合もあるが²⁾，定量的な評価においてはほとんどの場合評価軸はひとつとなる³⁾．総合評価体系の確立には依然として時間を有することが予想されるが，それを目指す過程では様々な評価軸のオプションが必要であることは言うまでもない。

静脈物流に限らず，物流のようにネットワーク化されることによって機能を発揮する経済活動は，ノード，リンク，ネットワークそのもののいずれも評価対象となる．そのため，港湾や空港といったノードや道路といったリンクの整備効果（例えば城所⁴⁾など）や車両巡回問題のようなリンクへの効率的なフローの流し方，施設配置割当問題のようなネットワーク構造の最適化，ネットワークシステム導入による効果の計測などの研究が行われてきた⁵⁾．そして評価軸としては，経済性が最も代表的なものとなる．例えば，港湾や空港といったノードの整備の是非や代替案の比較には費用便益分析が一般的に用いられ⁶⁾，⁷⁾，静脈物流に限らず物流ネットワーク構造における施設配置問題に関しては費用最小化または利益最大化を目的としているものが大部分であり⁸⁾，⁹⁾，いわば経済的な効率性が追求されてきたと言える．環境指標等を評価軸とする場合もあるが，経済性を無視してまで優先されるほど市民権を得ているとは言い難く，効率性を追求する点でも経済性を評価軸とする場合と基本構造は変わらない。

ここにはいくつかの問題がある．ひとつは，過度に効率性を追求することが本当に望ましいかということである．すなわち，これまで主流であった経済性あるいは効率性を追求する評価軸とは異なる評価軸の必要性である．また，これまで静脈物流ネットワークのミクロな観点からの評価方法については問題意識が持たれてきたが，ネットワークの状態をマクロに定量化して評価することには注意が払われていない．さらに，静脈物流に関しては，動脈物流とは異なる特性を踏まえる必要があること，あるいは静脈物流の特性を踏まえた上で Closed-loop supply chain の最適化を考える必要がある．以上の問題意識に基づき，

静脈物流の特徴を踏まえた上で、効率性追求とは異なる評価軸を用いて静脈物流ネットワーク全体の評価を試みる。

災害時に物流機能が停止すれば、国民生活あるいは経済活動が多大な影響を受ける。東日本大震災では物流ネットワークのノードもリンクも被災したことで、被災地への物流が多く途絶し、また被災地を物流ネットワークの一部としていた物流も甚大な影響を受けている。一方で、代替ルートの重要性が注目される契機にもなった。すなわち、代替ルートを持つ強靱なネットワーク構造の必要性が認識されるようになった。物流ネットワークにとって、一部の構成要素が機能を失っても、ネットワーク全体として機能を維持することは非常に重要な持つべき性質である。静脈物流ネットワークであれば、ネットワークが機能を果たし続けなければ、廃棄物で溢れる可能性や、静脈資源を原材料とする産業の活動を停止させる可能性もある。

そこで本章では、有効になるべき評価軸でありながら、これまで定量的に評価されてこなかった静脈物流ネットワーク全体のレジリエンス（強靱性）について議論する。第 5 章で現状の我が国の静脈資源貿易ネットワークの代替性の低さを明らかにしたとおり、ネットワーク構造の強靱性は我が国静脈物流システムにとって非常に重要な評価軸としていかなければならないという背景もある。研究萌芽期¹⁰⁾以降多くの先行研究で述べられているように、静脈物流は単に動脈物流の逆向きの流れではない。ロットの小さい疎から密への流れであることに加え、途中で保管や選別・処理といった過程も必要となる。そして最大の特徴が、量、質、タイミングに関する不確実性である^{5)、11)}。すなわち、静脈物流ネットワークの強靱性を評価する際には、ロットの小さい疎から密への流れという特徴と静脈物流故の不確実性が重要な要素となる。

以下、第 2 節では先行研究の整理と本研究の位置付けを述べる。第 3 節では本研究のアプローチについて整理した上で、経済モデルとそのモデルを基にしたシミュレーション結果から強靱な静脈物流ネットワークの形成可能性について動脈物流ネットワークと比較しながら検討する。第 4 節では強靱性を制約条件とした混合整数計画モデルのシミュレーションを行い、効率的に強靱な静脈物流ネットワークを構築する方法について検討する。第 5 節では第 4 節までの結果を国際静脈物流ネットワークへ適用し、望ましいあり方を検証する。第 6 節は本章のまとめである。

6.2 先行研究の整理と本研究の位置づけ

東日本大震災以降、我が国ではレジリエンスという言葉が注目を浴びているが、藤井ら¹²⁾によると、レジリエンスとは柳の木のような「しなやかさ」を意味するものであり、社会を一個の有機体と見なした上で、どのような危機が訪れようとも、致命傷を避け（致命傷回避）、可能な限り被害を最小化し（減災＝被害最小化）、被った被害の可能な限り早期に回復できる（回復迅速性）ことである。Norris et al.¹³⁾は Robustness, Redundancy,

Rapidity がストレス要因に対して反作用するときレジリエンスが起こるとしているとおおり、レジリエンスが高いとは、頑健性、代替性、迅速性の 3 つを有していることを意味する。ただし、別の表現であってもレジリエンスと同じ意図の、あるいは類似の概念をテーマとした先行研究もあり、サステナビリティや柔軟性といった言葉がそれに該当すると考えられる。

静脈物流に関しては、強靱性やその一要素である頑健性をテーマとした先行研究は筆者の知る限り存在しないが、外的な要因への対応という点では、不確実性の取扱いについて多くの研究蓄積がある。シミュレーション、確率論的プログラミング、ロバスト最適化、感度分析、シナリオ分析が一般的なアプローチとなるが、依然として重要な研究課題とされている⁵⁾。さらに、より強靱性に近い概念として **Bai and Sarkis¹¹⁾** は静脈物流システムの柔軟性について定性的に論じ、フレームワークを提示している。柔軟性とは「ある状態から他の状態へ変化することへのシステムの性能と容易さ(幅と反応)」と定義されるとし、幅の柔軟性とはシステムが活動できる状態や性能を指すとしている。反応の柔軟性とは他の状態へ変化できる容易さを指し、通常は時間やコストで表現されるとしている。

本研究に関係が深いという点では、大窪ら¹⁴⁾ が小型家電リサイクル制度における不確実な回収量に対する頑健な回収システムの構築を目的として、中間処理業者の利潤を確保するためにロバスト最適化手法を適用している。具体的には、**budget of uncertainty** と呼ばれるパラメータを用いて不確実性の範囲を定め、それに応じて算出したシナリオを与件として最適化を行う枠組みを活用している。回収量の想定の変化が中間処理業者の利潤やリスク分析の指標である **value at risk** に与える影響として、回収量を少なく想定することで平均的な利潤を大きくできることなどを明らかにしている。このように「頑健」という言葉をこそ使われているが、こういったアプローチは不確実性や在庫管理をテーマとする先行研究において多く採られている方法であり、システムの機能自体の頑健性を扱っている訳ではない。すなわち、頑健性の定義の問題であり、本研究が目指すネットワーク全体として機能を維持するという意味での強靱性とは異なっている。物流ネットワークの強靱性という点では、**Bai and Sarkis¹¹⁾** が静脈物流に関する類似テーマでの先行研究が存在せず、動脈物流の研究を参考にしているように、物流ネットワークの強靱性に関しても、動脈物流あるいはサプライチェーンネットワークの強靱性を取扱った先行研究が参考になる。

Meepetchdee and Shah¹⁵⁾ は、長期的視点では便益をもたらすにも関わらず物流ネットワーク設計の既往研究には頑健性の概念は登場せず、目的関数はいずれも効率性として表現できると指摘している。その上で、頑健性を「障害にも関わらずシステムがその機能を発揮できる範囲」として定義し、頑健性と複雑性を考慮した物流ネットワーク設計手法を提案している。具体的には、頑健性指標を制約条件とする混合整数線形計画モデルを構築し、得られたネットワーク構造を効率性指標と複雑性指標で評価するとともに、グラフ理論の立場からの解釈も加えている。**Meepetchdee and Shah¹⁵⁾** ではひとつの工場から倉庫を通じて消費者に製品を配送する仮想の物流ネットワークを想定して、一定値の以上の頑

健性指標となることを制約としながら、倉庫の数、位置を変数として費用最小化を目的とする最適化を行っている。頑健性指標としては、ネットワークのあるノード j が機能を失ったときにネットワークが達成できる需要と全体需要の比 β_j (最大 1) のうち最悪となる β_{worst} を用いている。頑健性指標を向上させるためには代替リンクを増加させる必要がある。効率性指標としては最も効率的なネットワーク構造の場合の物流費用と当該ネットワークの物流費用の比 (最大 1) で表現し、複雑性指標は実際のネットワークのリンク数と最小リンク数の比 (最小 1) で表現している。求められる頑健性指標を変動させた各シナリオの計算結果から、原則として頑健性が増加する場合、効率性は減少し、複雑性が増加することを明らかにしているが、ノードやリンクを増やすことなく、すなわち複雑性を増やすことなく形状的に頑健性を増やせることも示している。さらに、輸送費用に規模の経済を加味することで、複雑性を増やすことなく頑健性と効率性を増やせることを示している。また、グラフ理論的アプローチからは、頑健な物流ネットワークにおけるスケールフリー性の確認と、頑健性とクラスタリング係数の相関関係の確認を行っているが、高いクラスタリング係数は高い頑健性の十分条件であって必要条件ではないとしている。なお、求められるネットワークの頑健性レベルには絶対的なものではなく、ネットワークの管理者の判断によるべきものとされている。

ネットワーク全体の強靱性を評価する先行研究としては早い段階では Albert et al.¹⁶⁾ が挙げられる。Albert et al.¹⁶⁾ は、2 つのノード間の平均最短距離として定義されるネットワークの直径がノードの除去によりどれだけ変化するかを指標として頑健性を評価している。その結果、スケールフリーネットワークはランダムな障害に対しては高い頑健性を示すが、ハブへの攻撃に対しては脆弱であることを明らかにしている。他の指標として、Xuan et al.¹⁷⁾ がサプライネットワークの頑健性評価に用いたノードが除去された際の残るノードの平均次数の変化、Liu et al.¹⁸⁾ が製造システムの頑健性評価に用いたクラスタリング係数と平均最短経路が挙げられる。すなわち、こういった先行研究は、ノード障害時のスケールフリー性¹⁹⁾ とスモールワールド性²⁰⁾ を頑健性の指標としていることになる。

実際、鬼頭²¹⁾ は既往研究を参考にしながら、スケールフリー性、スモールワールド性、階層構造の頑健性指標の 3 つの指標を用いて自動車部品供給ネットワークの頑健性を評価している。フリースケール性を有するネットワークは次数の低いノードの機能が停止しても大多数のノードは連結性を保ちネットワーク全体として機能を保持できるため、この有無をノードの次数分布が冪乗則に従うか否かで検証している。スモールワールド性を有するネットワークはノード間のリンクである程度のリワイヤリングがなされても機能的な構造機能を保持しうるため、この有無を実際のネットワークがノード数とリンク数を固定してリンクをランダムに張り替えたネットワークと比較して短い平均最短経路長と大きいクラスタリング係数を持つか否かで検証している。さらに既往研究より上層ほど同層のノード間を繋ぐリンクが多く密な構造であるマルチスケールネットワークが高い頑健性を持つことが報告されていることから、階層構造の頑健性指標として、マルチスケールネット

ワークであるか否かを検証している。

ノードの除去方法に関連しては、池田²²⁾がネットワークからあるノードが取り除かれた際に、その影響で別のノードの生産活動が遮断され機能停止に陥ることを連鎖破壊とし、大きな一連の連鎖破壊を引き起こすノードがサプライネットワーク全体を脆弱にしている企業であるという観点からネットワークの頑健性における重要ノードの検証を行っている。媒介中心性の高い順、次数中心性の高い順、ランダムにノードを消失させるシミュレーション結果から、ネットワークの頑健性及び脆弱性における、媒介中心性の高いノードの重要性を示している。一方でランダムな破壊シミュレーションの分析結果から、媒介中心性の低いノードの消失でも、媒介中心性の高いノードとの繋がり次第では大規模破壊を引き起こすケースもあり、この点もネットワークへの影響度の大きさを評価する際に重要なことを指摘している。

より一般的には、Iyer et al.²³⁾が次数、媒介、近接、固有ベクトル中心性の高いノードが同時又は順番に攻撃された場合の頑健性に複数のネットワークを用いて検証している。頑健性の指標としては、ノード除去後のネットワークにおける最大要素のノード数と初期ネットワークのノード数との比を用いている。結果として、同時攻撃に対しては、次数中心性の高いノードへの攻撃が最も脆弱であるが、特定のネットワークに対しては媒介中心性の高いノードへの攻撃に脆弱であることを示している。一方で連続攻撃に対しては傾向が異なり、媒介中心性の高いノードへの攻撃に対して脆弱であり、近接中心性についてもそれに近い結果となっている。

効率性の過度な追求に警鐘を鳴らす先行研究として、Kharrazi et al.²⁴⁾はエコロジカル情報論的アプローチにより、経済的資源ネットワークのサステナビリティの定量化を行っている。Kharrazi et al.²⁴⁾は既往研究がシステムの効率性を高めることにのみ焦点を当て、過度な効率性の増加による負の影響を考慮していないとし、効率性の過度な増加がシステムの頑健性をどのように減少させるかについて検証している。

エコロジカル情報論的アプローチでは、情報の存在と不存在の比率が重要な役割を果たすシャノン多様度指数が用いられる。この指数はシステム全体の不確定性を表し、 $H=X+\phi$ で表される。 X はフロー T を観察することで解決される不確定性、 ϕ はフロー T 観察後に残る不確定性である。ネットワーク化されたシステムでは、これらの変数は k を定数として以下のように定義される。

$$H = -k \sum_{i,j} \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log \frac{T_{ij}}{T_{..}} \quad (6-1)$$

$$X = k \sum_{i,j} \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}} \quad (6-2)$$

$$\psi = -k \sum_{i,j} \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log \frac{T_{ij}^2}{T_{i.} T_{.j}} \quad (6-3)$$

なお、 $T_{..}$ はシステムの大きさの指標である TST (Total System Throughput) であり、以下のように定義される。

$$T_{..} = \sum_{i,j} T_{ij} \quad (6-4)$$

変数 X は平均相互情報量 AMI (Average Mutual Information) として知られ、全てのフローに対するネットワークにおける平均の拘束程度を示す指標である。 ϕ は全てのフローに対するネットワークにおける平均の自由度を示す指標である。

システムの成長や発展に対する能力を表すのが、加重システムレベル不確定性 C であり、次のように表される。

$$C = T_{..} \cdot H \quad (6-5)$$

C は全システム不確定性の上限値となり、これが高いネットワークはその構造を変化させるポテンシャルを有していると考えられる。別の表現では $C=A+\phi$ とも表され、 A はシステムの効率性であり、ノードの中で効率的にフローを流せる程度を示している。効率性は以下のとおり定義される。

$$A = T_{..} \cdot X \quad (6-6)$$

ϕ はシステムの代替性であり、混乱やネットワークへのショックに打ち勝つために維持している柔軟性を示し、以下のとおり定義される。

$$\phi = T_{..} \cdot \psi \quad (6-7)$$

その上で、効率性と代替性の間のバランスとしての頑健性を捉え、 $\alpha=A/C$ として以下の頑健性指標を用いている。

$$R = -\alpha \log(\alpha) \quad (6-8)$$

Kharrazi et al.²⁴⁾ はこれらの指標を用いて自然界のネットワークと分析対象となった経済資源ネットワークと比較し、後者の頑健性が低く、その理由を代替性の高さだとしている。一方で、貿易ネットワークのようなある設計者により意図的に作られたネットワーク構造と違い、都市水道ネットワークのような公的セクターにより設計されたネットワーク構造では効率性が高いことも指摘している。特に後者のような場合は、エコロジカル情報論的アプローチはネットワーク構造を修正する政策立案に大きく寄与するとしている。静脈物流ネットワークは後者に該当すると考えられ、過度な効率性の追求が頑健性を低下させているという Kharrazi et al.²⁴⁾ の問題意識に合致する対象であると言える。

静脈物流が有する不確実性を考慮したネットワーク全体の頑健性評価に示唆を与える先行研究としては、複雑ネットワークの動的頑健性における低次数ノードの重要性について検証している Tanaka et al.²⁵⁾ が挙げられる。Tanaka et al.²⁵⁾ は、振動子間の相互作用として拡散効果を仮定した振動子モデルで構成されるスケールフリーネットワークを対象としている。振動が維持される最大の故障率を頑健性の指標として動的頑健性に寄与するノードについて分析し、低次数ノードの故障に対する脆弱性を明らかにしているが、これは低次数ノードは小数の近隣ノードからしか影響を受けないことで高次数ノードと比較して相対的に高い動的活動性を維持できるためであるとしている。構造的頑健性におけるハブの重要性と相反するこの結論は非常に興味深い。この結論を適用できる事例のひとつとして Tanaka et al.²⁵⁾ は再生可能エネルギーを含む電力ネットワークを挙げているが、供給量の変動する点では静脈物流ネットワークへの適用の可能性も十分に想定される。

このように、サプライチェーン等の動脈ネットワークのマクロな強靱性評価についてはいくつかの先行研究が存在するとはいえ依然発展途上であり、静脈物流ネットワークに至っては筆者の知る限り先行研究は存在しない。そこで本研究では動脈ネットワークと静脈物流ネットワークの違いを踏まえつつ、ネットワーク全体を俯瞰するマクロな視点での強靱性について検証する。したがって本研究の特徴は、不確実性等の特徴を視野に入れた静脈物流ネットワークを対象としている点にあると言える。

6.3 静脈物流の特徴と強靱なネットワークの形成可能性

6.3.1 本研究のアプローチ

前節で先行研究を整理したが、ネットワーク自体の強靱性評価については、大きく分けて以下のようなアプローチがある。ただし、本研究では強靱性の概念に含まれる頑健性や代替性も含めて強靱性と呼ぶ。

- ① ネットワーク構造の強靱性は、スケールフリー性、スモールワールド性、マルチスケールネットワークであるか否かで評価することが一般的。これらの性質の確認には、次数分布、平均経路距離、クラスター係数が指標として用いられる。Shutters and Muneeppeerakul²⁶⁾ のようにノード除去時にもとの構造と構造的な類似性を維持できるか否かで強靱性を評価する方法もある。強靱性に関する重要ノードは、どのノードを除去した場合にスケールフリー性等の性質を失うかで評価する方法が一般的。順番に除去する場合、媒介中心性の高いノードあるいはそれに隣接したノードがネットワークの強靱性の維持に重要な役割を果たすが、同時に除去する場合は次数中心性の高いノードが重要な場合が多い。
- ② ネットワークに流れるフロー量を設定すれば、ネットワーク全体のパフォーマンスを指標化し、それにより強靱性を評価することが可能。例えば、物流ネットワークにおいてノード（倉庫）障害時の消費ゾーンにおける需要達成割合を指標とした Meepetchdee

and Shah¹⁵⁾ や効率性と代替性のバランスとしての強靱性指標を提案した Kharrazi et al.²⁴⁾ がある。こういった指標は、強靱であるか否かの絶対的な評価よりも、相対的な比較やネットワーク設計者の目標として用いられるべきものとなる。

このように、ネットワークの強靱性の評価方法については一定の研究蓄積があることから、静脈物流ネットワークの特性を踏まえた動脈物流ネットワークの強靱性との違いや強靱な静脈物流ネットワークの構築方法について提案し、先行研究で示された強靱性指標により評価を行うアプローチが効果的であると考えられる。①を踏まえると、特にハブを有する構造であることが、一般的にはネットワーク全体として強靱な構造であることを示すと同時に、ハブの機能停止をいかに防ぐかが大きな鍵となると言える。

まず、物流は経済活動であるという性質上、多くの先行研究で議論されてきたとおり経済効率性が求められる。すなわち物流ネットワークの強靱性評価においては、いかに経済的・効率的に強靱性を高められるか、あるいは効率性と強靱性のトレードオフが重要となる。

こういったことを踏まえると、静脈物流ネットワークの強靱性の評価においては、強靱性を制約条件に加えたネットワークの最適化モデルを提案している Meepetchdee and Shah¹⁵⁾ や、効率性と代替性の間のバランスとしての強靱性指標によりネットワーク全体を評価している Kharrazi et al.²⁴⁾ が参考になる。特に Meepetchdee and Shah¹⁵⁾ は原則として強靱性が増加する場合、効率性は減少し、複雑性が増加することを明らかにしているが、輸送費用に規模の経済を加味することで、複雑性を増やすことなく強靱性と効率性を増やせることを示している。すなわち、規模の経済によりハブが形成され、効率化を追求することで強靱性も高められるという有益な結果を示している。しかし、これらの先行研究の方法では、ネットワーク構造が同一であれば、フローの向きの違いは評価されない。すなわち、既存の方法では静脈物流ネットワークの強靱性は動脈のそれと同等に評価される。

この課題を解決するためには、静脈物流ネットワークの特性を明示的にモデル等に組み込む必要がある。具体的には、量・質・タイミングの不確実性、それに伴う小さな輸送ロット、さらに特に環境規制の厳格な我が国で考慮する必要がある輸送対象貨物の潜在汚染性に起因する割高な輸送コストである。こういった特性を考慮した静脈物流ネットワークが、動脈物流ネットワークと比較してハブが形成されやすいか否かという点から、静脈物流ネットワークの強靱性が評価可能と考えられる。

6.3.2 経済モデル

ハブの形成可能性については、Mori²⁷⁾ が以下のような簡略化したフレームワークの中で経済モデルを示している。すなわち、各地点で輸送需要を持つ $[0, F]$ からなる一次元の位置空間 X において、全ての需要が 0 に位置するゲートウェイに向かうというフレームワークである。輸送レート td の伝統的輸送モードと輸送レート $\tau(d, Q)$ の一括大量輸送モードを想定し、ハブが形成されればハブからゲートウェイまでは一括大量輸送モードで輸送されるものとして、距離の経済と密度の経済の条件下でのハブ形成可能性について分析している。

ただし、 t は伝統的輸送技術（輸送原単位）、 τ ：一括大量輸送技術、 d は距離、 Q は密度である。このモデルの概要は以下のとおりである。

輸送距離に関して、 $d > d' > 0$ のとき、輸送技術は以下の特性を持つ。

$$\tau(d, Q) > \tau(d', Q) > 0 \quad (6-9)$$

$$\tau(d, Q)/d < \tau(d', Q)/d' \quad (6-10)$$

輸送密度に関して、 $Q > Q' > 0$ のとき以下の特性を持つ。

$$Q' \tau(d, Q') \leq Q \tau(d, Q) \quad (6-11)$$

$$\tau(d, Q') > \tau(d, Q) \quad (6-12)$$

大量一括輸送技術 τ は以下の条件を満足すると仮定する。

$$\lim_{Q \rightarrow 0} \tau(d, Q) > td \quad (6-13)$$

$$\lim_{Q \rightarrow \infty} \tau(d, Q) \in [0, td) \quad (6-14)$$

$$\lim_{d \rightarrow 0} \tau(d, Q) \in (0, \infty) \quad (6-15)$$

(6-13)は密度がゼロに近づけば大量一括輸送モードより伝統的輸送モードの方が効率的であること、(6-14)は十分に大きな密度となったときはその逆であるということ、(6-15)は距離がゼロに近づけば大量一括輸送モードより伝統的輸送モードの方が効率的であることを意味する。

今、輸送需要の分布が一様に $v > 0$ であり、ある位置 h からゲートウェイまで幹線が形成される可能性をハブ形成可能性とし、以下の定義を与えている。

定義 ハブ形成可能性

以下のとき、位置 $h \in X$ にハブが形成可能となる。

$$\tau^*(h; F, v) \equiv \tau(h, v[F - h]) \leq th \quad (6-16)$$

(6-16)の下では、ハブの背後地となる均衡境界 $b \in (0, h)$ が唯一存在する。すなわち、 $[b, F]$ の旅客はハブを経由し、 $(0, b)$ の旅客は伝統的輸送モードで直接ゲートウェイに向かう。ただし、この定義によるある位置でのハブ形成可能性は均衡においてこの位置にハブが形成される必要条件であって十分条件ではない。均衡背後地 $(b, F]$ を考慮することで必要十分条件になる。

ここで、距離と密度の経済を理解するために、一括大量輸送費用関数を簡単に次のように与えている。

$$\tau(d, Q) = \frac{\phi + \rho d}{Q} \quad (6-17)$$

ただし、 ϕ/Q は固定費用を、 ρ/Q は限界費用を表す。相対的に大きな ϕ は大きな距離の経済を意味する。ゲートウェイ、境界 F 、内側の h において τ^* は以下の値を取る。

$$\tau^*(0) = \frac{\phi}{\nu F} > 0 \quad (6-18)$$

$$\tau^*(F) = \lim_{h \rightarrow F} \tau^*(h) = \infty \quad (6-19)$$

$$\tau^*(h) = \frac{\phi + \rho h}{\nu[F - h]} \quad (6-20)$$

以下より、 τ^* は単調増加かつ凸関数である。

$$\frac{\partial \tau^*(h)}{\partial h} = \frac{1}{\nu} \left[\frac{\rho}{F - h} + \frac{\phi + \rho h}{(F - h)^2} \right] > 0 \quad (6-21)$$

$$\frac{\partial^2 \tau^*(h)}{\partial h^2} = \frac{2(\phi + \rho h)^2}{\nu(F - h)^3} > 0 \quad (6-22)$$

これらを踏まえると、 $\tau^*(h) = th$ と $\partial \tau^*(h) / \partial h = t$ を同時に解くことで、ハブが形成される F と h の閾値あるいは ν と h の閾値が以下のとおり唯一定まる。

$$\tilde{F} = 2\sqrt{\frac{f}{\nu}} + \frac{r}{\nu} \quad (6-23)$$

$$\tilde{h} = \sqrt{\frac{f}{\nu}} \quad (6-24)$$

$$\hat{\nu} = \frac{2f + 2\sqrt{f}\sqrt{f + Fr} + Fr}{F^2} \quad (6-25)$$

$$\hat{h} = \sqrt{\frac{f}{\hat{\nu}}} \quad (6-26)$$

ただし、 $f \equiv \phi/t$ 、 $r \equiv \rho/t$ であり、それぞれ伝統的輸送技術に対する大量一括輸送技術の固定費用と限界費用の比率を表す。 f が r よりも相対的に大きいとき、より大きな距離の経済が働くことを意味する。固定費用 f が大きくなれば距離の経済を発揮させるためにはハブの位置はゲートウェイから離れる。逆に密度 ν が大きい場合ハブの位置はゲートウェイに近づく。このように、ハブの位置は距離と密度の経済のバランスの中で決定される。

Mori²⁵⁾ はさらにハブの階層についても検討を加えている。まず、空間規模が大きくなるにつれ形成されるハブの数が増し、かつ隣接するハブに連結する各駅停車型の階層的ハブシステムを分析している。

階層的なハブ構造になるかどうかは、一括大量輸送のためには固定費用に依存するため、ハブからゲートウェイまでの一括大量輸送の相対費用を以下のように定義する。

$$\Delta^* \tau(F) \equiv \frac{\phi + \rho n \tilde{h}}{|H_n|} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{\phi + \rho \tilde{h}}{|H_i|} \quad (6-27)$$

ハブ n からゲートウェイへの輸送に関し、分子はハブからゲートウェイまで直行する場合の潜在輸送原単位を、分母は隣のハブと連結する場合の輸送原単位を表す。式(6-27)より、以下が導かれる。

$$\Delta^* \tau(F) < \frac{1/n + \rho\sqrt{1/\phi v}}{1 + \rho\sqrt{1/\phi v}} \frac{|H_1|}{|H_n|} \quad (6-28)$$

$$\lim_{F \rightarrow \infty} \Delta^* \tau(F) = \frac{1/n + \rho\sqrt{1/\phi v}}{1 + \rho\sqrt{1/\phi v}} < 1 \quad (6-29)$$

式 (6-29) は、 F が大きくなるにつれハブの階層が深くなる時、やがてはハブ $n-1$ に向かうよりゲートウェイに直接向かった方が経済的となることを示している。距離の経済より密度の経済が強く働くとき、通常は大量一括輸送による費用削減効果が相対的に大きく、需要を集約する、すなわちハブを多層にすることで費用削減が図られる。しかし、空間的に十分に大きな経済の場合、距離と密度の経済がどのようなレベルであっても、ハブの階層には限界があることを意味している。

もうひとつは、距離の経済が支配的な場合に形成されるハブアンドスポーク型ハブシステムである。先と同様にゲートウェイに向かう場合と隣接するハブに連結する場合の相対費用を以下のように定義する。

$$\Delta^{**}T(h_n) \equiv \left[\frac{\phi + \rho h_{n-1}}{D_{n-1} + D_n} + \frac{\phi + \rho(h_n - h_{n-1})}{D_n} \right] - \frac{\phi + \rho h_n}{D_n} \quad (6-30)$$

