

平成 17 年度

博士論文

セメント産業を中心とする廃棄物の
マテリアルリサイクルシステムに関する研究

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

環境学専攻

原 卓也

要旨

本研究では、セメント産業を中心とする廃棄物リサイクルシステムに着目し、システムの有効性を評価することを目的とする。ライフサイクル分析、マテリアルフロー分析、産業連関分析を用いて、リサイクルシステムの環境負荷（最終処分削減効果とCO₂削減効果）と経済性の観点から評価をおこなう。

ライフサイクル分析はある特定の製品・技術・システムを対象に、ライフサイクル全体の環境負荷を定量的に評価する手法である。本研究では、ライフサイクル分析により廃棄物のセメント原料化リサイクル、その他処理技術、最終処分を比較し、セメント原料化リサイクルの有効性を評価する。

マテリアルフロー分析は着目した系のモノの流れを体系的・定量的に把握する手法である。ライフサイクル分析がミクロなシステムを対象とするのに対し、マテリアルフロー分析はマクロなシステムを対象とすると位置づけることもできる。本研究では、マテリアルフロー分析によりセメント工場や廃棄物発生源が立地する実際の地理条件を考慮に入れた上で、セメント産業を中心とする廃棄物リサイクルシステムにおける空間的マテリアルフローを把握する。マテリアルフロー分析により得られた情報を用いて廃棄物リサイクルの促進に有効な政策分析をおこなう。

産業連関分析は一国の産業システムを簡便に分析可能とする有用な分析手法であり、ライフサイクル分析、マテリアルフロー分析によく用いられる。本研究では、産業連関分析により産業間リサイクルシステムをモデル化し、リサイクルによる環境負荷削減のポテンシャルを評価する。

ライフサイクル分析で得られる主たる結論は以下の通りである。

- (a) 高炉スラグのセメント原料化は、高炉セメントの混合材として利用するにせよ、クリンカ原料として利用するにせよ、CO₂削減に有効である
- (b) フライアッシュ・一般廃棄物焼却灰・下水汚泥焼却灰のセメント原料化は、CO₂排出量の削減には大きく寄与しないものの、少なくともCO₂排出量の増加への影響はない。すなわち、これらの廃棄物のセメント原料化リサイクルは、CO₂排出量を増加させることなく最終処分量の削減に有効なリサイクルである
- (c) 一般廃棄物焼却灰のセメント原料化は、埋め立て処分場が逼迫した場合には、有望な代替オプションとなる

産業連関分析では、セメント生産に関わるプロセスを詳細化し、廃棄物の物量フローを組み込んだ拡張型産業連関モデルを構築する。このモデルを用い、セメント産業による廃棄物リサイクルの環境負荷削減ポテンシャルを推計する。

拡張型産業連関モデルにシナリオ分析を適用して得られる主たる結論を以下に示す。

- (a) セメント産業による廃棄物利用量を1995年実績値から増加させることで、CO₂排出削減、最終処分削減のどちらも可能となる
- (b) しかし廃棄物の利用量がクリンカ製造プロセスでの廃棄物利用可能量の上限に達した場合に

は、ある廃棄物の利用量を増加させることは別の種類の廃棄物利用量を減少させることになるため、結果として CO₂ 排出削減と最終処分削減のどちらも満たすことはできなくなる

廃棄物の種類により CO₂ 排出削減効果が異なることにより、廃棄物のセメント原料化リサイクルでは CO₂ 排出削減と最終処分削減の間にはトレードオフ関係が生じる。拡張型産業連関モデルを用いて得られるトレードオフ関係を表すフロンティア曲線を示す。

廃棄物をセメント原料として利用するリサイクルシステムの導入可能性を評価するためには、わが国におけるセメント工場の地域的偏在性に由来する廃棄物の長距離輸送を考慮することが重要であると考え、日本全国のセメント工場と高炉製鉄所、石炭火力発電所、および一般廃棄物焼却処理場の間の廃棄物輸送を考慮する廃棄物輸送・セメント生産モデルを構築し、構築したモデルを用いてシミュレーションをおこなう。セメント産業が廃棄物を最大限に利用する状況を想定してシナリオ分析をおこない、廃棄物のセメント原料化リサイクルによる環境負荷削減効果、およびリサイクル促進に有効な政策について検討する。シミュレーションより得られる主たる結論は以下の通りである。

- (a) CO₂ 削減プロジェクトとしての高炉スラグのセメント原料化リサイクルは、費用効果の大きな削減プロジェクトであり、CO₂ 削減量に対して 3400 円/t-CO₂ 程度の価格で買い取る制度の導入により、高炉スラグのセメント原料化リサイクルの促進に効果的な政策となる
- (b) セメント原料化リサイクルによる最終処分削減策は、削減ポテンシャルの大きな削減策である
- (c) 本モデルのシミュレーション結果から、セメント産業を中心とするリサイクルシステムについてシステム全体のコストが最小となる廃棄物排出源と受け入れ先のセメント工場のマッチング、両者をつなぐ廃棄物輸送ルート・輸送手段についての情報を得ることができることから、環境負荷低減に有効で経済効率的なリサイクルシステム構築の計画立案を支援することが期待できる

目次

第 1 章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 研究の目的.....	2
1.3 研究の構成.....	2
第 2 章 セメント産業におけるマテリアルリサイクルと廃棄物処理の現状	6
2.1 緒言	6
2.2 セメント生産プロセス.....	6
2.2.1 セメント生産プロセスの概要.....	6
2.2.2 塩素バイパスシステム.....	7
2.3 セメント産業における生産と廃棄物利用の状況.....	8
2.4 廃棄物の利用・処分の現状.....	11
2.4.1 高炉スラグ.....	11
2.4.2 石炭灰.....	11
2.4.3 一般廃棄物焼却灰.....	13
2.4.4 最終処分場.....	14
2.5 セメント原料化リサイクルの調査・研究の現状.....	16
2.5.1 循環型社会形成のための指標.....	16
2.5.2 エコセメント	16
2.5.3 都市ごみ焼却灰の国内広域処理システム構築に関する調査.....	16
2.5.4 焼却灰をモデルとした瀬戸内海エリアにおけるリサイクルシステムの具現化と静脈物流の構築調査	17
2.6 廃棄物を原料として利用したセメントの安全性.....	18
2.6.1 土壌環境基準	18
2.6.2 廃棄物を利用するセメント中の重金属含有量の管理策.....	18
2.6.3 セメントの重金属含有量と溶出量	20
2.6.4 セメント原料化リサイクルの潜在的問題.....	23
2.6.5 検討の総括.....	25

