

循環型社会に向けた物質循環の指標化と政策評価

山下 英俊

目次	
第 1 章 研究の背景	5
1.1 循環型社会の定義	5
1.2 循環型社会の指標	6
1.3 循環型社会に向けた政策	7
1.4 物質循環の多様性と政策の影響	9
1.5 世界に向け開かれつつある循環構造	9
第 2 章 先行研究	12
2.1 物質循環の分析	12
2.2 経済循環の分析	14
2.3 物質循環と経済循環との連関	15
2.4 国際的な物質循環の分析	17
第 1 部 物質循環を捉える指標	20
第 3 章 リサイクルされた資源は何回利用されているか	20
3.1 循環度の定式化	20
3.2 日本における紙リサイクル	27
3.3 分析結果	28
3.4 まとめ	34
第 4 章 自分の行動で資源の利用回数はどのくらい増えるか	37
4.1 はじめに	37
4.2 リサイクル行動とその評価	38
4.3 リサイクル行動の試算	39
4.4 まとめ	41
第 5 章 循環型社会はどこまで広がっているか	42
5.1 データの入手と加工	42
5.2 マテリアル・フローの分析	51
5.3 まとめ	60

目次

第2部 廃棄物税とその影響	61
第6章 廃棄物削減にはどの程度の課税が必要か	61
6.1 廃棄物税の経済分析	61
6.2 廃棄物税の経済モデル OPERA-W	69
6.3 分析結果	71
6.4 まとめ	74
第7章 循環構造は税の効果に影響を及ぼすか	75
7.1 リサイクルのモデル化	75
7.2 リサイクルを考慮した廃棄物税の経済モデル OPERA-R	77
7.3 分析結果	81
7.4 まとめ	85
第8章 結論	86
謝辞	87
参考文献	88
付録1 環境学はどうあるべきか	95
付録2 循環型社会とはどのような社会か	101
付録3 日本のリサイクルはどのような現状か	110
付録4 ドイツではどのようにリサイクルが推進されているか	118
付録5 OPERA-W 構造式	129

第1章 研究の背景

1.1 循環型社会の定義

2000年に循環型社会形成推進基本法が制定されたことに代表されるように、社会の各方面で循環型社会に向けた取り組みが進められている。基本法において、循環型社会は次のように定義されている。

この法律において「循環型社会」とは、製品等が廃棄物等となることが抑制され、並びに製品等が循環資源となった場合においてはこれについて適正に循環的な利用が行われることが促進され、及び循環的な利用が行われない循環資源については適正な処分（廃棄物（廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和四十五年法律第百三十七号）第二条第一項に規定する廃棄物をいう。以下同じ。））としての処分をいう。以下同じ。）が確保され、もって天然資源の消費を抑制し、環境への負荷ができる限り低減される社会をいう。（循環型社会形成推進基本法 第二条第一項）

簡潔に言えば、目的は、「天然資源の消費を抑制し、環境への負荷ができる限り低減される」ことであり、そのための手段として、廃棄物の発生抑制や循環的な利用（再使用、再生利用、熱回収）、適正処分を行うのが循環型社会ということである。また、持続可能な発展との関係については、「循環型社会の形成は、（中略）持続的に発展することができる社会の実現が推進されることを旨として、行われなければならない（第三条）」として、持続可能な発展の推進のために循環型社会の形成を進めることが明記されている。すなわち、持続可能な発展を実現するために、廃棄物の発生抑制や循環的な利用、適正処分といった手法により、天然資源の消費を抑制し、環境への負荷をできる限り低減させる取り組みを進めるのが、基本法が定義する循環型社会の姿ということになる。

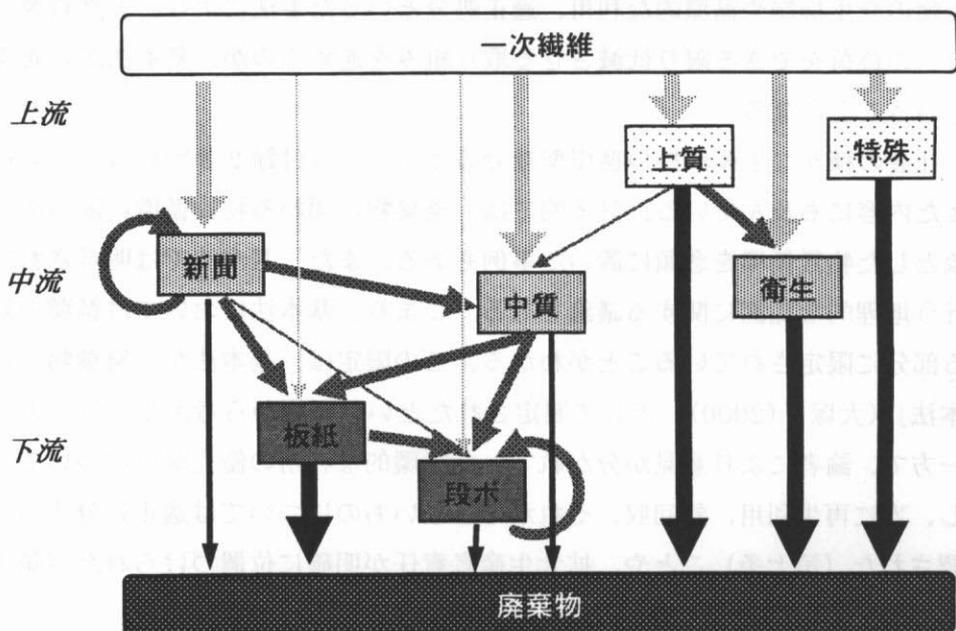
しかし、社会の様々な主体が持つ循環型社会のイメージ（付録2参照）は、この定義の示す領域を超えた内容にも及んでいる。具体的には、廃棄物に関わる物質循環に限らず、水や炭素などを対象とした物質循環を念頭に置いた事例もある。また、基本法では明示されていない物質循環を行う地理的な範囲に関する議論もある。つまり、基本法においては循環の対象が廃棄物に関する部分に限定されていることがわかる。この限定は、基本法が「廃棄物・リサイクル関連の基本法」（大塚（2000））として制定されたという経緯から考えて、致し方ないものといえる。一方で、論者により意見が分かれていた循環的な利用の優先順位について、再使用を最優先とし、次に再生利用、熱回収、それができないものについては適正処分するという基本原則が確認された（第七条）ことや、拡大生産者責任が明確に位置づけられた（第十一条）ことなどは、一つの方向性を与えるものとして評価できる。

1.2 循環型社会の指標

さらに、基本法の理念を具体的な政策として計画的に実現していくため、循環型社会形成推進基本計画を策定することが定められている（第十五条）。平成十四年度末をめどに進められている計画の本論文執筆時点の案¹においては、政策目標としてマテリアル・フローに関する指標を導入することが盛り込まれている。具体的には、「入口」、「循環」、「出口」という三つの指標が提案されている。「入口」の指標には、「資源生産性」すなわち天然資源等投入量単位あたりの GDP が選ばれている。「循環」の指標には、「循環利用率」すなわち天然資源等投入量と循環利用量の合計に対する循環利用量の割合が選ばれている。「出口」の指標には、廃棄物の「最終処分量」が選ばれている。このうち資源生産性については、平成二年にトンあたり約 21 万円だったものが、平成十二年には約 28 万円へと改善されており、計画案では平成二十二年に 39 万円とすることを目標に定めるという。

このように、環境保全に関する国の計画に具体的な数値目標が盛り込まれること自体は評価すべきことである。しかし、上記の指標によって、現実の物質循環の複雑性・多様性が十分に反映できるかどうかについては検討が必要である。なぜなら、上記のうち「循環」の指標とされているいわゆるリサイクル率は、物質循環が閉じている場合、すなわち回収された再生資源が再び同じ品質の製品にリサイクルされる場合にのみ、物質循環の指標として有効であるからである。実際には、回収された再生資源はより品質の低い製品にリサイクルされることが一般的である。したがって、物質循環の実情は、リサイクルという言葉から想起される閉じた円環のイメージに代表される循環的再利用（狭義のリサイクル）ではなく、らせんのイメージに代表される段階的再利用、あるいはらせんがより複雑にリンクしたカスケード（滝）なのである。

図 1.1 紙資源の循環構造



¹ パブリック・コメントのため公表されている原案を環境省ホームページより入手。

図 1.2 カスケード構造の模式図

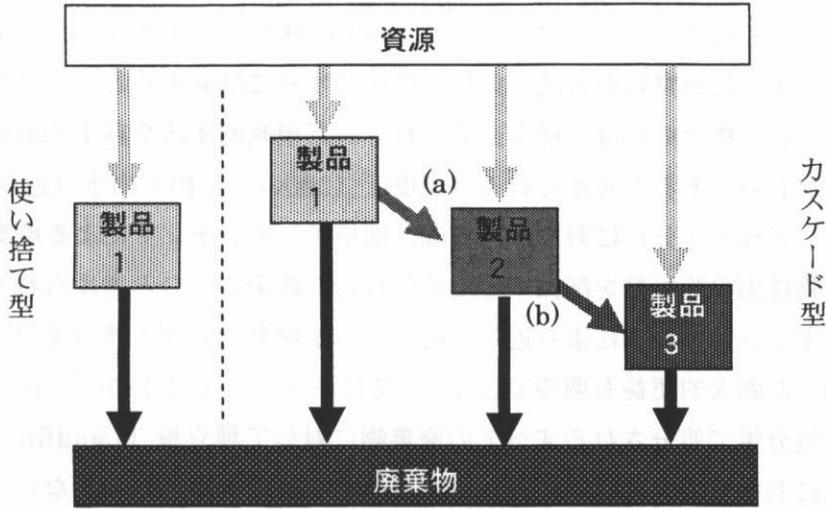


図 1.1 は現在の紙資源の循環構造を統計に基づいて模式化したものである。なお、本論文においては、いわゆる天然資源のことを一次資源と呼び、これとの対比で再生資源のことを二次資源と呼ぶ。この図から、一次資源から廃棄物に至るカスケードの中で、それぞれの紙製品が品目に応じて多様な位置を占めていることがわかる。すなわち、滝の上流域には一次資源を大量に使用しながら十分に回収されていない品目が位置し、中流域には新聞を起点とした資源の流れが見られる。そして、下流域の品目は限界まで古紙を利用している。このように、現実の物質循環がカスケード構造を持つとすれば、それを表現する指標もその構造にふさわしいものを用いる必要がある。

図 1.2 は図 1.1 を一般化してカスケード構造を表現したものである。図の左には、比較対照として使い捨て型の物質循環の例を示してある。この図の中で、従来のリサイクル指標を位置づけたのが、(a)と(b)である。いわゆるリサイクル率は、実際には二つの指標に分けられる。一つは、図の(a)によって示される二次資源の利用率、すなわち製品の生産量に対する二次資源投入量の割合である。他方、図の(b)によって示されるのは二次資源の回収率であり、製品の消費量に対する二次資源として回収された量の割合を意味する。

この図からも明らかなように、従来のリサイクル指標は循環構造を構成する個別の要素の指標に過ぎない。つまり、この指標だけでは循環構造を全体として評価することができないのである。したがって、カスケード構造における資源の有効利用の尺度としては不十分といえる。

1.3 循環型社会に向けた政策

一方、こうした指標を用いて測定されるリサイクルの水準を、目標値に近づけるために実施されるのがリサイクル促進政策である。基本法の制定に前後して容器包装、家電、建設廃棄物

第1章 研究の背景

など、品目毎にリサイクルを促進するための法律が施行され、拡大生産者責任や排出者責任のルールと品目による特性を考慮して具体的な制度が構築されている。また、先に示した基本計画における「出口」の指標については、すでに1999年9月にダイオキシン対策関係閣僚会議によって、2010年までに廃棄物の最終処分量を現状の半分に削減するという具体的な数値目標が示されている。この目標達成には、従来進められてきた規制的手法や自主的取組みに加え、経済的手法の活用が有効であると考えられる（環境庁（2000）、小出・山下（近刊）等）。

廃棄物の埋立（処理・処分）に対する課税は、価格インセンティブによる廃棄物削減効果が期待でき、廃棄物排出の絶対量を削減するための有効な政策の一つと考えられる。同時に、この税収をダイオキシン対策などにより近年高騰している廃棄物処理・処分施設の建設費用として利用するといった副次的便益も期待できる。すでにイギリスでは1996年10月1日以降、免許を受けた埋立処分場で処分されるすべての廃棄物に対して埋立税（Landfill Tax）が課せられている。日本においても、2000年4月の地方分権一括法の施行にともない、一部の自治体が国レベルに先んじて地方環境税の一つとして導入を検討している（倉阪（2000））。2001年6月にはその先陣を切り、三重県において県内で処理される産業廃棄物に課税する法定外目的税「産業廃棄物税」の条例が成立した。これにつづき、2002年には北九州市および岡山県でも条例が制定され、他の自治体でも類似の条例が検討されている。

しかし、地方環境税として自治体ごとに対応すると、地域間格差が生じて非課税の自治体に廃棄物が移動するおそれがある（環境省（2002a）等）。このような「漏れ」を防止し、税のもつ効果を最大限確保するためには、広域的な取り組みが重要となる。こうした動きを受け、環境省も2003年には「産業廃棄物行政と政策手段としての税の在り方に関する検討会」を開き、本格的な検討を始めている。同年内をめぐり一定の結論をとりまとめる予定とのことである²。

循環型社会の構築には大規模な社会システムの変革が不可欠である。変革のためには課税をはじめ、様々な施策が必要となる。これらの施策は、社会の全体としての環境負荷を低減することを目標とするものであるが、一方で副作用として社会に様々な影響を及ぼすことになる。例えば、リサイクルの進展は新たなビジネスチャンスを生む可能性もある。一方、一次資源の需要の減少により、これまで一次資源の生産によって生計を立てていた人々が、収入の減少や失業といった困難に直面するかもしれない。こうした政策の社会的な影響は、プラス面とマイナス面の双方があり、主体に応じて多様な結果を生むと考えられる。