括弧内はハブ n とハブ $n-1$ の需要がハブ $n-1$ で集約された場合の費用原単位、残りはハブ n からゲートウェイに直行した場合の費用原単位を表す。ここでも以下が導かれる。

$$\Delta^{**}T(h_n) \equiv \left[\frac{\phi + \rho h_{n-1}}{D_{n-1} + D_n} + \frac{\phi + \rho(h_n - h_{n-1})}{D_n} \right] - \frac{\phi + \rho h_n}{D_n} \quad (6-31)$$

$$\lim_{h_{n-1} \rightarrow \infty} \Delta^{**}T(h_n) < 0 \quad (6-32)$$

距離の経済が密度の経済よりも強く働くとき、ハブ同士の需要を集約することは相対的に小さな効果となり、高い階層のハブは形成されにくい。しかし、式 (6-32) は、ハブがゲートウェイから離れると、集約に係る追加コストよりも距離の経済の効果が凌駕することを示している。すなわち、経済が空間的に広がる場合、ハブの階層は深くなる。

以上のように、密度の経済が距離の経済を凌駕するとき、ハブの階層は深くなり、ゲートウェイに近づくにつれ大きなハブとなるため、ハブの大きさの分布は均整の取れたものとなる。しかし、大きな空間経済による大きな地方ハブの実現可能性が、この分布に歪みを生じさせる。距離の経済が密度の経済を凌駕するとき、ハブの階層は浅くなり、ハブの

大きさの分布はより歪み，ネットワークにおいてゲートウェイハブだけが不釣り合いに大きな需要を擁することになる．経済の空間的大きさが大きくなるに従い，高い階層のハブの形成が可能となり，大きさの分布の歪みは減ることになる．

以上の結果は，静脈物流ネットワークに対して次のような示唆を与える．まず，静脈物流の特性である動脈物流と比較した相対的なロットの小ささは，ハブの形成可能性を低下させる．ロットの小ささと不確実性は保管の必要性に繋がるが，保管費用の存在はハブの形成可能性を低下させ，またハブの階層を小さくする方向に働く．さらに，密度の経済が相対的に働きにくく，距離の経済の方が相対的に働きやすいことから，ハブが形成される場合でもその階層は小さくなりがちだが，各駅停車型のハブ構造とハブアンドスポーク型のハブ構造のどちらが強靱なネットワークであるかは一概には言えない．各駅停車型のハブ構造は特に海上輸送における多港寄りのように，輸送モードによっては事実上隣接しない上位ハブへの潜在的な代替経路は存在していると捉えられ，潜在的な代替経路を考慮したネットワークとして捉えれば，スケールフリー性やスモールワールド性の変動するためである．

ハブの形成可能性からは静脈物流ネットワークは動脈物流ネットワークと比較して強靱なネットワークとなりにくい，ハブが形成される場合に指向されるネットワーク構造の観点からは更なる検討が必要となる．

6.3.3 静脈物流ネットワークの強靱性検証シミュレーション

本節では 6.3.2 の経済モデルを参考に，混合整数線形計画モデルによりシミュレーションを行い，動脈物流ネットワークと比較した静脈物流ネットワークにおけるハブの形成可能性と形成される場合のネットワーク構造について検討する．具体的には，静脈物流の特徴を加味した条件とした場合に，ハブの形成状況がどのように変化するかを検証する．対象とするモデルは以下のとおりである．

- ・図 6-1 に示すような左端の発生ノード（動脈物流の場合）又は集中ノード（静脈物流の場合）を含め直線上に等間隔（ノード間距離 10）に並ぶ計 7 点のノードからなるフレームワークを想定する．発生（集中）ノードを除くノード 1～6 では等しい量（100）を需要（供給）し，発生（集中）ノードと需要（供給）ノードとの間で需要量（供給量）が輸送される．

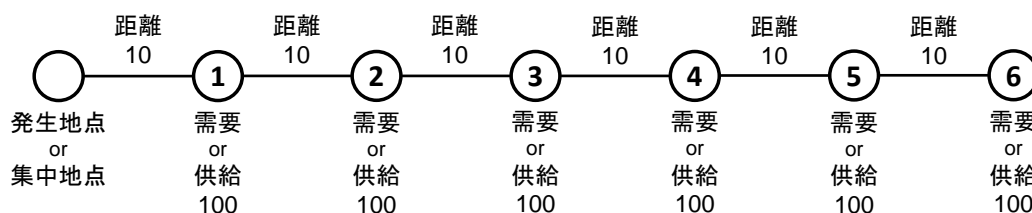


図 6-1 対象とするネットワーク

- ・発生地点から需要地点（供給地点から集中地点）へは直接またはハブを経由して向かう．密度の経済を表現するため単位需要量あたりの輸送費用は段階的に低減するものとし，距離の経済を表現するためハブでは積替費用を必要とするものとする．ハブを経由することで密度の経済が働くと同時に積替費用が発生するため，ハブ形成の有無，ハブの数，ハブの階層数に変動する．需要地点（供給地点）が 6 点あるため，ハブの階層は最大 5 となるが，ここでは発生（集中）ノードとのネットワーク上の距離が最も近いハブを一層目のハブとする．なお，距離の経済の影響を見るため，図 6-1 における発生（集中）ノードとノード 1 の間の距離が 100 となる場合も想定する．
- ・動脈物流と比較した静脈物流の特徴としてロットの小ささと不確実性を考慮し，前者は密度の経済の働きにくさ，後者はハブにおける積替費用の大きさと表現されるものとする．密度の経済は輸送量が増加するにつれ輸送費用原単位が段階的に低減することで表現し，低減の度合いの小ささと低減が開始する輸送量の大きさとで低減のしにくさを表現する．
- ・輸送費用原単位の低減度合，積替費用の大きさの組合せを変化させ，総費用が最小化を目的関数とする混合整数線形計画問題を解き，ハブの形成状況を確認する．
定式化は以下のとおり行い，計算にはオープンソースの混合整数線形計画法のソルバーである GLPK を用いる．

目的関数

$$\begin{aligned}
\min \quad & FC \cdot \left(\sum_{h=1}^n w_h + \sum_{i=1}^n w_i + \sum_{j=1}^n w_j + \sum_{k=1}^n w_k + \sum_{l=1}^n w_l + \sum_{m=1}^n w_m \right) \\
& + TS \cdot \sum_{g=1}^n \left(\sum_{h=2}^n q_{gh} + \sum_{i=2}^n q_{gi} + \sum_{j=2}^n q_{gj} + \sum_{k=2}^n q_{gk} + \sum_{l=2}^n q_{gl} + \sum_{m=2}^n q_{gm} \right) \\
& + TS \cdot \sum_{s=1}^t \left(\sum_{h=2}^n \sum_{i=1}^n r_{his} + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^n r_{ijs} + \sum_{j=2}^n \sum_{k=1}^n r_{ijks} + \sum_{k=2}^n \sum_{l=1}^n r_{kls} + \sum_{l=2}^n \sum_{m=1}^n r_{lms} \right) \\
& + TP \cdot \sum_{g=1}^n \left(\sum_{h=1}^n q_{gh} \cdot l_{gh} + \sum_{i=1}^n q_{gi} \cdot l_{gi} + \sum_{j=1}^n q_{gj} \cdot l_{gj} + \sum_{k=1}^n q_{gk} \cdot l_{gk} + \sum_{l=1}^n q_{gl} \cdot l_{gl} + \sum_{m=1}^n q_{gm} \cdot l_{gm} \right) \\
& + \sum_{s=1}^t TP_s \cdot \left(\sum_{h=2}^n \sum_{i=1}^n r_{his} \cdot l_{hi} + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^n r_{ijs} \cdot l_{ij} + \sum_{j=2}^n \sum_{k=1}^n r_{jks} \cdot l_{jk} + \sum_{k=2}^n \sum_{l=1}^n r_{kls} \cdot l_{kl} + \sum_{l=2}^n \sum_{m=1}^n r_{lms} \cdot l_{lm} \right) \\
& + \sum_{h=1}^n \sum_{s=1}^r TP_s \cdot p_{hs} \cdot l_h
\end{aligned} \tag{6-33}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{h=1}^n w_h \leq h_1 \tag{6-34}$$

$$\sum_{i=1}^n w_i \leq h_2 \tag{6-35}$$

$$\sum_{j=1}^n w_j \leq h_3 \quad (6-36)$$

$$\sum_{k=1}^n w_k \leq h_4 \quad (6-37)$$

$$\sum_{l=1}^n w_l \leq h_5 \quad (6-38)$$

$$\sum_{m=1}^n w_m \leq h_6 \quad (6-39)$$

$$w_h = \begin{cases} 1 & \text{ゾーンh に1層目のハブが形成される場合} \\ 0 & \text{ゾーンhに1層目のハブが形成されない場合} \end{cases} \quad (6-40)$$

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{ゾーンi に2層目のハブが形成される場合} \\ 0 & \text{ゾーンiに2層目のハブが形成されない場合} \end{cases} \quad (6-41)$$

$$w_j = \begin{cases} 1 & \text{ゾーンj に3層目のハブが形成される場合} \\ 0 & \text{ゾーンjに3層目のハブが形成されない場合} \end{cases} \quad (6-42)$$

$$w_k = \begin{cases} 1 & \text{ゾーンk に4層目のハブが形成される場合} \\ 0 & \text{ゾーンkに4層目のハブが形成されない場合} \end{cases} \quad (6-43)$$

$$w_l = \begin{cases} 1 & \text{ゾーンl に5層目のハブが形成される場合} \\ 0 & \text{ゾーンlに5層目のハブが形成されない場合} \end{cases} \quad (6-44)$$

$$w_m = \begin{cases} 1 & \text{ゾーンmに6層目のハブが形成される場合} \\ 0 & \text{ゾーンmに6層目のハブが形成されない場合} \end{cases} \quad (6-45)$$

$$x_{gh} \leq w_h, \quad \forall h \quad (6-46)$$

$$x_{gh} = \begin{cases} 1 & \text{ゾーンg の1層目のハブがゾーンh に形成される場合} \\ 0 & \text{ゾーンg の1層目のハブがゾーンh に形成されない場合} \end{cases} \quad (6-47)$$

$$x_{gi} \leq w_i, \quad \forall i \quad (6-48)$$

$$x_{gh} = \begin{cases} 1 & \text{ゾーンg の2層目のハブがゾーンi に形成される場合} \\ 0 & \text{ゾーンg の2層目のハブがゾーンi に形成されない場合} \end{cases} \quad (6-49)$$

$$x_{gj} \leq w_j, \quad \forall j \quad (6-50)$$

$$x_{gj} = \begin{cases} 1 & \text{ゾーンg の3層目のハブがゾーンj に形成される場合} \\ 0 & \text{ゾーンg の3層目のハブがゾーンj に形成されない場合} \end{cases} \quad (6-51)$$

$$x_{gk} \leq w_k, \quad \forall k \quad (6-52)$$

$$x_{gk} = \begin{cases} 1 & \text{ゾーン}g \text{ の4層目のハブがゾーン}k \text{ に形成される 場合} \\ 0 & \text{ゾーン}g \text{ の4層目のハブがゾーン}k \text{ に形成され ない場合} \end{cases} \quad (6-53)$$

$$x_{gl} \leq w_l, \quad \forall l \quad (6-54)$$

$$x_{gl} = \begin{cases} 1 & \text{ゾーン}g \text{ の5層目のハブがゾーン}l \text{ に形成される 場合} \\ 0 & \text{ゾーン}g \text{ の5層目のハブがゾーン}l \text{ に形成され ない場合} \end{cases} \quad (6-55)$$

$$x_{gm} \leq w_m, \quad \forall m \quad (6-56)$$

$$x_{gm} = \begin{cases} 1 & \text{ゾーン}g \text{ の6層目のハブがゾーン}m \text{ に形成される 場合} \\ 0 & \text{ゾーン}g \text{ の6層目のハブがゾーン}m \text{ に形成され ない場合} \end{cases} \quad (6-57)$$

$$\sum_{h=1}^n x_{gh} + \sum_{i=1}^n x_{gi} + \sum_{j=1}^n x_{gj} + \sum_{k=1}^n x_{gk} + \sum_{l=1}^n x_{gl} + \sum_{m=1}^n x_{gm} = 1, \quad \forall g \quad (6-58)$$

$$q_{gh} \leq M \cdot x_{gh}, \quad \forall g, h \quad (6-59)$$

$$q_{gi} \leq M \cdot x_{gi}, \quad \forall g, i \quad (6-60)$$

$$q_{gj} \leq M \cdot x_{gj}, \quad \forall g, j \quad (6-61)$$

$$q_{gk} \leq M \cdot x_{gk}, \quad \forall g, k \quad (6-62)$$

$$q_{gl} \leq M \cdot x_{gl}, \quad \forall g, l \quad (6-63)$$

$$q_{gm} \leq M \cdot x_{gm}, \quad \forall g, m \quad (6-64)$$

$$\sum_{h=1}^n q_{gh} + \sum_{i=1}^n q_{gi} + \sum_{j=1}^n q_{gj} + \sum_{k=1}^n q_{gk} + \sum_{l=1}^n q_{gl} + \sum_{m=1}^n q_{gm} = S_g, \quad \forall g \quad (6-65)$$

$$p_{hs} \leq M \cdot w_h, \quad \forall h, s \quad (6-66)$$

$$r_{his} \leq M \cdot w_i, \quad \forall h, i, s \quad (6-67)$$

$$r_{ijs} \leq M \cdot w_j, \quad \forall i, j, s \quad (6-68)$$

$$r_{jks} \leq M \cdot w_k, \quad \forall j, k, s \quad (6-69)$$

$$r_{kls} \leq M \cdot w_l, \quad \forall k, l, s \quad (6-70)$$

$$r_{lms} \leq M \cdot w_m, \quad \forall l, m, s \quad (6-71)$$

$$\sum_{g=1}^n q_{gh} + \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^t r_{his} = \sum_{s=1}^t p_{hs}, \quad \forall h \quad (6-72)$$

$$\sum_{h=1}^n \sum_{s=1}^t r_{his} = \sum_{g=1}^n q_{gi} + \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^t r_{ijs}, \quad \forall i \quad (6-73)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^t r_{ijs} = \sum_{g=1}^n q_{gj} + \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^t r_{jks}, \quad \forall j \quad (6-74)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^t r_{jks} = \sum_{g=1}^n q_{gk} + \sum_{l=1}^n \sum_{s=1}^t r_{kls}, \quad \forall k \quad (6-75)$$

$$\sum_{l=1}^n \sum_{s=1}^t r_{kls} = \sum_{g=1}^n q_{gl} + \sum_{m=1}^n \sum_{s=1}^t r_{lms}, \quad \forall l \quad (6-76)$$

$$\sum_{m=1}^n \sum_{s=1}^t r_{lms} = \sum_{g=1}^n q_{gm}, \quad \forall m \quad (6-77)$$

$$\sum_{s=1}^r z p_{hs} = w_h, \quad \forall h \quad (6-78)$$

$$z p_{hs} = \begin{cases} 1 & \text{一層目のハブと発生(集中)地点間の輸送量がレベルsの場合} \\ 0 & \text{一層目のハブと発生(集中)地点間の輸送量がレベルs以外の場合} \end{cases} \quad (6-79)$$

$$p_{hs} \leq M \cdot z p_{hs}, \quad \forall h, s \quad (6-80)$$

$$\sum_{s=1}^r z p_{his} = w_i, \quad \forall h, i \quad (6-81)$$

$$z p_{his} = \begin{cases} 1 & \text{一層目と二層目のハブ間の輸送量がレベルsの場合} \\ 0 & \text{一層目と二層目のハブ間の輸送量がレベルs以外の場合} \end{cases} \quad (6-82)$$

$$r_{his} \leq M \cdot z p_{his}, \quad \forall h, i, s \quad (6-83)$$

$$\sum_{s=1}^r zp_{ijs} = w_j, \quad \forall i, j \quad (6-84)$$

$$zp_{ijs} = \begin{cases} 1 & \text{二層目と三層目のハブ間の輸送量がレベル}s \text{の場合} \\ 0 & \text{二層目と三層目のハブ間の輸送量がレベル}s \text{以外の場合} \end{cases} \quad (6-85)$$

$$r_{ijs} \leq M \cdot zp_{ijs}, \quad \forall i, j, s \quad (6-86)$$

$$\sum_{s=1}^r zp_{jks} = w_k, \quad \forall j, k \quad (6-87)$$

$$zp_{jks} = \begin{cases} 1 & \text{三層目と四層目のハブ間の輸送量がレベル}s \text{の場合} \\ 0 & \text{三層目と四層目のハブ間の輸送量がレベル}s \text{以外の場合} \end{cases} \quad (6-88)$$

$$r_{jks} \leq M \cdot zp_{jks}, \quad \forall j, k, s \quad (6-89)$$

$$\sum_{s=1}^r zp_{kls} = w_l, \quad \forall k, l \quad (6-90)$$

$$zp_{kls} = \begin{cases} 1 & \text{四層目と五層目のハブ間の輸送量がレベル}s \text{の場合} \\ 0 & \text{四層目と五層目のハブ間の輸送量がレベル}s \text{以外の場合} \end{cases} \quad (6-91)$$

$$r_{kls} \leq M \cdot zp_{kls}, \quad \forall k, l, s \quad (6-92)$$

$$\sum_{s=1}^r zp_{lms} = w_m, \quad \forall l, m \quad (6-93)$$

$$zp_{lms} = \begin{cases} 1 & \text{五層目と六層目のハブ間の輸送量がレベル}s \text{の場合} \\ 0 & \text{五層目と六層目のハブ間の輸送量がレベル}s \text{以外の場合} \end{cases} \quad (6-94)$$

$$rl_{lms} \leq M \cdot zp_{lms}, \quad \forall l, m, s \quad (6-95)$$

$$\text{非負制約} \quad q_{gh} \geq 0, \quad \forall g, h \quad (6-96)$$

$$q_{gi} \geq 0, \quad \forall g, i \quad (6-97)$$

$$q_{gj} \geq 0, \quad \forall g, j \quad (6-98)$$

$$q_{gk} \geq 0, \quad \forall g, k \quad (6-99)$$

$$q_{gl} \geq 0, \quad \forall g, l \quad (6-100)$$

$$q_{gm} \geq 0, \quad \forall g, m \quad (6-101)$$

$$r_{his} \geq 0, \quad \forall h, i, s \quad (6-102)$$

$$r_{ijs} \geq 0, \quad \forall i, j, s \quad (6-103)$$

$$r_{jks} \geq 0, \quad \forall j, k, s \quad (6-104)$$

$$r_{kls} \geq 0, \quad \forall k, l, s \quad (6-105)$$

$$r_{lms} \geq 0, \quad \forall l, m, s \quad (6-106)$$

$$p_{hs} \geq 0, \quad \forall h, s \quad (6-107)$$

ただし、 n ：ノードの数、 IC ：ハブ形成初期費用、 $w_h \sim w_m$ ：ノード $h \sim m$ のハブ形成を示すバイナリ変数、 TS ：積替費用原単位、 $q_{gh} \sim q_{gm}$ ：需要（供給）ノード g とハブ $h \sim m$ の間の輸送量、 s ：輸送量のレベル、 t ：輸送量のレベルの分割数、 $r_{his} \sim r_{lms}$ ：ハブ間の輸送量（輸送量レベル s ）、 TP ：需要（供給）ノード g と一つのハブの間の輸送原単位、 $l_{gh} \sim l_{gm}$ ：需要（供給）ノード g とハブ $h \sim m$ の間の距離、 $l_{hi} \sim l_{lm}$ ：ハブ間の輸送量、 TP_s ：輸送量が s レベルのときの輸送原単位、 p_{hs} ：輸送量が s レベルのときのハブ h と発生（集中）ノードの間の輸送量、 l_h ：ハブ h と発生（集中）ノードの間の距離、 $h_1 \sim h_6$ ：各層のハブの上限数、 $x_{gh} \sim x_{gm}$ ：需要（供給）ノード g の需要がハブ $h \sim m$ を経由することを示すバイナリ変数、 M ：適切な大きな数値、 S_g ：需要（供給）ノード g の需要（供給）量、 zp_{hs} ：ハブ h と発生（集中）ノードの間の輸送量のレベルが s であることを示すバイナリ変数 $zp_{his} \sim zp_{lms}$ ：ハブの間の輸送量のレベルが s であることを示すバイナリ変数である。

制約条件について、(6-33)～(6-44)により各階層のハブ数の上限を設定している。(6-45)～(6-56)は、発生（集中）ノード又はハブとの間で輸送が行われる場合に限り需要（供給）ノードと当該ノードの間にリンクが張られることを示している。(6-57)は需要（供給）ノードと発生（集中）ノード又はいずれかひとつのハブとの間には一本のリンクのみが張られることを示している。(6-64)は全ての需要（供給）は保管されることなく必ず輸送されることを示している。(6-65)～(6-70)はハブ間及びハブと発生（集中）地点の間にリンクが存在する場合のみ輸送が行われることを示している。(6-71)～(6-76)は各ハブに搬入される需要（供給）と排出される需要（供給）が等しくなることを示している。(6-77)～(6-94)はハブ間及びハブと発生（集中）ノード間の輸送量はいずれかの輸送レベルを持つことを示している。

代表的なシミュレーション結果を図 6-2 に示す。なお、図 6-2 に示していないパラメータの値としては、 $FC=1000$ 、 $TP=10$ 、 $M=1000$ 、 $h_1=3$ 、 $h_2=2$ 、 $h_3=h_4=h_5=h_6=1$ としている。このシミュレーションは、他の先行研究と同様に、フローの向きは評価されないが、静脈物流の特徴を与条件とすることで、動脈物流と比較した相対的な評価を行うものである。

図 6-2 を見ると、ケース 1 は密度の経済が働かないためハブが形成されない。ケース 2 以降は密度の経済が働くケースで、ケース 2 とケース 3 は共に 1 つのハブが形成されているが、ケース 2 と比較してケース 3 は密度の経済の働き方が弱いので、ハブを経由する量が少なくなっている。ケース 4 は密度の経済が大きな輸送量の範囲で働き、ケース 5 は密度の経済が小さな輸送量の範囲で働くためケース 4 では全ての需要（供給）が 1 つのハブを経由し、ケース 5 では 2 つのハブに少量の需要（供給）が経由する形になっている。ケース 3, 6, 7, 8 は密度の経済の働き方は同じであるが、積替費用が異なる。ケース 8 のように積替費用が大きいとハブが形成されないが、積替費用が小さくなるにつれてハブの階層が 1, 3, 5 層と増加している。ケース 9 はケース 8 よりも発生（集中）ノードと需要（供給）ノードの間の距離が大きく、保管費用が大きくとも距離の経済が働くためハブが形成されている。

このように、固定費用の大きさと密度の経済の働き方により、ハブ形成の有無とハブの階層が変化することが分かる。ハブの形成について整理すると以下のとおりとなる。

- ・密度の経済が働かなければハブは形成されない。また、積替費用が密度の経済の発揮を凌駕するくらい大きい場合もハブは形成されない。これらのことは、静脈物流の場合、ロットが小さく密度の経済が働かない場合や、ロットを確保して密度の経済を働かせようにもそのための保管費用が大きすぎる場合に、小ロットでの割高な費用で輸送せざるを得ない状況の存在を意味している。ただし、ケース 8 のように輸送先が遠距離となることで距離の経済が働きハブが形成されることもある。
- ・距離の経済が相対的に強く働く場合（積替費用が大きい場合）、ハブの階層は小さく、密度の経済が相対的に強く働く場合、ハブは多層となる。このことは、ロットの小さな、あるいはロットを確保するために保管費用を必要とする静脈物流ネットワークはハブの階層が大きくなりやすく、動脈物流ネットワークと比較して相対的に単純なネットワーク構造となりやすいことを意味している。
- ・密度の経済が働くほど（ロットが確保できるほど）、また積替費用が小さいほど、ハブが形成されやすく多層になりやすいが、ロットが小さく、不確実性があることという静脈物流の特徴はハブの形成を妨げる方向に働く。すなわち、静脈物流ネットワークでは動脈物流ネットワークと比較してハブ構造を有さない可能性が高く、強靱性で劣ることになる。
- ・なお、多層ハブ構造は各駅停車型のネットワークを意味するため、鉄道輸送の場合では上位階層のハブが機能停止した場合にネットワーク全体の機能を大きく低下させるが、トラック輸送や海上輸送の場合は事実上一つ先の階層へ潜在的な代替リンクが張られているため、ハブへの攻撃にも強靱であると考えられる。

ここで扱っているのは直線状の単純なネットワーク構造であるため、ここではスモールワールド性等の有無からネットワーク構造の強靱性評価をするのではなく、あくまでもハブの形成可能性からネットワークの強靱性について検証したことになる。

ケース	条件	結果
1	<p>積替費用50</p>	<p>ハブの形成なし</p>
2	<p>積替費用50</p>	<p>1層のハブ構造(1つ)+直行</p>
3	<p>積替費用50</p>	<p>1層のハブ構造(1つ)+直行</p>
4	<p>積替費用50</p>	<p>1層のハブ構造(1つ)</p>
5	<p>積替費用50</p>	<p>1層(2つ)のハブ構造+直行</p>
6	<p>積替費用20</p>	<p>3層のハブ構造</p>
7	<p>積替費用5</p>	<p>5層のハブ構造</p>
8	<p>積替費用300</p>	<p>ハブの形成なし</p>
9	<p>積替費用300</p>	<p>1層のハブ構造(1つ)+直行</p>

図 6-2 シミュレーション結果

結果として、静脈物流の特徴であるロットの小ささと不確実性に対応するための保管費用の増加は、密度の経済の発揮を妨げることになるため、静脈物流ネットワークはハブを持つネットワーク構造となりにくく、静脈物流ネットワークはその特徴から動脈物流ネットワークと比較して相対的に強靱性を有しにくいことを示している。逆に言うと、ロットの確保や不確実性の吸収のための保管費用が相対的に小さければハブは形成されやすくなる。すなわち、静脈物流ネットワークが強靱性を有するためには安価な保管費用が重要な条件となることを示唆している。

6.4 強靱性を制約条件としたシミュレーションモデル

前節ではハブの形成可能性について経済モデルとそれを基にしたシミュレーションを行い、静脈物流ネットワークが動脈物流ネットワークと比較して強靱なネットワーク構造となりにくいことを述べた。本節では、ネットワークの重要ノードが機能停止になった場合でも代替リンクを持つことでネットワーク全体の機能のうち一定の割合を維持するという代替性の観点からの強靱性を制約条件としたモデルにより、静脈物流ネットワークの強靱性について動脈物流のそれと比較する。ここでは、Meepetchdee and Shah²⁴⁾ のモデルを参考に、供給場所の位置を所与とする物流ネットワークにおいて、強靱性を制約条件に加えた上で、保管場所の位置と代替経路の張られ方を模索する混合整数線形計画モデルを構築する。想定する物流ネットワークは以下の通りとする。

- ・供給場所、保管場所、プラントからなる物流ネットワークを想定する。ここでは、一般性を持たせるため、図 6-3 に示すようにプラントを中心として 3 層の半円を考え、外側の半円上に等間隔に供給地点を配置させる。真ん中の半円上には 6 つの保管場所、内側の半円上に 5 つの保管場所の候補地を与える。供給場所から必ず保管場所を経由してプラントへ向けた輸送が行われるものとし、保管場所では保管積替費用が発生するものとする。供給地点からはひとつの保管場所へ向かうのものとし、供給地点と保管場所一本の優先リンクでのみ結ばれるものとする。
- ・規模の経済（狭義には密度の経済だが、以降はこのように呼ぶ）について考慮し、輸送量が増加するのに伴い段階的に単位重要当たりの輸送費用が低減するものとする。ただし、輸送量が小さければ規模の経済は働かない。規模の経済が働く場合、一旦保管場所を経由してさらに別の保管場所で集約することも想定され、最大 2 つの保管場所を経由することができるものとする。すなわち、供給場所から中央の半円上の保管場所、又は内側の半円上の保管場所（プラントに併設された保管場所も含む）のいずれかに一本の優先リンクが張られ、中央の半円上の保管場所へ優先リンクが張られる場合は、内側の半円上の保管場所をさらに経由してプラントに向かうこともできるものとする。
- ・保管場所が機能を停止した場合、別の保管場所への代替経路を持たない限り、静脈資源のプラントへの供給が不可能となる（さらに場合によっては廃棄物が供給場所に滞留す

ることになる)。ここでは、代替経路の存在によりネットワーク全体の機能の一部が維持されることを強靱性として考える。すなわち、別の保管場所への代替リンクが存在する場合は当該供給地点からの供給が可能となるものとして、ネットワーク全体のうち供給が不可能となる割合の上限を制約条件として考える。

- 他の先行研究と同様にフローの向きによる違いは表現されないが、パラメータを変化させることで動脈物流と静脈物流の違いを表現する。すなわち、静脈物流の特徴であるロットの小ささと不確実性を表現するため、規模の経済の働き方と保管費用を変化させる。
- また、過度な効率性や強靱性の追求の弊害についても検証するために、式(6-8)で表される Kharrazi et al.²⁴⁾ が提案する強靱性指標についても確認する。