2.7	リサイクル全般に内在する諸問題	25
2.8	廃棄物のセメント原料化リサイクルに関する研究の課題.....	29
第 3 章	廃棄物セメント原料化リサイクルのライフサイクル分析	32
3.1	緒言	32
3.2	既往の研究.....	32
3.2.1	ライフサイクルアセスメント.....	32
3.2.2	セメント原料化の LCA の既往の研究.....	33
3.2.3	一般廃棄物処理の LCA の既往の研究.....	34
3.3	ライフサイクル CO ₂ 排出量.....	35
3.3.1	概要.....	35
3.3.2	セメント生産プロセス.....	35
3.3.3	一般廃棄物焼却灰処分方法のライフサイクル分析	46
3.3.4	一般廃棄物焼却灰セメント原料化リサイクルの輸送距離と CO ₂ 削減量の関係.....	51
3.3.5	一般廃棄物処理全体における焼却灰処分の位置づけ	52
3.4	ライフサイクルコスト分析.....	53
3.4.1	概要.....	53
3.4.2	一般廃棄物処理のコスト構成.....	54
3.4.3	セメント原料化プロセス	55
3.4.4	一般廃棄物焼却灰処分のコスト	58
3.4.5	輸送距離とコストの関係.....	60
3.5	結言	62
第 4 章	拡張型産業連関分析.....	65
4.1	緒言	65
4.2	産業連関分析の概要	65
4.2.1	基本モデル.....	66
4.2.2	Leontief 型産業連関表	67
4.2.3	SNA 産業連関表.....	68
4.2.4	プロセス連関分析.....	69

4.3	先行研究	69
4.3.1	産業連関分析の応用	69
4.3.2	付帯表型産業連関分析.....	70
4.3.3	構造分解分析	74
4.3.4	リサイクル・廃棄物処理の産業連関分析.....	75
4.3.5	ハイブリッド・物量産業連関.....	78
4.3.6	その他のリサイクル・廃棄物処理分析における産業連関表の利用例	81
4.4	拡張型産業連関モデル	81
4.4.1	モデルの概要	81
4.4.2	拡張産業連関モデル構築の詳細-1（一般産業部門）	84
4.4.3	拡張産業連関モデル構築の詳細-2（セメント生産プロセス）	86
4.4.4	拡張産業連関モデル構築の詳細-3（廃棄物利用プロセス）	89
4.4.5	拡張産業連関モデル構築の詳細-4（シナリオ行列）	90
4.4.6	シナリオ設定	91
4.4.7	現状のシナリオ変数値.....	93
4.5	シナリオ分析	94
4.5.1	CO ₂ 排出削減効果.....	94
4.5.2	最終処分量削減効果	96
4.5.3	廃棄物のセメント原料利用による CO ₂ 排出削減と最終処分削減の間のトレードオフ関係	98
4.5.4	産業の生産規模の変化.....	98
4.6	結言	100
第5章	廃棄物輸送・セメント生産モデルによる解析	104
5.1	緒言	104
5.2	先行研究	104
5.3	モデル	106
5.3.1	モデル分析のロジック.....	106
5.3.2	モデルの概要	108
5.3.3	モデルの詳細 定式	108
5.3.5	輸送コスト関数の設定.....	130
5.3.6	その他処分コストの設定.....	132
5.3.7	最適化計算.....	132

5.4	シミュレーション(1) 2000年度実績値の再現性	132
5.4.1	廃棄物のその他処分コストの推定	132
5.4.2	廃棄物のセメント原料化リサイクル量の地域別内訳	134
5.4.3	廃棄物のマテリアルフロー結果	136
5.5	シミュレーション(2) コスト最小化とCO₂最小化の比較	143
5.5.1	制約条件と目的関数	143
5.5.2	コスト最小化のシミュレーション結果	143
5.5.3	CO ₂ 排出量最小化のシミュレーション結果	146
5.5.4	結果の考察	148
5.6	シミュレーション(3) 環境負荷の限界削減費用の算出	149
5.6.1	リサイクルのフロンティア曲線	149
5.6.2	環境負荷削減のシナリオ分析	150
5.6.3	シミュレーション結果	151
5.6.4	考察	161
(1)	CO ₂ 削減プロジェクトとしての廃棄物のセメント原料化リサイクル	161
(2)	最終処分削減プロジェクトとしての廃棄物のセメント原料化リサイクル	163
(3)	本研究の寄与	163
5.7	結言	164
第6章	結論	167
6.1	結論	167
6.2	課題	169
謝辞	171
APPENDIX	172

第1章 序論

1.1 背景

環境問題とは何かという問いに対して端的に答えるならば、「人間の活動により、自然環境に影響が及びその状態が変化し、その結果として人間の生活の質、健康、ひいては人類の存続に悪影響を及ぼすと考えられる諸問題」ということができるのではないだろうか。環境問題における「人間の活動と自然環境の関係」とは、突き詰めれば人間社会と自然環境とのモノのやり取りに帰着される。自然環境からモノを取りすぎてしまったために今後はそれまでのようにモノが取れなくなってしまうことが懸念される問題が「資源枯渇問題」であるし、自然環境へモノを排出しすぎたことで顕在化してしまった問題が「地球温暖化問題」であり「大気汚染問題」であるといえるだろう。

このような環境問題の顕在化に対して、社会・環境システムの分析、生産・消費活動に起因する環境負荷の定量的把握、システム改善策の計画立案などを通じて持続可能な社会システムの構築に貢献することを目的とする研究分野が発展してきた。1972年に発表されたローマクラブ「成長の限界」^[1]は、このような研究分野が広く注目されるようになった大きなきっかけとなった。工学、経済学的手法を応用した政策科学の一分野とも位置づけられるこのような研究分野の基礎にあるのがシステム分析（systems analysis, systems thinking）とよばれる手法あるいは考え方である。

システム分析は以下のような特徴を有する^[2]。

- (a) 社会現象の相互の関連を一つのクローズドシステムとして把握し、将来の変化、計画の結果を予知するため、数量化・数理的工学的手段により対象をモデル化し、適用可能な計画手法を応用する
- (b) モデル化にあたっては、現在可能な知識（各種の統計など現状に関する情報の蓄積とこれを分析する手法）を有効に利用し、可能な限りシステムとしての全体像の把握を目指す
- (c) 政策の評価においては、計画段階においてその政策が社会に影響を及ぼす範囲を十分に把握し、政策の効果、影響、反作用などを事前に評価し、その結果に基づいて将来に問題を起こさない（またはその対策をも織り込んだ）政策を立案する

本研究は、わが国の廃棄物問題にシステム分析を適用して、問題解決に資する知見を得ることを目指すものである。

廃棄物問題はわが国にとって最も喫緊な課題の一つである。この問題は、人口に対する利用可能な国土面積が他国と比較して相対的に小さいこと、また求められる住環境の基準が高まったことで周辺住民の反対が強まったことなどの理由により、廃棄物最終処分場の新規立地が困難になったことから顕在化した問題である。わが国政府が循環型社会形成推進政策に力を入れているのも、政府が廃棄物問題への対応が急務であると認識しているためである。循環型社会形成推進基本法^[3]によれば、「循環型社会」とは、(1) 廃棄物等の発生抑制、(2) 循環資源の循環的な利用、及び(3) 適正な処分が確保されること