したがって、こうした廃棄物税のような新たな政策手法の導入にあたっては、その効果と社会的な影響を十分に吟味する必要がある。廃棄物削減の目標を達成するためには、税率をどの程度に設定すべきか。課税は各経済主体にどのような影響を与えるのか。こうした問いに対し、理論研究では定性的な傾向を示すことはできるかも知れないが、具体的な数値を示すことはできない。一方、十分な実施例がない現状では事例による実証研究も困難である。

² 環境省ホームページより入手した、2003年1月28日付環境省報道発表資料より。

1.4 物質循環の多様性と政策の影響

さらに、政策の影響を評価する際にも、先に述べた循環構造の多様性を考慮する必要がある。その理由は、日本およびドイツにおける実態調査³によって得られた知見から、以下のようにまとめることができる。

リサイクル推進政策とは、それまで市場メカニズムによって決定されていたリサイクルの水準を超えて、廃棄物削減のために強制的にリサイクルを行うことを意味する。こうした強制的リサイクルにおいては、それまで二次資源の価格に転嫁されて潜在化していたリサイクルの費用が顕在化する。費用負担の配分に採用されるルールは、対象となる資源や政策を実施する主体によって異なるが、最終的には廃棄物のもとになる一次資源の消費者の負担となる。

一方で、強制的リサイクルは二次資源の供給過剰を生み、二次資源の需要が増加しなければ、その分価格が低下する。これを二次資源の消費者の立場から見ると、強制的リサイクルによって自身が消費する財の価格が安くなるという便益が発生していると考えられる。つまり、一次資源の消費者の費用負担によって二次資源の消費者に利益が発生することになる。このように、強制的リサイクルは所得移転の効果を持つ可能性が示唆される。

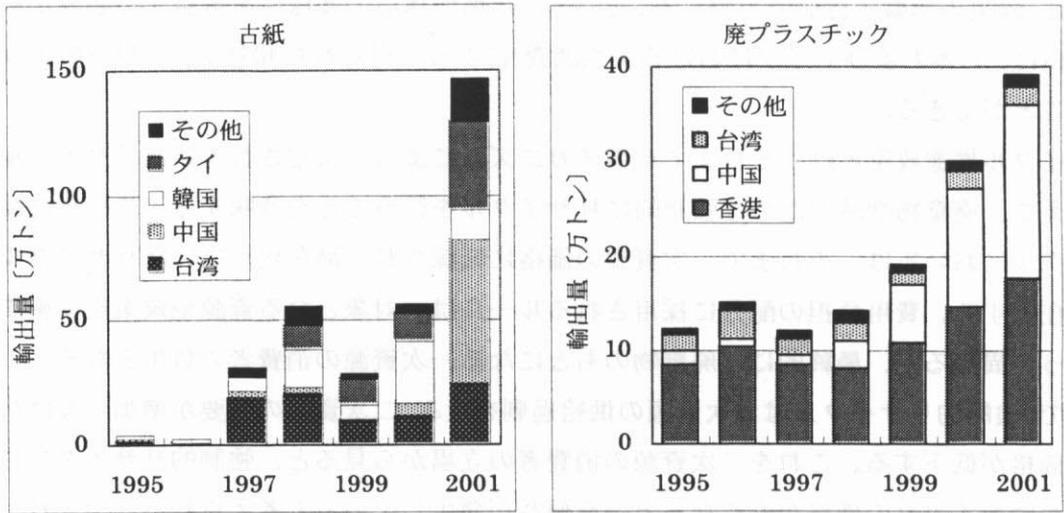
こうした状況を前提として、政策の効果と循環構造との関係を考えてみると、カスケード型の循環構造の場合、すなわち二次資源がもとの製品とは別の製品に再生される場合には上記の関係が成立することがわかる。一方、狭義のリサイクル型の循環構造の場合、すなわち二次資源がもとの製品に再生される場合には、一次資源の消費者と二次資源の消費者が一致することになり、上記の影響が緩和される可能性がある。このように、循環構造が閉じているか開いているかという違いが、関係主体の費用負担の状況に大きな影響を与えることが示唆される。こうした問題は廃棄物・リサイクルに特有の現象といえる。その意味でも、リサイクル政策の評価においては循環構造への配慮が不可欠である。

1.5 世界に向け開かれつつある循環構造

以上の議論においては、循環型社会は国内で閉じているという想定が暗黙のうちに前提とされている。実際、リサイクルは国内の問題であるというのが、これまでの日本における標準的な認識であった。しかし、1990年代後半以降、この状況に大きな変化が起きている。日本からアジア地域への二次資源の輸出が急激に増加しているのである。図 1.3 に示すように、古紙は1995年の年間4万トンから2001年には147万トンへ、廃プラスチックは12万トンから39万トンへと、それぞれ輸出量が増加している（財務省の貿易統計より）。2001年の古紙の輸出量は、同年の古紙回収量1769万トンの8%にあたる（経済産業省の統計）。また、廃プラスチックについては、2000年の総排出量997万トンに対し139万トンが再生利用（マテリアル・

³ 詳細は付録3および4を参照。

図 1.3 日本からの二次資源の輸出量の推移



リサイクル)されたが、そのうちの 22%が海外で再生利用された計算となる。このように、二次資源のフローに着目すると、循環型社会をめざす日本の物質循環が、急速に海外に向けて開かれつつあることがわかる。

こうした状況の背景を、古紙を例として見てみる。1997年の容器包装リサイクル法の施行をはじめとして、2000年施行の循環型社会形成推進基本法を柱としたリサイクル推進政策が次々に導入された。その結果、回収される二次資源の供給量は増加した。しかし、二次資源の国内需要が供給に対応した増加を示さなかったため、二次資源の大量の在庫、価格の暴落や逆有償といった問題が発生した。この二次資源の需給の格差を解消するために、余剰分の輸出が行われるようになった⁵。当初は緊急避難的に採算を度外視して始められた輸出であったが、輸出方法の合理化や海外の古紙市況の変化で採算がとれるようになり、恒常化していった⁶。

このように、日本だけに着目すると、二次資源の貿易は比較的新しい話題に見える。しかし、世界的視野に立つと、歴史的にはリサイクルの発展とともに二次資源の貿易も拡大してきたことがわかる。図 1.4 は、1970年から2001年までの全世界の古紙回収率と古紙貿易率の伸びを比較したものである。ここでは、リサイクルの指標として古紙回収率を用い、貿易の指標として古紙貿易率⁷を用いている。古紙回収率は1970年の24.3%から2001年の42.4%へと、およそ1.7倍に増加している。一方、古紙貿易率は5.8%から19.6%へ3.4倍となり、リサイクルの倍の速さで二次資源の貿易が拡大してきたことがわかる。したがって、循環構造の分析においては、こうした二次資源の貿易を通じた世界に開かれた循環をも視野に入れる必要がある。

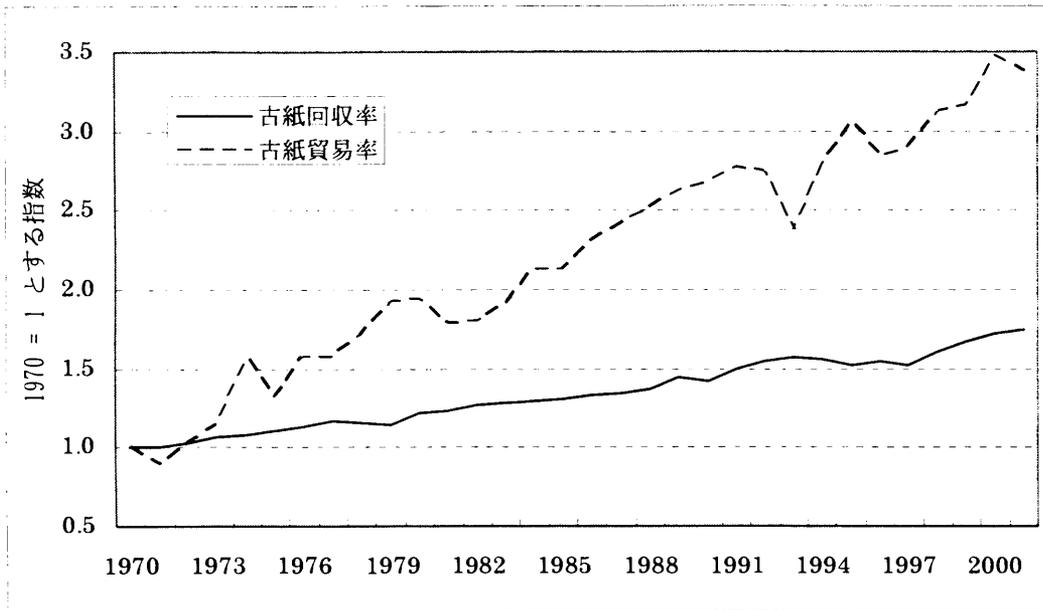
⁴ 社団法人プラスチック処理促進協会による推計。

⁵ 1997年以降2000年に至る日本からの古紙輸出の展開については羽生・岸野(2001)に詳しい。

⁶ 日本からの古紙の輸出について、山下(2000b)において述べた予想は間違っていた。

⁷ 古紙貿易率とは、世界の古紙回収量の総和に対する世界の古紙輸入量の総和の割合である。

図 1.4 古紙のリサイクルと貿易の推移



以上で確認したとおり、循環型社会に向けた政策を進める上では、現実の物質循環の多様性・複雑性を考慮し、政策に反映することが重要である。にもかかわらず、現在進められている諸政策においては、物質循環の把握や指標化の面でも、個別の政策の影響評価の面でも、物質循環の多様性に対する配慮が十分には行われていない。したがって、本論文においては、循環型社会の政策に現実の物質循環の多様性を反映するための手法を開発し、これを用いて物質循環の指標化や具体的な政策の評価を行うことを目的とする。

第2章 先行研究

「通常の経済理論は実際のところサービスのみを対象としている」。Ayres and Kneese (1969)はその古典的論文のなかで、Frank Knightの言葉を引きつつこう述べている。これまでの経済理論は、財とサービスの両方を対象としているといいつつも、そこでの財は消費された後あたかも消えてなくなってしまうかのように扱われていた。財のモノとしての本質である物質循環の観点がこれまでの経済学から欠落していることを、この言葉は端的に示している。

こうした認識の背景には、Boulding (1968)の画期的論文によって提示された「宇宙船地球号の経済学」が念頭にあると考えられる。地球は物質的に閉じたシステムであるという前提から、質量保存の法則が明示的に意識される。これを踏まえてAyres and Kneese (1969)は、それまで別個に扱われてきた人間社会の経済循環と自然界の物質循環を統合する理論的枠組み(植田ら(1991))として、マテリアル・バランス・アプローチを提案している。

マテリアル・バランス・アプローチにおいては、経済循環と物質循環という二つの循環を個別に把握することに加え、両者の連関を明らかにすることが重要となる。このうち、所定の経済循環にともなって発生する物質循環の把握に関しては、Kneese, Ayres and D'Arge (1970)において、当該の物質循環を具体的なフローチャートとして把握する手法が提案されている。一方、分析の方向を逆転し、所定の物質循環の構造や環境負荷の水準を達成させるためには、どのような経済構造である必要があるかを問うアプローチも存在する。Ayres and Kneese (1969)およびKneese, Ayres and D'Arge (1970)においても、生産段階への投入物と産出物(製品と廃棄物)との間のマテリアル・バランスを考慮した一般均衡理論を用い、廃棄物の排出によってもたらされる社会厚生低下を、廃棄物への課税によって緩和する政策の分析が試みられている。

2.1 物質循環の分析

前者の物質循環をフローチャートとして把握する手法は、経済学よりはむしろ社会工学などの分野において、システム・ダイナミクスや数理計画を用いた研究として発展してきた。たとえば、吉田・大野(1982)はシステム・ダイナミクスを用いてマクロ経済データから紙の物質循環をシミュレートするモデルを構築している。また、塩谷・大野・吉田(1982)は紙の物質循環に関する線形計画問題を定式化し、廃棄物や環境対策費用などの最小化問題を解いて最適なりサイクル率を示している。一方、森澤・関口・井上(1993)は紙の物質循環におけるマテリアル・バランスを微分方程式体系によって表現するモデルを構築し、森澤・長谷川・井上(1995)ではこのモデルを拡張してリサイクル政策の効果を物質、エネルギー、費用の各面から評価している。これらはいずれも日本国内を対象とした研究であるが、同様な研究はヨーロ

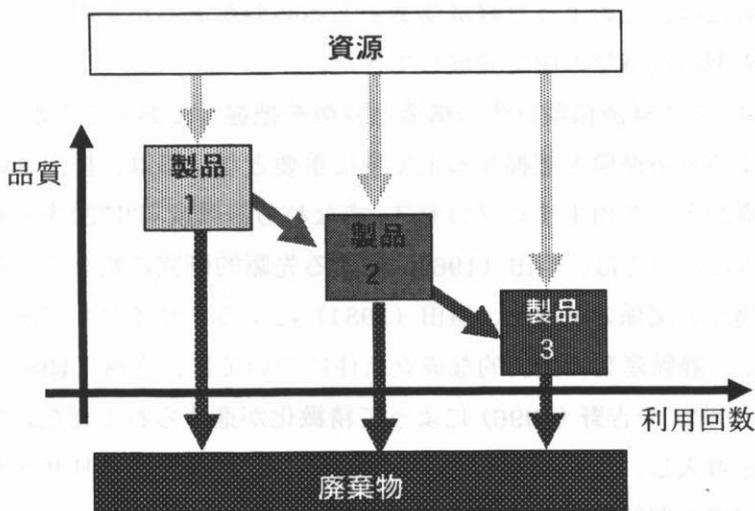
ツパにおいても行われている⁸。これらは、複雑な現実を実態に即してそのまま把握するアプローチといえる。