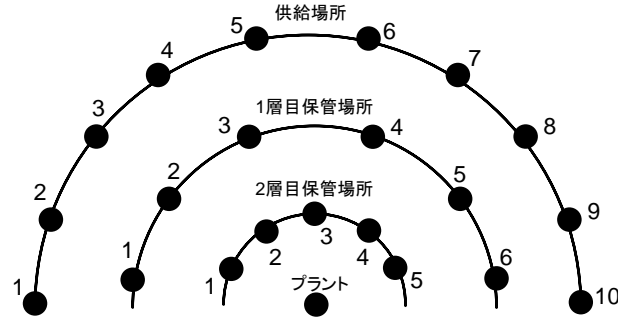


図 6-3 供給場所、保管場所、プラントの配置

この物流ネットワークに対し、シミュレーションモデルを以下のように定式化する。

目的関数

$$\begin{aligned}
 \min \quad & IC \cdot \left(\sum_{j=1}^m w_j + \sum_{k=1k \neq P}^n w_k \right) + TS \cdot \left\{ \sum_{i=1}^l \left(\sum_{j=1}^m q_{ij} + \sum_{k=1}^n q_{ik} \right) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^t r_{jks} \right\} \\
 & + TP \cdot \sum_{i=1}^l \left(\sum_{j=1}^m q_{ij} \cdot l_{ij} + \sum_{k=1}^n q_{ik} \cdot l_{ik} \right) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^t TP_s \cdot r_{jks} \cdot l_{jk} + \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^t TP_s \cdot p_{ks} \cdot l_k \quad (6-108) \\
 & + RD_1 \cdot \sum_{i=1}^l \left\{ S_i \cdot \left(\sum_{j=1}^m x_{s_{ij}} \cdot l_{ij} + \sum_{k=1}^n x_{s_{ik}} \cdot l_{ik} \right) \right\} + RD_2 \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n S_r \cdot x_{s_{jk}} \cdot l_{jk}
 \end{aligned}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^m w_j \leq h_1 \quad (6-109)$$

$$w_j = \begin{cases} 1 & \text{保管場所 } j \text{に優先リンクが張られる場合} \\ 0 & \text{保管場所 } j \text{に優先リンクが張られない場合} \end{cases} \quad (6-110)$$

$$\sum_{k=1}^n w_k \leq h_2 \quad (6-111)$$

$$w_k = \begin{cases} 1 & \text{保管場所 } k \text{ に優先リンクが張られる場合} \\ 0 & \text{保管場所 } k \text{ に優先リンクが張られない場合} \end{cases} \quad (6-112)$$

$$x_{ij} \leq w_j, \quad \forall i, j \quad (6-113)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{供給場所 } i \text{ と保管場所 } j \text{ の間にリンクがある場合} \\ 0 & \text{供給場所 } i \text{ と保管場所 } j \text{ の間にリンクがない場合} \end{cases} \quad (6-114)$$

$$x_{ik} \leq w_k, \quad \forall i, k \quad (6-115)$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{供給場所 } i \text{ と保管場所 } k \text{ の間にリンクがある場合} \\ 0 & \text{供給場所 } i \text{ と保管場所 } k \text{ の間にリンクがない場合} \end{cases} \quad (6-116)$$

$$x_{jk} \leq w_k, \quad \forall j, k \quad (6-117)$$

$$x_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{保管場所 } j \text{ と保管場所 } k \text{ の間にリンクがある場合} \\ 0 & \text{保管場所 } j \text{ と保管場所 } k \text{ の間にリンクがない場合} \end{cases} \quad (6-118)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} + \sum_{k=1}^n x_{ik} = 1, \quad \forall i \quad (6-119)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{jk} \leq 1, \quad \forall j \quad (6-120)$$

$$x_{jk} \leq \sum_{i=1}^l x_{ij}, \quad \forall j, k \quad (6-121)$$

$$q_{ij} \leq M \cdot x_{ij}, \quad \forall i, j \quad (6-122)$$

$$q_{ik} \leq M \cdot x_{ik}, \quad \forall i, k \quad (6-123)$$

$$r_{jks} \leq M \cdot x_{jk}, \quad \forall j, k, s \quad (6-124)$$

$$\sum_{j=1}^m q_{ij} + \sum_{k=1}^n q_{ik} = S_i, \quad \forall i \quad (6-125)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^t r_{jks} = \sum_{i=1}^l q_{ij}, \quad \forall j \quad (6-126)$$

$$\sum_{i=1}^l q_{ik} + \sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^t r_{jks} = \sum_{s=1}^t p_{ks}, \quad \forall k \quad (6-127)$$

$$x_{ij} + xs_{ij} \leq 1, \quad \forall i, j \quad (6-128)$$

$$x_{ik} + xs_{ik} \leq 1, \quad \forall i, k \quad (6-129)$$

$$x_{jk} + xs_{jk} \leq 1, \quad \forall j, k \quad (6-130)$$

$$xs_{ij} \leq w_j, \quad \forall i, j \quad (6-131)$$

$$xs_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{供給場所 } i \text{と保管場所 } j \text{の間に代替経路がある 場合} \\ 0 & \text{供給場所 } i \text{と保管場所 } j \text{の間に代替経路がない場合} \end{cases} \quad (6-132)$$

$$xs_{ik} \leq w_k, \quad \forall i, k \quad (6-133)$$

$$xs_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{供給場所 } i \text{と保管場所 } k \text{の間に代替経路がある 場合} \\ 0 & \text{供給場所 } i \text{と保管場所 } k \text{の間に代替経路がない場合} \end{cases} \quad (6-134)$$

$$xs_{jk} \leq w_k, \quad \forall j, k \quad (6-135)$$

$$xs_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{保管場所 } j \text{と保管場所 } k \text{の間に代替経路がある 場合} \\ 0 & \text{保管場所 } j \text{と保管場所 } k \text{の間に代替経路がない場合} \end{cases} \quad (6-136)$$

$$xs_{jk} \leq \sum_{i=1}^l x_{ij}, \quad \forall j, k \quad (6-137)$$

$$\sum_{j=1}^m xs_{ij} \leq 1, \quad \forall i \quad (6-138)$$

$$\sum_{k=1}^n xs_{ik} \leq 1, \quad \forall i \quad (6-139)$$

$$\sum_{k=1}^n xs_{jk} \leq 1, \quad \forall j \quad (6-140)$$

$$xf_{ij} = x_{ij} - \sum_{j'=1, j' \neq j}^m xs_{ij'} - \sum_{k=1, k \neq j}^n xs_{ik}, \quad \forall i, j, j' \quad (6-141)$$

$$xf_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{保管場所 } j \text{が機能停止時に供給場所 } i \text{からの 供給が不可な場合} \\ 0 & \text{保管場所 } j \text{が機能停止時に供給場所 } i \text{からの 供給が可能な場合} \end{cases} \quad (6-142)$$

$$xf_{ik} = x_{ik} - \sum_{k'=1, k' \neq k}^n xs_{ik'} - \sum_{j=1, j \neq k}^m xs_{ij}, \quad \forall i, k, k' \quad (6-143)$$

$$xf_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{保管場所}k\text{が機能停止時に供給場所}i\text{からの 供給が不可な場合} \\ 0 & \text{保管場所}k\text{が機能停止時に供給場所}i\text{からの 供給が可能な場合} \end{cases} \quad (6-144)$$

$$xf_{ijk} = x_{jk} - \sum_{k'=1, k' \neq k}^n xs_{jk'} + x_{ij} - 1, \quad \forall i, j, k, k' \quad (6-145)$$

$$xf_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{保管場所}k\text{が機能停止時に供給場所}i\text{からの 供給が不可な場合} \\ 0 & \text{保管場所}k\text{が機能停止時に供給場所}i\text{からの 供給が可能な場合} \end{cases} \quad (6-146)$$

$$1 - \sum_{i=1}^l xf_{ij} \cdot S_i \Big/ \sum_{i=1}^l S_i \geq \beta, \quad \forall j \quad (6-147)$$

$$1 - \left(\sum_{i=1}^l xf_{ik} \cdot S_i + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m xf_{ijk} \cdot S_i \right) \Big/ \sum_{i=1}^l S_i \geq \beta, \quad \forall k \quad (6-148)$$

$$\sum_{s=1}^t zp_{jks} = w_k, \quad \forall j, k \quad (6-149)$$

$$zp_{jks} = \begin{cases} 1 & \text{保管場所}j\text{と保管場所 } k\text{の間の 輸送量がレベル } s\text{の場合} \\ 0 & \text{保管場所}j\text{と保管場所 } k\text{の間の 輸送量がレベル } s\text{以外の場合} \end{cases} \quad (6-150)$$

$$r_{jks} \leq M \cdot zp_{jks}, \quad \forall j, k, s \quad (6-151)$$

$$\sum_{s=1}^t zp_{ks} = w_k, \quad \forall k \quad (6-152)$$

$$zp_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{保管場所}k\text{とプラントの間の 輸送量がレベル } s\text{の場合} \\ 0 & \text{保管場所}k\text{とプラントの間の 輸送量がレベル } s\text{以外の場合} \end{cases} \quad (6-153)$$

$$p_{ks} \leq M \cdot zp_{ks}, \quad \forall k, s \quad (6-154)$$

$$\text{非負制約} \quad q_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (6-155)$$

$$q_{ik} \geq 0, \quad \forall i, k \quad (6-156)$$

$$r_{jks} \geq 0, \quad \forall j, k, s \quad (6-157)$$

$$p_{ks} \geq 0, \quad \forall k, s \quad (6-158)$$

ただし, l : 供給地点の数, m : 保管場所 (中央の半円状) の候補数, n : 保管場所 (内側の半円上) の候補数 (プラントに併設される保管場所も含む), t : 輸送量レベルの分割数, IC : 保管場所の初期設置費用 (円), w_j : ゾーン j に保管場所が設置されることを示すバイ

ナリ変数, w_k : ゾーン k に保管場所が設置されることを示すバイナリ変数, TS : 保管場所での保管積替費用原単位 (円/kg), q_{ij} : 供給場所 i と保管場所 j の間の輸送量 (kg), q_{ik} : 供給場所 i と保管場所 k の間の輸送量 (kg), r_{jks} : 輸送量が s レベルのときの保管場所 j と保管場所 k の間の輸送量 (kg), TP : 供給場所と保管場所の間の輸送費用原単位 (円/kg), TP_s : 輸送量が s レベルのときの輸送費用原単位 (円/kg), l_{ij} : 供給場所 i と保管場所 j の間の距離 (km), l_{ik} : 供給場所 i と保管場所 k の間の距離 (km), l_{jk} : 保管場所 j と保管場所 k の間の距離 (km), p_{ks} : 輸送量が s レベルのときの保管場所 k とプラントとの間の輸送量 (kg), l_k : 保管場所 k とプラントの間の距離 (km), RD_1 : 供給場所とプラントの間の代替経路準備費用原単位 (円/kg), RD_2 : 保管場所 j と保管場所 k の間の代替経路準備費用原単位 (円/kg), S_i : 供給場所 i の供給量, xs_{ij} : 供給場所 i と保管場所 j の間に代替経路が張られることを示すバイナリ変数, xs_{ik} : 供給場所 i と保管場所 k の間に代替経路が張られることを示すバイナリ変数, xs_{jk} : 保管場所 j と保管場所 k の間に代替経路が張られることを示すバイナリ変数, S_r : 保管場所 j と保管場所 k の間の代替経路の想定輸送量 (kg), h_1, h_2 : 保管場所数の上限, x_{ij} : 供給場所 i と保管場所 j の間にリンクが張られることを示すバイナリ変数, x_{ik} : 供給場所 i と保管場所 k の間にリンクが張られることを示すバイナリ変数, x_{jk} : 保管場所 j と保管場所 k の間にリンクが張られることを示すバイナリ変数, M : 適切な大きな数値, xf_{ij} : 保管場所 j が機能停止時に供給場所 i との間の輸送が不可能なことを示すバイナリ変数, xf_{ik} : 保管場所 k が機能停止時に供給場所 i との間の輸送が不可能なことを示すバイナリ変数, xf_{jk} : 保管場所 k が機能停止時に保管場所 j を経由した供給場所 i との間の輸送が不可能なことを示すバイナリ変数, β : 最小の強靱性 (保管場所の機能停止時もシステム全体の需要又は供給が満たされる割合), zp_{jks} : 保管場所 j と保管場所 k の間の輸送量のレベルが s であることを示すバイナリ変数 zp_{ks} : 保管場所 k とプラントの間の輸送量のレベルが s であることを示すバイナリ変数である。

制約条件について, (6-109)～(6-112)により各層の保管場所数の上限を設定している。(6-113)～(6-118)は, 供給場所と保管場所の存在するゾーンの間でのみリンクが張られることを示している。(6-119)は供給場所と保管場所の間に張られるリンク数が一本のみであることを示している。(6-120), (6-121)は供給場所と中央の半円上の保管場所の間にリンクがある場合のみ, 中央の半円上の保管場所と内側の半円上の保管場所 (プラントに併設される保管場所も含む) の間の一本のリンクが張られることを示している。(6-122)～(6-124)はリンクが存在する場合のみ輸送が行われることを示している。(6-125)は供給場所で供給されたものは保管されることなく必ず輸送されることを示している。(6-126), (6-127)は各保管場所に搬入される供給量と搬出される供給量が等しくなることを示している。(6-128)～(6-130)は代替リンクが張られる場合, 優先リンクとは別の保管場所に対して張られることを示している。(6-131)～(6-136)は保管場所が存在するゾーンとの間でのみ代替リンクが張られることを示している。(6-137)は供給場所と中央の半円上の保管場所の間にリンクがある場合のみ, 中央の半円上の保管場所から代替リンクが張られることを示している。(6-138)

～(6-140)は各供給場所又は保管場所から張られる代替リンクが一本であることを示している。(6-141)～(6-148)は、強靭性を示す制約条件であり、保管場所の機能停止時に、代替リンクがない場合に輸送されなくなる割合が、ネットワーク全体の輸送量のうち一定割合以下であることを示している。(6-149)～(6-154)は保管場所間及び保管場所とプラントの間の輸送量はいずれかの輸送レベルを持つことを示している。

設定したシナリオとその結果を表 6-1 に示す。前節同様、計算には GLPK を用い、使用データについては付録 1 に示す。表 6-1 には R を示しているが、これは優先リンクに 9 割、代替リンク 1 割のフローを流すことを想定した場合の Kharrazi et al.²⁴⁾ が提案する強靭性指標である。 R を計算するにあたり、もともと優先リンクが張られていない保管倉庫に代替リンクが張られる場合はそこからプラントに向かうリンクが存在していないため、もともと優先リンクが張られていた保管場所のリンク先となる保管場所又はプラントに対してフローを流している。

表 6-1 シミュレーションの条件と結果

条件					結果				
想定	初期費用	保管費用	輸送費用	強靭性	総費用	ハブ数	階層数	代替リンク数	R
シナリオ1: 動脈物流	1000	10	30,25,20	0%	833,882	6	2	0	0.2515
				50%	834,699	7	2	0	0.2534
				70%	837,647	7	2	2	0.2705
				90%	851,068	7	2	8	0.3127
シナリオ2: ロットが小さくて規模の経済が働かない静脈物流	1000	10	30	0%	910,000	1	1	0	0.3678
				50%	915,719	4	1	0	0.3361
				70%	918,079	5	1	0	0.3242
				90%	923,607	6	1	6	0.3569
シナリオ3: ロットが小さくて規模の経済が働かず、不確実性により保管費用も大きい場合の静脈物流	10000	100	30	0%	1,000,000	1	1	0	0.3678
				50%	1,017,572	2	1	5	0.3675
				70%	1,022,861	2	1	7	0.3667
				90%	1,029,464	2	1	9	0.3654
シナリオ4: 保管により規模の経済が働く場合の静脈物流	10000	100	30,25,20	0%	965,731	3	1	0	0.3419
				50%	965,731	3	1	0	0.3419
				70%	971,475	3	1	2	0.3479
				90%	984,549	3	1	7	0.3594
シナリオ5: 保管により強く規模の経済が働く場合の静脈物流	10000	100	30,20,10	0%	863,636	4	2	0	0.2790
				50%	863,636	4	2	0	0.2790
				70%	872,132	5	2	4	0.3127
				90%	882,797	5	2	8	0.3252

代表的な結果を図示したものを図 6-4 から図 6-8 に示す。赤色の実線が供給場所から保管場所、保管場所間、保管場所からプラントまでのリンク、青色の破線が代替リンクを示し、保管場所を経由した場合はその都度線の太さを太くしている。もともと優先リンクが張られていない保管倉庫に代替リンクが張られる場合の代替保管場所から先の代替リンク形成費用は保管場所初期設置費用に含まれるとして細かい破線で表現している。

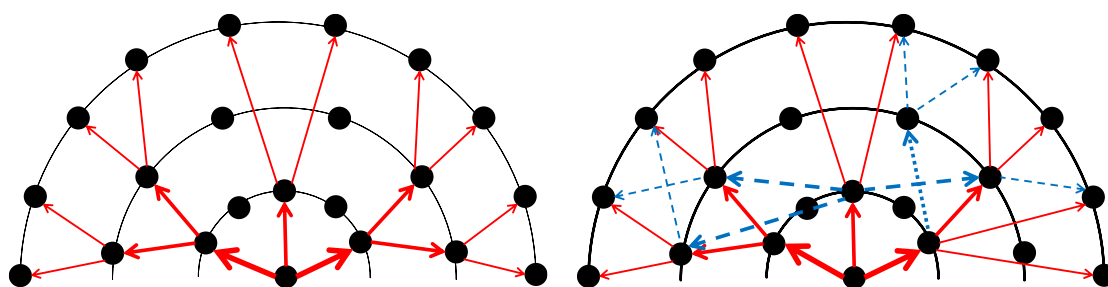


図 6-4 シナリオ 1 の結果 (左 50%, 右 90%)

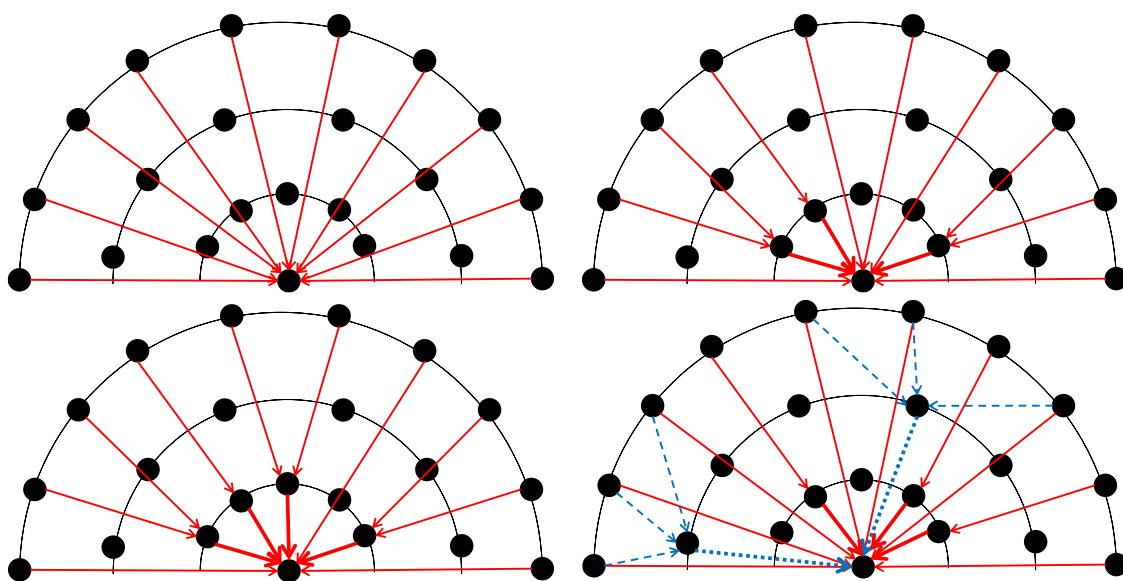


図 6-5 シナリオ 2 の結果 (左上 0%, 右上 50%, 左下 70%, 右下 90%)

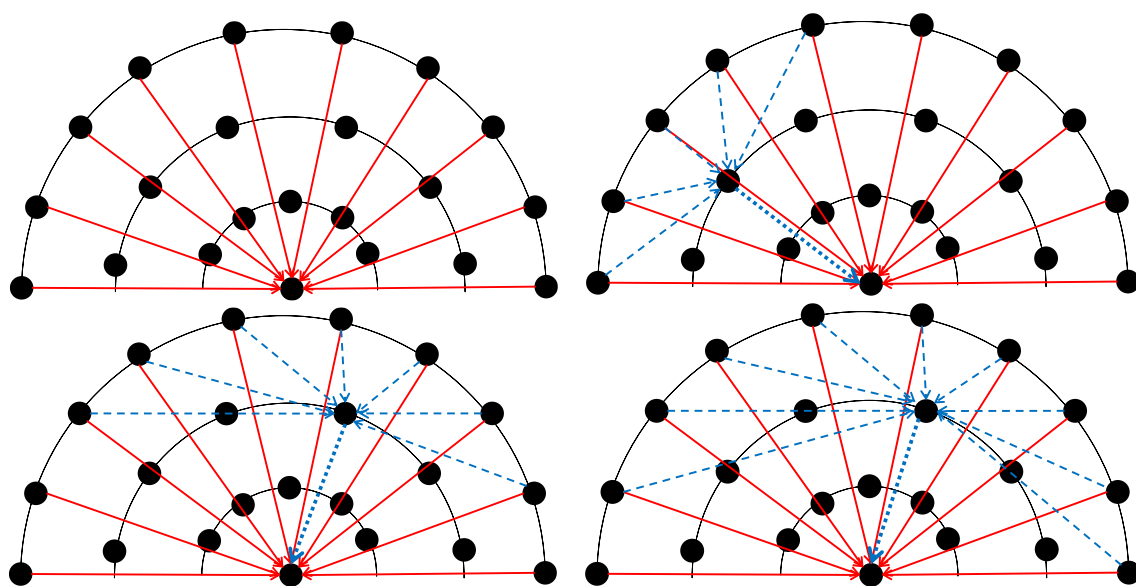


図 6-6 シナリ 3 の結果 (左上 0%, 右上 50%, 左下 70%, 右下 90%)

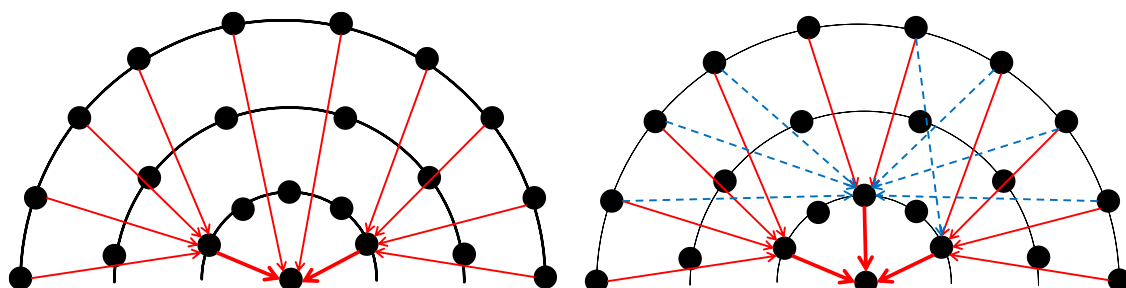


図 6-7 シナリオ 4 の結果 (左 50%, 右 90%)

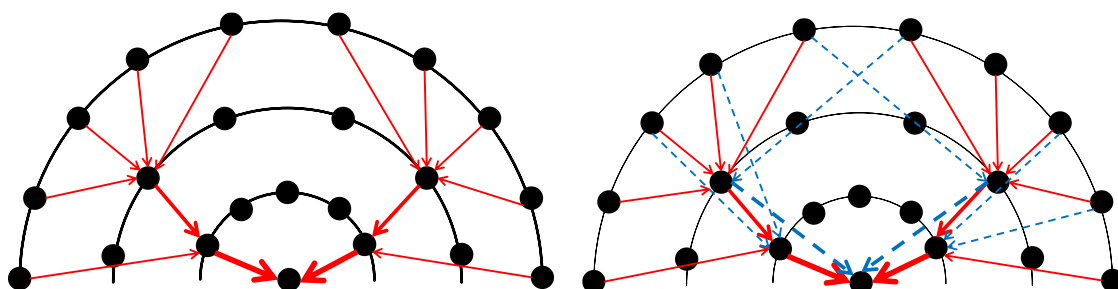


図 6-8 シナリオ 5 の結果 (左 50%, 右 90%)

経路する保管場所はネットワークにおけるハブに該当する．これを踏まえ，表 6-1 と図 6-4～6-8 についてまとめると以下ようになる．シナリオ 1 では，規模の経済が働きハブ関連費用（保管場所初期設置費用，保管積替費用）も小さいため制約条件の強靱性が 0 でも多くのハブが形成されており，その階層は 2 層である．制約条件の強靱性が大きくなるとハブの数が増え，70%以上では代替リンクも必要となる．このことはハブの数が 5 を超えるとひとつのハブに集約される輸送量が単位重量当たりの輸送費用原単位を最低レベルにする輸送量の閾値に達しないことに起因している．すなわち，規模の経済の発揮に必要な集約量との関係から，同一階層形成されるハブの数には限界があり，この場合は強靱性を高めるためには代替リンクが必要となる．シナリオ 2 では，規模の経済が働かないため制約条件の強靱性が 0 の場合はハブが形成されないが，制約条件の強靱性が大きくなるとハブの数を増やすことでハブが受け持つ機能を分散し，ハブの機能停止に対するネットワーク全体の強靱性を高めている．シナリオ 3 では，制約条件の強靱性が大きくなってもハブの数は大きく増えず，代替リンクを張ることで強靱性を高めている．シナリオ 2 と 3 の違いはハブ関連費用であり，ハブ関連費用と代替リンク設置費用の相対的關係において，前者が卓越する場合代替リンクを増やすことで，後者が卓越する場合ハブを増やすことで強靱性を高めることが分かる．シナリオ 4 では，シナリオ 2 と 3 の中間のような様相であり，規模の経済が働くため制約条件の強靱性が大きくなるにつれハブ形成可能性は高まるが，ハブ関連費用も高いため，シナリオ 1 ほど多くのハブは形成されず，ハブの階層も 1 層である．シナリオ 5 では，規模の経済がシナリオ 1 よりも強く働く場合であるが，ハブ

関連費用が大きいいためハブの数はシナリオ 1 よりも少ない。ただし、ハブの階層は再び 2 層となっている。

また、全てのシナリオの R の値から、ハブの数が少ない単純なネットワークの場合、代替リンクが多くなると効率性の欠如が顕在化して R が減少する一方、ハブの数の多い複雑なネットワークの場合、代替リンクが増えるにつれて代替性の増加が評価されて R の値が増加していることが分かる。ただし、ハブが二層の場合は、代替リンク含めてもネットワークの密度が小さいことが評価され、 R の値は一層の場合よりも小さくなっている。

これらの結果から以下のことが導かれる。

- ・規模の経済が働く場合、ハブを経由することで輸送量が大きくなるため、規模の経済による効果がハブ関連費用（初期費用、保管積替費用、ハブ経由に伴う輸送距離増加）を凌駕する限りハブが形成される。
- ・ロットの小ささという静脈物流の特徴により規模の経済が働かない場合、強靱性を制約条件に加えなければ当然ハブは形成されないが、強靱性を制約条件に加えると、ハブを形成するか代替リンクを張るかのいずれかの方法で強靱性を高めることになる。どちらの方法が選択されるかは、ハブ関連費用と代替リンク設置費用に依存し、前者が卓越する場合、すなわちロットの小ささと不確実性のために多くの保管を必要とする場合やハブ経由に伴い迂回距離が大きな場合はハブが形成されにくく、代替リンクにより強靱性を高める必要がある。
- ・規模の経済が働けば、強靱性を制約条件にするかどうかに関わらずハブを持つネットワーク構造が志向される。同一階層内に複数のハブを持つ場合、強靱性を持たせるために代替リンクを必要としないか、少ない代替リンクで済む。ハブ関連費用の大きさによりハブが形成されにくい場合や規模の経済の発揮に必要な集約量の観点からハブの数が上限に達している場合には代替リンクを張ることで強靱性を高める必要があるが、ハブの数が多いほど必要な代替リンク数が少なくなる。これらのことは強靱性を意図することなく効率性の追求により形成されるネットワーク構造に付加的に少数の代替リンクでノード間を連結させるだけで、容易に強靱なネットワーク構造にできることを示唆している。
- ・動脈物流ネットワークは規模の経済によりハブが形成されやすく、効率性を追求することで同時に強靱なネットワーク構造となりやすいが、静脈物流ネットワークの場合、ロットの小ささと不確実性の特徴から規模の経済が相対的に働きにくいいため、強靱性に関するこのメカニズムが働きにくい。
- ・強靱性と効率性のバランスを示す指標である R による評価については、同階層に多くの階層を持つ場合やハブの階層が多くなる場合、代替リンクがない状態では密度の低さから高く評価されないが、代替リンク数が増えネットワークの密度が増すことにより評価が高まる。一方、静脈物流で相対的に実現しやすいノード数の少ない単純な構造の場合は、代替リンクが増えると冗長な構造と評価され R は低下する。ハブを同じ階層内で増

やすこと、あるいは階層を増やすことで代替リンクを多く張らずに強靱性を高めた構造は R の値としては決して高くない。このように R については、ランダムな機能停止に対する強靱性を評価していることになる。したがって、本シミュレーションで制約条件とした強靱性と R の両面から評価することで、ノードのランダムな機能停止とハブの機能停止の両面を評価できることになる。