によって、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社会と定義される。このように、資源の循環利用により廃棄物の発生抑制と天然資源の消費抑制の両者を達成し、環境負荷の低い社会を形成することを目的とするものである。

一方で、地球温暖化問題は世界全体が取り組まなければならない環境問題である。わが国は京都議定書に批准し、2008年から2012年までの第一期約束期間において、温室効果ガスの排出量を1990年比で6%削減する義務を負っている。そのため、廃棄物問題に対する環境政策も温室効果ガス排出削減に寄与する（少なくとも反しない）ものであることが求められている。

以上述べた背景のもと、本研究ではセメント産業によるリサイクルに着目した。わが国のセメント産業はこれまで大量の廃棄物を原燃料として利用してきたことから、セメント産業を中心とする産業間での副産物・廃棄物のリサイクルシステムが廃棄物最終処分量の削減に大きく貢献することが期待されている。特にリサイクルが難しい焼却灰などの廃棄物を大量に利用できる可能性を持つという点でセメント産業によるリサイクルは重要な位置を占めると考えられる。

1.2 研究の目的

本研究では、セメント産業を中心とする廃棄物のマテリアルリサイクルシステムに着目し、このリサイクルシステムの環境負荷削減効果（最終処分削減効果とCO₂削減効果）の評価と経済性評価をおこない、このシステムの有効性を評価することを目的とする。

本研究ではライフサイクル分析（LCA）、マテリアルフロー分析（MFA）、産業連関分析（IOA）とよばれる手法を用いる。3つの分析はみな環境問題に適用されてきたシステム分析手法である。

LCAはある特定の製品・技術・システムを対象に、ライフサイクル全体の環境負荷を定量的に評価する手法である。本研究では、LCAにより廃棄物のセメント原料化リサイクル、その他処理技術、最終処分を比較し、セメント原料化リサイクルの有効性を評価する。

MFAは「ある着目した系に投入される資源やエネルギーと、系から産出される製品、副産物、廃棄物、汚染物質などについて、その総量や特定の物質の量、これらの収支バランスを、体系的・定量的に把握する手法」^[4]である。LCAがミクロなシステムを対象とするのに対し、MFAはマクロなシステムを対象とすると位置づけることもできる。本研究では、MFAによりセメント工場や廃棄物発生源が立地する実際の地理条件を考慮に入れた上で、セメント産業を中心とする廃棄物リサイクルシステムにおける空間的マテリアルフローを把握する。MFAにより得られた情報を用いて廃棄物リサイクルの促進に有効な政策分析をおこなう。

IOAは一国の産業システムを簡便に分析可能とする有用な分析手法であり、LCA、MFAによく用いられる。本研究では、IOAにより産業間リサイクルシステムをモデル化し、リサイクルによる環境負荷削減のポテンシャルを評価する。

1.3 研究の構成

本研究は全部で6章からなる。

第2章ではセメント産業におけるリサイクルと廃棄物処理の現状について概括する。廃棄物のセメント原料化リサイクルに関する研究の現状と課題について調査した内容をまとめる。

第3章では廃棄物のセメント原料化リサイクルのライフサイクル分析をおこなう。廃棄物のセメント原料化リサイクルと廃棄物のその他処理技術の環境負荷を定量化し、セメント原料化リサイクルの有効性を評価する。

第4章では拡張型産業連関分析をおこなう。産業間のリサイクルシステムを産業連関表をベースにモデル化し、廃棄物のセメント原料化リサイクルによるマクロな環境負荷削減効果を評価する。

第5章では廃棄物輸送・セメント生産モデルによる解析をおこなう。廃棄物をセメント原料として利用するリサイクルシステムの導入可能性を評価するためには、わが国におけるセメント工場の地域的偏在性に由来する廃棄物の長距離輸送を考慮することが重要であると考え、日本全国のセメント工場と高炉製鉄所、石炭火力発電所、および一般廃棄物焼却処理場の間の廃棄物輸送を考慮する廃棄物輸送・セメント生産モデルを構築し、構築したモデルを用いてシミュレーションをおこなう。シミュレーションにより、リサイクルシステムの経済効率性や異なる環境負荷の削減（複数の政策目標の存在）という視点から政策分析をおこなう。

第6章では本論文の結論をまとめる。

なお、本研究ではセメント原料に利用される廃棄物として

- (a) 高炉製鉄所から排出される高炉スラグ
- (b) 石炭火力発電所から排出される石炭飛灰（フライアッシュ）
- (c) 一般廃棄物焼却場から排出される焼却主灰
- (d) 一般廃棄物焼却場から排出される焼却飛灰
- (e) 下水処理場から排出される下水汚泥(脱水汚泥)、汚泥焼却灰

の5種類を扱う（ただし下水汚泥については第3章のライフサイクル分析においてのみで扱っている）。高炉スラグ・石炭飛灰は有価で取引される場合には副産物とよばれるが、需要が下回った場合にはなんらかの処分が必要とされるという点では潜在的廃棄物といえるものであることから、本研究では廃棄物という呼称で統一する。

セメント産業では、廃タイヤなどを燃料代替として利用するサーマルリサイクルもおこなわれているが、本研究ではこのようなりサイクルは扱わない。本研究では廃棄物をセメント原料として利用するマテリアルリサイクルを対象とし、「廃棄物のセメント原料化リサイクル」という呼称を用いる。