一方、Bouldingの「宇宙船地球号」モデルには、質量保存則だけでなく熱力学第二法則、すなわちエントロピー増大則への配慮も包含されていた。上記のマテリアル・バランス・アプローチとその発展形においても、物質循環にともなう環境負荷の把握という形で間接的にエントロピー的側面への配慮が試みられているといえる。これに対し、物理法則であるエントロピーの法則と人間の経済活動との関係を直接的に取り扱った研究としては、Georgescu-Roegen (1971) や玉野井 (1978, 1990) などが代表的である。これらの貢献を踏まえ、物質循環の分析にエントロピー的視点を組み込む理論的枠組みとして、Sirkin and ten Houten (1994) によりカスケード理論の基礎が提示されている。

エントロピーの法則によれば、物質循環における資源利用形態は、通常イメージされることの多い閉じた循環（狭義のリサイクル）ではなくカスケード構造を有する。カスケードという言葉は、川にある滝（カスケード）からの類推に由来している。つまり、川の水は、滝のある高さから次の高さへと順々に流れ落ち、ついには海へと至る (Sirkin and ten Houten (1994))。このように、物質循環においては、品質の段階的劣化を伴いながら、資源を段階的に活用しているのである。こうした段階的な資源利用システムを、カスケードあるいはカスケード連鎖と呼ぶ (Fraanje (1997))。

カスケード理論においては、物質循環の構造を記述するために二次元のモデルを用いる。すなわち、物質の利用回数と品質という二つの尺度から物質循環を評価することになる (図 2.1 参照)。後者の尺度が導入されることで、品質の低下の評価を通じてエントロピー的側面への配

図 2.1 カスケード構造の分析軸



⁸ たとえば、Byström and Lönnstedt (1995, 1997)、Weaver et al. (1997) など。

慮が可能となる。加えて、物質循環をこの二次元のモデルで表現することで、現実の複雑な循環構造の要点を簡潔に把握することができる。この点が、上記のシステム・ダイナミクスを用いたアプローチとの大きな違いである。ただし、Sirkin and ten Houten (1994) は理論的な枠組みを提示したに過ぎない。また、これまでに、Fraanje (1997) や Lafleur and Fraanje (1997) によってカスケード理論を用いた木材利用に関する事例研究が行われているが、どちらも二つの次元のうち利用回数のみを定量評価したに過ぎない。したがって、これまではカスケード理論の持つ可能性が十分に活用されていない状況にあったといえる。

そこで、本論文第1部においては、カスケード理論の二つの次元の両方を定量評価できるモデルを提案する。これを用いてリサイクル政策に有効となる新たな指標が得られ、現実の複雑な循環構造の核心部分を簡潔に把握することが可能となる。第1部では、対象を紙資源に限定して分析を進める。紙資源を選ぶのは次のような理由による。廃プラスチックなどと違い、長期にわたるリサイクルと貿易の歴史があること。有害性が認められバーゼル条約による規制の対象となっている廃鉛などと違い、貿易の規制が行われていないこと。そして、最終製品として様々な用途に用いられる金属類と違い、用途が限定されているために分析対象を限定できることである。

2.2 経済循環の分析

以上の研究は、経済活動に関するシナリオを外生的に与え、それにとまなう物質循環や環境負荷の変化を試算するアプローチといえる。すなわち、経済循環が物質循環に及ぼす影響を評価する方向で、物質循環の把握に重点を置いた分析が行われていた。一方、マテリアル・バランス・アプローチにおける分析のもう一つの方向は、所定の物質循環の構造や環境負荷の水準を達成させるためには、どのような経済構造である必要があるかを問うことであった。このアプローチは、従来型の経済学の中で発展してきた。

分析のためには、まず経済循環自体の構造と特徴を把握しておくことが前提となる。廃棄物・リサイクルに関する経済循環を把握する上で特に重要となるのは、排出された廃棄物を回収し再び利用可能な資源として再生するプロセス、すなわち静脈産業⁹に関する経済的メカニズムの解明である。日本においては、柴田 (1961) による先駆的研究に始まり、華山 (1976) による家計消費と廃棄物との関係の分析や、植田 (1981) によるリサイクルに関する実証的分析が行われてきた。特に、静脈産業の経済的な成立条件については、寺西 (1987) による理論的定式化を受け、植田 (1992) や吉野 (1996) によって精緻化が進められてきた。さらに、細田 (1999) は負の財の概念を導入し、政策によって経済的な成立条件を超えてリサイクルが推進された結果発生した、逆有償の問題を分析している。

⁹ 経済の循環を血液の循環になぞらえ、一次製品の生産・供給側を動脈産業、二次資源の回収・供給側を静脈産業と呼ぶ。

環境の制約を考慮した経済構造のあり方を分析するには、大きく三つの典型的アプローチがある。その一つは、Leontief (1970) に代表される産業連関分析の環境問題への応用である。このアプローチは、大平ら (1998, 1999) による廃棄物に関する付帯表を用いた産業連関分析、中村 (1999, 2000a, 2002) による物量表による廃棄物産業連関分析など、日本においても近年盛んに行われている。ただし、産業連関分析は経済構造が価格によって変化しないという前提を持つため、価格変化を通じた経済構造や物質循環の変化を分析することができない。この点は、以下で述べるようなりサイクル政策の評価を行う上で、大きな制約となる。

第二のアプローチは、資源経済学的アプローチである。廃棄物の長期間にわたる蓄積とそれにとまなう社会厚生低下を考慮した上で、社会厚生を最大化するように動学的最適化問題を解くといった分析が行われる。この中で、リサイクルを意識した研究としては、Smith (1972)、D'Arge and Kogiku (1973)、Weinstein and Zeckhauser (1974)、Huhtala (1997) などがあげられる。たとえば Smith (1972) の場合、廃棄物の蓄積にとまなう社会的費用とリサイクルに要する私的費用との比較により、最適なりサイクル水準とそれをもたらす経済構造が求められる。

そして第三は、公共経済学的な理論分析である。本アプローチにおいては、税などの経済的手法が企業や家計の行動にどう影響を与えるかについて理論的な分析が行われる。これらアプローチで企業行動に焦点をあてたものとして、Kohn (1997)、Conrad (1999)、家計行動に焦点を当てたものとして、Dinan (1993)、Fullerton and Kinnaman (1995)、Palmer et al. (1997)、Fullerton and Wu (1998)、Fullerton and Wolverton (1999) などがある (これらの研究をまとめたものとして、Fullerton and Kinnaman (2002) がある)。

第三のアプローチでは、廃棄物によってもたらされる外部不経済をピグー税的手段によって内部化するというアプローチがとられている。分析の焦点は、税や補助金の対象としてどのような組み合わせを採用するかという点にある。これを Kinnaman and Fullerton (2000) にならって整理すると、主要な選択肢としては 1) 廃棄物排出への課税、2) リサイクルへの補助金、3) 製品購入への課税、4) 一次資源利用への課税、5) 二次資源利用への補助金が挙げられる。不法投棄を完全に防ぐことができる場合には、もっとも直接的な方法である 1) の廃棄物排出への課税でも、効率的な資源配分を実現できる。しかし、不法投棄の防止が不可能である場合には、2) と 3) の組み合わせであるデポジット・リファンド制度 (Bohm (1981)) がもっとも望ましいとする研究が多い。

2.3 物質循環と経済循環との連関

以上の経済循環に関する研究を物質循環の観点から吟味すると、大半の研究がカスケード型ではなく狭義のリサイクル型のモデルを採用しているという限界が明らかとなる。すなわち、リサイクルされた資源が、再び同じ製品の原料として用いられるという閉じた物質循環が想定されている。理論的分析を目的とするためシンプルな構造が仮定されていることがその主たる

理由と考えられる。特に、第三の公共経済学的アプローチにおいては家計行動に焦点を当てた研究が多いため、生産者に関してより詳細な条件設定が必要となる開いた物質循環の想定が採用されにくいといえる。

しかし、これまでにカスケード型の物質循環が政策に与える影響について言及した研究がまったく存在していないわけではない。Smith (1972) の考察部分には、論文の理論モデルの内容とは直接関係していないものの、物質循環が閉じている場合と開いている場合との費用負担の違いに関する記述がある。すなわち、物質循環が閉じている場合¹⁰には、生産者は廃棄物への課税による費用負担を被るが、二次資源の利用により補助金を得ることができるため、実質的な負担はその差額のみとなる。一方、物質循環が開いている場合には、廃棄物税を負担する生産者と補助金を得る生産者が別の主体となるため、所得移転の効果をもたらすことになると論じられている。

開いた物質循環を明示的に扱った論文としては、Dinan (1993) によるデポジット・リファンド制度と一次資源税の比較に関する研究が挙げられる。それによれば、一次資源への課税がリサイクル促進効果を持つのは、二次資源が課税される一次資源と代替関係にある場合、すなわち物質循環が閉じている場合に限られるという。たとえば、新聞古紙が再び紙の生産に用いられる場合には、パルプへの課税が新聞古紙の利用を促す効果があるが、新聞古紙が家畜の敷き藁として用いられる場合に対しては、パルプへの課税は何の効果もない。さらに、Dinan は開いた物質循環の例として、海外への輸出についても言及している。こうした分析に基づき、Dinan は一次資源税よりデポジット・リファンド制度の方が適切なインセンティブ効果を生むことができると結論づけている。

Smith や Dinan の分析やドイツにおける実態調査の結果(付録4を参照)から、物質循環の構造に応じてリサイクル政策の効果や影響が異なることが示唆される。このことは、物質循環と経済循環との連関を明らかにするという Ayres and Kneese 以来の問題関心の文脈においても重要な意味を持つ。循環構造の多様性と政策の効果との関係を詳細に評価するには、相応の精度で循環構造を記述でき、かつ、廃棄物税など価格インセンティブを用いた政策が経済に及ぼす影響を反映できる分析手法が必要となる。先に紹介した三つのアプローチのうち、第一のアプローチは実データを用いた詳細な記述という面では優れるが、価格効果の評価ができない。第二、第三のアプローチは価格効果の評価は可能であるが、詳細な記述には向かない。

そこで、本論文第2部においては、上記アプローチの長所を生かした分析が可能である、応用一般均衡モデル(Shoven and Whalley (1992)などを参照)を用いて、リサイクル推進政策の定量的な評価を行う。ここで、上記アプローチにおいては基本的にピグー税的な政策が分析対象とされていた。しかし、応用一般均衡モデルの枠組みにおいてピグー税的な政策を導入するためには、廃棄物の排出や蓄積によって生じる社会的費用についての具体的なデータが必

¹⁰ Smith (1972) の定義においては、廃棄物(となる製品)の生産と利用が同一の生産者によって行われる場合。

要となる。この社会的費用曲線の推定はそれ自体が独立した研究として行われるべき類の課題であり、その作業は本論文の範囲を超えることになる。したがって、ここでは次善の策として、所定の目標を達成するために必要な政策（具体的には税率）を分析の対象とする。

また、廃棄物の不法投棄の問題は、理論的にも現実世界においてもリサイクル政策に大きな影響を及ぼすものである。しかし、不法投棄の問題を定量的に分析するには、不法投棄の実行費用、不法投棄に起因する環境汚染による社会的費用、不法投棄が発見され処罰される確率など、現時点で定量化が困難な情報が必要となる。こうした状況に鑑みて、本論文においては不法投棄を分析の対象から除くこととする。これを踏まえ、分析の対象とする政策手法としては、もっとも直接的な内部化手法である廃棄物税を取り上げる。

廃棄物・リサイクル政策に応用一般均衡モデルを用いている研究事例は少なく、宮田（1998）および宮田・彪（1999, 2000）による廃棄物に関するモデル分析、増井ら（2000, 2001）による二酸化炭素と廃棄物制約を入れたモデル分析などに限られている。宮田（1998）は北海道を対象とした家庭廃棄物有料化の分析であり、宮田・彪（1999, 2000）は愛知県を対象としてリサイクル活動の有無が物質循環に与える影響を評価している。増井ら（2000, 2001）は全国を対象としているが、廃棄物だけでなく二酸化炭素も制約としている点が本論文とは異なる。また、モデル構造上の本質的な違いについては後述する。

2.4 国際的な物質循環の分析

先の Dinan の指摘にもあるように、廃棄物・リサイクル政策の検討においても、国境を越えた物質循環を無視することはできない。第1章で見たように、日本においては二次資源の貿易は比較的新しい事象であるが、世界的に見ると二次資源の貿易にも長い歴史がある。こうした過程を反映して、早くも1978年には、Grace et al.（1978）によって二次資源の貿易が各国のリサイクルに与える影響に関する経済学的分析がなされている。具体的には、紙資源を題材として、回収率や利用率を古紙や製品の貿易と関係づける理論モデルを構築し、これと現実のデータを照合することで、次のような結論を導いている。すなわち、二次資源貿易が行われた方が、全体としてリサイクルされる資源量が増え、二次資源市場も安定化する。したがって、二次資源貿易は環境面でも経済面でも望ましい結果を生むとされる。

また、Copeland（1991）は廃棄物貿易の制限が社会厚生に与える影響を理論モデルによって分析している。すなわち、理論的には廃棄物に関しても自由貿易を適用し、廃棄物処理にともなう社会的費用を課税により内部化した上で、処理費用の安い国で処理を行うことが最適である。しかし、現実には不法投棄が防止できないので、税率を下げ貿易を制限する方が最適となる。また、受入国で廃棄物への課税政策がない場合も貿易制限をすべきであると論じている。