以上のシミュレーションにより、動脈物流ネットワークと比較した静脈物流ネットワークの構造的な強靱性についての一般的な傾向が把握できたため、より実証的なシミュレーションに発展させる。ここでは、静脈物流の特徴のひとつでもある廃棄物を運搬する場合の割高な陸上輸送費用を想定し、安価な海上輸送のコストメリットが顕在化する場合のネットワーク構造の変化についても検証する。

シミュレーションの対象として、図 6-9 に示すような、50 の需要（供給）ゾーン、10 の保管積替ゾーン（そのうちひとつはプラントに併設）が存在する 1 マス 10km×10km の正方形のゾーンからなる空間を考える。

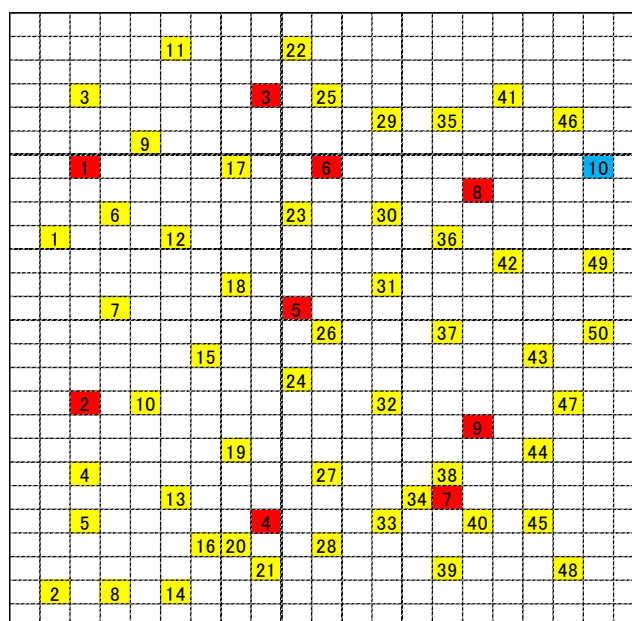


図 6-9 各ゾーンの設定

ゾーン間の距離はゾーンの中心間の直線距離とする。ただし、保管積替ゾーン 6 及び 7 とプラント（=保管積替ゾーン 10）を繋ぐ経路は海上輸送を想定し、それぞれの間の距離は実際の直線距離よりも長い、700km、500km とする。黄色の色掛けが消費（供給）ゾーン、赤色の色掛けが保管積替ゾーン、青色の色掛けがプラントを示す。先のシミュレーションと同様に、必ず保管積替場所を経由して需要（供給）場所とプラントの間で輸送が行われるものとし、経由する保管積替場所の数（ハブの階層）は最大 2 とする。ここでは、パラメータである規模の経済の働き方、保管積替費用に加え、輸送費用原単位、供給量を変化

させることで、静脈物流の特徴であるロットの小ささ、不確実性、割高な輸送費用を表現することとする。

この物流システムにおいて、以下のシナリオでシミュレーションを実施する。ここでも需要（供給）量、保管費用、陸上輸送費用原単位を変動させることで、動脈物流と比較した静脈物流の特徴を表現する。海上輸送を考慮するため、モデルの目的関数を以下のように修正する。

$$\begin{aligned}
 \min \quad & IC \cdot \left(\sum_{j=1}^m w_j + \sum_{k=1}^n w_k \right) + TS \cdot \left\{ \sum_{i=1}^l \left(\sum_{j=1}^m q_{ij} + \sum_{k=2}^n q_{ik} \right) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=2}^n \sum_{s=1}^t r_{jks} \right\} \\
 & + TP \cdot \sum_{i=1}^l \left(\sum_{j=1}^m q_{ij} \cdot l_{ij} + \sum_{k=1}^n q_{ik} \cdot l_{ik} \right) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^t TP_s \cdot r_{jks} \cdot l_{jk} \\
 & + \sum_{k=1, k \neq M}^n \sum_{s=1}^t TP_s \cdot p_{ks} \cdot l_k + \sum_{s=1}^t TP_M \cdot p_{Ms} \cdot l_M \\
 & + RD_1 \cdot \sum_{i=1}^l \left\{ S_i \cdot \left(\sum_{j=1}^m x_{Sij} \cdot l_{ij} + \sum_{k=1}^n x_{Sik} \cdot l_{ik} \right) \right\} + RD_2 \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n S_r \cdot x_{Sjk} \cdot l_{jk}
 \end{aligned} \tag{6-159}$$

ただし、 TP_M ：海上輸送費用原単位（円/kg）である。

設定したシナリオとその結果を表 6-2 に示す。輸送費用は先のシミュレーションと同様に計算には GLPK を用い、使用データについては付録 2 に示す。表 6-2 には R を示しているが、これも前のシミュレーション同様、優先リンクに 9 割、代替リンク 1 割のフローを流すことを想定した場合の Kharrazi et al.²⁴⁾ が提案する強靱性指標である。代表的な結果を図 6-10 から図 6-18 に示す。

表 6-2 シミュレーションの条件と結果

条件						結果				
想定	需要	初期費用	保管費用	輸送費用	強靱性	総費用	ハブ数	階層数	代替リンク数	R
シナリオ1: 動脈物流	200	500000	30	30,25,20 海上は10	0%	37,281,596	5	1	0	0.3623
					50%	37,281,596	5	1	0	0.3623
					70%	37,281,596	5	1	0	0.3623
					90%	38,699,877	5	1	25	0.3665
シナリオ2: 規模の経済が大きく働き、保管関連費用も小さい場合の動脈物流	200	50000	10	30,20,10 海上は10	0%	24,262,849	7	2	0	0.3390
					50%	24,262,849	7	2	0	0.3390
					70%	24,262,849	7	2	0	0.3390
					90%	25,120,630	7	2	18	0.3548
シナリオ3: ロットが小さくて規模の経済が働かない静脈物流	200	500000	30	30	0%	41,597,928	1	1	0	0.3508
					50%	43,290,081	2	1	7	0.3662
					70%	43,923,141	3	1	12	0.3678
					90%	45,039,242	4	1	30	0.3670
シナリオ4: ロットが小さく、保管関連費用が大きく、陸上輸送費用が割高な場合の静脈物流	100	2500000	150	60,50,40 海上は10	0%	42,370,771	2	1	0	0.3671
					50%	42,526,713	2	1	5	0.3666
					70%	43,354,805	2	1	20	0.3641
					90%	45,047,874	2	1	40	0.3587

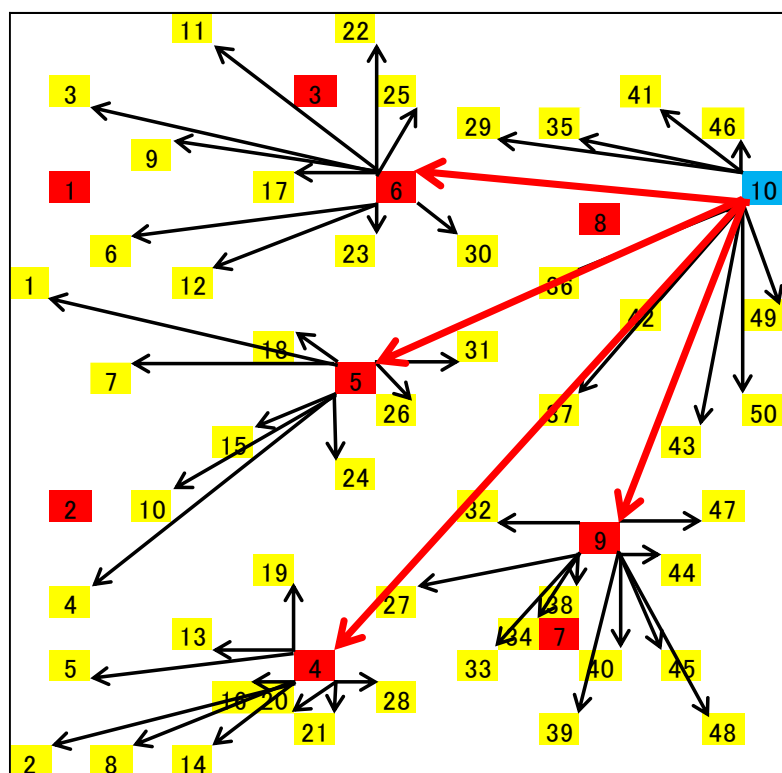


図 6-10 シナリオ 1 (強靱性 0%)

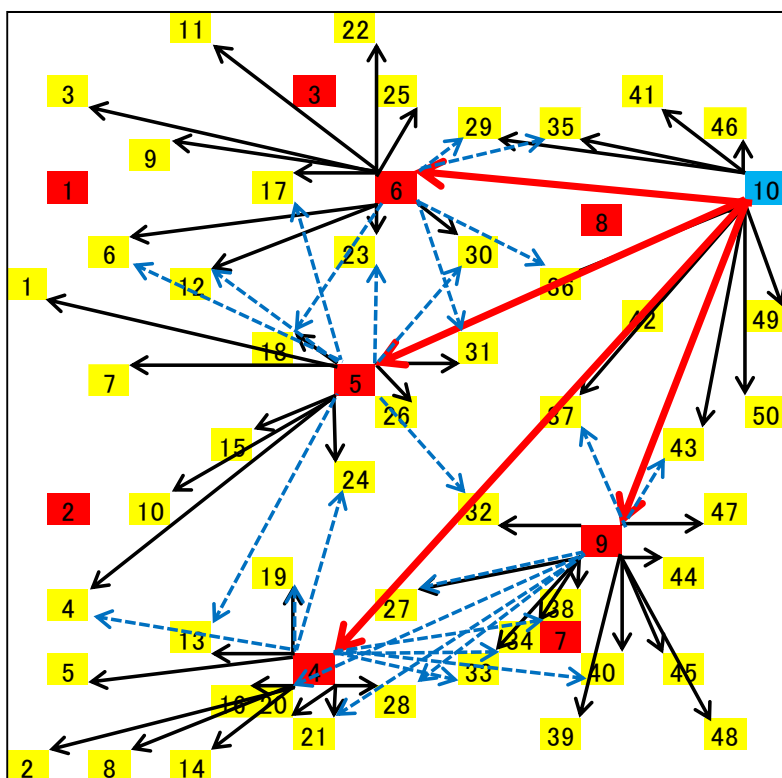


図 6-11 シナリオ 1 (強靱性 90%)

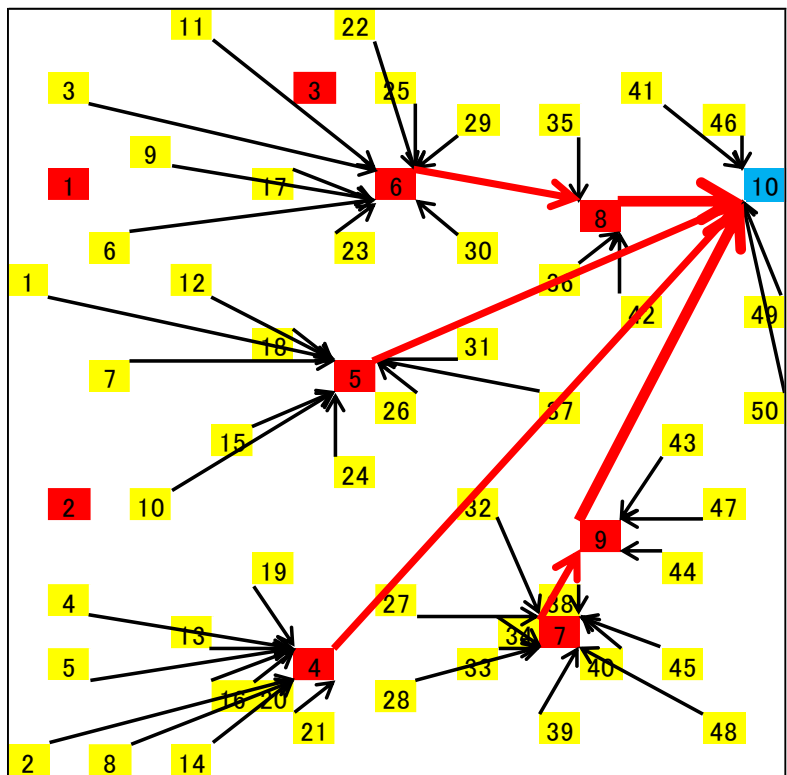


図 6-12 シナリオ 2 (強靱性 0%)

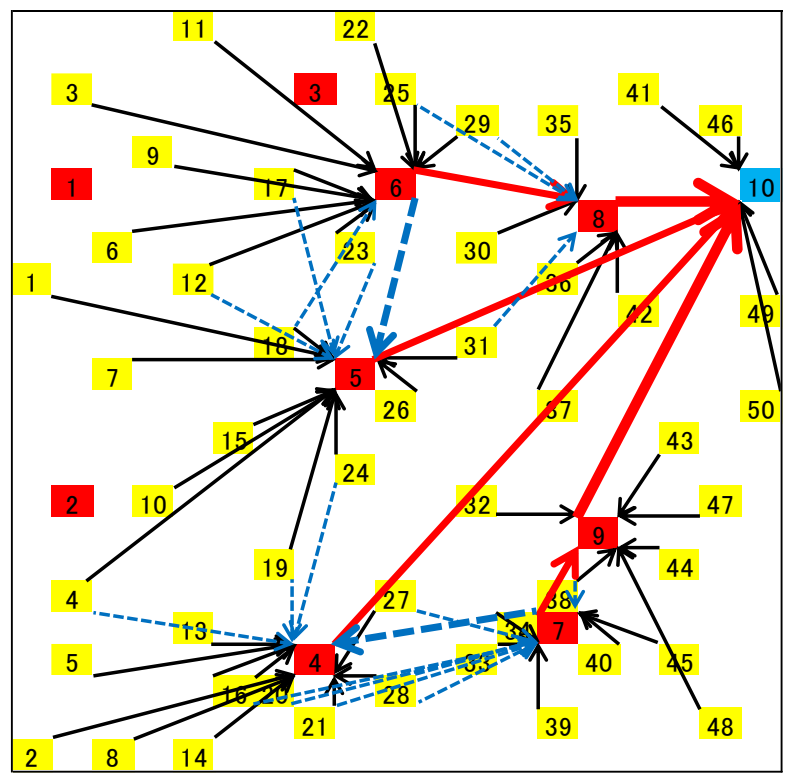


図 6-13 シナリオ 2 (強靱性 90%)

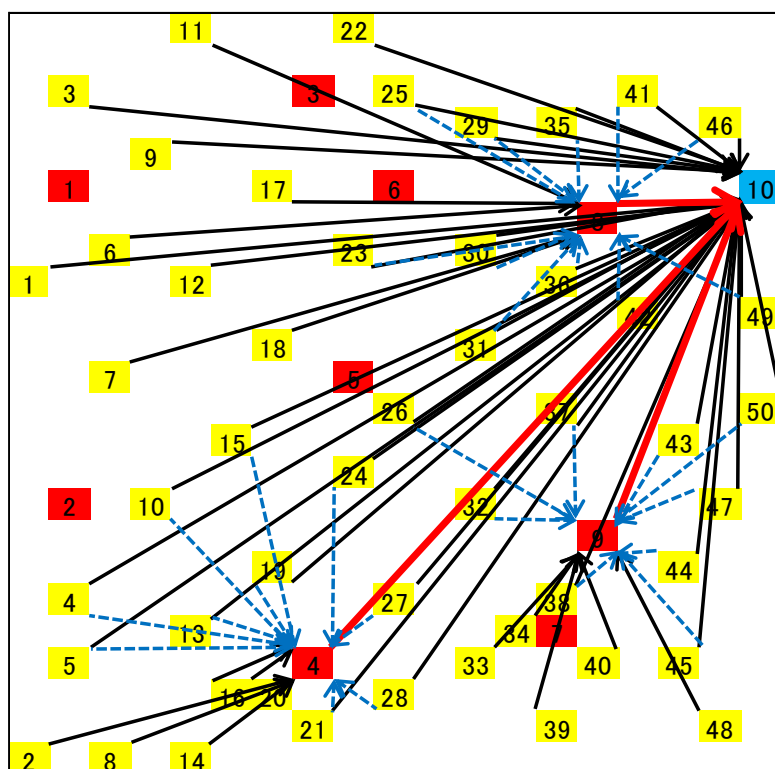


図 6-16 シナリオ 3 (強靱性 90%)

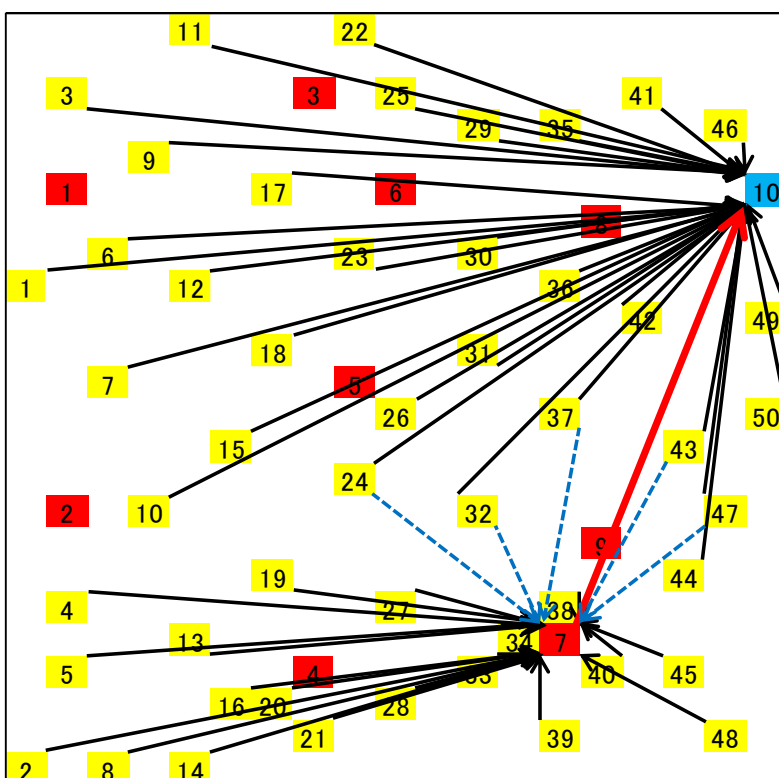


図 6-17 シナリオ 4 (強靱性 50%)

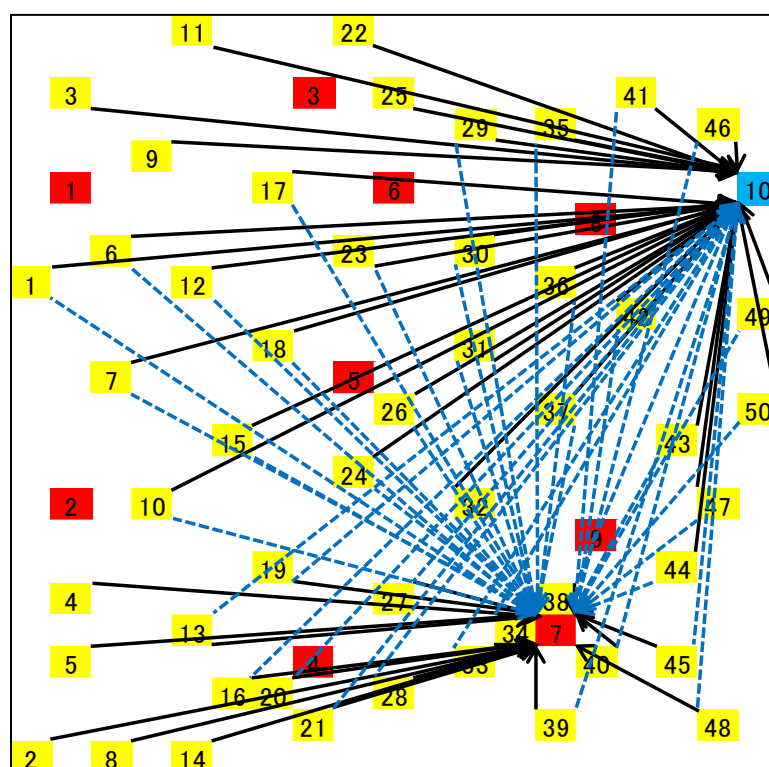


図 6-18 シナリオ 4 (強靱性 90%)

表 6-2 と図 6-10～6-18 についてまとめると以下ようになる。シナリオ 1 では規模の経済が働き、ハブ関連費用も大きくないため、多くのハブが形成されている。そのため強靱性を制約条件としても、70%までは構造は変わらず、代替リンクも必要ない。強靱性が 90% となれば代替リンクが必要となる。シナリオ 2 でも同様な傾向であるが、規模の経済の働き方が強く、ハブ関連費用がより小さいため、ハブの階層が 2 層になっている。シナリオ 3 では、規模の経済が働かないながらもハブ関連費用も大きくないため、シナリオ 1,2 程ではないがハブを複数持つことで強靱性を高めている。シナリオ 4 では、需要が少なく、ハブ関連コストが大きいいためハブの形成よりむしろ代替リンクを張ることで強靱性を高めている。また、このシナリオでは海上輸送が活用される結果となっている。陸上輸送費用原単位が割高になる条件としたことで海上輸送費用原単位の小ささが顕在化したためであるが、このことは静脈物流ネットワークでは動脈物流ネットワークではハブにならないノードがハブとなるというネットワーク構造の変化の可能性及びモーダルシフトが起こる可能性も示唆している。R についても先のシミュレーションと同様の傾向が見られ、ハブの数が少ない単純なネットワークの場合、代替リンクが多くなると効率性の欠如が顕在化して R が減少する一方、ハブの数の多い複雑なネットワークの場合、代替リンクが増えるにつれて代替性の増加が評価されて R の値が増加している。このように、より実証的なシミュレーションの結果からも、強靱性を制約条件に加える同一階層内に複数のハブを持つか、代替リンクを張ることで強靱性を高め、これには規模の経済の有無やハブ関連費用が影響すると

いう先のシミュレーションと同様の考察が可能となる。さらに静脈物流の特徴である割高な陸上輸送費用を想定することでモーダルシフトが行われ、別のメカニズムでハブ構造を持つ強靱なネットワークが形成される場合があることも示唆される。こうした強靱性は特定ノードの機能停止に対する強靱性を評価していると言え、ネットワーク全体の構造的な強靱性は R による評価が適しており、ハブを多く持つ複雑なネットワーク構造の場合はより多くの代替リンクを有している方が望ましいことになる。

以上のことから、静脈物流ネットワークの強靱性について、動脈物流ネットワークのそれと比較して次のことが言える。まず、物流ネットワークの一般論として、規模の経済が働く場合、ハブ構造を持つ強靱性の高いネットワークが形成されやすい。そのため、代替性を制約条件に入れなくても一定の強靱性を有したネットワーク構造となる。意図的に高い代替性を有するネットワーク構想にする場合でも、効率性を追及して形成されるネットワークに付加的に代替経路を設定することで強靱なネットワークとすることができる。静脈物流ネットワークの場合、小ロットであること、また不確実性を吸収するための保管費用の増大が規模の経済を阻害し、ハブを形成しにくいいため強靱なネットワークが形成されにくく、代替リンクを張って強靱性を高める場合でも多くの費用を要する可能性が高い。ただし、逆に陸上輸送費用が大きくなると、モーダルシフトが行われ、別のメカニズムでハブ構造を持つ強靱なネットワークが形成される場合がある。こうしたネットワークの強靱性の評価においては、強靱性を制約条件とすることと R による評価の両面から行うことで、ノードのランダムな機能停止と特定のノードへの攻撃の両面の強靱性を評価できることになる。

6.5 国際静脈物流ネットワークへの適用

前節までで、ロットの小ささや不確実性の存在という静脈物流の特徴により、規模の経済が働きにくい静脈物流ネットワークはハブ構造を有しにくく、その強靱性は動脈物流ネットワークと比較して相対的に低くなることについて述べてきた。一方で、ノードの機能停止時にもネットワークの機能の一定割合を維持し続けるという意味での強靱性を持たせることを制約条件としたネットワークの設計により、ハブ構造となることについても示してきた。すなわち、安価な保管により不確実性を吸収し、ロットを確保することで規模の経済を働かせることができれば、ハブが形成されることになり、ネットワークの構造的にも、ノードの機能停止時の機能維持の面からも、強靱なネットワークとすることができる。これに加え、第5章で述べたアウトプットの不確実性への対応、すなわち輸出代替性を持たせることができれば、より強靱な国際静脈物流ネットワークが設計できることになる。

本節では、強靱な国際静脈物流ネットワークの設計方法について具体的な検討を行う。題材としては、小型家電リサイクル制度における中間処理施設以降を海外で実施することを想定した場合の国際静脈物流ネットワークを用いる。すなわち、我が国で発生する使用

済小型家電が収集され、保管された後、海外に輸出されることを想定したシミュレーションにより、強靱な国際静脈物流ネットワークの設計方法を提案する。

以下の想定の下、前節で構築したモデルを発展させる。

- 全国で発生する使用済小型家電発生量を設定の上、人口比で各都道府県に割り振り、各都道府県の都道府県庁所在地を一次集積所とする。一次集積所に持ち込まれた使用済小型家電は最寄りの積出港まで陸送されるものとする。積出港については全国になるべく分散させることを意図して、釜石港、能代港、東京港、姫川港、三河港、神戸港、堺港、宇部港、三池港とする。各都道府県の陸送先となる積出港は付録3に示す。
- 積出港に持ち込まれた使用済小型家電は、当該積出港を1.5次集積所として保管後輸出されるか、別の1.5次集積所であるハブ港湾に向けてその都度海上輸送されるかのいずれかが選択されるものとする。したがって、後者の場合の積出港から1.5次集積所に向けた輸送では規模の経済は働かないものとする。1.5次集積所では保管され、ロットを確保した後輸出されるものとし、保管積替費用が発生するものとする。1.5次集積所以降の輸送については、ロットが確保されるため規模の経済が働くものとする。
- 海外の輸出先港湾3箇所を二次集積所とし、第5章の結果を踏まえ近距離の韓国、東南アジア方面、インド方面とする。積出港から二次集積所へのリンクの張られ方としては、図6-19に示すように、直行（ネットワーク上の距離1）、1.5次集積所となるハブ港湾の経由（ネットワーク上の距離2）、加えて輸出拠点となるハブ港湾の経由（ネットワーク上の距離3）のいずれかが選択されるものとする。ただし、積出港から輸出拠点となるハブ港湾へ直接輸送することも可能とする。韓国については近距離であるためいずれの積出港からも直接輸出が可能であるが、東南アジア、インド方面については大型船舶で輸送する必要があり、それに対応可能な港湾からのみしか輸出できない。そのため、これらの方面へは釜山港、国内の大港湾である東京港、神戸港に加え、地方部の港湾で静脈資源輸出拠点形成のための政策が実施されたと仮定した場合には、三河港と境港からの輸出も可能であるとし、これらを輸出拠点となるハブ港湾とする。釜山港、東京港、神戸港に比べ三河港、境港では保管積替費用が小さいものとする。実際、図6-20に示すとおり、地方部のリサイクルポートにおいては、都市部のリサイクルポートと比較して保管積替費用は小さい。
- アウトプットの不確実性に対応しうる強靱性として、第5章で述べたとおり輸出先を複数持つことが重要であるため、各輸出先に最低限輸出すべき割合を強靱性の一つの指標として設定することができるものとする。また、ハブ港湾が機能を停止した場合、別のハブ港湾への代替経路を持たない限り静脈資源の供給が不可能となるとともに、使用済小型家電が積出港等に滞留する。そのため、ハブ港湾へ向かうリンクに代替リンクが存在する場合には輸送機能を維持できるものとして、ネットワーク全体の何割の機能を維持すべきかを強靱性のもう一つの指標として設定できるものとする。