本論文の構成を図 1-1 に示す。

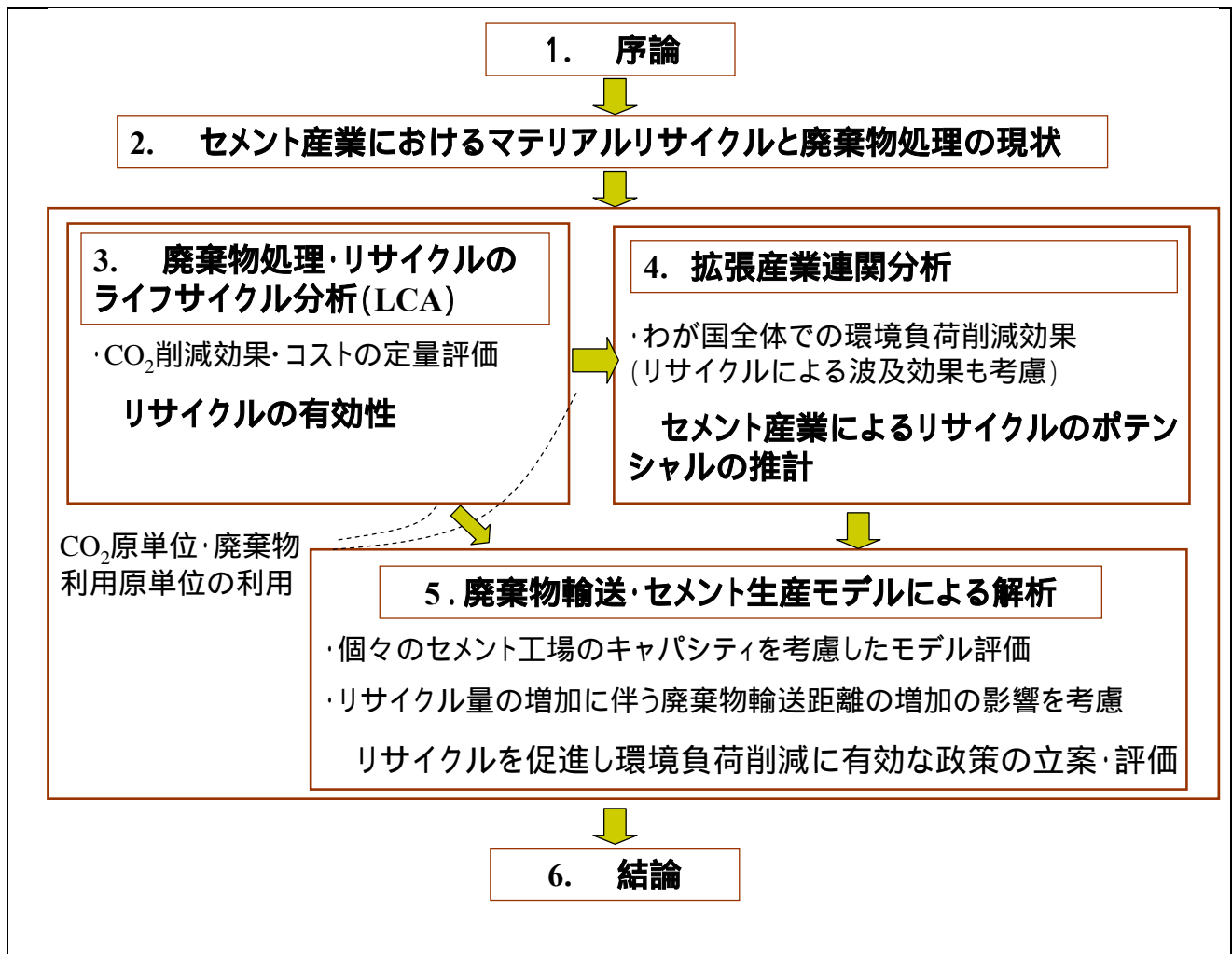


図 1-1 本論文の構成

第 1 章引用文献

- [1] D.H.メドウズ, D.L.メドウズ, J.ランダーズ, W.W.ベアランズ III 世 (大来多佐武郎監訳): 成長の限界, ダイヤモンド社, 1972 .
- [2] 石谷久, 石川眞澄: 社会システム工学, 朝倉書店, p.4, 1992 .
- [3] 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部企画課: 「循環型社会形成推進基本法」について, 環境省ホームページ, <http://www.env.go.jp/recycle/circul/recycle.html>, 2000 .
- [4] 森口祐一: マテリアルフロー分析からみた人間活動と環境負荷, 環境システム研究, Vol.25, pp.557-568, 1997 .

第2章 セメント産業におけるマテリアルリサイクルと廃棄物 処理の現状

2.1 緒言

本章では、セメント産業におけるマテリアルリサイクルの現状を概括する。

2.2 ではセメント生産プロセスの概要について述べる。2.3 ではセメント産業の現状を示す。2.4 では本研究で対象とする廃棄物について、利用・処分の現状を示す。2.5 では廃棄物のセメント原料化リサイクルに関する調査・研究の動向について述べる。2.6 では廃棄物を原料として利用したセメントの安全性について述べる。2.7 ではリサイクル全般に内在する諸問題という観点から廃棄物のセメント原料化リサイクルに関わる論点・知見を整理する。2.8 で廃棄物のセメント原料化リサイクルに関する課題を整理する。

2.2 セメント生産プロセス

2.2.1 セメント生産プロセスの概要

セメント生産プロセスの概要を簡単に説明する。セメント生産プロセスのフローを図 2-1 に示す。

セメント生産プロセスは大きく 2 つの工程からなる。一つは原材料をキルン炉に投入して加熱してクリンカという中間品を製造する工程（クリンカ製造工程）である。もう一つはクリンカに石こうなどを混合してセメントを製造する工程（セメント混合工程）である。前者を焼成工程、後者を仕上工程とよばれることもあるが、本研究では便宜上、クリンカ製造工程、セメント混合工程とよぶこととする。

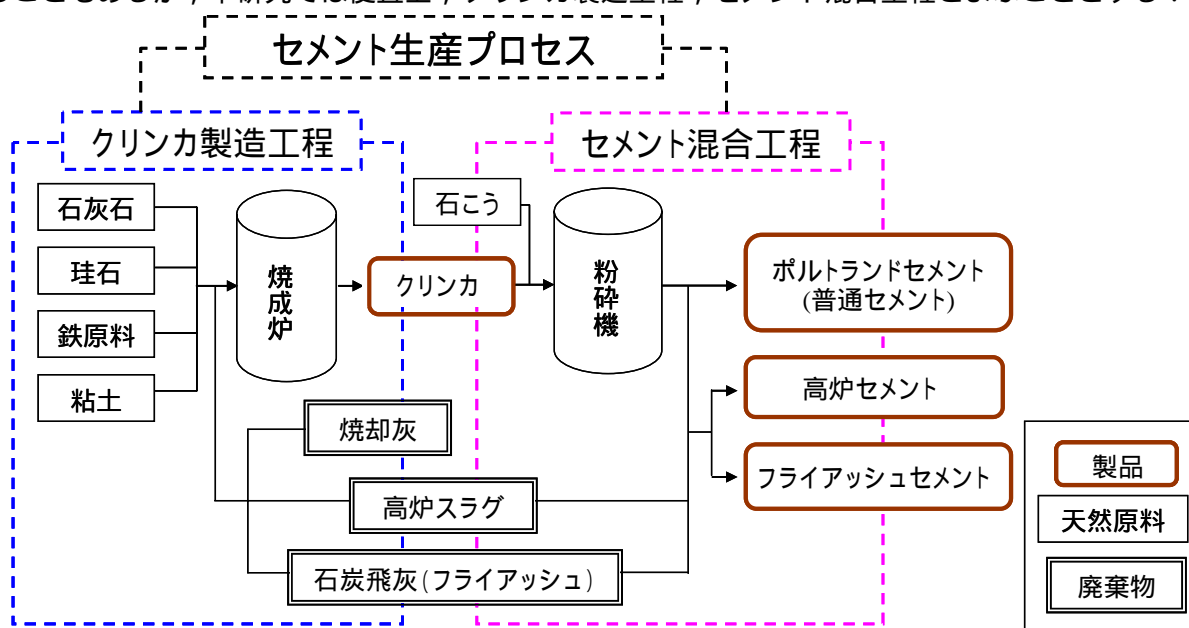


図 2-1 セメント生産プロセスのフロー

廃棄物を利用する方法は二種類ある。一つはクリンカ製造工程で原料と一緒にキルン炉に投入するというものである。もう一つは、セメント混合工程でクリンカと混合するというものである。以後、クリンカ製造工程での利用を原材料利用、セメント混合工程での利用を混合材利用とよぶことにする。