一方、国別の内訳を検討することで、リサイクルと二次資源の貿易に一定のパターンがあることが明らかになる。van Beukering（2001）は、世界各国の古紙（50カ国）と廃鉛（40カ国）のリサイクルと貿易の統計を分析し、次のようなパターンを見いだした。すなわち、先進

第2章 先行研究

国は二次資源の回収に特化して二次資源の輸出国となり、途上国は二次資源の利用に特化して輸入国となるという傾向である。言い換えれば、先進国で回収された二次資源が途上国に輸出され、途上国で再生利用されるというパターンが一般的であるということである。

二次資源の輸出国にとっては、日本の古紙輸出の例に見るように、輸出という選択肢によって回収後の利用先が担保されることで、二次資源の回収が促進されると考えられる。しかし、輸出への依存が高まると国内の再生産業の発展が阻害される可能性もある。一方の輸入国にとっては、二次資源の輸入は安価な工業原料の供給源となり、産業の発展への寄与が期待できる。また、一般に一次資源の生産工程は環境負荷が相対的に大きく¹¹、国産の一次資源が輸入二次資源に代替されることによる環境負荷の低減が期待できる場合もある。しかし、輸入二次資源は国内の二次資源回収と競合し、輸入国内の産業に悪影響を及ぼすことが懸念される¹²。

一方で、こうした先進国と途上国とのリサイクルの分業は、いわゆる公害輸出(寺西(1992))となる可能性も否定できない。先述の van Beukering (2001) は、分業が進む理由の一つとして、先進国に比べ途上国の環境規制の水準が低いことをあげている。また、二次資源の越境移動が活発化するにつれ、1999年12月におきたニッソー事件のような廃棄物の不法輸出の問題が増加することも懸念される。

こうした二次資源の貿易を評価するには、経済的側面と環境的側面双方を視野に入れる必要がある。しかし、そのためにはまず分析の端緒として、対象となる物質のマテリアル・フローの把握を行う必要がある。その際、二次資源だけでなく、代替的な一次資源(古紙に対するパルプ、鉄屑に対する鉄鉱石など)と両者をもとに生産される最終製品(古紙とパルプから生産される紙製品)についても同時に扱わなくてはならない。こうした資源の流れと製品の流れの連鎖を一括して扱う手法として、Material-product chain (MPC) analysis という手法がある(Opschoor(1994))。さらに、van Beukering(2001)はこれを多国間の資源、製品の移動を考慮できるように拡張した International MPC を提案している。このモデルの基本的構造を図2.2に示す。MPCには一次資源、最終製品、二次資源という3つの要素がある¹³。実線矢印で示されるフローが資源と製品の間の垂直方向の流れであり、従来型のMPCを示している。これに加え、波線矢印で示される水平方向のフローが同一要素間の貿易を示している。この矢印によって複数の国のMPCが接続される。この拡張により、A国で生産された一次資源がB国に輸出され、B国で最終製品となって消費され、二次資源として回収されたものが再びA国に輸出されるといった、複雑なフローを追跡することが可能となる。本論文第1部第5章

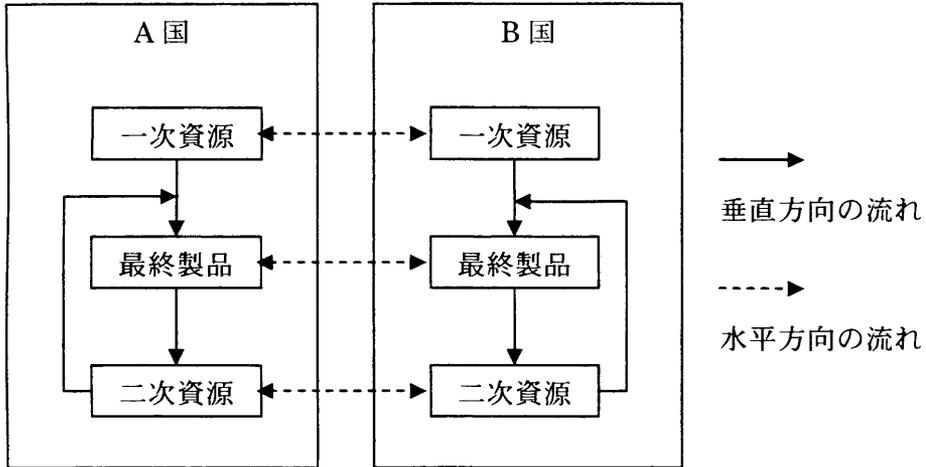
¹¹ 例えば、中国では淮河流域の水質汚濁を防止するため「汚染がひどく排水処理対策の見込みの薄い年産5000トン以下の製紙工場における化学パルプ製造設備を、すべて閉鎖または生産停止する」という対策が1995年に講じられたという(大塚(2002)参照)。

¹² たとえば、Sharma et al.(1997)によるインドの古紙輸入に関する事例研究の場合、輸入を促進した方が環境面や製紙業の経済面ではメリットがあるが、雇用の面ではインフォーマルセクターの活用が重要であると報告されている。

¹³ なお、現実のマテリアル・フローには各段階から排出される廃棄物も含まれるが、ここでは要素間の連鎖を強調するため省略している。

では、アジア地域の紙資源のマテリアル・フローの分析を試みる。

図 2.2 国際的 MPC におけるマテリアル・フローのモデル



以上の位置づけからも明らかな通り、本論文は環境問題という問題の解決を指向して学際的なアプローチから研究を進めている。こうしたアプローチの位置づけに関する議論については付録1を参照のこと。

第1部

物質循環を捉える指標

第1部においては、物質循環の多様性を把握するための新たな指標として循環度を提案し、これを用いて日本の紙資源の物質循環の現状や、個人のリサイクル行動、そして国際化したリサイクルの現状を分析する。

第3章 リサイクルされた資源は何回利用されているか

本章では、まず循環度計算の基礎となるマテリアル・バランス・モデルを定式化し、そこから循環度を導出する。この循環度を用いて日本の紙資源の物質循環の現状を分析し、指標としての循環度の有効性を検証する¹⁴。

3.1 循環度の定式化

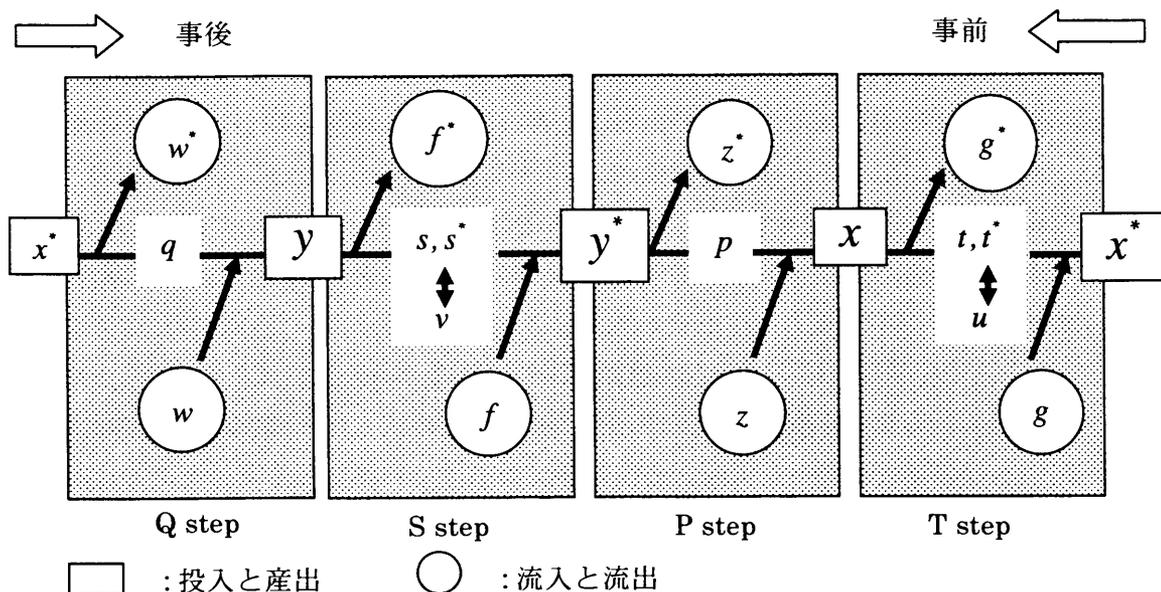
ここでは、主として単一の物質から作られる製品のリサイクル・システムに焦点を当て、そのマテリアル・フローを記述するモデルを用いて循環度を算出する方法を示し、そのシステムにおける物質循環を分析する。例えば、紙製品のリサイクル・システムにおいては、木材繊維が主要な原料となっている。このシステムにおいては、木材チップのような一次原料と古紙のような二次原料が、新聞紙や段ボールなどの紙製品を製造するために投入される。こうした製品は、消費されたあと回収されてシステムの原料である古紙となるか、あるいはシステムの外へと廃棄されることになる。このように、ある場所では製品であり、また別の場所では原料となる。しかし、主として循環している物質自体は同じ紙繊維である。

マテリアル・バランス・モデル

マテリアル・バランス・モデルにおいては、システムを四つの連続的な成分に分割する。製品の消費を起点として物質の流れに沿って見た場合、最初の段階は「国内における使用済みの製品の回収 (Q step)」となる。2番目の段階は、「原料の貿易 (S step)」であり、3番目の段

¹⁴ 本章は、Yamashita et al. (2000) をもとに加筆修正したものである。

図 3.1 マテリアル・バランス・モデル



階は、「国内における新たな製品の生産 (P step)」である。そして、最後の段階が「製品の貿易 (T step)」である。最初は、このシステムにおいてはその物質から単一の製品が生産され、その製品はリサイクルされて単一の原料となるという仮定をおく。この仮定の下で、各段階のマテリアル・バランスを記述する (図 3.1 を参照)。

今、ある国において、分析の対象とする製品が x^* 消費されたとする。この x^* が、Q step (国内回収段階) への投入となる。この投入のうち、 w^* が廃棄され (流出)、残りの $x^* - w^*$ が回収される。 $x^* - w^* = q$ が、この段階の通過量と定義される。回収の過程で不純物が w 混入する (流入)。それゆえ、回収される使用済み物質の量 y は、通過量と w の和となる。 y が、この段階の産出である。したがって、この段階においては次のマテリアル・バランスが成り立つ。

$$x^* - w^* = q = y - w. \quad (3.1)$$

次の S step (原料貿易段階) においては、回収量 y (投入) のうち f^* が輸出される (流出) ので、投入側から見た場合のこの段階の通過量は $y - f^* = s$ となる。一方、2次原料の利用量 y^* (産出) のうち f が輸入されたもの (流入) であるので、産出側から見た場合のこの段階の通過量は $y^* - f = s^*$ となる。これら2つの通過量 s と s^* の違いは、2次原料の在庫変動によるものである。 v を在庫の純増量とすれば、この段階のマテリアル・バランスは次のようになる。

$$y - f^* = s, s = s^* + v, s^* = y^* - f. \quad (3.2)$$

同様に、P step (国内生産段階) においては、システムの外から来る1次原料 z に加え、2次原料 y^* が投入される。結果として、製品が x 生産され、投入された原料のうち z^* が生産工程においてスラッジなどの排出として失われる。したがって、 p をこの段階の通過量とすると、この段階のマテリアル・バランスは以下のように表される。

第3章 リサイクルされた資源は何回利用されているか

$$y^* - z^* = p = x - z. \quad (3.3)$$

最後の T step (製品貿易段階) においては、生産量 x のうち g^* が輸出されるので、投入側から見たこの段階の通過量は $x - g^* = t$ となる。一方、製品消費量 x^* のうち g は輸入されたものであるので、産出側から見たこの段階の通過量は $x^* - g = t^*$ となる。これら 2 つの通過量 t と t^* との違いは、製品の在庫変動によるものである。 u を製品在庫の純増量とすると、この段階のマテリアル・バランスは以下のように表される。

$$x - g^* = t, t = t^* + u, t^* = x^* - g. \quad (3.4)$$

以上が、マテリアル・バランス・モデルの 4 つの段階である。それぞれの均衡式において、次の関係が成立する。

$$\text{投入} - \text{流出} = \text{通過量} = \text{産出} - \text{流入}$$

ある段階の産出はそれに続く段階の投入に等しく、その段階の投入は一つ前の段階の産出に等しい。ある段階の通過量は、投入のうち次の段階に流れていくものとしてだけでなく、産出のうち前の段階から流れてきたものとしても認識される。したがって、投入に対する通過量の割合を事後通過率と定義し (添字 a)、産出に対する通過量の割合を事前通過率と定義する (添字 b)。それぞれの段階において、この二つの割合は以下のように表される。

	Post,	Pre
Q step:	$q_a = \frac{q}{x^*},$	$q_b = \frac{q}{y}$,
S step:	$s_a = \frac{s}{y},$	$s_b = \frac{s^*}{y^*},$
P step:	$p_a = \frac{p}{y^*},$	$p_b = \frac{p}{x},$
T step:	$t_a = \frac{t}{x},$	$t_b = \frac{t^*}{x^*}.$

(3.5)

ある段階の流出は、投入のうちシステムの外に流れ出る部分であり、流入は産出のうちシステムの外から流れ込む部分である。本章においては、システムの境界を一国内 (あるいは、特定の地理的単位) に限定する。したがって、流出としてみなされる輸出は、一度輸出されたものは他国で使われることはあってもその国では二度と製品として使われることはないという意味で、廃棄物と等価である。さらに、流入としてみなされる輸入は、これまでにその国で製品として使われたことがないという意味で、一次原料と等価である。

循環度

先に定義した道具立てを用いて、カスケード理論の二つの主要な次元である資源の寿命と品質の統計的な定量化を行う。前者は、消費後にその物質が利用される回数として定義される。