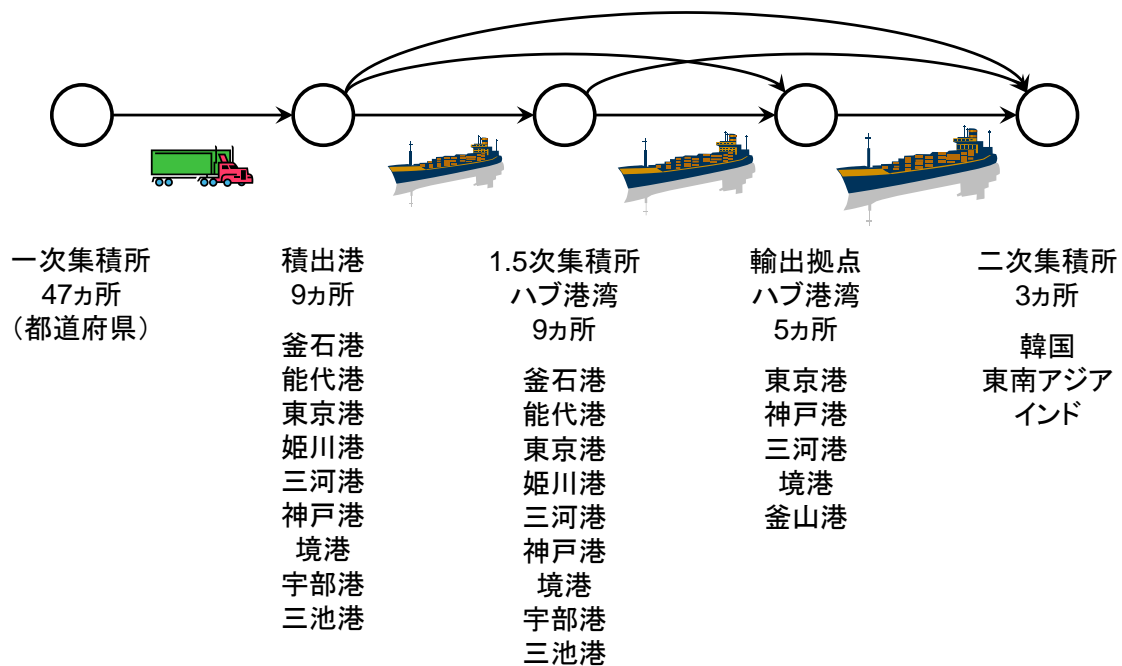
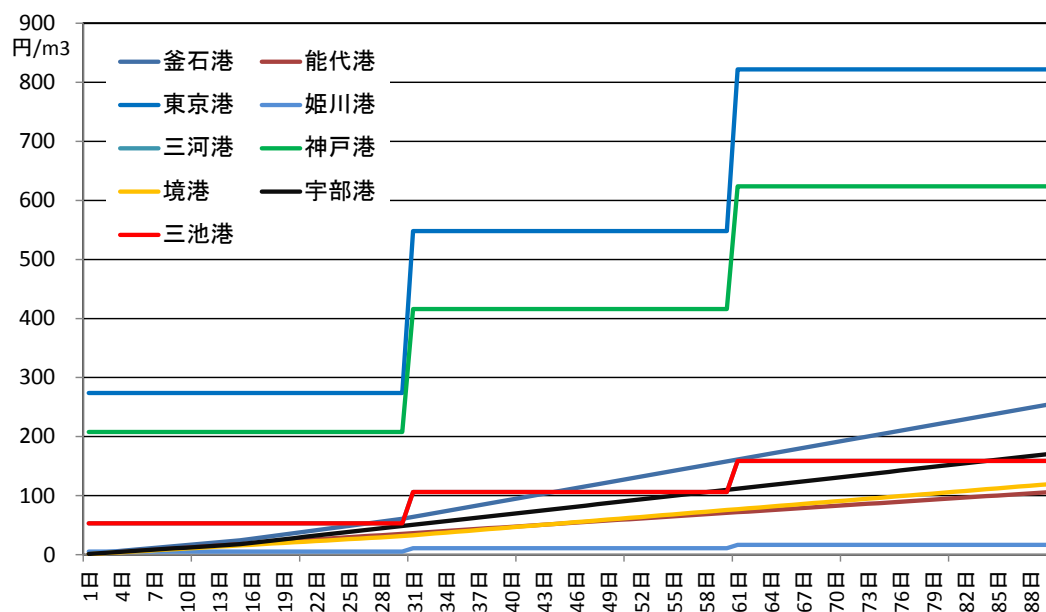


図6-19 輸送方法のイメージ



出所：各都県の港湾管理条例（最も安い野積場使用料）

図6-20 リサイクルポートにおける保管費用

ここでは、以下の3つのシナリオを想定し、それぞれで形成される国際静脈物流ネットワークを比較する。また、シミュレーションの対象を図6-21に示す。

シナリオ1：輸出先代替性とハブ機能停止時の強靱性を有するネットワーク構造を志向せず，輸出先は最寄りの韓国のみとするシナリオ．

シナリオ2：輸出先代替性とハブ機能停止時の強靱性を有するネットワーク構造を志向しつつも，東南アジア以遠に輸出可能な国内の静脈資源輸出拠点港湾は保管費用が割高な東京港と神戸港に限定され，リサイクルポートにおける効率的な保管も行われないシナリオ．

シナリオ3：政策により地方部のリサイクルポートで効率的な保管施策の推進と，大型船舶の利用が可能な静脈資源輸出拠点港湾としての三河港と堺港の整備を実施した上で，輸出先代替性とハブ機能停止時の強靱性を有するネットワーク構造を志向するシナリオ．

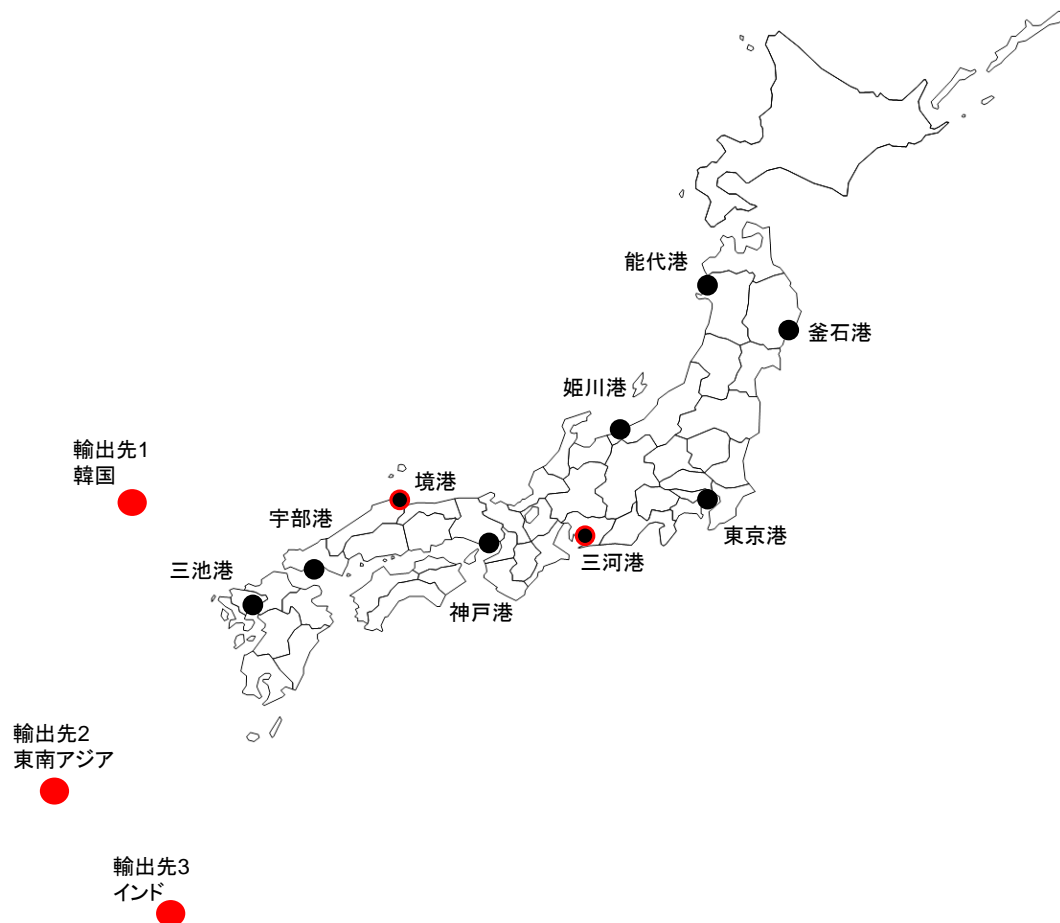


図6-21 シミュレーション対象

モデルについて，目的関数は(6-158)のように修正する．なお，(6-107)における l ， m ， n については $l=9$ （1～7 が地方部の釜石港，能代港，姫川港，三河港，堺港，宇部港，三池

港, 8,9 が都市部の東京港, 神戸港を指す), $m=9$ (1~7 が地方部の釜石港, 能代港, 姫川港, 三河港, 堺港, 宇部港, 三池港, 8,9 が都市部の東京港, 神戸港を指す), $n=5$ (三河港, 境港, 釜山港, 東南アジア, インドであり, 3 が釜山港, 4 が東南アジア, 5 がインドを指す) となり, (6-159)には具体的数値を記載している.

$$\begin{aligned}
\min \quad & IC_l \cdot \left(\sum_{j=1}^7 w_j + \sum_{k=1}^2 w_k \right) + IC_u \cdot \sum_{j=8}^9 w_j + IC_p \cdot \sum_{k=3}^3 w_k + IC_f \cdot \sum_{k=4}^5 w_k \\
& + TS_l \cdot \left\{ \sum_{i=1}^9 \left(\sum_{j=1}^7 q_{ij} + \sum_{k=1}^2 q_{ik} \right) + \sum_{j=1}^9 \sum_{k=1}^2 \sum_{s=1}^t r_{jks} \right\} + TS_u \cdot \left(\sum_{i=1}^9 \sum_{j=8}^9 q_{ij} + \sum_{j=1}^9 \sum_{k=1}^2 \sum_{s=1}^t r_{jks} \right) \\
& + TS_p \cdot \left(\sum_{i=1}^9 \sum_{k=3}^3 q_{ik} + \sum_{j=1}^9 \sum_{k=3}^3 \sum_{s=1}^t r_{jks} \right) + TS_f \cdot \left(\sum_{i=1}^9 \sum_{k=4}^5 q_{ik} + \sum_{j=1}^9 \sum_{k=4}^5 \sum_{s=1}^t r_{jks} \right) \\
& + TP \cdot \sum_{i=1}^9 \left(\sum_{j=1}^9 q_{ij} \cdot l_{ij} + \sum_{k=1}^5 q_{ik} \cdot l_{ik} \right) + \sum_{j=1}^9 \sum_{k=1}^5 \sum_{s=1}^t TP_s \cdot r_{jks} \cdot l_{jk} + \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^3 \sum_{s=1}^t TP_s \cdot p_{kls} \cdot l_k \\
& + RD_1 \cdot \sum_{i=1}^9 \left\{ S_i \cdot \left(\sum_{j=1}^9 x_{s_{ij}} \cdot l_{ij} + \sum_{k=1}^5 x_{s_{ik}} \cdot l_{ik} \right) \right\} + RD_2 \cdot \sum_{j=1}^9 \sum_{k=1}^5 S_r \cdot x_{s_{jk}} \cdot l_{jk}
\end{aligned} \tag{6-160}$$

制約条件については, 以下のとおり追加及び変更する.

$$x_{kl} \leq w_k, \quad \forall k, l \tag{6-161}$$

$$x_{kl} = \begin{cases} 1 & \text{ゾーン}k \text{ のハブと輸出先 } l \text{ にリンクがある場合} \\ 0 & \text{ゾーン}k \text{ のハブと輸出先 } l \text{ にリンクがない場合} \end{cases} \tag{6-162}$$

$$p_{kls} \leq M \cdot x_{kl}, \quad \forall j, k, s \tag{6-163}$$

$$\sum_{l=1}^3 x_{kl} \leq 2, \quad \forall k \tag{6-164}$$

$$\sum_{k=1}^5 \sum_{s=1}^t p_{kls} \leq 0.2 \cdot \sum_{i=1}^9 S_i, \quad \forall l \tag{6-165}$$

$$(6-127) \text{ の変更} \quad \sum_{i=1}^9 q_{ik} + \sum_{j=1}^9 \sum_{s=1}^t r_{jks} = \sum_{l=1}^3 \sum_{s=1}^t p_{ks}, \quad \forall k \tag{6-166}$$

$$(6-152) \text{ の変更} \quad \sum_{s=1}^t z p_{lks} = w_k, \quad \forall k, l \tag{6-167}$$

$$(6-153) \text{ の変更} \quad zp_{kls} = \begin{cases} 1 & \text{ハブ}k\text{と輸出先}l\text{の間の輸送量がレベル}s\text{の場合} \\ 0 & \text{ハブ}k\text{と輸出先}l\text{の間の輸送量がレベル}s\text{以外の場合} \end{cases} \quad (6-168)$$

$$(6-154) \text{ の変更} \quad p_{lks} \leq M \cdot zp_{lks}, \quad \forall k, l, s \quad (6-169)$$

ただし、 IC_l ：地方部での保管場所初期設置費用（円）、 IC_u ：都市部での保管場所初期設置費用（円）、 IC_p ：釜山港での保管場所初期設置費用（円）、 IC_f ：東南アジア、インドでの保管場所初期設置費用（円）、 TS_l ：地方部での保管積替費用原単位（円/kg）、 TS_u ：都市部での保管積替費用原単位（円/kg）、 TS_p ：釜山港での保管積替費用原単位（円/kg）、 TS_f ：東南アジア、インドでの保管積替費用原単位（円/kg）である。

追加された制約条件のうち、(6-163)は輸出拠点港湾から輸出できる輸出先は2つまでであることを示し、(6-164)は我が国から発生する使用済小型家電の最低2割以上を各輸出先に輸出するという輸出代替性の制約条件となっている。

各シナリオについて、何らかの施策や政策が実施された場合を検証するため表 6-3 に示すケース分けを行う。シナリオ 1 のケース 1 は現状を意図しており、港湾間連携が行われず積出港間で輸送量の集約は行われませんが、ケース 2 では港湾間の輸送が集約されることを想定する。シナリオ 2 のケース 1 では、輸出拠点港湾である釜山港で港湾コスト（ここでは保管積替費用）を低減するための経営努力が行われた場合、ケース 2 では東京港、神戸港で経営努力が行われた場合を想定している。シナリオ 3 のケース 1 では、リサイクルポート政策が深化され、地方部のリサイクルポートで保管積替費用が低減され、かつ三河港と境港には大規模岸壁が整備された場合を想定し、ケース 2 ではさらにリサイクル政策が統合され、使用済小型家電以外の静脈資源も一括して輸出される場合を想定する。

表6-3 シミュレーション条件と意図

シナリオ	ケース	発生量	保管	輸出先	強靱性	政策対象港	ケース設定の意図
1	1	2万トン	なし	1	0%	現状	現状
	2	4万トン	あり	1	0%	現状	港湾間(企業間)連携の効果検証
2	1	4万トン	あり	3	70%	釜山港	海外港湾での営業努力の効果検証
	2	4万トン	あり	3	70%	東京港、神戸港	国内港湾での営業努力効果検証
3	1	4万トン	あり	3	70%	三河港、境港	リサイクルポート政策深化の効果検証
	2	10万トン	あり	3	70%	三河港、境港	統合リサイクル政策+リサイクルポート政策深化の効果検証

以上の計 6 ケースについてシミュレーションを実施した。使用データは付録 4 に示す。港湾間距離については先行研究のデータ²⁸⁾やインターネット上で公開されているソフト²⁹⁾を参考に設定している。結果を図 6-22～図 6-27 に示す。特定のノードへの攻撃については、媒介中心性の高いノードへの攻撃に対して脆弱である²³⁾ことを踏まえ、各ノードの重要性を確認するために、図中には一次集積場所を含めたネットワークにおける各ノードの媒介中心性を示している。

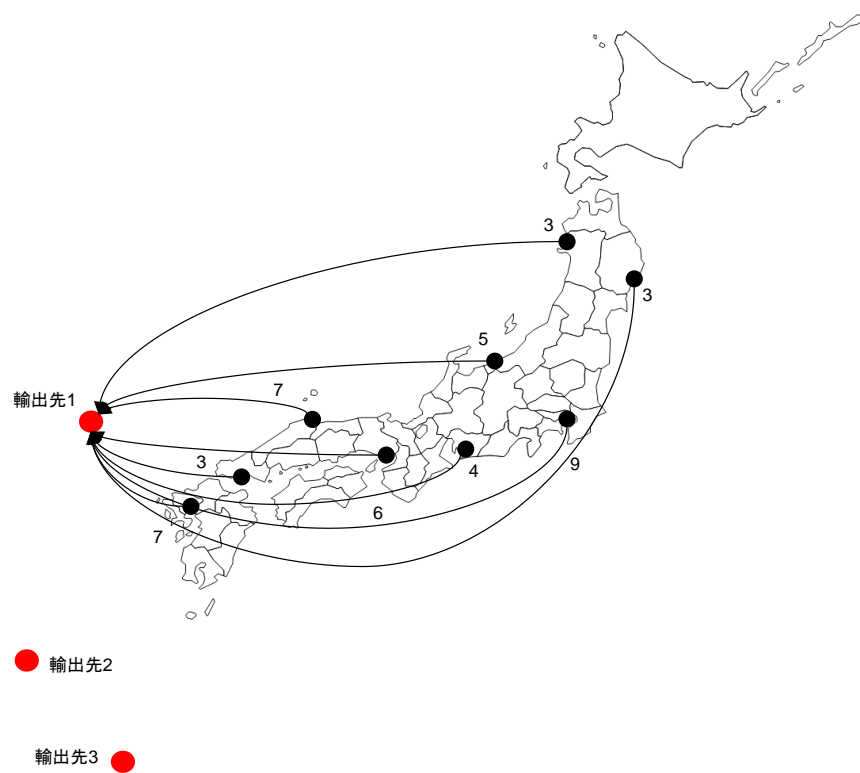


図 6-22 シナリオ 1, ケース 1 のネットワーク

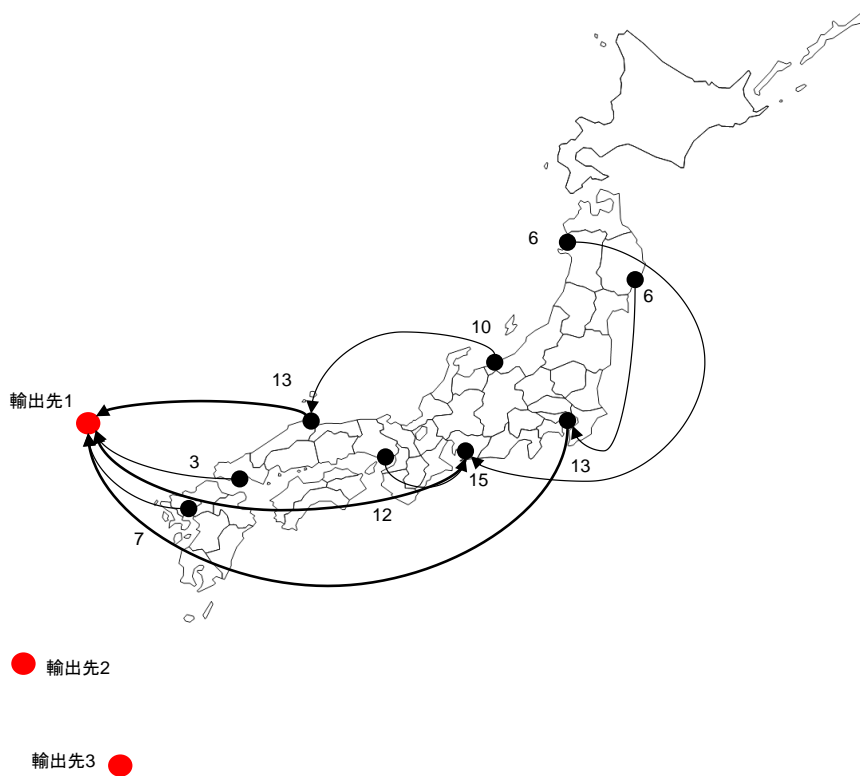


図 6-23 シナリオ 1, ケース 2 のネットワーク

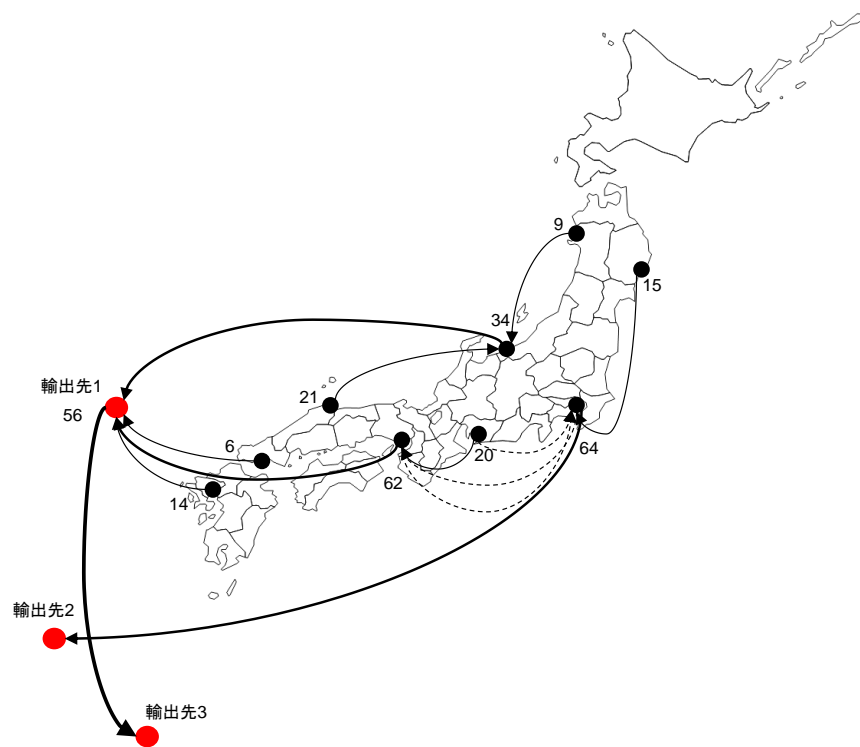


図 6-24 シナリオ 2, ケース 1 のネットワーク

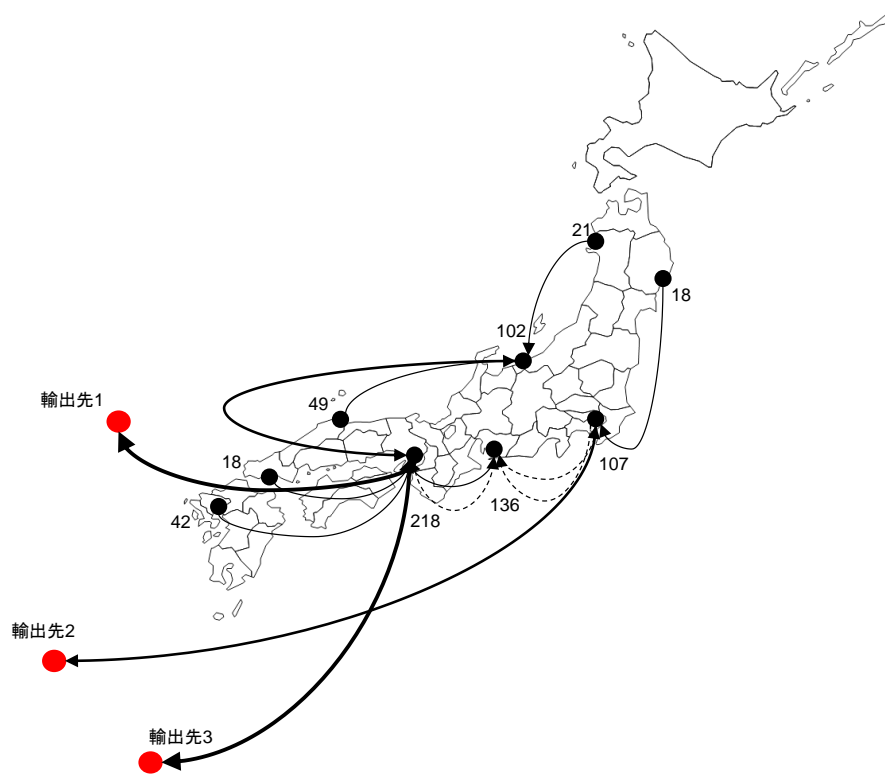


図 6-25 シナリオ 2, ケース 2 のネットワーク

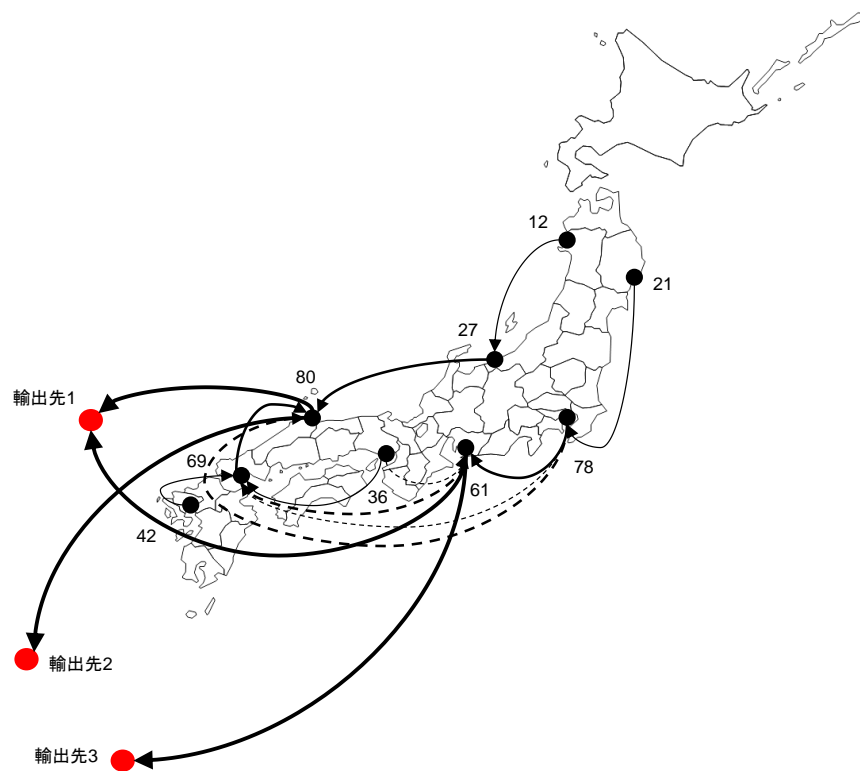


図 6-26 シナリオ 3, ケース 1 のネットワーク

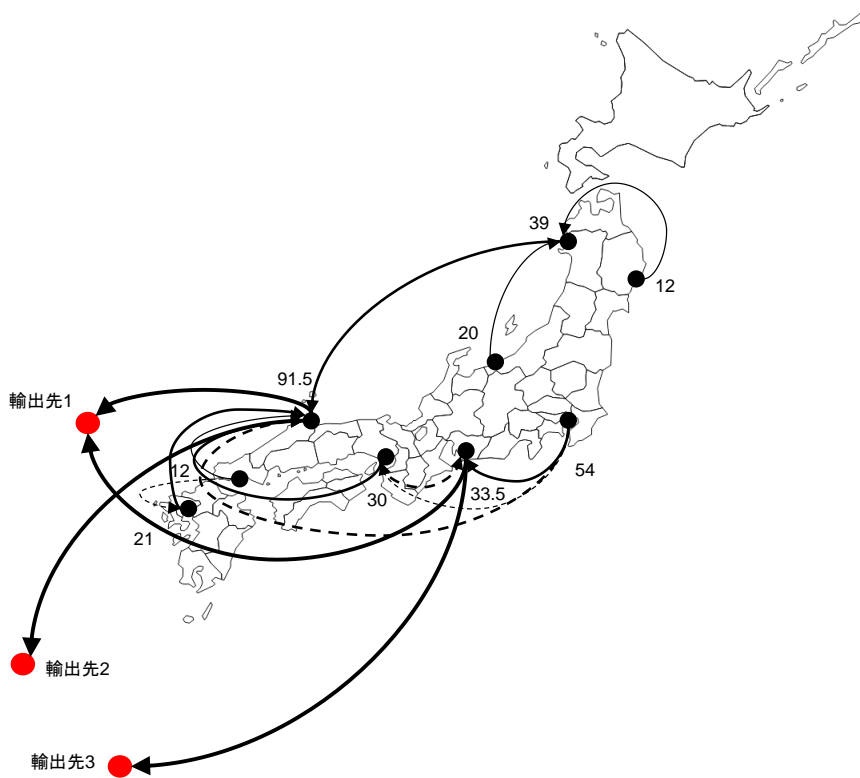


図 6-27 シナリオ 3, ケース 2 のネットワーク

シナリオ1のケース1では各積出港から釜山港に直行しているが、ケース2では東京港、三河港、境港がハブとなっている。シナリオ2のケース1では東京港がハブとなり東南アジアへの輸出拠点となっているが、神戸港と姫川港に集約された貨物が釜山港に輸送され、釜山港をハブとしてインドに輸送されている。ケース2では、輸出拠点ハブが釜山港から神戸港に移り、神戸港から釜山港とインドに輸出が行われている。両ケースとも代替経路については効果的に形成されている。シナリオ3のケース1では、三河港と境港が輸出拠点港湾となり、それぞれが2つの輸出先を持っている。輸出拠点港湾に至るまでにも東京港、姫川港、宇部港が中継ハブとなっている。ケース2では中継ハブの位置が変わっているが、概ね同様な結果となっている。両ケースとも代替経路については効果的に形成されている。全シナリオを通して、輸出拠点港や一部の中継ハブ港は高い媒介中心性を示しており、こういったノードの機能維持については強靱性の観点から十分に注意を払う必要がある。

結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ・シナリオ1について、図6-22が示すように、輸出先を一箇所としかつ保管によるロット確保を行わない場合は、最寄りの輸出先（本シミュレーションの場合韓国）に各積出港から直行する。現状の我が国の金属くずの輸出状況がこのような状況にある。一方、図6-27のように港湾間連携（企業間連携）が行われる場合、保管し規模の経済を発揮させることで効率的な輸送が可能となると同時に、ネットワーク構造的にも強靱な方向へと変化する。ただし、輸出先の代替性はなく、アウトプットの不確実性には課題が残る。
- ・シナリオ2について、ケース1は海外港湾の使用インセンティブが高まる場合であり、図6-28が示すとおり、ネットワーク構造的な面からも、重要ノード機能停止時の機能維持の面からも、輸出先代替性の面からも強靱なネットワークとなるが、ハブを海外に依存するという課題が残る。また、ケース2では図6-23に示すとおりハブを国内に形成できるが、割高な保管積替費用であるため、効率性の面からは課題が残る。
- ・シナリオ3について、いずれのケースでもネットワーク構造上も、重要ノード機能停止時の機能維持の面からも、輸出先代替性の面からも強靱なネットワークとなり、かつハブ機能を他国に依存していないことから、理想的な強靱な国際静脈物流ネットワークとなっている。今回のシミュレーションでは発生静脈資源量の違いはネットワーク構造に大きな変化はもたらししていないが、仮に規模の経済を享受するのに十分な量を確保できれば保管費用が低減されるため、より動脈物流ネットワークに近い形でハブ形成メカニズムが働くことになる。
- ・輸出拠点港や一部の中継ハブ港は高い媒介中心性を示しており、先行研究が示すとおりネットワークにおける重要ノードの特定には、媒介中心性を指標として活用することは有益であると考えられる。