高炉スラグ、石炭飛灰（フライアッシュ）は原材料利用、混合材利用のどちらでも利用される。一般廃棄物焼却灰・下水汚泥焼却灰は原材料利用のみである。なお高炉スラグ・石炭飛灰は有価で取引される場合には副産物とよばれるが、需要が下回った場合にはなんらかの処分が必要とされるという点では潜在的廃棄物といえるものであることから、本稿では廃棄物という呼称で統一する。

高炉スラグは、高炉において鉄鉱石およびコークスの不純物などからなる成分が媒溶剤（石灰石）と反応・熔融し、銑鉄と分離したものである^[1]。銑鉄を1t製造するのに粉鉱石・塊鉱石あわせて約1500～1600kg、石炭約700kg、石灰石約150kgが使用され、銑鉄1tあたり高炉スラグは約310kg生成する^[2]。高炉スラグの主成分はCaO、SiO₂である。石灰石（主成分CaCO₃）は高炉内で分解するため、石灰石の脱炭酸によるCO₂が発生する。クリンカ製造工程において高炉スラグをCa源として利用する場合、石灰石の脱炭酸によるCO₂が発生しないため、その分CO₂削減に有効となる。

石炭飛灰は、石炭火力発電所などでの微粉炭の燃焼の際に発生する石炭灰のうち、煤煙中から電気集塵機などで捕集されたものである^[1]。石炭飛灰の主成分はSiO₂、Al₂O₃である^[3]。石炭灰には石炭飛灰のほかに石炭の燃焼残渣である石炭主灰（ボトムアッシュ）がある。一般に石炭灰の90%以上が石炭飛灰であるといわれる。

高炉セメントは一般にポルトランドセメントに比して初期強度が小さく、長期強度は大きくなる。また、海水に対する抵抗性があること、水和反応によって出来る組織が緻密であることから、これらの特性が生きる土木工事で使用されることが多い^[4]。フライアッシュセメントは流動性がよく、打ち込みやすいコンクリートを作るのに適している。水和熱および乾燥収縮を小さく出来る特徴を持ち、ダム等のマスコンクリートや水密性を要求される構造物に使用されることが多い^[4]。またポルトランドセメントにも少量の高炉スラグが混合される場合も多い。

2.2.2 塩素バイパスシステム

セメント生産プロセスでは、多くのキルン炉でプロセス中の塩素を除去するために塩素バイパスとよばれる設備が導入されている^[5]。塩素バイパスシステムの概要を図 2-2 に示す。この設備は、クリンカ製造工程において、塩素濃度が 50ppm を越えると運転に支障をきたすという問題を回避するためのものである。塩素濃度の上昇によって生じる問題とは、プレヒータを構成するサイクロンの閉塞である。塩素がキルン炉の高温部分で揮発しプレヒータで凝縮してしまうことにより、プレヒータ内の塩素濃度が上昇する。それにともない原材料の粘度が上昇することがサイクロンの閉塞の原因である。

塩素バイパスシステムはプレヒータの下部に設置され、濃縮したガスを数パーセント抽気して、塩素を塩化カルシウムなどの塩化化合物の形で抽出するものである。ガス抽気式のほか、原料を抜き出して塩素を抽出するタイプのものもある。原料抜き式のタイプは、ガス抽気式に比べて抜き出し量が多くなる欠点があるが、設備コストが小さく運転が容易という利点がある。

¹ 石灰石は高炉中で脱炭酸反応により生石灰（CaO）となる。CaO と鉄鉱石およびコークス中の不純物（ケイ素分など）が反応し、スラグを生成する。スラグと銑鉄の比重差（スラグの方が比重が小さい）を利用して両者を分離する。

セメント中の塩素の許容量は JIS 規格 (JIS R 5210) で 350ppm と定められている . クリンカ製造工程での塩素許容量は 50ppm であるため , 製造段階での塩素許容量の方が製品の塩素許容量より厳しいという状況になっている . このことは , 廃棄物を利用したセメントの品質に対する懸念のうち , 塩素含有量に対する懸念を解くための根拠となる . 廃棄物中の塩素が問題となるのは , クリンカ製造工程の稼働の障害となる可能性があるためである . 換言すれば , 原料中の塩素はセメントの使用段階で問題を引き起こすのではなく , 製造段階で問題を起こすため懸念されるということである .

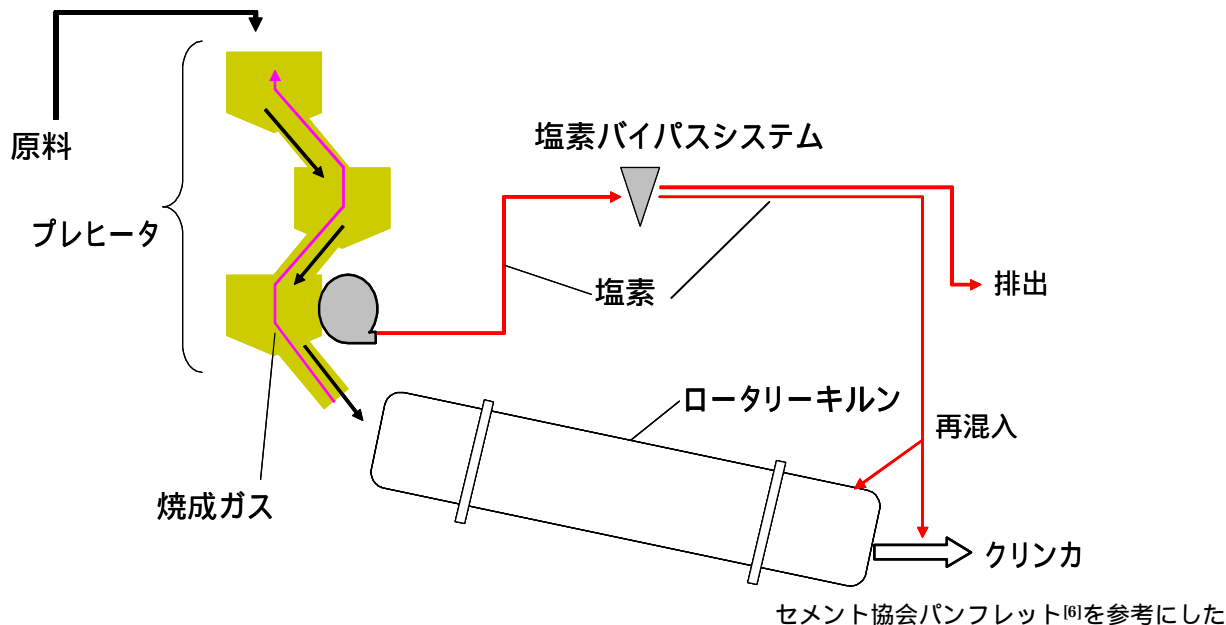


図 2-2 塩素バイパスシステムの概要

2.3 セメント産業における生産と廃棄物利用の状況

わが国のセメント生産は , 戦後から高度成長期にかけて経済成長とともに右肩上がり増加を続けた . オイルショック後の安定成長期には , 景気によって上下があるものほぼ 7 千万 t から 1 億 t の間で推移した . 近年では , 1995 年にセメント生産量のピーク 9900 万 t に達した後は建設需要の低迷を受け , 生産量 , 国内出荷量ともに減少を続けている . 2003 年度では国内生産量 7351 万 t , 国内出荷量 5886 万 t である (図 2-3) .