製品の利用回数が多いほど、その寿命は長いといえる。しかし、利用回数を評価するに当たっては、製品のすべてが同じ経路を辿るわけではないため、直接的な測定が不可能である。マクロ的には、製品がリサイクルされるか否かは確率的に決定される。したがって、製品の利用回数は消費後利用回数の期待値のかたちで統計的に求めることになる。

事後循環率 r_a は、製品の消費量に対する再び同じ製品として利用される量の割合として定義され、事後通過率によって次のように表される。

$$r_a = q_a s_a p_a t_a \quad (3.6)$$

というのは、ある段階の事後通過率は、その段階への投入量に対する次の段階に流れ下る量の割合を示しているので、この割合を四つの段階すべてについて掛け合わせることで、最初の段階(Q step)への投入量に対する五番目の段階(Q step)に流れ下る量の割合がえられる。これは、消費された後その国において少なくとも1回循環するものの確率である。

したがって、 r_a^2 によって少なくとも2回循環するものの確率が与えられる。それゆえ、 $r_a - r_a^2$ によって、ちょうど1回循環する確率が得られ、 $r_a^k - r_a^{k+1}$ によってちょうど k 回循環する確率が得られる。こうして、事後循環度が循環回数の期待値として以下のように得られる。

$$\begin{aligned} c_a &= \sum_{k=1}^{\infty} (k-1)(r_a^{k-1} - r_a^k) \\ &= \frac{r_a}{1-r_a}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

c_a は、その製品が消費されたあと、国内で平均何回利用されるかを示しており、製品の寿命の尺度となる。

この式から明らかな通り、 c_a は r_a のみによって決まり、 r_a は各段階の事後循環率によって決まる。ここで、一般的に z^* と w は製品の消費量に比べて十分に小さいとみなされる。それゆえ、マテリアル・フローが国内で閉じている場合、すなわち、製品や原料の輸出入がない場合には、 r_a は従来の回収率、つまり、製品消費量 x^* に対する回収量 y の割合に相当する。

$$\begin{aligned} r_a &= q_a s_a p_a t_a = \frac{x^* - w^*}{x^*} \frac{y - f^*}{y} \frac{y^* - z^*}{y^*} \frac{x - g^*}{x} \\ &= \frac{x^* - w^*}{x^*} \frac{y^* - z^*}{y^*}, (f^*, g^* \equiv 0) \\ &= \frac{x^* - w^*}{x^*}, (z^* \equiv 0) \\ &= \frac{y}{x^*}, (\because w \equiv 0 \Rightarrow x^* - w^* \equiv y) \end{aligned} \quad (3.8)$$

このように、 r_a と c_a は、従来の回収率を内包する指標であるといえる。

カスケード理論のもう一つの次元である資源の品質に関しても、資源の寿命の定量化に用いられたのと同様な方法を用いる。すなわち、寿命の場合には、製品の消費後利用回数を数えた。一方今回は、製品が国内でこれまで何回利用されてきたか、すなわち消費前利用回数を

第3章 リサイクルされた資源は何回利用されているか

数える。その理由は、製品（例えば紙製品）の品質が、その製品を構成する物質の品質（例えば、紙繊維）によって表されるからである。物質の品質はリサイクルされるにつれて劣化する。2回リサイクルされた物質の品質は、1回リサイクルされたものよりも低い。したがって、消費前利用回数は、製品の品質に反比例する。

消費後利用回数が事後循環度によって表されるのと同様に、消費前利用回数は事前循環率 r_b によって得られる事前循環度 c_b によって表される。 r_b は、製品消費量に対する以前同じ製品として利用された量の割合によって定義され、事前通過率によって以下のように表される。

$$r_b = t_b p_b s_b q_b \quad (3.9)$$

4段階すべての割合を掛け合わせることで、今回の T step の産出に対する前回の T step から流れ下ってきた量の割合が得られる。これが、消費前に国内で少なくとも1回は循環したことがあるものの確率である。

c_b の導出過程は c_a の場合と同様で、

$$\begin{aligned} c_b &= \sum_{k=1}^{\infty} (k-1)(r_b^{k-1} - r_b^k) \\ &= \frac{r_b}{1-r_b}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

となる。

ここでも、国内で閉じたマテリアル・フローの場合には、 r_b は従来の利用率、すなわち製品生産量 x に対する二次原料投入量 y^* の割合に相当する。

$$\begin{aligned} r_b = t_b p_b s_b q_b &= \frac{x^* - g}{x^*} \frac{x - z}{x} \frac{y^* - f}{y^*} \frac{y - w}{y} \\ &= \frac{x - z}{x} \frac{y - w}{y}, \quad (f, g \cong 0) \\ &= \frac{x - z}{x}, \quad (w \cong 0) \\ &= \frac{y^*}{x}, \quad (\because z^* \cong 0 \Rightarrow x - z \cong y^*) \end{aligned} \quad (3.11)$$

したがって、 r_b と c_b は、従来の利用率を内包する指標であるといえる。

最後に、総循環度が事前循環度と事後循環度の和として定義される。

$$c = c_a + c_b \quad (3.12)$$

ある製品の総循環度が小さいとすれば、すなわち、その製品の事前循環度と事後循環度が共に小さいとすれば、その製品は品質の高い原料から作られており、あまりリサイクルされていないといえる。一方、ある製品の総循環度が大きいとすれば、つまり、その製品の事前循環度や事後循環度が大きいとすれば、その製品はすでに十分に利用された原料から作られているか、消費後に十分にリサイクルされているか、どちらかであるといえる。したがって、総循環度は資源生産性の総合的指標であるといえる。ある製品の総循環度が大きければ、その製品が作ら

れている物質の資源生産性が高いといえる。

ここまでは、製品の消費、すなわち T step と Q step の間を開始点としてマテリアル・フローを記述してきた。結果として、計算される循環度は製品に関するものであった。しかし、実際には、開始点はどの段階の間にも設定しうる。特に、開始点を S step と P step の間、つまり生産工程のために原料が用意された場面に設定した場合、原料の循環度を計算することができる。

行列モデル

上記のマテリアル・バランス・モデルにおいては、閉鎖型リサイクルの仮定がおかれていた。すなわち、製品、原料とも単一の種類しかない場合、例えば回収された新聞紙はすべて再び新聞紙としてリサイクルされるような場合が想定されていた。しかし、こうした仮定は現実のマテリアル・フローにおいては例外的である。一般的には、同じ物質からなるものであっても、製品にも原料にも様々な種類がある。二次原料の種類は、それが由来する製品の組成によって定義される。回収工程においては、二次原料の種類にしたがっていくつかの種類の製品が混合される。同様に、生産工程においては、いくつかの原料が新たな製品の生産のために混合される。例えば、あるカスケードにおいては、製品 A は一次原料のみからなるかもしれない。製品 B は一次原料と A のリサイクル品半々からなるかもしれない。製品 C は B のリサイクル品と C のリサイクル品からなるかもしれない。B のリサイクル品には一部 A が含まれるかもしれない。

ここで、品には m 種類、二次原料には n 種類あるとする。その場合、これまでスカラー変数で記述されてきた製品生産量 x のような変数は、各成分が対応する製品についての値を示す $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_m)$ のような列ベクトルで置き換えられる。製品は添字 i で、二次原料は添字 j で表す。その場合、Q step と P step のマテリアル・バランスは、それぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} \text{Q step: } \quad x_i^* - w_i &= \sum_{j=1}^n q_{ij}, \quad y_j - w_j^* = \sum_{i=1}^m q_{ji} \\ \text{P step: } \quad y_j^* - z_j^* &= \sum_{i=1}^m p_{ji}, \quad x_i - z_i = \sum_{j=1}^n p_{ij} \end{aligned} \quad (3.13)$$

ここで、 q_{ij} は i 番目の製品から j 番目の二次原料に流れる量を示し、 p_{ji} は j 番目の二次原料から i 番目の製品に流れる量を表す。したがって、行列 $Q = (q_{ij})$ と $P = (p_{ji})$ 、あるいはそれらの転置行列 ${}^tQ = (q_{ji})$ と ${}^tP = (p_{ij})$ が、相互作用項を表す。前者は製品が回収工程でどのように混合されるかを示し、各二次原料の定義を与える。後者は原料がある製品を生産する際にどのように混合されるかを示し、それによって各製品を定義する。

S step と T step には相互作用項がないため、マテリアル・バランスは以下のように表される。

$$\text{S step: } y_j - f_j^* = s_{jj}, \quad s_{jj} = s_{jj}^* + v_j, \quad s_{jj}^* = y_j^* - f_j$$

第3章 リサイクルされた資源は何回利用されているか

$$\text{T step: } x_i - g_i^* = t_{ii}, \quad t_{ii} = t_{ii}^* + u_i, \quad t_{ii}^* = x_i^* - g_i \quad (3.14)$$

ここで、 s_{jj} と t_{ii} は対角行列 $S = (s_{jj}')$ と $T = (t_{ii}')$ の対角成分である。

行列モデルでは、各段階の事前通過率、事後通過率についても定義の更新が必要である。

	Post,	Pre
Q step:	$Q_a = (q_{a ij}), \quad q_{a ij} = \frac{q_{ij}}{x_i^*}$	$Q_b = (q_{b ji}), \quad q_{b ji} = \frac{q_{ji}}{y_j}$
S step:	$S_a = (s_{a jj}'), \quad s_{a jj}' = \frac{s_{jj}'}{y_j}$	$S_b = (s_{b jj}'), \quad s_{b jj}' = \frac{s_{jj}^*}{y_j}$
P step:	$P_a = (p_{a ji}), \quad p_{a ji} = \frac{p_{ji}}{y_j}$	$P_b = (p_{b ij}), \quad p_{b ij} = \frac{p_{ij}}{x_i}$
T step:	$T_a = (t_{a ii}'), \quad t_{a ii}' = \frac{t_{ii}'}{x_i}$	$T_b = (t_{b ii}'), \quad t_{b ii}' = \frac{t_{ii}^*}{x_i}$

(3.15)

したがって、事前循環行列 R_b と事後循環行列 R_a は、次のように定義される。

$$\begin{aligned} \text{Post: } R_a &= Q_a S_a P_a T_a \\ \text{Pre: } R_b &= T_b P_b S_b Q_b \end{aligned} \quad (3.16)$$

ここで、 R_b は、各製品の1回転前の資源配置を示している。すなわち、 R_b の kl 成分は、 k 番目の製品1単位に含まれる、1回転前に l 番目の製品だったものの量を示している。したがって、 R_b の行和によって、各製品1単位に含まれる、少なくとも1回は製品として消費されたことのあるものの割合が得られる。同様に、 R_a の kl 成分は、 k 番目の製品1単位に含まれる、国内で循環しリサイクルされて l 番目の製品となるものの量を示している。したがって、 R_b と R_a は、消費前に少なくとも1回は循環したことがあるものの確率と、消費後に少なくとも1回は循環するものの確率をそれぞれ表している。

これらの行列を用いて、スカラー・モデルの場合と同様に、各製品の事前、事後、そして総循環度を求めることができる。

$$\begin{aligned} \text{Post: } C_a &= \sum_{k=1}^{\infty} (k-1)(R_a^{k-1} - R_a^k), \\ &= (I - R_a)^{-1} R_a, \\ c_{ai} &= \sum_{i'=1}^m C_{a i i'}, \\ \text{Pre: } C_b &= \sum_{k=1}^{\infty} (k-1)(R_b^{k-1} - R_b^k), \\ &= (I - R_b)^{-1} R_b, \\ c_{bi} &= \sum_{i'=1}^m C_{b i i'}, \end{aligned}$$

$$\text{Total: } c_i = c_{ai} + c_{bi}. \quad (3.17)$$

ここまで、循環度のモデルを記述してきたが、これを用いて物質のカスケード構造の定量的評価を行うことができる。

3.2 日本における紙リサイクル

以上において定式化した循環度を用い、日本の紙資源の物質循環の状況を分析する。使用したデータの構造の詳細は以下の通りである。紙製品は九種類に分けられる。すなわち、新聞紙(NP)、書籍向け印刷用紙(BK)、雑誌向け印刷用紙(MG)、その他印刷用紙(PP)、情報用紙(IP)、衛生用紙(TP)、その他の紙(SP)、段ボール(CC)、その他の板紙(CB)である。古紙は5種類に分けられる。すなわち、上質古紙(OHG)、新聞古紙(ONP)、雑誌古紙(OMG)、段ボール古紙(OCC)、板紙古紙(OCB)である¹⁵。一次繊維は二種類に分けられる。すなわち、化学パルプ(CV)と機械パルプ(MV)である。計算には、1995年のデータを用いた。データの出典は、通産省の『紙パルプ統計年報』、古紙再生促進センターの『古紙統計年報』である。公表されたデータが入手できないものについては、製紙メーカーや古紙問屋に対するインタビューを利用した。表 3.1 と表 3.2 に、計算に用いた入力データを示した。

表 3.1 日本の紙製品の生産と貿易の構造 (1995年、千トン)

	NP	BK	MG	PP	IP	TP	SP	CC	CB	z*
CV	0	2854	1812	1169	1514	657	2071	1595	676	
MV	1393	0	816	0	0	0	0	0	0	
OHG	1	0	0	143	137	825	16	127	264	25
ONP	1552	0	901	407	0	0	19	146	518	43
OMG	0	0	275	0	0	0	21	940	1197	138
OCC	0	0	0	0	0	0	31	6479	488	449
OCB	0	0	0	0	0	0	0	314	235	35
x	3098	3000	4000	1807	1736	1558	2268	9601	3379	
g*	100	94	126	57	35	0	121	117	168	
g	580	93	124	56	1	0	58	123	59	
u	-1	34	45	20	5	0	4	-8	6	
x*	3579	2965	3953	1786	1697	1558	2201	9615	3264	