以上の結果は、我が国で発生した使用済小型家電を海外でリサイクルする場合を想定した実証的なシミュレーションに基づくものである。ノード間の距離や発生量の観点からは

我が国を題材としたケーススタディとして位置づけられるが、制約条件の考え方や導かれる結論は十分に一般性を有している。すなわち、ノード間の距離、発生量、その国の目指すべき社会システムに合わせて制約条件の中で設定したパラメータを変動させれば、世界各国で使用可能となる。例えば、周辺に輸入国を多く抱え輸出代替性をそれ程重視する必要がない国であれば、(6-165)の制約式で右辺の数値を小さくすることや、制約条件自体を無視することで対応できる。

また、輸出拠点港への貨物の集約の仕方には、本来であればハブ&スポーク方式と、多港寄りの両パターンが存在する。現状ではバルク船による静脈資源の輸送は、輸出であっても移出であっても一港寄り、すなわち積出港から積卸港までポイント to ポイント方式となっており³⁰⁾、Yoon が指摘するように³¹⁾、静脈物流では共同輸送も行われていない。すなわち、現状を踏まえれば規模の経済の発揮を目指す場合ハブ&スポーク方式が志向される可能性が高い。一方で、経済効率性の観点からは 6.3.3 で示した規模の経済が強く働きハブ関連費用が小さい場合は多港寄り方式が志向されることになる。多港寄りはハブの階層が多層となっているネットワークであるが、海上輸送の場合は事実上一つ先、あるいはそれ以上先の階層のハブへ潜在的な代替リンクが張られていることになるため、ノードへの攻撃にも強靱であり、強靱性の観点からも多港寄りは望ましいと考えられる。ただしこういったことは、インフラ整備状況とも関係してくることに留意が必要であろう。当然、こういった議論についても世界各国で必要となるものである。

6.6 まとめ

本章では、動脈物流ネットワークと比較した静脈物流ネットワークの強靱性について検証した。物流という経済活動である以上、効率性の追及は前提条件であるとし、いかに経済効率的に強靱なネットワーク構造を形成しうるかという点からアプローチした。

まず、ネットワーク構造から見た強靱性は、先行研究によりスケールフリー性、スモールワールド性を有しているかどうか等により評価することが明らかになっているため、本研究では特にハブ形成の状況に注目して静脈物流ネットワークの強靱性について評価した。ハブの形成可能性を説明した経済モデルとそれを基にしたシミュレーションモデルにより、ハブの形成可否、位置、階層は密度の経済と距離の経済のバランスの中で決定されることを確認し、静脈物流の特徴である動脈物流と比較した相対的なロットの小ささ、あるいはロット確保と不確実性吸収のための保管がハブの形成可能性を低下させ、動脈物流ネットワークと比較して構造的な強靱性が小さくなりやすいことを明らかにした。

さらに、ハブを有するネットワークはハブへの攻撃に対しては脆弱であるが、ハブへ向かうリンクに代替リンクが存在する場合には輸送機能を維持できるものとして、ハブの機能停止時にネットワーク全体の一定割合の機能を維持できることを強靱性として考え、強靱性を制約条件としたシミュレーションモデルでも、規模の経済が働けば強靱なネットワ

ーク構造となりやすく、また高い程度の機能を維持するための代替経路が必要な場合でも、ハブを有した構造が経済的となることが明らかとなった。このように静脈物流ネットワークはその特徴から動脈物流ネットワークと比較して強靱性を持ちにくい。ただし、静脈物流の特徴である輸送費用の増加がモーダルシフトを誘引し、このことが強靱なネットワーク構造に繋がる可能性についても示した。

さらにこれら結果について小型家電リサイクル制度をケーススタディとした国際静脈物流ネットワークに適用し、ネットワーク全体の一定割合の機能を維持できる強靱性、輸出代替性を制約条件としたシミュレーションを実施した。その結果として、地方部の安価な保管を可能とする地方部のリサイクルポートを静脈資源の輸出拠点港とすることで、ハブの国内確保を可能とする目指すべき国際静脈物流ネットワークを提示している。

我が国の国際静脈物流ネットワークを論じる場合、必然的に海上輸送が必要となる。安価な保管コストとモーダルシフトの両面から、強靱かつ効率的なネットワーク構造を目指すためには、保管コストの安い地方部の港湾をハブとすることが解となる。地方部の港湾における保管コストは都市部の港湾よりも低いため、ハブとなる地方部の港湾に海上輸送で静脈資源を輸送し、ロットが確保できるまで安価に保管した上で、一括大量輸送が実現できるというメリットを有している。このように、国際静脈物流ネットワークにおける地方部の港湾のハブとしての活用は、効率性の面からも強靱性の面からも望ましい。

第6章付録

付録1

項目	値
IC	シナリオ1,2: 1,000 シナリオ3,4,5: 10,000
TS	シナリオ1,2: 10 シナリオ3,4,5: 100
TP	30
TP_s	シナリオ1,4: $TP_1=30$ (輸送量200未満), $TP_2=25$ (輸送量200以上400未満), $TP_3=20$ (輸送量400以上) シナリオ2,3: $TP_1=TP_2=TP_3=20$ シナリオ5: $TP_1=30$ (輸送量200未満), $TP_2=20$ (輸送量200以上400未満), $TP_3=10$ (輸送量400以上)
RD_1	1
RD_2	1
S_i	全て100
S_t	100

なお, I_{ij} , I_{ik} , I_{jk} については以下のとおり.

		保管場所(中央の半円)						保管場所(内側の半円)					プラント
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	
発生場所	1	11.87	21.25	31.46	40.13	46.35	49.59	21.92	26.46	31.62	36.06	38.98	30.00
	2	10.23	14.58	24.73	34.57	42.51	47.78	20.23	23.25	28.19	33.23	37.22	30.00
	3	14.58	10.23	17.80	28.16	37.48	44.59	20.23	20.89	24.79	29.93	34.72	30.00
	4	21.25	11.87	11.87	21.25	31.46	40.13	21.92	20.00	21.92	26.46	31.62	30.00
	5	28.16	17.80	10.23	14.58	24.73	34.57	24.79	20.89	20.23	23.25	28.19	30.00
	6	34.57	24.73	14.58	10.23	17.80	28.16	28.19	23.25	20.23	20.89	24.79	30.00
	7	40.13	31.46	21.25	11.87	11.87	21.25	31.62	26.46	21.92	20.00	21.92	30.00
	8	44.59	37.48	28.16	17.80	10.23	14.58	34.72	29.93	24.79	20.89	20.23	30.00
	9	47.78	42.51	34.57	24.73	14.58	10.23	37.22	33.23	28.19	23.25	20.23	30.00
	10	49.59	46.35	40.13	31.46	21.25	11.87	38.98	36.06	31.62	26.46	21.92	30.00
保管場所 (中央の半円)	1	-	-	-	-	-	-	10.66	14.74	19.91	24.57	27.98	20.00
	2	-	-	-	-	-	-	10.66	10.66	14.74	19.91	24.57	20.00
	3	-	-	-	-	-	-	14.74	10.66	10.66	14.74	19.91	20.00
	4	-	-	-	-	-	-	19.91	14.74	10.66	10.66	14.74	20.00
	5	-	-	-	-	-	-	24.57	19.91	14.74	10.66	10.66	20.00
	6	-	-	-	-	-	-	27.98	24.57	19.91	14.74	10.66	20.00
保管場所 (内側の半円)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.00
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.00
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.00
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.00

付録2

項目	値
IC_i	シナリオ1,3: 500,000 シナリオ2: 50,000 シナリオ4: 2,500,000
TS	シナリオ1,3: 30 シナリオ2: 10 シナリオ4: 150
TP	シナリオ1,2,3: 30 シナリオ4: 60
TP_s	シナリオ1: $TP_1=30$ (輸送量1トン未満), $TP_2=25$ (輸送量1トン以上2トン未満), $TP_3=20$ (輸送量2トン以上) シナリオ2: $TP_1=30$ (輸送量1トン未満), $TP_2=20$ (輸送量1トン以上2トン未満), $TP_3=10$ (輸送量2トン以上) シナリオ3: $TP_1=TP_2=TP_3=30$ シナリオ4: $TP_1=60$ (輸送量1トン未満), $TP_2=50$ (輸送量1トン以上2トン未満), $TP_3=40$ (輸送量2トン以上)
TP_M	10
RD_1	5
RD_2	1
S_i	シナリオ1,2,3: 全て200 シナリオ4: 全て100
S_t	100

なお, l_{ij} , l_{ik} , l_{jk} については以下のとおり.

		保管場所									プラント
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
発生場所	1	31.62	70.71	92.20	138.92	85.44	94.87	170.29	141.42	161.25	172.63
	2	180.28	80.62	221.36	76.16	144.22	201.25	145.60	220.23	152.64	254.56
	3	30.00	130.00	60.00	189.74	114.02	85.44	208.09	136.01	191.05	172.63
	4	130.00	30.00	170.88	63.25	98.99	152.64	120.42	176.92	131.53	214.01
	5	150.00	50.00	189.74	60.00	114.02	170.00	120.42	191.05	136.01	220.23
	6	22.36	80.62	70.71	139.28	72.11	72.80	162.79	120.42	150.00	161.25
	7	60.83	41.23	102.96	102.96	60.00	92.20	136.01	130.00	130.00	170.88
	8	180.28	80.62	215.87	58.31	134.16	193.13	126.49	208.09	136.01	240.83
	9	22.36	111.80	44.72	164.92	86.02	60.83	180.28	111.80	162.79	150.33
	10	101.98	20.00	136.01	64.03	64.03	116.62	107.70	142.13	110.45	180.28
	11	58.31	152.97	36.06	202.24	117.05	70.71	210.24	116.62	188.68	155.24
	12	42.43	76.16	76.16	123.69	50.00	58.31	142.13	101.98	128.06	133.42
	13	143.18	50.00	172.63	31.62	89.44	148.66	90.00	164.01	104.40	197.99
	14	182.48	85.44	212.13	42.43	126.49	186.82	107.70	197.23	120.42	228.04
	15	89.44	44.72	111.80	72.80	36.06	89.44	100.00	114.02	94.87	152.64
	16	164.92	72.11	191.05	22.36	104.40	164.92	82.46	174.93	100.00	206.16
	17	50.00	111.80	31.62	150.33	63.25	30.00	156.52	80.62	136.01	120.00
	18	70.71	70.71	80.62	100.50	22.36	58.31	114.02	89.44	100.00	130.00
	19	130.00	53.85	150.33	31.62	63.25	123.69	72.80	136.01	80.62	169.71
	20	167.63	78.10	190.26	14.14	101.98	162.79	72.80	170.00	94.34	200.00
	21	180.28	92.20	200.00	20.00	110.45	171.17	67.08	174.64	92.20	202.48
	22	86.02	165.53	22.36	200.25	110.00	50.99	196.47	84.85	170.88	111.80
	23	72.80	106.30	50.99	130.38	40.00	22.36	130.00	60.83	108.17	101.98
	24	114.02	70.71	120.42	60.83	30.00	90.55	70.71	100.00	63.25	134.54
	25	85.44	152.64	20.00	181.11	90.55	30.00	174.64	64.03	148.66	94.87
	26	106.30	85.44	101.98	82.46	14.14	70.00	80.62	78.10	64.03	114.02
	27	152.64	85.44	161.25	28.28	70.71	130.00	41.23	130.00	53.85	158.11
	28	178.89	100.00	191.05	22.36	100.50	160.00	44.72	158.11	70.71	183.58
	29	101.98	156.20	41.23	174.64	85.44	28.28	161.25	42.43	133.42	72.80
	30	101.98	128.06	64.03	136.01	50.00	28.28	120.42	31.62	94.87	72.80
	31	111.80	111.80	89.44	107.70	31.62	53.85	92.20	50.00	67.08	86.02
	32	141.42	100.00	136.01	64.03	50.00	101.98	44.72	94.87	31.62	122.07
	33	180.28	111.80	184.39	40.00	94.87	151.33	22.36	143.18	50.00	165.53
	34	178.04	117.05	177.20	50.99	89.44	143.18	10.00	131.53	36.06	152.32
	35	121.66	169.71	60.83	180.28	94.34	44.72	160.00	31.62	130.38	53.85
	36	123.69	138.92	84.85	134.16	58.31	50.00	110.00	22.36	80.62	58.31
	37	138.92	123.69	116.62	100.00	50.99	80.62	70.00	60.83	41.23	86.02
	38	176.92	123.69	170.88	63.25	86.02	136.01	10.00	120.42	22.36	139.28
	39	208.09	138.92	208.81	63.25	120.83	174.64	30.00	160.31	60.83	177.20
	40	198.49	139.28	193.13	70.00	108.17	158.11	14.14	140.00	40.00	155.24
	41	143.18	191.05	80.00	196.98	114.02	67.08	171.17	41.23	140.36	42.43
	42	143.18	152.32	106.30	136.01	72.80	72.11	101.98	31.62	70.71	50.00
	43	170.00	151.33	142.13	114.02	82.46	106.30	67.08	72.80	36.06	82.46
	44	192.09	151.33	174.93	94.87	100.00	138.92	36.06	111.80	22.36	121.66
	45	212.13	158.11	201.25	90.00	120.42	165.53	31.62	141.42	44.72	151.33
	46	161.25	200.00	100.50	197.23	120.42	82.46	164.92	42.43	133.42	22.36
	47	188.68	160.00	164.01	111.80	98.49	128.06	56.57	94.87	31.62	100.50
	48	233.45	174.64	223.61	101.98	142.13	187.88	50.00	162.79	50.00	170.29
	49	174.64	180.28	130.38	155.56	101.98	98.49	111.80	50.00	80.62	40.00
	50	183.85	172.63	148.66	136.01	100.50	114.02	86.02	72.11	56.57	70.00
保管場所	1	0.00	100.00	67.08	161.55	92.20	80.00	184.39	130.38	170.29	170.00
	2	100.00	0.00	143.18	78.10	80.62	128.06	126.49	158.11	130.38	197.23
	3	67.08	143.18	0.00	180.00	90.55	36.06	180.28	80.62	156.52	700.00
	4	161.55	78.10	180.00	0.00	90.55	151.33	60.83	156.52	80.62	186.01
	5	92.20	80.62	90.55	90.55	0.00	60.83	94.34	78.10	78.10	116.62
	6	80.00	128.06	36.06	151.33	60.83	0.00	145.60	50.99	120.83	90.00
	7	184.39	126.49	180.28	60.83	94.34	145.60	0.00	130.38	31.62	500.00
	8	130.38	158.11	80.62	156.52	78.10	50.99	130.38	0.00	100.00	41.23
	9	170.29	130.38	156.52	80.62	78.10	120.83	31.62	100.00	0.00	117.05

付録 3

	発生量(トン)			積出港までの距離(km)								
	2万トン	4万トン	10万トン	釜石港	能代港	東京港	姫川港	三河港	神戸港	境港	宇部港	三池港
北海道	863	1,725	4,313	714	567	1,151	1,197	1,430	1,660	1,845	2,070	2,272
青森県	216	432	1,081	298	146	730	776	1,009	1,239	1,424	1,648	1,851
岩手県	210	419	1,048	122	187	554	600	833	1,063	1,248	1,472	1,675
宮城県	366	732	1,829	231	304	380	427	659	889	1,074	1,299	1,502
秋田県	172	343	858	225	64	624	451	902	914	1,098	1,323	1,526
山形県	184	369	922	289	363	393	439	671	902	1,086	1,311	1,514
福島県	319	639	1,597	309	382	302	348	581	811	995	1,220	1,423
茨城県	464	928	2,320	487	560	124	403	412	646	864	1,079	1,282
栃木県	314	629	1,572	474	548	143	347	422	656	874	1,089	1,292
群馬県	314	628	1,569	570	644	140	265	386	592	810	1,025	1,228
埼玉県	1,121	2,242	5,605	576	650	42	339	320	554	772	987	1,190
千葉県	967	1,934	4,834	633	707	47	397	341	575	793	1,008	1,211
東京都	2,031	4,062	10,154	593	667	21	355	295	529	747	962	1,165
神奈川県	1,408	2,816	7,040	630	703	29	366	282	516	734	949	1,152
新潟県	373	745	1,863	492	346	347	169	522	632	816	1,041	1,244
富山県	171	342	856	735	589	450	86	323	393	578	802	1,005
石川県	182	365	912	788	643	503	140	326	331	515	740	943
福井県	126	253	632	872	727	527	224	252	257	442	666	869
山梨県	136	272	679	709	783	136	278	229	454	672	887	1,090
長野県	338	676	1,689	699	546	257	122	325	471	689	904	1,107
岐阜県	326	652	1,631	963	796	400	293	125	202	420	635	838
静岡県	592	1,185	2,961	771	844	191	369	133	367	585	800	1,003
愛知県	1,159	2,318	5,796	943	812	364	316	89	203	421	636	839
三重県	291	582	1,456	1,003	894	424	391	150	172	390	605	808
滋賀県	219	438	1,096	1,035	889	460	386	186	86	304	519	722
京都府	411	823	2,057	1,047	902	472	399	199	79	297	512	715
大阪府	1,382	2,764	6,911	1,085	939	510	436	236	40	271	486	689
兵庫県	875	1,751	4,377	1,112	967	537	462	264	9	257	460	663
奈良県	219	438	1,095	1,074	928	499	426	224	70	303	518	721
和歌山県	157	314	786	1,154	1,009	579	506	305	103	356	571	774
鳥取県	92	185	462	1,225	1,079	683	577	409	186	105	461	653
島根県	113	225	563	1,321	1,176	779	673	505	282	27	316	508
岡山県	304	608	1,519	1,228	1,082	675	579	402	171	163	318	521
広島県	448	896	2,241	1,375	1,230	823	727	550	319	208	159	362
山口県	228	456	1,139	1,517	1,371	950	868	676	445	308	39	234
徳島県	123	247	617	1,225	1,079	649	576	376	120	290	431	634
香川県	156	313	782	1,271	1,126	696	623	423	167	219	361	564
愛媛県	225	450	1,124	1,409	1,264	857	761	584	305	331	366	569
高知県	120	240	600	1,381	1,236	801	733	528	272	303	445	648
福岡県	792	1,584	3,961	1,656	1,510	1,104	1,007	830	599	462	139	88
佐賀県	133	267	667	1,707	1,561	1,155	1,058	881	650	513	190	39
長崎県	224	448	1,120	1,796	1,650	1,244	1,147	970	739	602	279	183
熊本県	284	568	1,420	1,753	1,607	1,201	1,104	927	696	559	236	63
大分県	187	374	936	1,704	1,559	1,152	1,056	878	647	511	187	190
宮崎県	177	354	886	1,936	1,791	1,384	1,288	1,110	879	743	419	246
鹿児島県	268	535	1,338	1,927	1,781	1,375	1,279	1,101	870	734	410	237
沖縄県	217	433	1,083	2,679	2,534	2,127	2,031	1,853	1,622	1,486	1,162	989
全国2万トンの場合の集積量				760	1,250	7,074	1,191	2,369	3,889	509	863	2,095
全国4万トンの場合の集積量				1,520	2,501	14,148	2,381	4,738	7,778	1,018	1,726	4,190
全国10万トンの場合の集積量				3,800	6,252	35,370	5,953	11,845	19,446	2,545	4,316	10,474

※色掛けが各都道府県から最寄りの積出港

付録 4

項目	値
IC_l	シナリオ1: ケース1 50,000 ケース2 500,000 シナリオ2: 500,000 シナリオ3: 100,000
IC_u	シナリオ1: ケース1 100,000 ケース2 1,000,000 シナリオ2: ケース1 1,000,000 ケース2 500,000 シナリオ3: 1,000,000
IC_p	シナリオ1: ケース1 80,000 ケース2 800,000 シナリオ2: ケース1 500,000 ケース2 800,000 シナリオ3: 800,000
IC_f	シナリオ1: ケース1 50,000 ケース2 500,000 シナリオ2: 500,000 シナリオ3: 100,000
TS_l	シナリオ1: ケース1 5 ケース2 50 シナリオ2: 50 シナリオ3: 10
TS_u	シナリオ1: ケース1 5 ケース2 50 シナリオ2: ケース1 100 ケース2 50 シナリオ3: 100
TS_p	シナリオ1: ケース1 5 ケース2 80 シナリオ2: ケース1 50 ケース2 80 シナリオ3: 80
TS_f	シナリオ1: ケース1 5 ケース2 50 シナリオ2: 50 シナリオ3: 10
TP_s	シナリオ1,3: 30 シナリオ2: 10 シナリオ4: 150
TP	0.7
TP_s	シナリオ1 ケース1: $TP_1=0.7$ (輸送量3万トン未満) $TP_2=0.4$ (輸送量3万トン以上5万トン未満), $TP_3=0.3$ (輸送量5万トン以上10万トン未満), $TP_4=0.2$ (輸送量10万トン以上15万トン未満), $TP_5=0.1$ (輸送量15万トン以上) 上記以外: $TP1=0.7$ (輸送量3千トン未満) $TP2=0.4$ (輸送量3千トン以上5千トン未満), $TP3=0.3$ (輸送量5千トン以上1万トン未満), $TP4=0.2$ (輸送量1万トン以上1.5万トン未満), $TP5=0.1$ (輸送量1.5万トン以上)
TP_M	10
RD_1	0.01
RD_2	0.01
S_i	付録3のとおり
S_t	4,000

なお, I_{ij} , I_{ik} , I_{jk} については以下のとおり.

単位: km												
	釜石港	能代港	東京港	姫川港	三河港	神戸港	境港	宇部港	三池港	釜山港	東南アジア	インド
釜石港	0	452	573	776	758	1009	1146	1291	1542	1461	-	-
能代港	452	0	1009	340	1194	1365	718	1003	1191	1057	-	-
東京港	573	1009	0	1333	328	579	1207	861	1112	1062	5608	8338
姫川港	776	340	1333	0	1390	1120	473	758	946	813	-	-
三河港	758	1194	328	1390	0	352	980	634	885	835	5339	8068
神戸港	1009	1365	579	1120	352	0	710	364	669	565	5191	7934
境港	1146	718	1207	473	980	710	0	348	536	402	4956	7747
宇部港	1291	1003	861	758	634	364	348	0	307	203	-	-
三池港	1542	1191	1112	946	885	669	536	307	0	272	-	-
釜山港	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	4695	7497
東南アジア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4695	0	4411
インド	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7497	4411	0

第6章参考文献

- 1) Govindan K, Soleimani H, Kannan D: Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future, *European Journal of Operational Research*, 2014.
- 2) Lambert S, Riopel D, Abdul-Kader W: A reverse logistics decisions conceptual framework, *Computers & Industrial Engineering*, 61, pp.561-581, 2011.
- 3) Sasikumar P, Kannan G: Issues in reverse supply chains, part II: reverse distribution issues – an overview, *International Journal of Sustainable Engineering*, 1, pp.234-249, 2008.
- 4) 城所幸弘: 交通プロジェクトの便益評価－体系と課題－, *運輸政策研究*, 6, pp.14-27, 2003.
- 5) Ilgin MA, Gupta SM: Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art, *Journal of Environmental Management*, 91, pp. 563-591, 2010.
- 6) 国土交通省港湾局: 港湾整備事業の費用対効果分析マニュアル, 国土交通省ホームページ, <http://www.mlit.go.jp/common/000149528.pdf>, 2011.
- 7) 国土交通省航空局: 空港整備事業の費用対効果分析マニュアル Ver.4, 国土交通省ホームページ, <http://www.mlit.go.jp/common/000168996.pdf>, 2006.
- 8) Mero MT, Nickel S, Saldanha-da-Gama F: Facility location and supply chain management - A review”, *European Journal of Operational Research*, 196, pp.401-412, 2009.
- 9) Pishvae MS, Farahani RZ, Dullaert: A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design, *Computers & Industrial Engineering*, 37, pp.1100-1112, 2010.
- 10) Fleischmann M, Bloemhof-Ruwaard JM, Dekker R, van der Laan E, van Nunen JAEE, Van Wassenhove LN: Quantitative models for reverse logistics: A review, *European Journal of Operational Research*, 103, pp.1-17, 1997.
- 11) Bai C., Sarkis J.: Flexibility in reverse logistics: a framework and evaluation approach, *Journal of Cleaner Production*, 47, pp. 306-318, 2013.
- 12) 藤井聡・久米功一・松永明・中野剛志: 経済の強靱性 (Resilience) に関する研究の展望, RIETI Policy Discussion Paper Series 12-P-008, 独立行政法人経済産業研究所, 2012.
- 13) Norris FH, Stevens SP, Pfefferbaum B, Wyche KF, Pfefferbaum RL: Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness, *American Journal of Community Psychology*, 41, pp.127-150, 2008.
- 14) 大窪和明・奥村誠: 使用済み製品回収システムの外生的回収量と需要の変動に対する反応, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 68, I_1013-I_1024, 2012.
- 15) Meepetchdee Y, Shah N: Logistical network design with robustness and complexity considerations, *International Journal of Distribution & Logistics Management*, Vol.37, pp.201-222, 2007.
- 16) Albert R, Jeong H, Barabasi AL: Error and attack tolerance of complex networks, *Nature*, 406, 99.378-382, 2000.
- 17) Xuan Q, Du F, Li Y, Wu TJ: A framework to model the topological structure of supply networks, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 8, pp.442-446, 2011.
- 18) Liu L, Shu Z, Hu X, Cai H: Resource allocation and network evolution considering economics and robustness in manufacturing grid, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57, pp.201-222, 2007.
- 19) Barabasi AL, Albert R: Emergence of scaling in random networks, *Science*, 286, pp.509-512, 1999.
- 20) Watts DJ, Strogatz SH: Coellective dynamics of ‘small-world’ networks, *Nature*, 393, pp.440-442, 1998.
- 21) 鬼頭朋美: 実世界サプライチェーンの構造的頑強性: 複雑ネットワーク・アプローチ, *情報処理学会論文誌*, 6, pp.174-181, 2013.¥
- 22) 池田竜一: 実データを用いた自動車産業サプライネットワークの複雑ネットワーク解析と頑強性シミュレーション, 東京大学修士論文, 2014.
- 23) Iyer S, Killingback T, Sundaram B, Wang Z: Attack robustness and centrality of complex networks, *PLOS ONE*, Vol.8, 2013.
- 24) Kharrazi A, Rovenskaya E, Fath BD, Yarime M, Kraines S: Quantifying the sustainability if economic resource network: An ecological information-based approach, *Ecological Economics*, 90, pp.177-186, 2013.
- 25) Tanaka T, Morino K, Aihara K: Dynamic robustness in complex network: the crucial role of low-degree nodes, *Scientific Reports*, 2012.

- 26) Shutters ST, Muneeppeerakul R: Agricultural trade networks and patterns of economic development, PLoS ONE, Vol.7, 2012.
- 27) Mori T: Increasing returns in transportation and the formation of hubs, Journal of Economics Geography, 12, pp.877-897, 2013.
- 28) 柴崎隆一, 渡部富博: 東・東南アジア地域におけるマルチモード国際物流モデルの構築とアセアン物流インフラ施策の評価, 国土技術政策総合研究所報告, 2009.
- 29) 日本沿岸航海最短距離計算: <http://www.comship.co.jp/Jp/Inp.asp>.
- 30) 国土交通省港湾局: 平成 26 年度バルク貨物流動実態調査, 2015.
- 31) Yoon J, Le Y: Analysis of the transport efficiency of reverse logistics in Japan, International Journal of Urban Sciences, 17, pp.399-413, 2013.