生産量と国内出荷量の差は輸出量となり , 生産量の 1 ~ 2 割を占める . 輸入量は 100 万 t 程度であり , 生産量等と比較して非常に少ない .

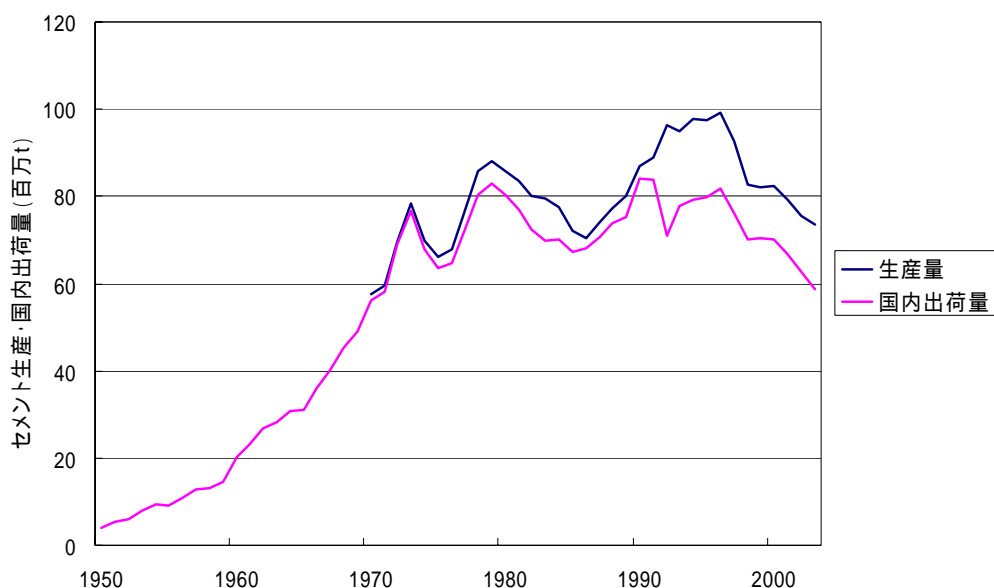


図 2-3 わが国のセメント生産・国内出荷量の推移 1, 2

- 1 1950-1969年は暦年ベース．出典はセメント年鑑⁷⁾
- 2 1970-2003年は年度ベース．出典はセメントハンドブック⁸⁾

セメント種類別の生産動向を見ると、ポルトランドセメントと高炉セメントが大半を占めており、フライアッシュセメントなどの高炉セメント以外の混合セメントはごく少量であることがわかる（図 2-4）。高炉セメントの生産量自体はほぼ横ばいであるが、セメント生産量の減少を受けて、セメントの全生産量に占める高炉セメントの割合は徐々に増加しており、2003年度で 23.7%である（図 2-5）。セメント生産の減少はほぼポルトランドセメントの減少によるものである。

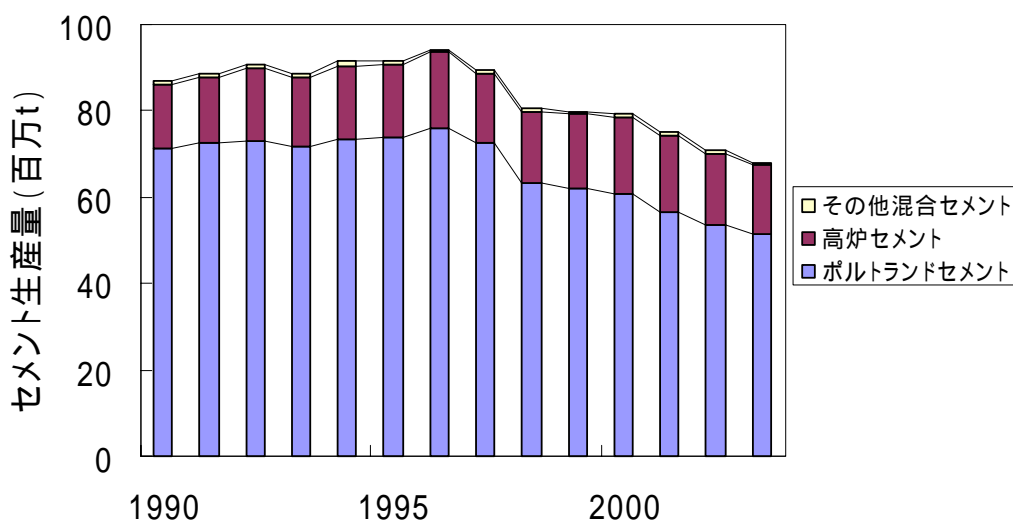


図 2-4 セメント種類別の生産量の推移（出典：セメントハンドブック⁸⁾）

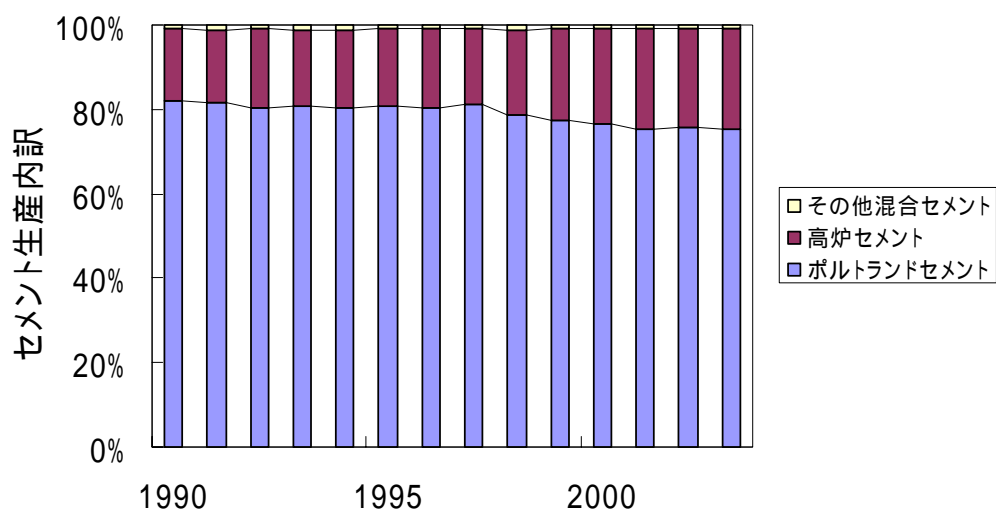


図 2-5 セメント種類別の生産割合の推移 (出典：セメントハンドブック⁸⁾)