¹⁵ ここで、上質古紙は「上白・カード」と「模造・色上」であり、雑誌古紙は「雑誌」、「特白・中白・カード」、「切付・中更反古」からなり、「茶模造紙」は段ボール古紙に含めた。

表 3.2 日本の古紙の回収と貿易の構造 (1995年、千トン)

	OHG	ONP	OMG	OCC	OCB
NP	0	2326	0	0	0
BK	1502	0	0	0	0
MG	0	0	2496	0	0
PP	0	1252	0	0	0
IP	0	0	87	0	0
TP	0	0	0	0	0
SP	0	0	0	338	0
CC	0	0	0	6705	0
CB	0	0	0	0	587
y	1502	3578	2582	7043	587
f*	0	0	25	13	3
f	36	8	15	418	2
v	0	0	0	0	0
y*	1538	3587	2572	7447	585

3.3 分析結果

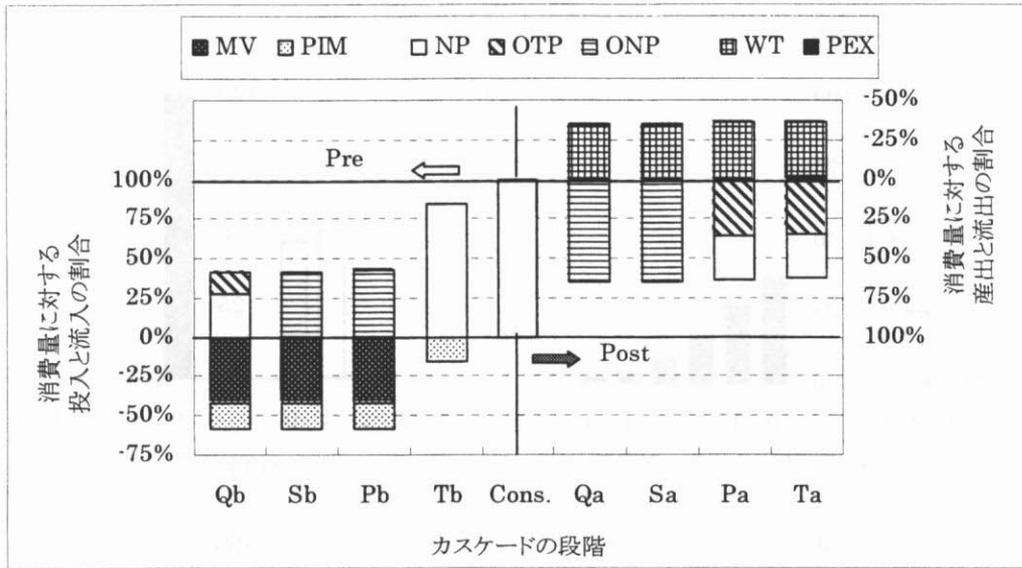
循環行列

図 3.2 は、マテリアル・バランス・モデルから得られる新聞紙(NP)の繊維の国内循環の計算例である。図の右半分は消費後の繊維の流れを示している。まず、消費された新聞紙(NP)の 65% が新聞古紙(ONP)として回収され、残りが廃棄される(WT) (Q step)。新聞古紙(ONP)の輸出はほとんどないので、大半が新たな紙製品の生産のために投入される(S step)。それに続く P step においては、新聞古紙(ONP)のうち 43% (最初に消費された新聞紙(NP)の 28%) が、再び新聞紙(NP)を作るために投入され、残り (最初に消費された新聞紙(NP)の 36%) がその他の紙製品となる(OTP)。最後に、製品の一部は輸出される(PEX)ので、最初に消費された新聞紙(NP)の 62%が、再び国内で紙製品として消費される(T step)。

一方、図の左半分は、消費前の繊維の流れを示している。消費される新聞紙(NP)の 16%は輸入されたものである(PIM)(T step)。残りは国内で生産されたものであり、新聞古紙(ONP)と機械パルプ(MV)が半分ずつ含まれている(P step)。新聞古紙(ONP)はほとんど輸入されていないので、投入される新聞古紙(ONP)の大半が国内で回収されたものである(S step)。回収された新聞古紙(ONP)の 65%は新聞紙(NP)由来のものであり、残りはその他の紙(OTP)に由来している(Q step)ので、今回消費される新聞紙(NP)の 27%が、前回は新聞紙として消費されたものであり、15%はその他の紙として前回消費されたものである。このように、各段階における投入、産出、流入、流出の関係が図 3.2 によって例示されている。

事前循環行列 R_p と事後循環行列 R_q の計算値を表 3.3 に示す。これらの行列をもとにして、各製品の事前循環回数および事後循環回数の確率分布を得ることができる。

図 3.2 紙繊維の国内循環の例（新聞紙）

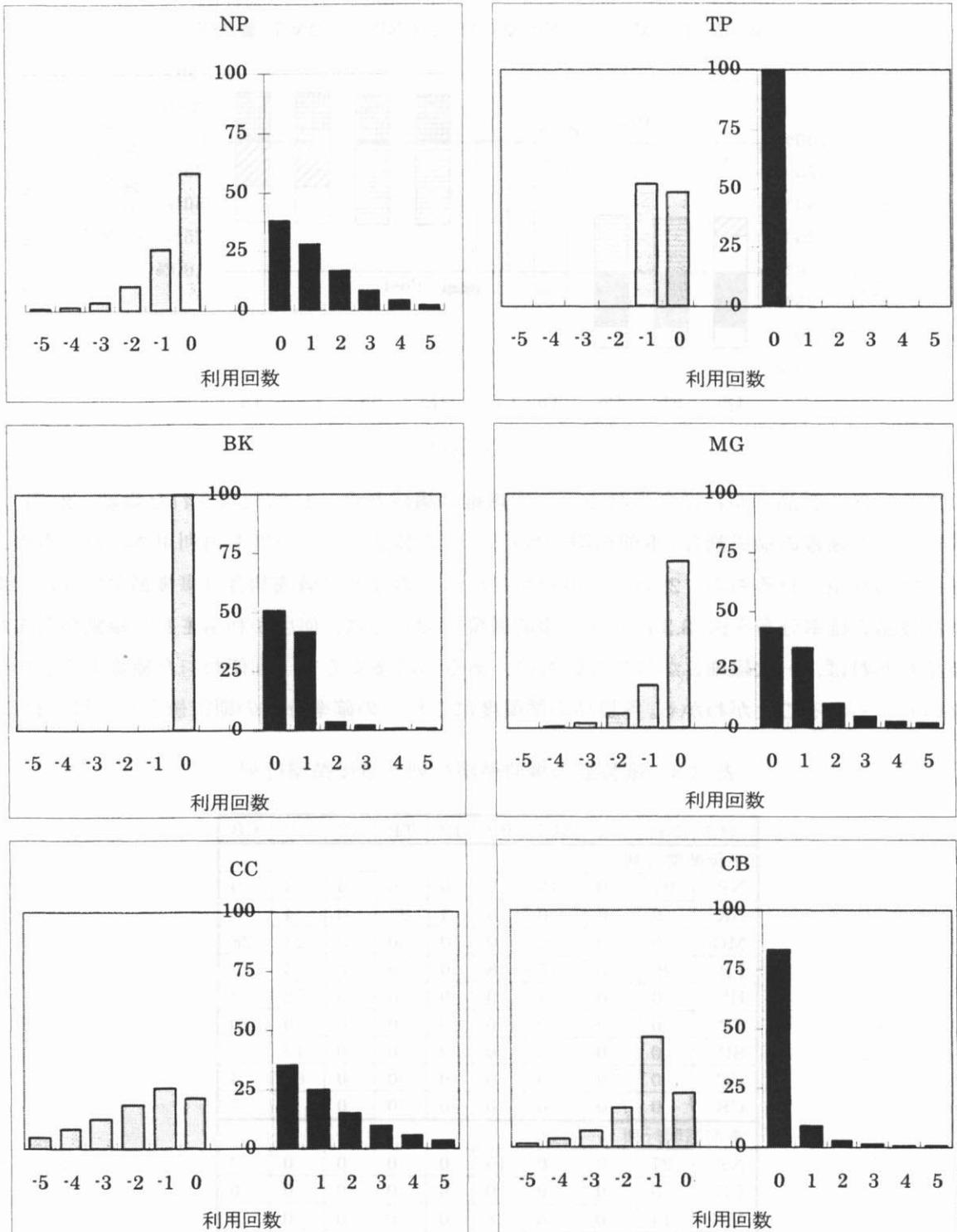


つまり、ある製品の原料に含まれる、一次繊維の構成割合、1 回利用された繊維、2 回、3 回利用された繊維の構成割合（事前循環回数）と、その製品のうち一度も再利用されないもの、1 回だけ再利用されるもの、2 回だけ再利用されるものなどの構成割合（事後循環回数）である。各製品の確率分布を図 3.3 に示す。事前循環に関しては、何度か利用された繊維が含まれる製品もあれば、一次繊維しか含まないもの、あるいは多くても 1 回使われた繊維までしか含まないものもあることがわかる。各製品の循環度はこれらの確率分布の期待値として得られる。

表 3.3 紙製品の事前循環行列と事後循環行列

(%)	NP	BK	MG	PP	IP	TP	SP	CC	CB
事後循環行列									
NP	27	0	16	7	0	0	0	3	9
BK	0	0	0	5	4	27	0	4	8
MG	0	0	6	0	0	0	0	23	28
PP	29	0	17	8	0	0	0	3	10
IP	0	0	1	0	0	0	0	2	2
TP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP	0	0	0	0	0	0	0	13	1
CC	0	0	0	0	0	0	0	60	4
CB	0	0	0	0	0	0	0	9	7
事前循環行列									
NP	27	0	0	15	0	0	0	0	0
BK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MG	14	0	6	8	0	0	0	0	0
PP	14	7	0	8	0	0	0	0	0
IP	0	8	0	0	0	0	0	0	0
TP	0	52	0	0	0	0	0	0	0
SP	1	1	1	0	0	0	0	1	0
CC	1	1	9	1	0	0	3	60	3
CB	10	7	33	5	1	0	1	13	7

図 3.3 各製品の事前循環回数および事後循環回数の確率分布¹⁶



¹⁶ 図中、負値（左側）が事前の利用回数、正値（右側）が事後の利用回数を表している。

循環度

図 3.4 および図 3.5 と表 3.4 は、各製品の事前、事後、総循環度の計算値を示している。各製品の循環度とともに、これらとその消費量によって重み付けした加重平均の値(AV)をも示している。事前循環度は従来の利用率を内包しており、事後循環度は従来の回収率を内包しているため、参考のためにこれら従来指標についても表 3.4 に示した。

図 3.4 各紙製品の事前循環度と事後循環度

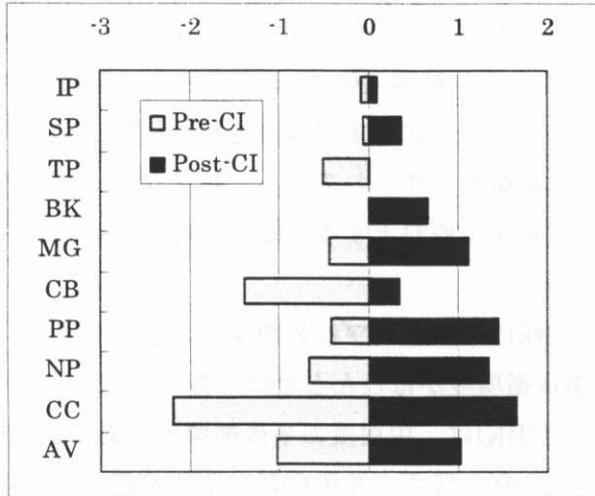
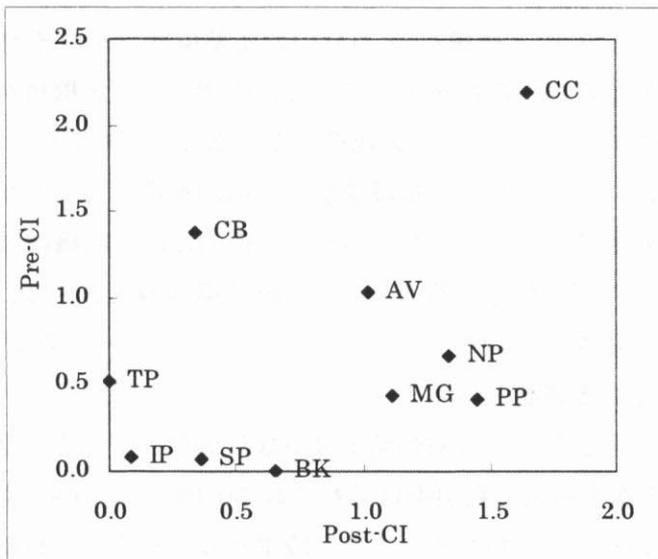


図 3.5 製品別の事前循環度と事後循環度の比較



第3章 リサイクルされた資源は何回利用されているか

表 3.4 各製品の事前・事後・総循環度

	NP	BK	MG	PP	IP	TP	SP	CC	CB	AV
事前循環度	0.66	0.00	0.44	0.42	0.08	0.52	0.07	2.19	1.38	1.03
事後循環度	1.34	0.66	1.11	1.44	0.09	0.00	0.36	1.64	0.34	1.02
総循環度	2.00	0.66	1.55	1.86	0.17	0.52	0.43	3.84	1.72	2.05
古紙利用率(%)	50.1	0.0	29.4	30.4	7.9	53.0	3.8	83.4	80.0	53.4
古紙回収率(%)	65.0	50.7	63.1	70.1	5.1	0.0	15.4	69.7	18.0	51.6