第7章 望ましい国際静脈物流システムの設計方法

7.1 はじめに

これまでの各章で、一般論としてのあるいは我が国における望ましい国際静脈物流システムの設計に資する検討を行ってきた。第2章では Reverse logistics (以下「RL」と呼ぶ。)の先行研究から、後進的とも言える我が国の静脈物流システムへの示唆を整理した。第3章では小型家電リサイクル制度を例に、静脈物流の効率化を社会システムに組込むこと、ひいては静脈物流システムを社会システムそのものとして設計することの重要性を論じた。第4章と第5章では国際静脈物流システムの前提となる国際資源循環について、それに関連する我が国の社会システムの課題や静脈資源の貿易ネットワーク構造から見た課題について整理するとともに、我が国の社会システムにおける課題の解決策についても論じた。第6章ではこれまで主に効率性が追求されてきた静脈物流システムに対して、その特徴がネットワーク構造から見た強靱性にどのように影響するかを検証した上で、強靱な国際静脈物流ネットワークの設計方法について論じた。

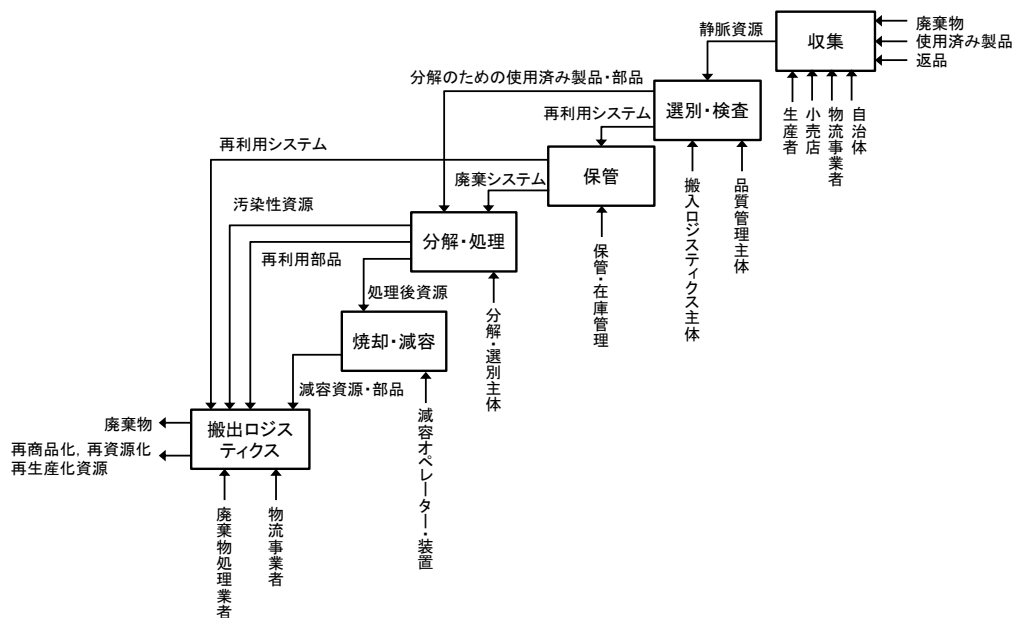
本章ではこれらの結論を有機的に結び付けることで、望ましい国際静脈物流システムの設計方法を提案する。本章の提案は直接的には我が国に対するものであるが、社会システムとの関係を踏まえたアプローチ自体は各国共通のものであり、そういう点では世界に対する提案にもなる。

7.2 各章の成果の有機的結合

7.2.1 マネジメント概念としての静脈物流システム

RLの先行研究で明らかにされているとおり、静脈物流は経済的、社会的、環境的ニーズから必要とされてきた¹⁾。このこと及び我が国の実情を踏まえると、静脈物流が必要となるのは、ビジネススペースで静脈資源を原材料として調達・販売する場合、環境的な社会システムの対象とはならないながらも社会的なニーズから企業が環境経営の一環で行う場合、環境的な社会システムから派生的に要求される場合に分類できると考えられる。本研究ではこれらを商業系静脈物流、環境経営系静脈物流、社会システム系静脈物流と呼ぶこととする。ただし、環境経営系静脈物流は静脈資源の潜在汚染性と潜在資源性次第で商業系静脈物流か社会システム系静脈物流のいずれかとして位置づけられるため、大きくは商業系静脈物流と社会システム系静脈物流に分類できる。また、例えば自動車リサイクルに係る静脈物流システムでは、自動車リサイクル制度が静脈物流システムの一部のみをカバーしているため、商業系静脈物流と社会システム系静脈物流が混在した静脈物流システムとなっており、このようなケースが存在することも留意する必要がある。

先行研究の中で最も包括的な RL の定義は「原料・製造過程・完成財・使用済み製品・廃棄物・廃棄過程・関連する情報に対して、消費地点から発生地点又は処分地点までの全てのフローを、価値の再取得や適切な処理、広い意味では循環型社会の形成のため、効率的かつ費用効果的に計画・実行・コントロールするプロセス」²⁾である。このように、RL はマネジメントシステムであり、静脈物流はマネジメント概念としての静脈物流システムの一機能として捉えられる必要がある。静脈物流システムに含まれる各機能は互いに関係し合いながら、それぞれの役割を担っている。すなわち、単なる輸送機能だけではなく、様々な機能を含みかつそれらを系統立てて最適化するマネジメントシステムとしての静脈物流システムが設計される必要がある。静脈物流システムに含まれるべき機能については、RL の先行研究から見ても大きくは収集、選別・検査、処理に分類とされるが³⁾、先行研究における詳細な分類例としては図 7-1 のような分類が挙げられる⁴⁾。第 2 章で述べたとおり、これに加えて静脈物流システムに係るインプット（投入される使用済み製品等）とアウトプット（リカバリー後製品の販売等）の全体をマネジメントすることが静脈物流システムには必要となる。図 7-1 は RL のバウンダリーを示していることにもなり、回収されてからリカバリー後販売されるまでに含まれる機能が RL に含まれる機能ということになる。すなわち、日本の廃棄物・リサイクル法体系では、再資源化後には興味が払われないが、本研究では再資源化の販売及びそのための物流も注目すべき機能としている。



出所：Bai and Sarkis⁴⁾ を参考に著者作成

図 7-1 Bai and Sarkis による RL の機能と流れの例示

経済効率性の観点から全体最適化を行う場合には、システム全体の費用最少化あるいは便益最大化が行われなければならない。例えば、静脈物流費用がいくら小さくても処理プ

ラントでの処理コストが高ければ全体の最適化が実現しない場合もある。さらに、静脈物流システムではインプットにおける不確実性が特徴となるが、この不確実性が各機能に及ぼす影響を考慮しなければならない。小ロットの輸送や処理は効率的ではなく、保管する場合でも経済性や環境面での配慮が必要な場合も多い。また、先行研究ではほとんど触れられていないが、アウトプットにおける不確実性にも対応する必要がある。リカバリーの後の成果物の販売先、あるいは保管先や輸送先がなければ、埋立処分が選択される可能性もあり、アウトプットの柔軟性が求められる。国際静脈物流システムとなれば、アウトプット先は海外となるため、その変更には慎重な対応が必要となる。このように、マネジメント機能として、インプットにおける不確実性を吸収することと、アウトプットの不確実性に伴うリスクを顕在化させないことも重要となる。この対応として、例えば保管期間の長期化や輸出先の変更に対応できることや、物流ネットワークにおける代替性を有すること等が挙げられる。以上のことはいずれのタイプの静脈物流システムに対しても、あるいは国際静脈物流を含む場合でも共通するものであり、本研究ではマネジメント概念として静脈物流システムをそれぞれ、商業系（国際）静脈物流システム、環境経営系（国際）静脈物流システム、社会システム系（国際）静脈物流システムと呼ぶこととする。

7.2.2 静脈物流システムと社会システムとの関係

いずれのタイプの静脈物流システムが設計されるべきかは、対象となる静脈資源の潜在汚染性と潜在資源性に依存する。潜在汚染性と潜在資源性の有無により、現状の静脈物流の課題と目指すべき方向を整理すると表 7-1 のようになる。

表 7-1 が示すように、現状の課題は潜在汚染性が顕在化して環境汚染に繋がるものと、潜在資源性が顕在化せずに循環型社会形成が阻害されるというものに分類できる。そして、この潜在汚染性と潜在資源性は社会システムの設計と密接に関係している。静脈物流を必要とする社会システムが構築されるのは、静脈資源が潜在汚染性を有する場合、潜在資源性は低いが環境便益を考慮してリカバリーが必要とされる場合、潜在資源性が高いが社会システムが整備されなければその顕在化が困難な場合である。潜在資源性の顕在化が困難な場合とは、規制により輸送費用を含むリカバリー費用が大きい場合や排出者の協力が必要な場合で、静脈物流システムの機能としては静脈資源の収集や輸送などまさに狭義の静脈物流であることが一般的である。

社会、環境という実行背景を持つ静脈物流システムにとって、社会システムとの関係が重要となることはこれまで述べてきたとおりである。第 1 章では動脈物流と比較して静脈物流は社会システムとの関係が深く、社会システムから派生する形で必要とされてきたことを述べたが、これが社会システム系静脈物流のことである。しかしながら、静脈物流の最適化は社会システムに組込まれておらず、結果として非効率な静脈物流に繋がる社会システムが設計されてきたことは否定できない。

社会システムに静脈物流の最適化が組込まれる場合、すなわちマネジメント概念たる社

会システム系静脈物流システムとして社会システムが設計される場合、システム全体の中の一機能である静脈物流も含めた形でシステム全体の最適化が図られる。第 3 章で述べた小型家電リサイクル制度がその好事例で、法律という形で社会システムとなっているが、小型家電リサイクルシステム全体はマネジメント概念としての社会システム系静脈物流システムそのものである。むしろ小型家電リサイクル制度は静脈物流を含む全機能の効率化が組込まれているため、社会システム内包型静脈物流システムと呼ぶべきであろう。通常発生する廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年法律第 137 号）（以下、「廃掃法」と呼ぶ。）の規制に伴う輸送の非効率性は、社会システムの中で特例措置が講じられることで解消される。例えば、廃掃法の広域認定制度も同様に輸送の非効率性を解消する社会システムであるが、静脈物流システムの一要素の効率化を社会システムで担保しようとするものであり、この場合、静脈物流システムの全体最適を実現することは相対的に困難になる。

表 7-1 現状の静脈物流の課題

潜在汚染性	潜在資源性		現状の課題	目指すべき静脈物流システム
	国内市場	海外市場		
なし	あり	あり	市場が存在する限り静脈物流固有の課題は生じないが、資源価格次第では静脈資源の潜在資源性が顕在化せずリサイクルが実現しない可能性あり	リサイクルの実現が資源価格に左右されることのないよう社会システムとしてリサイクルを担保するか、物流効率化等に資する静脈物流システム
なし	なし	あり	特定の近距離の国が輸出先となっているため、頑健な貿易ネットワークとなっておらず、社会インフラも輸出先の変化に十分に対応できるかどうか不透明。輸出先の変化次第では物流コストの増加により潜在資源性が顕在化しない可能性あり	輸出相手国の経済成熟度や環境政策等により輸出先の変化についてのリスクに対応しうる強靱なネットワークを志向し、我が国社会システムや社会インフラが輸出の足枷にならないような静脈物流システム
なし	なし	なし	国内で埋立処分が行われることになり、循環型社会形成にとって課題	環境面も含んだ社会厚生を最大化し、物流効率化等により関係者の負担を最小化するリサイクルを目的とする社会システムとしての静脈物流システム
あり	あり	あり	資源価格次第では静脈資源の潜在資源性が顕在化せずリサイクルが実現しない可能性があることに加え、潜在汚染性が無視されることで、海外市場が経済的に優位となり環境汚染に繋がる可能性あり	潜在汚染性が社会システムの中で確実に認識された上で、国内リサイクルが効率的となり、かつ環境ダンピングにより海外市場が経済的に優位にならないような社会システムに組み込まれた静脈物流システム
あり	なし	あり	社会システムの方向性としては国際資源循環を促進しているが、手続きを規定する社会システムがそれに対応しきれず、また潜在汚染性を無視した脱法的な輸出が行われていることから、望ましい静脈物流システムは構築されていない状態	潜在汚染性が社会システムの中で確実に認識された上で、適切かつ現実的な規制の下で海外への輸出を促進する静脈物流システム
あり	なし	なし	国内で埋立処分が行われることになり、循環型社会形成にとって課題	環境面も含んだ社会厚生を最大化し、物流効率化等により関係者の負担を最小化するリサイクルや適正処理を目的とする社会システムとしての静脈物流システム

一方、商業系静脈物流システムの場合、市場原理の下でリカバリーが目指されるため、社会システムそのものとはならず、社会システムとの整合が求められる。これまで国際静脈物流としては事実上、商業系国際静脈物流のみが存在していた。国際静脈物流システムの場合、国内で閉じた静脈物流とは異なり、貿易という新たな活動が加わるためそれに伴い関連する社会システムとの整合が必要となる。第 4 章、第 5 章で述べたとおり、国際資源循環に係る我が国の社会システムは課題を抱えているが、一方で静脈資源の持つ潜在汚染性を顕在化させずリカバリーすることで、安定的に循環型社会形成に寄与し続ける必要がある。安定的とは、資源価格や輸出先の変化による静脈資源の社会システム上の位置付けの変化が輸出の阻害につながらないようにすること、さらに輸出相手国の経済動向や環境規制の変化により当該国への輸出が止まった場合の代替輸出先が存在することである。さらに、静脈物流ネットワーク自体も強靱であることが望まれる。例えば、資源価格は世界の資源市場で決定されるため、変動次第では静脈資源の潜在資源性が顕在化しない場合もありうる。静脈物流システムは、資源価格の変動に対して安定的であることが望ましい。すなわち、リカバリーの量が大きく変動することなく、あるいはシステムの関係者の負担が大きくなることなく、システムの目的が達成され続けられる必要がある。社会システムとの整合が求められる以上、課題を抱えた社会システムが改善されなければ、望ましい国際静脈物流システムは構築できない。これは政策立案者、すなわち政府の役割となる。望ましい商業系国際静脈物流システムを構築するためには、それを取り巻く社会システムが適切に設計され、それを前提としたシステムとすることが必要となる。

以上のように、社会システムとの関連の面から、社会システム系静脈物流システムは社会システムそのものとして設計されるべきものであり、商業系静脈物流システムは社会システムと整合を取りながら設計されるべきものということができる。

7.2.3 国際静脈物流システム構築の課題

国際静脈物流に関しては、第 4 章で述べた国際資源循環に係る社会システム上の課題や第 5 章で述べた国際資源循環の不安定さを抱えながら実行されている。現在我が国には国際静脈物流システムと呼べるような社会システムは存在せず、輸送機能以外も含めたマネジメント概念としての国際静脈物流システムでさえ存在しているとはいえない。

国際静脈物流システムについては学術的にはほとんど研究されていないが、政策的には一時期検討が行われている。第 1 章で述べたとおり、静脈物流という言葉が各種計画に登場し始めた時期に、国際静脈物流に関する検討がいくつか行われている。その中で、特に踏み込んだ議論について整理すると以下のとおりとなる。

港湾を核とした静脈物流システム事業化検討委員会提言（平成 15 年 3 月）⁵⁾

- ・ターミナルの分散化や小型船による輸送，ストックヤードの不足など必ずしも効率的なシステムにはなっておらず，国際的な市況商品でもある鉄スクラップ，古紙等循環資源の国際競争力が低下．
- ・バーゼル条約で規定される有害廃棄物の越境移動が国際問題．
- ・国際静脈物流システム形成の方向性として，輸出量が多い地域に立地する港湾を拠点化することにより，物流管理を強化して受入国への信頼を確保するとともに低コスト化を図り，循環資源の国際競争力を強化．

産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会国際資源循環ワーキング・グループ（第3回）配付資料（平成16年7月29日）⁶⁾（ただし，国土交通省の説明資料であるため，同じく国土交通省から説明が行われた中央環境審議会循環型社会計画部会（第30回）資料（平成18年11月15日）⁷⁾でも同様の内容）

- ・循環資源を適正に処理するためには，上流から下流まで多様な主体が連携する一貫したシステムの構築が必要．バーゼル条約で規定される有害廃棄物の越境移動等が国際問題化しており，受入国の信頼性確保が必要．
- ・鉄くず，古紙，廃プラなどは，価格競争下におかれる国際商品のため，国際競争力の確保が必要．循環資源は動脈の貨物に比較して運賃負担力が小さいため，循環資源の資源性を発揮させ，有効利用を進めるためには，物流コストを低減させる必要．循環資源ネットワークの構築に際しては，循環資源の資源性を高めるため，静脈物流の経済性・効率性を高めていくことが重要．

このように我が国において静脈物流の黎明期には，国際静脈物流の推進，特に静脈資源の輸出に前向きな議論がなされている．この後，環境管理の重要性の観点からの政策議論が主流となるが，この時期の議論は学術的背景が少ないにしろ，「国際静脈物流システム」という言葉が使用されていることも含め，示唆に富む内容を含んでいる．要約すると，これらの議論に関しては以下の2点が結論となっている．

- ・静脈資源は価格競争下におかれる国際商品であるため，静脈物流の効率化により資源性を発揮させることが必要．特にその拠点として港湾が重要な役割を果たす．
- ・有害廃棄物の越境移動を防止し，環境管理の面から輸出先国での信頼性確保が必要．その観点から総合的な管理システムが必要．

このとき議論されているのは，本研究で言うところの商業系国際静脈物流システムが中心となっている．特に，静脈資源の運賃負担力の低さ，静脈資源の資源性の不安定さを理由に輸送の効率化の必要性が示唆され，また環境管理の観点から脱法的輸出防止のための水際対策の必要性について議論がなされている．さらに，課題解決の提案として，環境管理のための総合的なシステムと港湾における機能充実が挙げられている．こういった議論は本研究で論じている内容と同じ立場に立っている．ただし，社会システムを所与として

捉えその改善を論じていないこと、国際静脈物流システムに含まれるべき機能のうち輸送や保管といった一部の機能を重視している点は十分とは言えない。さらに、社会システム系国際静脈物流システムについては想定されていない。

社会システム系国際静脈物流システムは我が国には存在しないのは、第4章で述べたとおり個別リサイクル法を始めとする社会システムの下では、現状としては海外でのリサイクルは非現実的となっているためである。すなわち、処理を目的とした静脈資源の輸出は社会システムに位置づけられていない。しかし、海外のリサイクル技術が向上していること、我が国での中間処理後の成果物が市場原理の下で輸出されていること、そういった成果物を原材料としてしようした資源を使用する我が国資本の企業が海外に多く進出していることを踏まえれば、こういった社会システムはもはや見直されるべきである。静脈サプライチェーンの中で最終的には海外で使用する再生資源なら、効率性やネットワークの強靱性の観点からどの段階で輸出することが最適なのかを考える必要がある。すなわち、国際静脈物流システムとしての側面も有した社会システムが設計の是非が問われる段階に来ている。

商業系国際静脈物流については国際資源循環の中ですでに実行されているが、マネジメント概念としての国際静脈物流システムの一機能として実行されているとはいえない。それどころか、静脈資源の価格やリカバリー費用次第では廃掃法やバーゼル法といった社会システム上の取扱いが異なるという不安定さ、それに関連して場合によっては輸出が止まりうるという不安定さ、社会システム上の手続きに伴う追加コストを避けるための違法・脱法的輸出が社会システムの規制を緩和できないというジレンマ、輸出相手国の受入が止まった際の代替輸出先が確保されない可能性があるという貿易ネットワークの脆弱性という課題を抱えている。社会システムが国際静脈物流の促進とリンクしているとは言えず、個別企業が短期的な利益を追求しながら、場当たり的に輸出先を決定し、その中で輸送の効率化が目指されている。こういった現状は循環型社会形成の観点からは見直されるべきであろう。これまで経済性が追求されてきた商業系静脈物流システムの課題であるとは言え、循環型社会形成のためにはこういった課題を社会システムが解決することが望ましい。

以上のように、社会システム系静脈物流システムには環境管理を条件に国際静脈物流システムとしての性格を持たせること、商業系国際静脈物流システムに循環型社会形成という社会的側面を持たせることがひとつの重要な方向性となる。

7.3 政策提言

前節を踏まえ、まず望ましい静脈物流システムのタイプを選択する際に用いるべきフローチャートとして図7-2を提案する。図7-2で示すフローチャートは、対象となる静脈資源に関する潜在汚染性、リカバリーの必要性、潜在資源性（国内市場、海外市場）の有無により最終的にリカバリーか適正処理のいずれが望ましいかを示し、さらに国際静脈物流システムを含め、その際に適応されるべき静脈物流システムを示している。このうち、リカ

バリーの必要性は社会システム設計の中で確認されるべきで、社会厚生を最大化するように経済性以外の評価軸も含むこと、経済性の判断については、静脈物流を含む各機能の効率性が前提となっていることが必要となる。潜在汚染性を有する場合と、国内外に市場がなくリカバリーが市場原理の下で達成されない場合は社会システムとして担保することになる。国際静脈物流システム①、②、③の場合は環境管理が必要となり、中でも海外に市場を有する①、②については社会システムの枠外で取り扱われる蓋然性が高まるため、その対策も社会システムに含める必要がある。社会システムの枠内からの逸脱する蓋然性の高さのメルクマールは、潜在資源性と潜在汚染性の高さにある。また、海外市場がない場合でも「国内外リカバリー」としているのは、リカバリーを社会システムで担保しつつも、海外で経済効率的なリカバリーが行われることを許容する場合を想定しているためである。

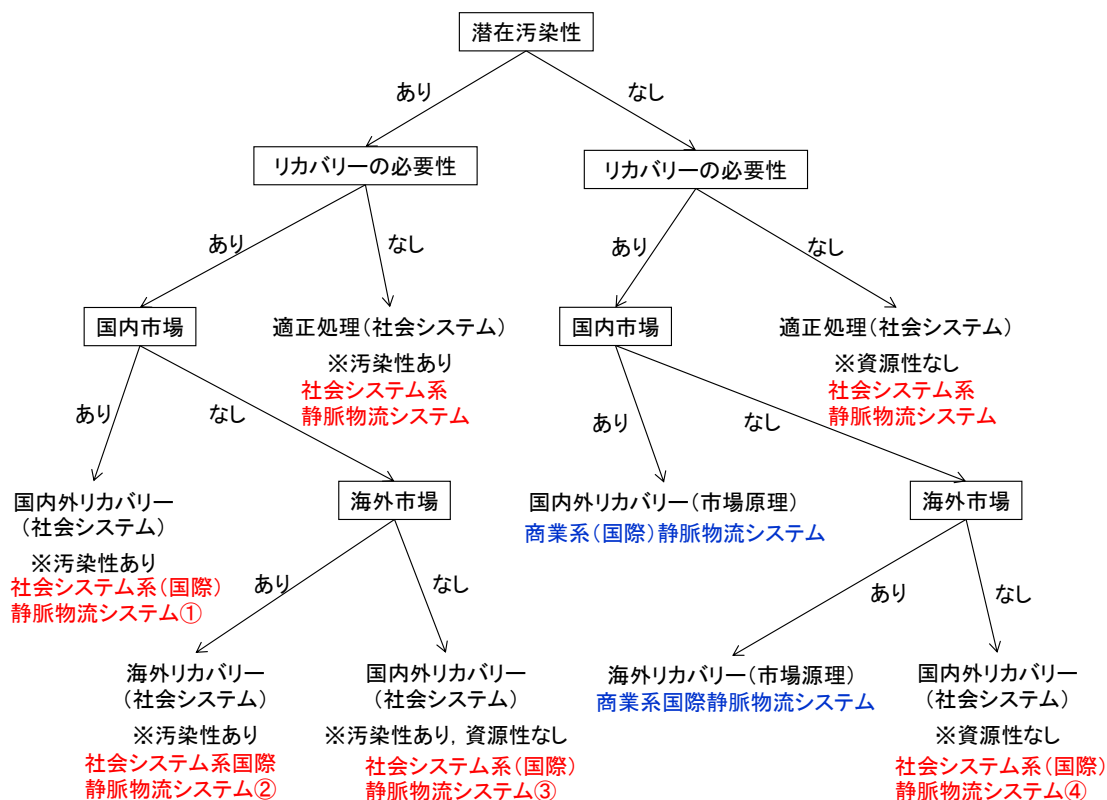


図 7-2 静脈物流システム選択フローチャート

この上で、望ましい国際静脈物流システムが構築される条件は以下のように整理される。

【望ましい国際静脈物流システムが構築される条件】

- (1)システムに含まれる機能を全体として最適化するマネジメントシステムであること。静脈物流システムの特徴であるインプットとアウトプットの不確実性に柔軟に対応するシステムであること。また、部分的な機能停止が生じてシステム全体の機能の低下を

最小限に抑える強靱なネットワーク構造を有すること。

- (2)商業系国際静脈物流システムの場合は、環境管理を前提として国際資源循環が促進される社会システムが再設計され、その社会システムとの整合が図られること。
- (3)社会システム系国際静脈物流システムの場合は、社会システムそのものとして設計されること。特に、現状の社会システムでは海外でのリカバリーは想定されていないため、環境管理を条件に海外でのリカバリーを許容した社会システムとして設計されること。

7.3.1 マネジメント概念としての国際静脈物流システム

(1)に関連して、静脈物流システムをマネジメントシステムとするため、システムに含まれるべき機能を決定した上で個々の機能の最適化を目指すのではなく、システム全体の最適化を目的とされる必要がある。そのためには、社会システム上の制約条件を所与としてシステム全体の経済効率性を評価することが現時点では現実的である。具体的には、第 3 章で示したような、現在学術的にも、実務的にも最も確立されたアプローチである費用対効果分析による評価が現実的である。さらに評価の際には、便益以外の効果を考慮することが重要で、AHP のような総合評価手法により、代替案間の優先度が決定されることが望ましく、最終的には全ての評価軸を加味した普遍的な総合評価手法の導入が理想的である。

さらに、求められるマネジメント機能として、静脈物流システムの最大の特徴である不確実性に対する柔軟性をシステム全体で吸収することが重要となる。具体的には、インプットの不確実性は保管の最適化、アウトプットの不確実性は販売先の多角化、特に国際静脈物流システムの場合は代替輸出先の確保、さらにシステム全体での柔軟性を高めるため、静脈物流ネットワークに強靱性を持たせることが必要となる。保管については第 2 章で述べたとおり、十分な研究蓄積があり効率化についてはそれらを参考にできるが、これに加えて保管の費用原単位を下げることで、すなわち国際静脈物流ネットワークにおける地方部の港湾での保管など保管場所の選定も併せて必要となる。アウトプットの不確実性については、後述するように社会システムでの対応も必要となる。また、静脈物流ネットワークの強靱性はハブ構造を持つなどが必要となる。これに加え、不確実性のマネジメントには情報管理も必要となる。第 2 章で整理したとおり、情報技術の活用も国際静脈物流システムに含まれるべき内容となる。

静脈物流ネットワークは動脈物流ネットワークと比べてロットの小ささと保管の必要性から規模の経済が働きにくく、ハブの形成可能性が相対的に小さい。ロットの確保、すなわち一括大量輸送による規模の経済の発揮は、ネットワークの強靱性とシステム全体の経済効率性の両面から必要となる。社会システム上の対応としては、システムの対象を統合すること、すなわち個別リサイクル法の対象品目を個々にではなく統合したリサイクル制度とすることがひとつの解決策になる。地域間連携等によりロットを確保することも解決策になるが、社会システムの中で義務的に目指されるより、小型家電リサイクル制度のように経済原則に基づいた地域間連携、すなわち多層となるネットワーク構造が目指される

社会システムが設計されるべきであろう。

一方、不確実性を吸収するための保管費用の存在が、規模の経済の発揮と強靱なネットワーク構造になることを阻害する。逆に言うと、効率的な保管は規模の経済の発揮を妨げず、強靱なネットワークの形成に寄与する。ロットの小ささと保管費用の問題を同時に解決するためには、安価な保管を実現する必要がある。安価な保管は規模の経済の発揮を可能とし、強靱なネットワーク構造へと繋がる。強靱なネットワーク構造であれば不確実性は吸収されやすい。このようにネットワークの強靱化により不確実性を吸収する観点からも、効率的な保管は重要な意味を持つ。

ハブ構造を有するネットワークは個々のノードのランダムな故障に対しては強靱であるが、ハブへの攻撃に対しては脆弱である。国際静脈物流システムの場合、ネットワークのハブを海外に依存するのはリスクを有することになる。国際静脈物流ネットワークにおいては、保管や積替えの拠点が必要となる。そういった拠点を海外に依存し、さらにその拠点が機能を停止した場合、ネットワーク全体として機能の大部分を停止することになる。ハブ機能を国内に置くことはそういったリスクを低減させる。ハブ機能を国内に留めることはネットワークの強靱性を管理下におけるという意味を持つ。

最後に、第2章で述べたとおり、RL研究は純粋なRL研究からERPといった概念の導入やそれに伴う社会システムの整備に伴い、Closed-loop supply chain研究へとシフトしている。しかし欧州では静脈産業の発展により、ビジネススペースでRLに特化することが可能となっており、これに伴い廃棄物に係る社会システムを大きく変換させようとしている^{8),9)}。欧州も動きは、静脈産業の発展により受動的に社会システムを変換させていると言え、Closed-loop supply chain managementから深化したマネジメント機能を持つRLへと発展的回帰させる流れを作るものであると考えられる。このように欧州では、大きなマネジメントシステム、しかもビジネススペースでそれを設計し、そのシステムを社会システムが支えているという構図になる。しかし第4章で触れたとおり、我が国ではそのような静脈産業は存在しないため、能動的に社会システムを変化させることが、マネジメントシステムとしての静脈物流システムの実現に繋がると考えられる。

7.3.2 商業系国際静脈物流システムを支える社会システム

(2)に関連して、商業系国際静脈物流システムでは、システム自体にマネジメント概念を持たせる以外に、これまで述べてきた現状の課題を解決するような商業系国際静脈物流システムを支える社会システムが必要となる。すなわち、望ましい商業系国際静脈物流システムとは、そのような社会システムを前提とし、それらと整合する形で設計されたマネジメントシステムということになる。