セメント産業における廃棄物・副産物の使用量を見ると、1995～2003年では全体としてはほぼ横ばいである(図 2-6)。セメント生産量が減少していることから、セメント 1t 当たりの使用量は増加しており、1995年度で 257kg だったものが 2003 年度では 375kg まで増加している。セメント協会では自主目標を設定しており、目標値は 2010 年までにセメント 1t 当たり 400kg の廃棄物・副産物使用を達成するというものである。

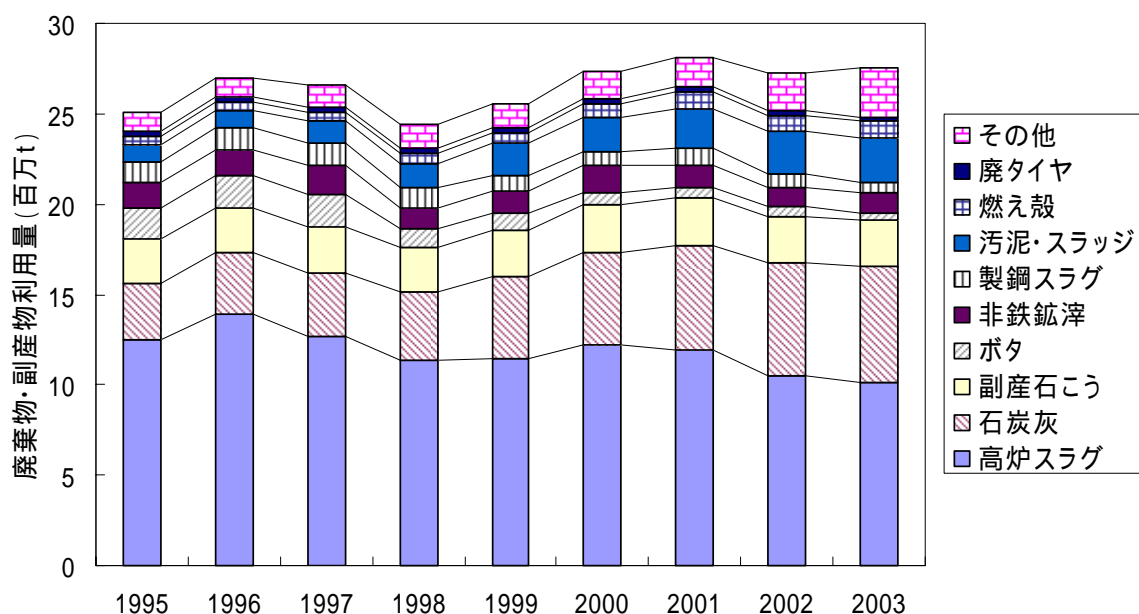


図 2-6 セメント産業における廃棄物・副産物使用量の推移 (出典：セメントハンドブック⁸⁾)

高炉スラグと石炭灰の関係は興味深い。石炭灰の使用量が増加するにつれて、高炉スラグの使用量が減少しているという関係にある。

高炉セメントの生産量が横ばいであるにもかかわらず高炉スラグの使用量が減少しているということから、この減少分はクリンカ製造工程で使用される分であると推測される。石炭灰はほとんどがクリンカ製造工程で使用されたものであるため、クリンカ製造工程で使用される廃棄物・副産物の中で石炭灰の使用量が増加した分だけ高炉スラグの使用量が減少したという関係にあったと考えられる。

2.4 廃棄物の利用・処分の現状

2.4.1 高炉スラグ

高炉スラグの利用用途の推移を図 2-7 に示す。

1995～2003 年にかけては高炉スラグ利用総量が 2200～2500 万 t で推移している。用途別の利用割合にも大きな変化は見られない。強いてあげればコンクリート骨材向が増加した傾向が見られる。図 2-6 のセメント産業で使用される高炉スラグ量と図 2-7 の高炉スラグのセメント向利用量の数値の間の差異は海外のセメント工場向け輸出分である。

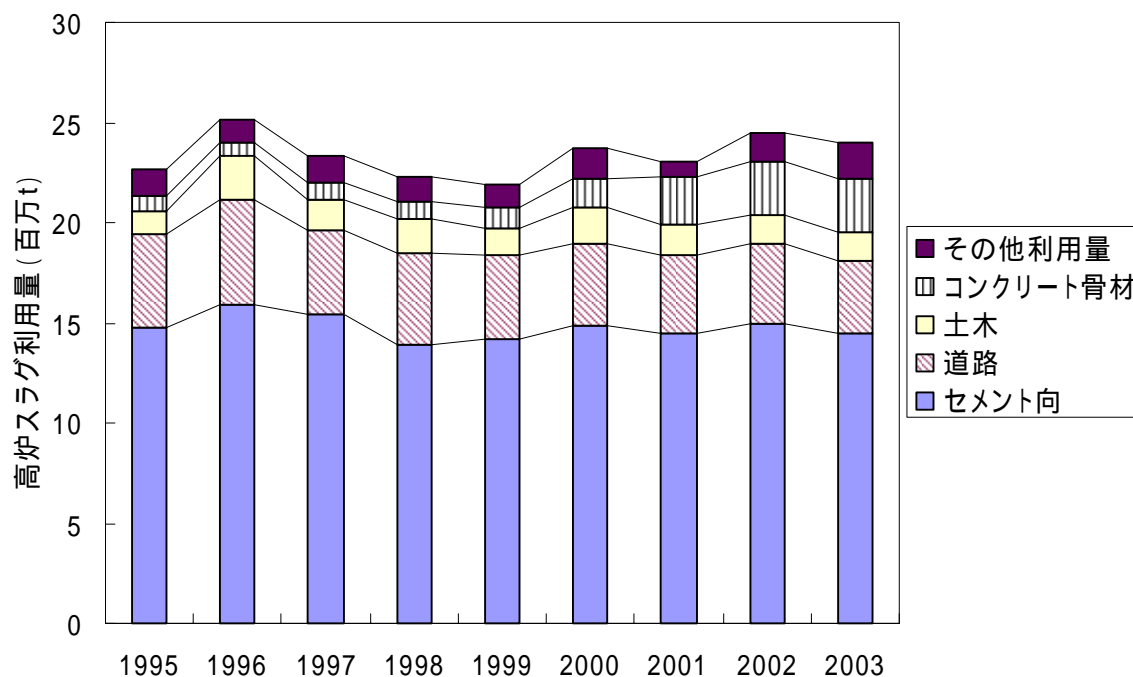


図 2-7 高炉スラグの利用用途の推移 (出典：鉄鋼スラグ統計⁹⁾)