事前循環度についてみると、紙製品は3つのグループに分類することができる。第1のグループは、書籍向け(BK)、情報用紙(IP)、その他の紙(SP)からなり、これらは事前循環度がほとんどゼロである。第2のグループは、その他の印刷用紙(PP)、雑誌向け(MG)、衛生用紙(TP)、新聞紙(NP)からなり、中程度の事前循環度(0.4~0.7)をもつ。最後のグループは、その他板紙(CB)と段ボール(CC)であり、平均以上の事前循環度を持つ。第1グループは品質要求の高い製品からなり、ほとんどが一次繊維から作られている。第2グループは古紙が利用可能な製品からなる。最後のグループは古紙を主原料とする板紙からなる。このように、事前循環度は製品の品質を示しているといえる。

事後循環度についても、同様に3グループに分類することができる。第1グループの衛生用紙(TP)と情報用紙(IP)は、事後循環度がほとんどゼロである。第2グループのその他の紙(SP)、その他の板紙(CB)、書籍向け(BK)は、中程度の事後循環度である。最後の雑誌向け(MG)、新聞紙(NP)、その他の印刷用紙(PP)、段ボール(CC)は、平均を超える事後循環度を持つ。第1グループは、回収不能、あるいは回収されていない製品である。最後のグループは、消費後に十分回収されている製品である。このように、事後循環度は製品の消費後の利用の程度を示しているといえる。

一次原料である化学パルプ(CV)と機械パルプ(MV)の総循環度(それぞれの事後循環度に等しい)は、紙繊維の平均的な資源生産性を示している。化学パルプと機械パルプはカスケード構造の中を異なった経路で流れるため、両者の総循環度も異なったものになる。総循環度の値(それぞれ0.79と1.30)は、日本において紙繊維が平均何回循環しているかを示している。機械パルプは化学パルプよりもリサイクルされている。技術的には、紙繊維は3回から5回リサイクルすることができると考えられているので、この総循環度の大きさは、日本には未だリサイクルの技術的な可能性が残されていることを示唆している。段ボールの総循環度は3.84であり、十分にリサイクルされている製品といえる。

古紙利用率はほとんど同じだが、事前循環度はかなり異なっている製品がある。例えば、表5.4において、新聞紙と衛生用紙の利用率はそれぞれ50.1%と53.0%であるが、事前循環度は0.66と0.52となっていることがわかる。また、段ボールとその他の板紙の古紙利用率はそれぞれ83.4%と80.0%であるが、一方、事前循環度は2.19と1.38となっている。こうした違いは投入される古紙の種類の違いによるものである。図3.3によれば、新聞紙は衛生用紙よりも一次繊維(事前循環回数がゼロの繊維)の投入割合が高いことがわかる。しかしながら、衛生

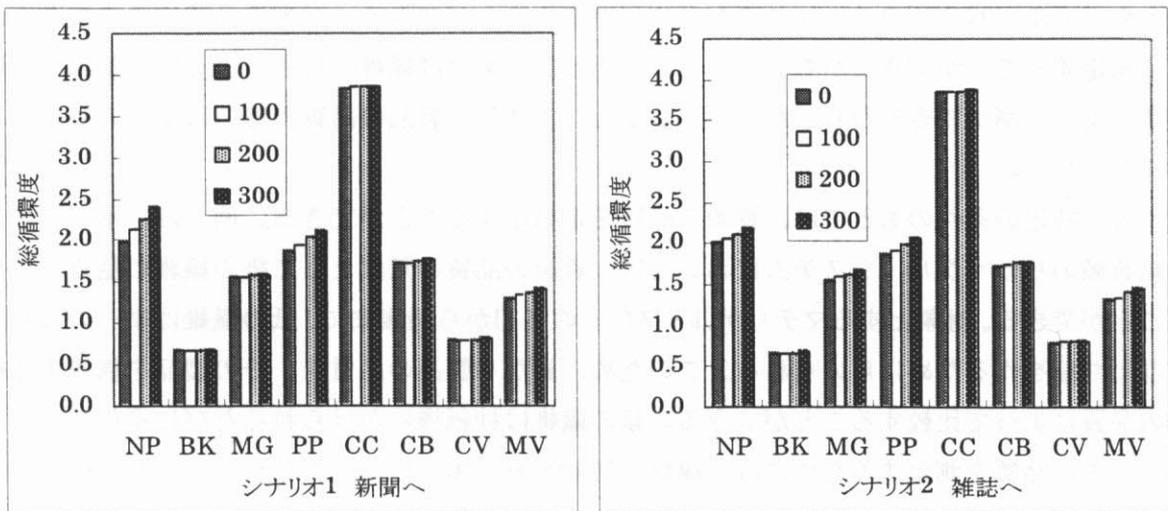
用紙に投入される古紙は、すべてちょうど1回だけ使われた古紙、すなわち上質古紙である。一方、新聞紙に投入される古紙は、すでに数回使われているものである。それゆえ、平均的に見ると、新聞紙の方が事前循環度が高くなる。従来の古紙利用率ではカスケード構造を捉えることができないが、循環度は繊維のフローの構造を正確に反映している。

リサイクル・シナリオの感度分析

次に、二つの紙リサイクル推進策の評価を行う。それぞれのシナリオの設定は、以下の通りである。まず、(1) 新聞紙の回収を促進し、(2) 結果として発生する余剰新聞古紙を次のように利用する。一次繊維である機械パルプの代替として、新聞古紙を(シナリオ1): 再び新聞紙を作るために投入する、(シナリオ2): 雑誌向け印刷用紙を作るために投入する、という二つの選択肢を考える。各シナリオにおいて、各種の紙製品および原料の循環度に対する影響を推定する。結果の一部を図3.6に示す。例えば、機械パルプの投入が新聞古紙によって10万トン代替された場合、新聞紙の総循環度はシナリオ1の場合0.13、シナリオ2の場合0.06増加する。同時に、各シナリオにおいて、雑誌向けの総循環度は0.01と0.04、機械パルプの総循環度は0.03と0.04増加する。

この結果に基づいて、新聞古紙投入の変化に対する循環度の感度を計算した。感度とは、新聞古紙投入の変化に対する循環度の変化の割合として定義される。すなわち、新聞古紙の投入量が1%増加した場合、つまり、機械パルプの投入が減少した場合、各製品の循環度は何%変化するかを示している。こうした感度の計算により、同量の新聞古紙が利用されたとした場合、

図 3.6 二つのリサイクルシナリオの比較¹⁷



¹⁷ それぞれの棒は、代替なし、10万トン(100 × 10³)代替、20万トン代替、30万トン代替した場合の各製品の総循環度を示している。

表 3.5 両シナリオにおける各製品の総循環度の感度

	NP	BK	MG	PP	IP	TP	SP	CC	CB	CV	MV
新聞へ	1.46	0.12	0.16	1.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.16	0.23	0.62
雑誌へ	0.64	0.10	0.59	0.74	0.00	0.00	0.03	0.06	0.21	0.19	0.85

あるいは同量の機械パルプが節約されとした場合、新聞紙生産に投入する場合と雑誌向け生産に投入する場合のどちらがより好ましいのかがわかる。感度分析の結果を表 3.5 に示す。

もちろん、感度分析の結果は日本の状況に強く依存したものであるが、新聞古紙（新聞紙）自身の感度については、新聞から新聞へのリサイクル（シナリオ 1）がより好ましいといえる。新聞紙の感度は、シナリオ 1 では 1.46 であり、シナリオ 2 では 0.64 であった。反対に、機械パルプの感度については、新聞から雑誌へのリサイクル（シナリオ 2）が望ましいといえる。機械パルプの感度は、シナリオ 1 では 0.62 であり、シナリオ 2 では 0.85 であった。

3.4 まとめ

資源の品質の定量化

既存研究における資源のカスケード構造の分析は、定性的評価が主流であった。カスケード理論の二つの次元のうち、定量的評価がなされてきたのは資源の寿命（利用回数）の次元についてだけであった。これは、もう一つの次元（資源の品質）を単一の尺度によって定義することが一般には困難であるためである。なぜなら、カスケード連鎖の各段階において、きわめて多様な資源の利用形態や製品が存在しているからである。例えば、木材利用の場合、木材は、材木やパネル、パルプ用チップ、薪などに利用することができる。材木の品質はその堅さによって測定することができるかもしれないし、チップの場合は繊維の長さによって、薪の場合は熱量によって測定できるかもしれない。しかし、こうした製品の品質の違いは単一の基準では評価できない。

一方、特定の条件のもとでは、資源の品質を定量化することができる。例えば、本章で扱った紙資源のリサイクル・システムにおいては、資源の品質の尺度として紙の繊維の品質を用いることができる。対象とするマテリアル・フローの最初から最後まで、紙の繊維は単一の製品、すなわち紙を作るために用いられる。このため、異なる製品の品質を、その製品を構成する繊維の品質によって比較することができる。紙の繊維は抄紙機にかけられるたびに劣化していくので、その品質を測定するためには、繊維が何回製紙工場で処理されたか、すなわち繊維のこれまでの利用回数を数えればよい。したがって、利用回数によって品質を測定できるような単一の物質の場合、理論的には製品の利用回数を推定することによって、その物質のカスケード構造を定量的に評価することが可能なのである。

循環度の適用可能性

マテリアル・バランス・モデルと、その行列形式への拡張は、一般のマテリアル・フローに適用可能である。事後循環度は消費後の回転数を示すものであり、これも一般に適用可能である。しかし、事後循環度を資源の寿命の指標として解釈することには、一定の制限がある。すなわち、紙や包装材など短期間に製品としての役割を終えるものの場合には、消費後の利用回数が多いほど、当該資源の寿命も長くなる。一方、紙と同様木材を原料とする製品でも、家屋の柱のように耐久財として利用されるものの場合には、製品として利用されている期間の長さ自体が寿命の大きな決定要因となる。事後循環度はこうした製品の寿命の指標としてはふさわしくない。循環速度が著しく異なる品目の間の比較を行うためには、循環度にさらなる拡張が必要と考えられる。

同様に、事前循環度は消費前の回転数を示すものであり、これも一般に適用可能である。しかしながら、事前循環度を資源の品質の指標として解釈することは、常に可能なわけではない。先に確認したとおり、再利用の回数を基礎にして品質の劣化を測定できる物質に対しては、こうした解釈が適用可能である。紙製品だけでなく、高分子や金属の中にもそうした物質があると考えられる。

事前循環度および事後循環度は、直接的にはそれぞれ対応するリサイクル率の従来指標である再生資源の利用率と回収率を置き換える指標である。紙資源の場合、事前循環度には従来の古紙利用率が含まれ、事後循環度には従来の古紙回収率が含まれる。しかし、循環度はカスケード構造に関する情報をこれら従来指標より多く含んでいる。例えば、二つの製品の古紙利用率が等しくても、事前循環度には違いがあり得る。これは、カスケード構造における両製品の位置が違うためにおこる。

一方、循環度においては対象地域内でマテリアル・リサイクルされたもののみを指標化するという限定があるが、従来指標においてはリサイクルの定義をより柔軟に扱うことができる。たとえば、サーマル・リサイクルされた量についてもリサイクル率の分子に加えて評価することができる。ただし、循環型社会形成推進基本法の定める循環利用の優先順位に従えば、サーマル・リサイクルよりはマテリアル・リサイクル、リサイクルよりはリユースを優先的に評価すべきということになる。この点については、従来指標ではリユースの評価は原理的に困難であるが、循環度の場合は理論的には評価が可能である。しかし現状は、リユースに関する統計が存在しないため、循環度を用いても実際の評価は困難である。次章では、個々人のリサイクル行動に限定することで、リユースをも考慮した評価が可能となることを示している。

循環度と資源生産性

資源の有効利用の指標としては、リサイクル率の他に資源生産性が一般に用いられている。資源生産性とは、ある財により入手できるサービス単位の総計を、その財を生み出すための物

第3章 リサイクルされた資源は何回利用されているか

質、エネルギー等の総消費量で割ったものである（環境省（2002b)）。この値が大きいほど、より少ない資源投入によってより多くのサービスが生まれ出されていることを意味し、資源が有効に利用されていることがわかる。資源生産性において、分母を資源投入量ではなくエネルギー投入量とすればエネルギー生産性が得られ、二酸化炭素排出量などの環境指標を分子に用いれば、いわゆる環境効率性が得られる。類似の概念に、シュミット＝ブレイク（1997）らが提唱する MIPS(Material-Intensität Pro Serviceeinheit)、すなわちサービス一単位あたりの物質集約度がある。

事前循環度および事後循環度が先に述べた諸条件を満たす場合に、両者の和として得られる総循環度は資源生産性に類する情報を持つと考えられる。この場合の総循環度は、対象となる資源が投入されてから最終的に廃棄されるまで、製品として何回利用されるかを示すことになる。この回数が多ければ多いほど、資源としては有効に利用されていると考えることができる。

従来型の資源生産性と比較した場合の総循環度の利点としては、経済的な評価に依らず物理的な基準のみで資源の有効利用の水準を評価できることが挙げられる。具体的には、トイレット・ペーパーを従来型の資源生産性を評価する場合、トイレット・ペーパーの生産に要する資源の量が一定でも、トイレット・ペーパーによって得られるサービスの価値、すなわちトイレット・ペーパーの価格が変化することで資源生産性が変化してしまう。反対に、総循環度が劣る点としては、複数の資源を横断的に評価することができないことが挙げられる。端的には、従来型であれば「日本の資源生産性」といったきわめてマクロな評価が形式的には可能であるが、総循環度には不可能である。ただし、従来型指標によるマクロ評価は、資源の種類に応じた多様性を捨象し、極端に言えば石炭もダイヤモンドも同じトンあたりで評価し、足しあわせて GDP で割って得られる類の数値をもとにしている。こうした数値が持つ意味自体、限定的なものといえる。