商業系国際静脈物流システムを取り巻く社会システムとの関係において、以下の課題が存在している。

① 社会システム上の安定性

② 資源性が低い場合のリカバリーの必要性

③ ネットワークの強靱性

①については、第 5 章で国際資源循環に係る課題として、違法・脱法的輸出の存在と、貿易を阻害する可能性のある社会システム上の手続き面の厳しさが静脈資源の社会システム上の安定性の要因であることを明らかにした。まず、第 5 章で述べたような違法・脱法的輸出を防止した上で、潜在汚染性を有さない静脈資源の輸出に係る社会システムを再設計する必要がある。

現在、商業系静脈物流システムの対象となる静脈資源は潜在汚染性を有しないこととなるため、潜在汚染性を有した静脈資源の混合を除けば、廃掃法が最も鍵を握る社会システムとなる。この対象となることで、輸出に際し追加的な手続きが必要となる。対象となるか否かが有価性に依存しており、以下のようなケースに分類される。

ケース 1: 国内市場あり，海外市場あり（FOB プラス）

ケース 2: 国内市場なし，海外市場あり（FOB プラス）

ケース 3: 海外市場あり（FOB マイナス，CIF プラス）

ケース 4: 海外市場なし（リカバリー目的で CIF マイナス，シャドープライス（国内処理費用）より小）

ケース 5: 海外市場なし（処分目的で CIF マイナス，シャドープライス（国内処理費用）より小）

ケース 6: 海外市場なし（リカバリー・処分いずれの目的でもシャドープライスより大）

現状の廃掃法の施行状況では、確実に廃掃法の枠外とされるのはケース 1 のみで、ケース 2 については解釈が示されていない。しかし、経済原則ではケース 2～5 は海外への輸出が有利となり、ケース 1 でも海外市場価格次第で海外への輸出が有利となる場合も多い。処分目的で輸出を行うことは廃棄物の国内処理原則に反するためケース 5 の場合の輸出促進は問題であるが、ケース 1～4 の場合の輸出は循環型社会形成に寄与するため、これを促進できる社会システムが望ましい。すなわち、海外リカバリー費用（輸送コスト含む）がシャドープライス未満の場合は追加コストを発生させない社会システムが設計され、それを前提とした国際静脈物流システムとなれば、安定的な輸出が可能となる。ただし、ケース 4, 5 については、不法投棄の可能性が否定しきれないが、その点は別途の処置で対応することが前提となる。すなわち、ケース 1～4 の場合の輸出には追加的費用を発生させないことが、システムの対象となる静脈資源の社会システム上の安定性を確保できる。

資源性が低い場合にリカバリーを実現することも社会システムで担保する必要がある。マネジメントシステムとしての国際静脈物流システムを構築することで、リカバリー費用が低減され、静脈資源の資源価値は高まる可能性は高い。しかし、社会的な最適リカバリー量を実現するためには、社会システムによる担保が最終手段となる。

さらに、静脈物流システムの場合、経済活動としての側面が強いため、個別企業の利潤最大化が一義的には目指される。そのような中で、代替性を有した強靱なネットワークと

するには経済原則だけでは限界がある。企業がリスクを避けるために輸出先を自ら多角化すれば強靱なネットワークが形成されるが、第 6 章で述べたとおり、現状としてそのようにはなっていない。資源価値が小さいマイナスの場合、輸送距離等物流面の条件から社会システム上の位置づけが変化することにより輸出が回避されている場合には、インセンティブの設定が可能となる。すなわち、輸出に伴う追加コストをなくすことでマイナスからプラスに転換するのであれば、追加コストの免除と引き替えに輸出が可能となり、輸出先の多様化が実現する場合もある。また、インフラの充実により、輸送コストを削減可能とし、遠距離となる輸出先を選択する企業には当該施設の使用インセンティブを与えることもひとつの解決策にはなろう。しかし、公共施設には排他性があってはならず、また大量輸送のためには集荷も必要となる。

現実的には、第 5 章で触れたとおり、中国に加えインドと東南アジアを輸出先として確保しておく必要がある。しかし、特に資源価値がプラスの場合に利益を下げる代替輸出先に変更させることは難しい。そのためにはやはり社会システム上の担保が必要であろう。貿易継続計画 (Trade Continuity Plan) を定め、それに寄与する企業にはインセンティブを与えることでネットワークの強靱性を確保していく必要がある。本研究で提案した一国依存度のチェックを常時行い、中心性指標の変化や経済成熟度から輸入量が確保される国を代替輸出先として確保する必要がある。代替輸出先としては、第 5 章で示したように、ネットワーク分析における別コミュニティとすることで、より安定的なネットワークとなる。

7.3.3 社会システムとしての社会システム系国際静脈物流システム

(3)に関連して、望ましい社会システム系国際静脈物流システムとは、社会システムとして設計されたマネジメント概念を持ったシステムである。社会システム系静脈物流が必要とされる場合、経済効率性が達成されない可能性についてはこれまで述べてきたとおりであり、まずは 7.3.1 の対応が必要となる。その上で、社会システム系国際静脈物流システムについては以下の課題が存在している。

- ① 海外リカバリーの社会システムとしての許容
- ② 環境管理の徹底
- ③ ネットワークの強靱性

これまで述べてきたとおり、静脈物流を必要とする現在の社会システムは、海外でのリカバリーを実質的に認めていない。海外でのリカバリーを認めれば、経済効率性の観点から自ずと海外でのリカバリーが指向されることになる。環境管理の徹底が前提になることは言うまでもないが、海外でのリカバリーについては、政策的な判断により実現は可能であると考えられる。

環境管理の徹底に関しては、社会システム系国際静脈物流システムが社会システムとして設計される場合、環境管理をシステムに組み込むことが可能となる。社会システムの枠内での輸出の場合、手続き面の厳しさという現状の課題は解決される。さらに、ここでも第 2

章でも述べた情報技術の活用は有効な手段となりうる。特に、情報管理によるトレーサビリティの確保が重要となる。

ネットワークの強靱性は商業系静脈物流システムの場合と同様であるが、社会システムとして設計される場合、アウトプットの不確実性への対応はシステムに組みやすい。例えば、輸出先の代替性については、社会システムにおける認定制度等を通じて担保が可能となる。

7.3.4 リサイクルポートの活用

これまで述べてきたように、国際静脈物流システムはマネジメントシステムとして、含まれる機能が全体として最適化される必要がある。国際静脈物流システムの場合、社会システムとの関係が非常に重要となるが、社会インフラの能力や活用方法も重要な要素となる。

第5章で示したとおり、我が国の静脈資源の輸出は比較的小規模の港湾施設で行われている。これは静脈資源の輸出先が比較的近距离に集中しているためであるが、輸出先が変更された場合、静脈資源の資源性を顕在化させる観点から問題となる。先述したとおり、社会システムにおける対応も必要ではあるが、大量一括輸送を可能とする社会インフラの機能面も重要な要素となる。ただし、社会インフラの機能充実に充てられる予算はもはや潤沢ではなく、限定的な投資が現実的である。さらに、一括大量輸送による規模の経済を発揮させ、効率的な輸送を行うためには、ロットの小さな静脈物流では保管が必要となる。規模の経済の発揮はハブの形成にも寄与し、強靱なネットワーク構造のためにも保管は重要な意味を持つ。システムに含まれる物流や保管といった機能を最適化させ、またシステム全体として不確実性を吸収し、柔軟性を高めるための拠点として、リサイクルポート政策は非常に有効となる。保管費用の安価な地方部の港湾をリサイクルポートとして活用することは、物流、保管、ネットワークの強靱性、モーダルシフトによる環境負荷低減やネットワークの強靱性強化に資する。

第6章で示したとおり、地方部の港湾における保管コストは都市部の港湾よりも低い。特に保管期間が長くなるほど、その差は大きくなる。都市部の港湾ではヤードの回転率が高く、そもそも長期間の保管が不可能な場合もある。ただし、静脈資源はその潜在汚染性故に各港の港湾管理規則等で港湾内での保管が制限される場合も多く、リサイクルポートにおける拠点的な取扱いが一層重要となるため、その機能強化も必要となる。

以上を踏まえると、広い保管施設と、大規模な係留施設を有した数港のリサイクルポートを充実させるというリサイクルポート政策の深化が非常に重要な意味を持つ。また、不確実性や環境面の管理のための情報拠点としての機能も今後は求められるであろう。ただし、輸出量の増加や輸出先の変化による船型の大型化に対応するためには、リサイクルポート自体の機能強化とともに、輸出ロット確保のための港湾間連携・企業間連携が必要となる可能性もある。そういった面は社会システムでの対応も必要となる。

7.4 まとめ

本章ではこれまでの各章の成果を有機的に結合させ、我が国における望ましい国際静脈物流システムの設計方法について提案を行った。まず、実行要因から静脈物流システムを商業系静脈物流システム、環境経営系静脈物流システム、社会システム系静脈物流システムにカテゴリー分けを行い、潜在汚染性と潜在資源性の有無により、どのタイプの静脈物流システムが適用されるべきか及びその際の社会システムとの関係について示した。その上で、国際静脈物流システム構築における課題について整理した。

これらを踏まえ、政策提言としてまず望ましい静脈物流システムのタイプを選択する際に用いるべきフローチャートを示し、さらに望ましい国際静脈物流システムが構築される条件として、①システムに含まれる機能を全体として最適化するマネジメントシステムであること。静脈物流システムの特徴であるインプットとアウトプットの不確実性に柔軟に対応するシステムであること。また、部分的な機能停止が生じてもシステム全体の機能の低下を最小限に抑える強靱なネットワーク構造を有すること、②商業系国際静脈物流システムの場合は、環境管理を前提として国際資源循環が促進される社会システムが再設計され、その社会システムとの整合が図られること、③社会システム系国際静脈物流システムの場合は、社会システムそのものとして設計されること。特に、現状の社会システムでは海外でのリカバリーは想定されていないため、環境管理を条件に海外でのリカバリーを許容した社会システムとして設計されることを提案した。リサイクルポートの活用等、これらを実現するための具体的方策も提示している。

本章の内容は定性的なものとしているが、これは定量的・具体的内容となっているこれまでの各章の統合であるため各章の成果を参照できること、政策として立案されることを目指しているため理念的に理解されることを重視したことが理由である。したがって、本章単独でも十分に完結する内容となっており、詳細な根拠は各章に委ねているという構図になる。

第 7 章参考文献

- 1) Fleischmann M, Bloemhof-Ruwaard JM, Dekker R, van der Laan E, van Nunen JAEE, Van Wassenhove LN: Quantitative models for reverse logistics: A review, *European Journal of Operational Research*, 103, pp.1-17, 1997.
- 2) 尹鐘進: 静脈物流に関する研究の動向と課題－論文レビュー－, *運輸政策研究*, Vol.12, No.3, pp.2-12, 2009.
- 3) Barker TJ, Zabinsky ZB: Reverse logistics network design: A conceptual framework for design making, *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4), pp. 250-260, 2008.
- 4) Bai C., Sarkis J.: Flexibility in reverse logistics: a framework and evaluation approach, *Journal of Cleaner Production*, 47, pp. 306-318, 2013.
- 5) 港湾を核とした静脈物流システム事業化検討委員会：港湾を核とした静脈物流システム事業化検討委員会提言, 2003.
- 6) 産業構造審議会：産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会国際資源循環ワーキング・グループ（第 3 回）配付資料, 2004.
- 7) 中央環境審議会：中央環境審議会循環型社会計画部会（第 30 回）資料, 2006.
- 8) 経済産業省：平成 26 年度地球温暖化問題等対策調査（資源循環高度化・効率化事業）報告書, 2015.
- 9) European Commission: Communication from the commission EUROPE 2020, A strategy for smart, sustainable and inclusive growth, 2010.

第8章 結論

本研究は静脈物流システムを対象としたものである。我が国においては静脈物流に関する十分な研究蓄積はなく、政策担当者や実務者へヒアリングをしても静脈物流に対する認識は「通常の物流と逆向きの物流」といった回答が目立つような状況である。一方、一般的に静脈物流は **Reverse Logistics**（以下、**RL** とする）と英訳されてきたが、**RL** の定義は静脈物流より広範囲で、狭義の静脈物流を一機能として含むマネジメント概念となっている。我が国における静脈物流の位置付けは、実務的にも政策的にも不十分で、それを支えるべき研究面でも未成熟な分野となっている。

我が国は世界的に見ても環境先進国のひとつであり、すでに様々な環境規制やリサイクル制度が整備されてきた。今後一層その重要性が増すことが予想される中、静脈物流システムを的確に理解し改善を講じていかなければ、環境的にも、経済的にも望ましい社会が実現しない。特に我が国は、静脈物流に影響する面からだけでも、静脈資源の大量発生を意味する経済の成熟、世界的に見ても厳しい環境規制の存在、貿易には海上輸送を必ず伴うことを意味する島国であることなど、静脈物流システムの重要性を諸外国より相対的に高める特徴を有している。

静脈物流は、経済、資源、環境という我が国にとっても、世界にとっても重要な概念を背景としている。経済原則だけで最適化されない背景を有している故に、社会システムとの関係が重要となり、そしてその社会システムにはその国の特徴が十分に反映される必要がある。本研究では社会システムとの関係を踏まえた望ましい国際静脈物流システムの設計方法を提案することを目的に、様々なアプローチで検討を行った。具体的な内容をまとめると、以下のとおりである。

第1章では研究の背景として、静脈物流が環境保全や循環型社会形成という経済原則だけでは最適化が担保されにくい実行要因を有しているため、静脈物流社と社会システムとの関係は動脈物流以上に深く、静脈物流はその実行の要因やそれと関連する社会システムとの関係を含めて動脈物流よりも多角的に評価されるべきことを示した。また、社会システムとの関係が強い以上、その国にとって望ましい静脈物流のあり方がその国の特徴やその国の社会を取り巻く状況に依存することを意味し、特に、我が国では時間的にも空間的にも急速に進展する経済のグローバル化と四面を海に囲まれているという地政的特徴が、静脈物流システムに大きな影響を与えることを示した。さらに、海外における **RL** を意図する「静脈物流システム」が本研究の対象であることを明確にした。

第2章では、我が国における静脈物流及び世界的な **RL** の先行研究の網羅的なレビューを行った。これにより、我が国の静脈物流研究の不十分さや分野的な偏りを明らかにするとともに、その原因についても考察を行った。また、これまでの世界的な研究動向を俯瞰することで、先行研究によって明らかにされたことと残されている課題を整理した。さらに、

これまでの世界の先行研究が与える我が国の静脈物流システムへの示唆と我が国の特徴を踏まえた静脈物流研究の方向性について明らかにした。本章の意義として、まず、我が国において単なる経済活動として捉えられがちであった静脈物流をマネジメントシステムとしての静脈物流システムへ昇華させる必要性を示したことがある。このことは第 3 章を始めとし、以降の章にも大きな意味を持たせることになる。また、社会ネットワーク分析により、研究分野の分類とそれぞれにおける重要文献を示していることは、今後の我が国における効率的な静脈物流研究に寄与させることを意図している。さらに、本研究で十分に深化しない課題の存在と参考にするべき重要先行研究を提示していることは、これらの課題が本研究とは別に深化され、本研究の成果と統合することで、大きな相乗効果が生まれることを意図している。

第 3 章では、マネジメントシステムとしての静脈物流システムを社会システムとして設計することの意義を、小型家電リサイクル制度を題材にケーススタディ的に示した。その結果、費用対効果分析を適用することでシステム全体として最適となる枠組みを明らかにした上で、その枠組みを担保するように社会システムが設計されれば、社会的に望ましい静脈物流システムが設計可能であることが明らかとなった。小型家電リサイクル制度は静脈物流等のシステムを構成する各要素の全体最適を目指したマネジメントシステムとしての静脈物流システムを社会システムとして設計したという画期的な事例と言え、本制度の誕生とその制度設計過程は我が国のリサイクル政策にとって非常に大きな意味を持ち、今後の静脈物流システム設計の基本にされるべきであろう。

第 4 章では、国際静脈物流を必要とする国際資源循環について、それに関連する我が国の社会システムの理念的方向性と課題について整理した。その結果、国際資源循環に関しては、理念的には環境汚染に繋がる貿易は防ぐという前提で適正な貿易を容認あるいは促進する方向にあるが、それを支える手続き面を規定する社会システムがその理念に追いついていないのが現状であることを明らかにした。その上で、手続き面を規定する社会システムである廃掃法（廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年法律第 137 号））、バーゼル法（特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律（平成 4 年法律第 108 号））の制度的課題について整理し、解決方策を提案した。現在、我が国では事実上商業系国際静脈物流しか存在していらず、本章の課題は商業系国際静脈物流システムを支える社会システムが解決すべきものであるという位置づけになる。本章からは国際静脈物流システムが国際資源循環の促進を支えるべく機能するためには、課題を持った社会システムを所与とするのではなく、社会システムの課題を解決し、それと整合させることを視野に入れる必要があることが導かれた。

第 5 章では、社会ネットワーク分析により、静脈資源貿易ネットワークの構造的な特徴や中心性の高い国の経年変化を明らかにし、得られる指標等から我が国の国際資源循環の状況・特徴を相対的に評価した。我が国の静脈資源貿易は、量的には世界全体でも相対的に高いレベルで進んでいるが、一方で社会ネットワーク分析の中心性指標からは我が国が

静脈資源貿易ネットワークにおいて構造的な中心性が低下していることが明らかとなった。この結果は、我が国の静脈資源貿易が輸出特化であり、相対的に少ない輸出先となっていること、かつ一部の中心性の高い貿易相手国との貿易量が大宗を占めていることに起因しており、本研究で提案した指標である一国依存度からその状況を定量的に示した。我が国の静脈資源貿易はネットワーク構造上から見て代替性が低く、量的な要素も加味すると特定の国への依存度は世界最高と言っても過言ではない中、輸出先の代替性の低さ、輸出先の変更への対応という静脈物流システムにおけるアウトプットの不確実性への対応が課題として存在し、これらの課題を解決しうる、輸出先が多角化し、さらに輸出先の変化への対応柔軟な対応を可能とする国際静脈物流システムが必要であることが示された。

第 6 章では、静脈物流ネットワークの強靱性について特に動脈物流ネットワークと比較しながら評価を行った。先行研究により得られているハブ構造を持つネットワークが強靱であるとの知見から、混合整数線形計画モデルを用いたハブ形成に関するシミュレーションを行い、小ロットかつ不確実性であるという静脈物流の特徴がハブ形成を阻害し、静脈物流ネットワークの強靱性を下げることが明らかにした。また、代替性を制約条件に入れたシミュレーションにより、規模の経済が働く場合ハブ構造を持つネットワークが形成されやすいため、代替性を制約条件に入れなくても一定の強靱性を有したネットワーク構造となるが、小ロットであること、また不確実性を吸収するための保管コストの増大が規模の経済を阻害し、強靱な静脈物流ネットワークが形成されにくいことを明らかにした。ただし、逆に静脈物流であることで輸送費用が大きくなると、モーダルシフトが行われ、別のメカニズムでハブ構造を持つ頑健なネットワークが形成される場合もある。最終的に、小型家電リサイクル制度において海外での中間処理を想定した場合を題材として、強靱性をの観点も加味した望ましい国際静脈物流ネットワークを提案している。

第 7 章では、それまでの章を有機的に結合して、望ましい国際静脈物流システムの設計方法を提案した。まず、静脈物流システムを実行要因により分類し、それぞれに商業系静脈物流システム、環境経営系静脈物流システム、社会システム系静脈物流システムという呼称を与えた。その上で、政策立案に資するような望ましい国際静脈物流システムが構築される条件を提示し、各分類に共通するマネジメント概念としての国際静脈物流システムの設計方法を提案するとともに、個別には商業系国際静脈物流システムを支える社会システムのあり方、社会システムとしての社会システム系国際静脈物流システムの設計方法についても提案した。さらには、こういった政策の推進にリサイクルポートの活用が重要な役割を果たしうることを提案した。

以上のように、本研究では社会システムとの関係を踏まえた望ましい国際静脈物流システムの設計方法を提案することを目的に、様々なアプローチから検討を行っている。先行研究や我が国の政策を踏まえると、本研究の貢献は以下の点にあると考えられる。

- ・企業活動にとっても社会システムにとっても重要でありながら、我が国においてはほとんど先行研究の存在しなかった静脈物流に焦点を当てていること。更に、静脈物流研究

が我が国では進まなかった理由を考察していること。

- ・海外における RL の先行研究で得られている成果と我が国における現状の静脈物流システムのギャップを明らかにすることで、我が国の静脈物流システムの課題と即効的な解決策を提示したこと。また、世界の研究動向を整理し、先行研究における重要文献を抽出したことは、我が国における今後の効率的な静脈物流研究に大きく寄与するとともに、これを踏まえて行われる他の研究と本研究の成果の相乗効果により、更なる成果が期待されること。
- ・静脈物流は社会システムと密接な関係があり、先行研究では社会システムを所与とすることが一般的であるが、本研究では社会システムを所与とせず、静脈物流システムそのものとして設計すること、あるいは静脈物流システムと整合させることを意図して、社会システムそのものの設計にまで踏み込んでいること。静脈物流システムに関連する社会システムの現状の課題解決と将来に向けた望ましい設計の両方の観点から、具体性のある提案を行っていること。
- ・世界的な国際資源循環の流れと島国であるという我が国の地理的特徴を踏まえ、我が国に適用されるべき国際静脈物流システムの設計方法を提案していること。特に、実際の静脈資源貿易ネットワークを用いて新しい指標である一国依存度の提案や、使用済小型家電の海外リサイクルを題材としたネットワークの強靱性や輸出代替性を制約条件に入れたシミュレーションにより望ましいネットワーク構造を提示するなど、実証的かつ新規性のある方法で提案を行っていること。
- ・静脈物流の特徴から、動脈物流ネットワークと比較して静脈物流ネットワークの強靱性が必然的に低くなることを明らかにしたこと。さらに、経済性を前提にしながら静脈物流ネットワークに強靱性を持たせる方法を提案し、国際静脈物流ネットワークへの適用について検証したこと。
- ・静脈物流システムを類型化し、それぞれについて望ましい設計方法を提案したこと。特に、研究により解が得られる部分と政策判断が必要な部分を明確にしているため、政策立案及び政策判断に役立つ内容となっていること。
- ・我が国をケーススタディとしながら、多くの成果に一般性があり、また研究のアプローチ自体も諸外国で適用可能なものとなっているため、世界における RL 研究に対しても大きな影響を与える内容となっていること。

次に、本研究で残された課題について述べる。

まず、本研究では社会システムが重要な鍵を握っているが、社会システムの理念は国民あるいは人類の価値観の変化や、国や地球を取り巻く状況の変化に伴い変動しうる。本研究では現在の我が国の価値観、あるいはそれに基づく社会システムの理念を前提にしている。例えば、人口減少問題等により経済発展を放棄する、あるいは環境至上主義が台頭する社会になれば、静脈物流ネットワーク構築において最大化する目的関数が変化する。本研究は大きな社会シナリオの変化に対応していないという点で課題が残る。

次に、第2章で述べたとおり、大きな傾向として世界的にはRLからClosed-loop supply chain management（以下、CLSCMという）の研究へとシフトしている。本研究では動脈物流システムと静脈物流システムの統合国際物流システムにまでは言及していないが、今後我が国産業の動脈サプライチェーンを踏まえた実証的な望ましい統合国際物流システムの研究が必要となる可能性がある。ただし、第7章で触れたように、欧州では廃棄物に係る社会システムの変換時期にあり、CLSCMからRLへの発展的回帰とも言える状況にある。本研究でRLに特化した意図はまさに能動的に欧州方式に向かうことを目指す点にあるため、現時点でCLSCMの一部としてのRLを積極的に支持する立場ではない。RLへの発展的回帰の先に深化したCLSCMが登場による可能性もあり、欧州の動きには注目する必要がある。

また、静脈物流の特徴である量、質、タイミングの不確実性について、量とタイミングの不確実性については、効率的な保管と絡めながら対処方法を示しているが、質の不確実性については十分な議論を行っていない。RLの機能のうち静脈物流とは別の機能である処理方法に依存する内容であるため、本研究とは別系統の研究分野であるためであるが、質の不確実性を解決する処理技術の開発等は、混載での輸送のインセンティブとなるため、より効率的な静脈物流に繋がる可能性がある。本研究の成果とこうした技術開発や関連する研究との融合が必要となる。

最後に、RL研究で今後発展されるべき情報技術の問題がある。RLの特徴である不確実性、さらに環境管理の重要性に観点からの情報技術の活用は大きな意味を持つが、本研究では定性的に触れた程度である。例えば、保管費用の大幅な削減可能性や輸出先での環境管理の確実性に繋がる技術開発がなされる場合など、情報技術の発展は本研究で置いた様々な前提を抜本的に変化させる可能性もあり、情報技術の発展を組み込んだ国際静脈物流ネットワークのあり方も論じられるべきであろう。

以上のように本研究には大きな貢献があるとともにいくつかの課題を残している。本研究を契機として我が国が静脈物流研究先進国となり、本研究で提案した国際静脈物流システムの設計方法が世界標準となることで、経済的にも環境的にも望ましい社会の実現に繋がることが期待される。

謝辞

本研究を遂行し、学位論文をまとめるに当たり温かくご指導いただいた指導教官である東京大学大学院村上進亮准教授には心から感謝申し上げます。副査の東京大学大学院藤田豊久教授、青山和浩教授、田中謙司准教授、醍醐市朗准教授からも多くの貴重な助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

私は学生時代には土木工学を専攻し、運輸省（現国土交通省）入省後、港湾や空港行政を中心に経験を積んできました。世間で「港湾技官」と呼ばれる部類に入ります。したがって、港湾や空港事業に関する予算要求、需要予測、環境影響評価、事業評価、事業実施や国際物流等に係る政策立案に携わってきました。このように港湾、空港、物流といったバックグラウンドを持つ私ですが、平成22年4月から2年7ヶ月間は、それまでとは仕事内容も文化も異なる環境省に出向し、その中心的業務が小型家電リサイクル法の創設でした。法律成立に至るまでに関係者との調整、審議会、国会審議等を経ましたが、費用対効果分析や静脈物流といったこれまでのリサイクル政策とは異なる切り口で議論がなされたことは、法律策定チームのリーダーであった私自身の港湾技官としての経験が大きく影響したことは間違いありません（出向者でありながらそのような重職をやらせていただいたことは今でも非常にありがたく思っています）。この環境省出向時代に、担当した検討会や審議会の委員であった村上先生に出会い、技術的な面で相談に乗っていただき、また資料作成等で多くの支援をしていただきました。村上先生のご協力があったからこそ、これまではない新しいタイプのリサイクル制度の議論、創設が可能になったと思います。そして、私自身にとっては学際的な視点の重要性を認識する契機にもなりました。

一方で、それまでのリサイクル政策を勉強してみると、その制度設計や創設過程に違和感を覚えたのも事実です。リサイクル政策だけではなく、霞が関で打ち出される政策に同様の違和感を覚えたことは少なくありません。すなわち、目的や効果が不明瞭な政策、ステークホルダー間で最適な役割分担となっていない政策、フィージビリティのない政策に対する違和感です。そういった政策が、場合によっては関係する省庁間の複雑な調整や高度な政治的判断等を経た結果であることは、これまでの経験で分かっています。しかし、政策や制度の立案過程で技術的、学術的な観点が欠けている、あるいは偏っていることもひとつの原因であり、それが大きな問題だというのが私の主張です。確固たる技術力、幅広い学術的知見を持ったエンジニアとしての行政官が関わった政策こそ、日本を豊かにするものだと思っています。こうした背景から、政策立案者、エンジニアとして成長する必要があるということが、私の研究生生活におけるモチベーションでした。

本研究を遂行する期間、役人としては北陸地方整備局金沢港湾・空港整備事務所長、港湾局海岸・防災課首席港湾保安管理官、航空局航空ネットワーク部空港施設課総括補佐（現職）を歴任してきました。いずれのポストも技術力が求められる業務が多く、それらに対

処することで日々新たな経験を積むことができましたが、研究との両立は体力的も精神的にも楽なものではありませんでした。社会人としての職務が非常に多忙で、研究に割く時間がほとんど取れない時期もあり、また金沢在住時代には距離的にも大学と離れている中で学位論文をまとめることができたのは村上准教授の温かいご指導があったからこそだと思っています。

特に、学位論文の提出間際の時期であるにも関わらず、この1ヶ月は空港の地盤改良工事における施工不良、データ改竄、発注者への虚偽の報告の問題が世間を騒がせ、職務上その渦中にいるため、休日どころか寝る間もない程多忙な日々を過ごしてきました。エンジニアがこの問題に関わっていたようですが、図らずも改めて技術力の重要性を再認識することになりました。技術に対する信頼を失わせるような、こういった事案が二度と起こらないことを心から願うとともに、日本のエンジニアの技術力の全体的な底上げを願ってやみません。

私が研究を遂行するに当たり、村上先生から学んだ一番大きなことは、学際的な視点の重要性、学術的な物の捉え方です。それを踏まえ、学生時代に学んだ土木工学の知見、国土交通省職員として培ってきた港湾、空港、物流分野の専門家としての知見、環境省に出向することで得た環境分野に関する知見を融合させることで、学際的な本論文をまとめることができたと考えています。

今後も、技術力と学術的な知見を持ったエンジニアとして成長し、政策立案に自らの技術力・学術的能力を反映できるよう日々精進していきたいと思っています。