循環度の国際化

本章においては、リサイクル・システムの境界を特定の国に限定した。こうした単純化は、紙製品や古紙の流通がこれまで国内でほぼ完結していた日本のような国に対しては適切である。例えば、1995年の紙製品の輸入量と輸出量は、国内消費量のそれぞれ4%と3%であり、古紙についてはそれぞれ3%と0.3%となっている。しかし、アメリカ合衆国のような国の場合には、こうした単純化がリサイクルの過小評価につながるおそれがある。アメリカは相当量の回収古紙を輸出しており（1995年には24%）、そうした古紙は自国では利用されないとしても、海外で数回利用されるかもしれないのである。したがって、循環度を資源の全寿命にわたって正確に推定するためには、輸出入される製品や古紙の海外での利用回数を考慮しなければならない。後の第5章において、この作業を行う。

第4章 自分の行動で資源の利用回数はどのくらい増えるか

4.1 はじめに

再生製品の需要拡大のためには、消費者の購買行動の変化が不可欠である。しかし、Hanyu et al. (2000) と羽生・岸野 (2001) の住民意識調査によれば、古紙の分別回収に協力的な人が必ずしも再生紙を積極的に購入しているとはいえないという。この消費者の回収行動と購買行動との乖離が、結果としてリサイクルの進展を阻んでいることも否めない¹⁸。一方で、問題意識を持ち何らかの積極的活動を試みる市民は、一次繊維より古紙の方が望ましいといった直感的判断に基づいて製品の選択を行なうことはできる。しかし、物質循環の視点から見て、自分の行動が実際にどのくらい貢献しているのかを評価することは困難である。

本章では、紙リサイクルを題材として第3章において提示した循環度を応用し、リサイクル行動を包括的に評価する簡便な方法論を提示する。これにより、積極的市民や団体に対しては自らの進むべき方向についての一定の客観的基準を与えることが可能となる。さらに、製品の購入から廃棄までを一括して評価する方法の使用により意識改革を促し、回収行動と購買行動との乖離を改善する効果も期待できる。

第3章で見たように、循環度は、紙繊維がこれまでに何回紙として利用されたかを示す事前循環度と、今後何回紙として利用されるかを示す事後循環度、そしてこれらを足しあわせた総循環度からなり、公表されている統計データをもとにして求めることができる。

紙資源のように「一次繊維→新聞→新聞→雑誌→段ボール」といった単線的でない複雑な循環構造を持つ場合には、新聞の古紙利用率の上昇が下流にある雑誌や段ボールの品質にも副作用を与える。古紙利用率を10%上昇させるとしても、上昇させる品目によって全体に及ぼす効果に大きな違いが生じる可能性がある。単に回収率や利用率を見るだけでは、この影響を見出すことはできない。循環度は紙の繊維が紙として利用される回数に着目しており、これを用いることで、こうした循環構造の特徴を分析することが可能となる。この循環度により、統計データをもとに国レベルのマクロな物質循環を評価することができる。以下では、これを用いて、特定の個人や団体など、主体レベルのミクロなリサイクル行動が物質循環に与える影響を評価する指標を新たに提示する。

¹⁸ こうした議論の詳細は付録3を参照。

4.2 リサイクル行動とその評価

リサイクル行動の分析・評価にあたっては、回収だけでなく製品の購入から廃棄(回収)に至る過程全体を対象としなければならない。そこで、リサイクル行動を「購買行動」、「消費行動」、「回収行動」の3要素に分割し、各段階について行動の評価を行なうこととする。

購買行動とは、製品の購入にあたりどの程度環境に配慮した製品を選択しているかということと定義する。紙リサイクルの場合には、再生紙の選択や同じ再生紙でも古紙利用率や利用されている古紙の種類の違いにともなう選択である。これは、消費される紙品目 i について、その古紙利用率（あるいは消費量に対する再生紙の割合） u_i によって評価することができる。

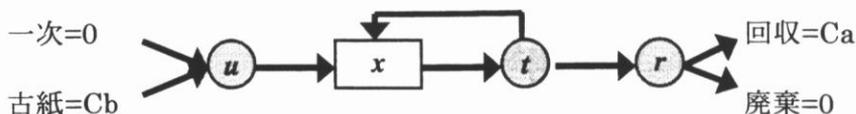
消費行動とは、製品の消費にあたりどの程度消費量の抑制や再使用を行なっているかということと定義する。紙リサイクルの場合には、無駄なコピーや失敗の回避といった消費量抑制や、裏紙の利用や両面コピーといった複数回使用の推進を意味する。消費量の抑制については、品目 i の消費量 x_i そのものによって評価することができる。一方、再使用については、品目 i についてその総消費量に対する再使用量（両面コピーや裏紙）の割合（再使用率） t_i によって評価することができる。

回収行動とは、製品の廃棄にあたりどの程度回収ルートにまわすことができているかということと定義する。紙リサイクルの場合には、新聞・段ボール・雑誌あるいはコピー用紙といった回収・再生が可能な品目もあるが、トイレット・ペーパーなどの衛生用紙や書籍のようにリサイクルが困難な品目もある。これは、消費される紙品目 i の回収率 r_i によって評価することができる。

以上のモデルによってリサイクル行動を定量化することが可能になる。さらに、その行動が物質循環に与える効果を定量的に評価することを試みる。すなわち、自分が消費している紙（に含まれる繊維）の総循環度（紙として利用される回数）がリサイクル行動によって改善される程度を推定するのである（図 4.1）。個人が消費する紙には様々な種類があるが、紙として購入する製品は衛生用紙や情報用紙など一部に限られる。そこで、ここでは情報用紙の代表としてコピー用紙をとりあげる。

コピー用紙を買うときに新聞古紙が 80% 利用されている再生紙を選択すれば、新聞古紙の事前循環度 c_0 がおよそ 1.4 であるので、選択したコピー用紙の事前循環度はおよそ 1.1 ($= 1.4 \times 0.8$) になる。また、コピーをするときに全消費量の 80% を両面コピーすれば、コピー用紙の循環度（紙としての使用回数）は両面コピーを全くしなかった場合に比べてさらに平均 0.8 回

図 4.1 リサイクル行動のモデル化



増加する。また、コピーした紙のうち60%を使用後にリサイクルし、それが雑誌古紙相当の用途に用いられたとすれば、雑誌古紙の事後循環度 c_a がおよそ1.1であるので、消費したコピー用紙の事後循環度はおよそ0.7 (= 1.1 × 0.6) になる。したがって、ここで消費したコピー用紙に含まれる紙の繊維は、紙として約2.6回 (= 1.1 + 0.8 + 0.7) 利用されているといえる。

以上をまとめると、品目 i の総循環度 C_i は、以下のように求められる。

$$C_i = c_{bi}u_i + t_i + c_{ai}r_i \quad (4.1)$$

品目毎に総循環度は異なるので、それらを消費量で重みづけして加重平均をとり、平均循環度 C を求める。

$$C = \frac{\sum_i C_i x_i}{X} = \frac{\sum_i (c_{bi}u_i + t_i + c_{ai}r_i) x_i}{X} \quad (4.2)$$

消費量が一定の場合、この総循環度を最大にする紙の消費構造が、投入された資源を最も有効に利用しているという意味では最適である。さらに、長期的には資源の消費量自体も適正な水準に削減する必要があると考えた場合、消費量の削減という基準も加えた分析が必要となる。その場合、以下に定義される「単位投入あたりの循環度 k 」が大きいほど、物質循環の視点からは望ましい消費形態であるといえる。すなわち、消費量 X が小さくなるほど k は大きくなり、また循環度 C が大きくなるほど k は大きくなるのである。

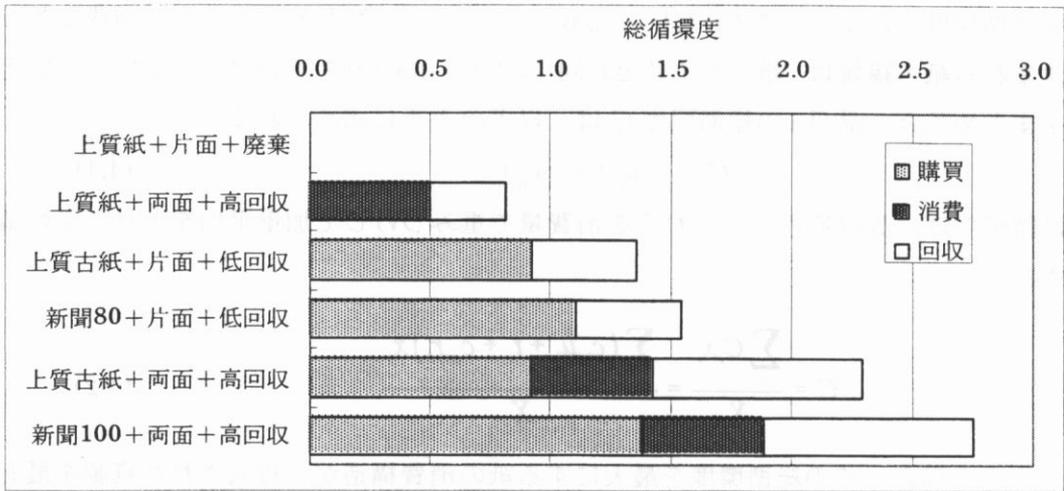
$$k = \frac{C}{X} \quad (4.3)$$

4.3 リサイクル行動の試算

上で定義されたモデルに仮設データを適用し、リサイクル行動の変化がどの程度総循環度の改善につながるのか、試算を行う。上記モデルでは複数の品目を扱えるように定式化がなされているが、ここでは論点を明確にするため一品目に絞り、先述のコピー用紙の事例を扱う。

購買・消費・回収の各段階に、それぞれ複数のシナリオを設定し、その組み合わせに応じた総循環度を計算する。購買行動に関しては、実際に市販されているコピー用紙にならない、上質紙（パルプ100%）、上質古紙100%、新聞古紙80%、新聞古紙100%という4つの選択肢を考える。消費行動に関しては、両面コピーを全く行わない場合と、半数の割合で両面コピーを行う場合の2つの選択肢を考える。そして、回収行動については100%廃棄、回収率40%、回収率80%という3つの選択肢を考える。これらの選択肢の組み合わせのうち、代表的な試算結果を図4.2に示す。

図 4.2 リサイクル行動の変化にともなう総循環度の改善の試算



パルプ 100%のコピー用紙を買い、すべて片面でコピーをし、使用後はすべて廃棄してしまうという行動の場合、ここで消費される紙の繊維は一度も循環することなく廃棄されてしまうため、総循環度は当然 0 となる。また、上質紙を購入した場合には、その後の消費、廃棄行動において努力をしたとしても、総循環度としては古紙製のコピー用紙を購入することで得られる値には及ばないことがわかる。上質紙を購入して消費・回収段階で最大限努力をする人と、新聞古紙 100%のコピー用紙を購入して消費・回収段階では全く努力しない人とは、得られる総循環度が大差ない。このように、循環度という一つの基準で評価することで、購買段階の意思決定の重要性を客観的な形で提示することができる。

一方、古紙製のコピー用紙を購入した場合には、循環度は上質古紙 100%を購入し後は努力しない場合に最低の 0.9 となり、最大で 2.8 となる。つまり、古紙製の場合は購入後の消費・回収行動によって総循環度に 3 倍以上の開きが生じることになる。また、回収行動によって得られる循環度を比較した場合、回収率が同じであれば上質紙よりも古紙製の方が大きな値となっている。これは、次のような現在の紙の循環構造が反映している。上質紙が分別回収されると上質古紙として扱われる。これは主として衛生用紙の原料となる。衛生用紙は使用后紙として回収されることはないので、事後循環度は 0 である。このため、上質紙の事後循環度は相対的に低くなる。一方、古紙製のコピー用紙は回収後は雑誌古紙として扱われる。これは主として段ボールや板紙の原料となる。これらは回収率・利用率とも相対的に高い。このため、古紙製の事後循環度の方が相対的に高くなるのである。

4.4 まとめ

以上のモデル化と試算により、マクロ指標として開発した循環度が、個人レベルの行動を評価するミクロ指標としても有効であることが確認された。試算に要するコピー用紙の古紙利用率などの情報は、一般消費者も容易に入手できるようになっている。こうした情報源の一例を挙げれば、「グリーン購入ネットワーク」のホームページ (<http://eco.goo.ne.jp/gpn/index.html>)にある商品情報データベースには、各社が販売しているコピー用紙の情報が古紙利用率の高い順に掲載されている。こうした情報と循環度を合わせることで、各自が簡単に自分のリサイクル行動を評価することができる。

個々の主体の規模が十分に小さく、その行動によってマクロな循環度がほとんど影響を受けないと考えられる場合には、今回提案した手法を用いることができる。しかし、個々の主体は小さくとも、行動を改善する主体の数が十分に増えると、国レベルの回収率が10%向上するといったマクロ的効果が発生する。こうしたマクロ的循環構造の変化が循環度に与える影響は、今回のミクロモデルとは別に、構造変化に対する循環度の感度分析によってマクロ的に評価することができる。しかし、将来的にはミクロな行動の蓄積がマクロな循環に及ぼす効果をも、直接ミクロモデルから評価できるようにする必要がある。また、発展的には、より積極的な行動である自己循環の形成¹⁹を総循環度の算出に組み込み、このような行動を適切に評価に反映できるモデルを構築する必要があると考えられる。

なお、総循環度の平均値として一次繊維の循環度を利用することができ、それによると1995年時点ではおよそ1であった。一方、技術的には紙の繊維は最大5回程度紙として利用することが可能であるとされており、したがって総循環度を5以上に増加させることは困難である。つまり、日本の「紙リサイクルの成績」は5段階評定で平均的には1であるということになる。この事実が、個人レベルのリサイクルへの取り組みを促すよい刺激となることを期待したい。

¹⁹ 例えば、自分の消費した牛乳パックをリサイクルしてトイレット・ペーパーとして再び自分が利用するなど。