鉄鋼スラグ統計⁹⁾では高炉スラグ生成量・生産量・利用量の 3 種類のデータがある。生成量はドライベース(乾燥重量)の数値であり、生産量より小さい。高炉スラグ生産量は水砕等の処理後重量を計上した数値。生産量と利用量の差は在庫調整等に由来する

2.4.2 石炭灰

石炭灰の発生量、利用・処分量の推移を図 2-8、図 2-9 に示す。石炭灰に関する統計¹⁰⁾では石炭主灰(ボトムアッシュ)・石炭飛灰(フライアッシュ)別のデータが示されていないため、両者を合計した

石炭灰としての数値を示す。なお第3章以下の分析においては、石炭飛灰の発生量等は石炭灰の発生量の数値を用いている。

石炭灰が最も多く発生するのは電気事業(石炭火力発電所)である。全発生量の70~80%を占める。1995~2003年にかけて発生量は増加傾向にあり、2003年度の発生量748万tは、1995年度の発生量515万tと比較して1.45倍まで増加している。今後も石炭火力発電所の増設が予定されているため、石炭灰発生量も増加し続けていくと予想される。

一般産業で石炭灰が多く発生する産業としては、化学産業・セメント産業・鉄鋼産業・紙パルプ産業があげられる。これらの産業には石炭ボイラや自家発電設備を有する事業者が多いためである。発生量は増加傾向にあるものの、電気事業ほどのペースではない。

石炭灰の利用・処分量の推移を見ると、1995~2003年にかけてセメント産業での利用量は増加傾向を示している。特に1999年以降の増加が著しく、石炭灰発生量の増加のペースを上回っている。2003年度では発生量に対するセメント産業での利用量が占める割合は64%となっている。

一方、埋め立て量は減少傾向にある。2003年度の発生量に対する埋め立て量の占める割合は15%となっている。

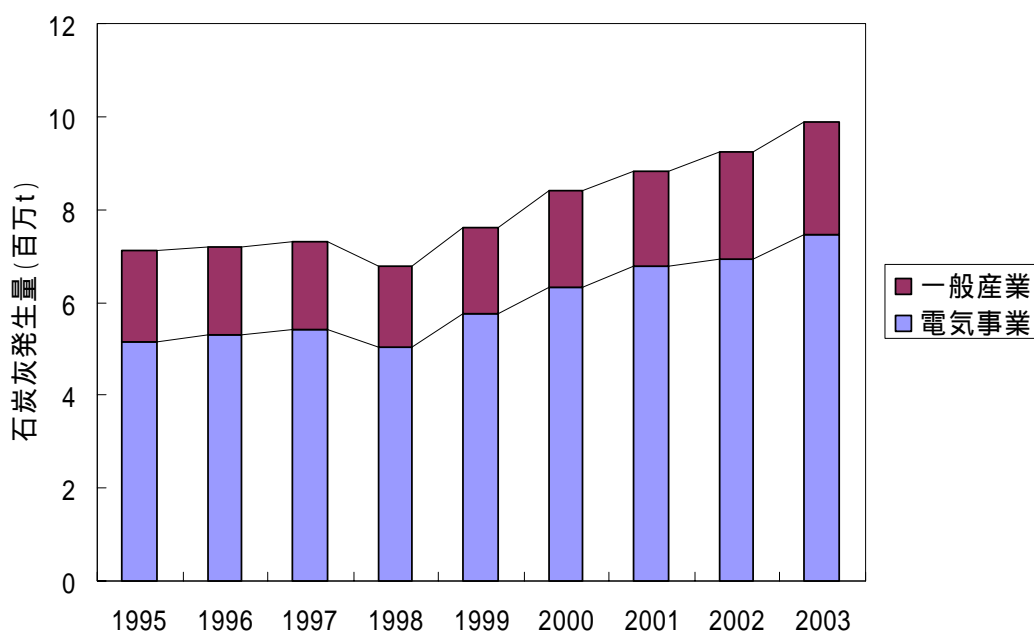


図 2-8 石炭灰の発生量の推移 (出典：石炭灰全国実態調査^[10])

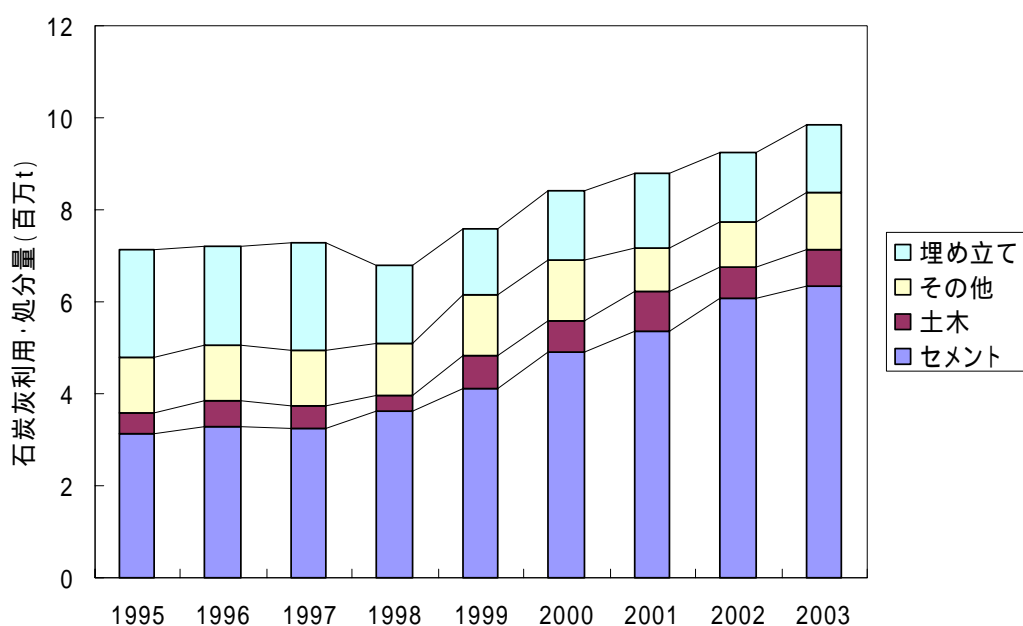


図 2-9 石炭灰の利用量・処分量の推移 (出典：石炭灰全国実態調査^[10])

2.4.3 一般廃棄物焼却灰

一般廃棄物の処理量，最終処分量の推移を図 2-10，図 2-11 に示す。

1995～2002 年にかけて，一般廃棄物の発生量は 5000 万 t 前後で推移している。発生量の約 80% が直接焼却処理される。直接最終処分量が減少傾向にあり，その減少分だけ直接資源化量が増加しており，有効利用の割合が高まっているのが見て取れる。

最終処分量の推移を見ると，焼却処理量が横ばいであることを受けて焼却灰等の埋め立て量は横ばいで推移しており，直接最終処分量の減少分がすなわち最終処分量の減少となっている。焼却灰等埋め立て量は 2002 年度で 680 万 t と，電気事業からの石炭灰の発生量に匹敵する量となっている。

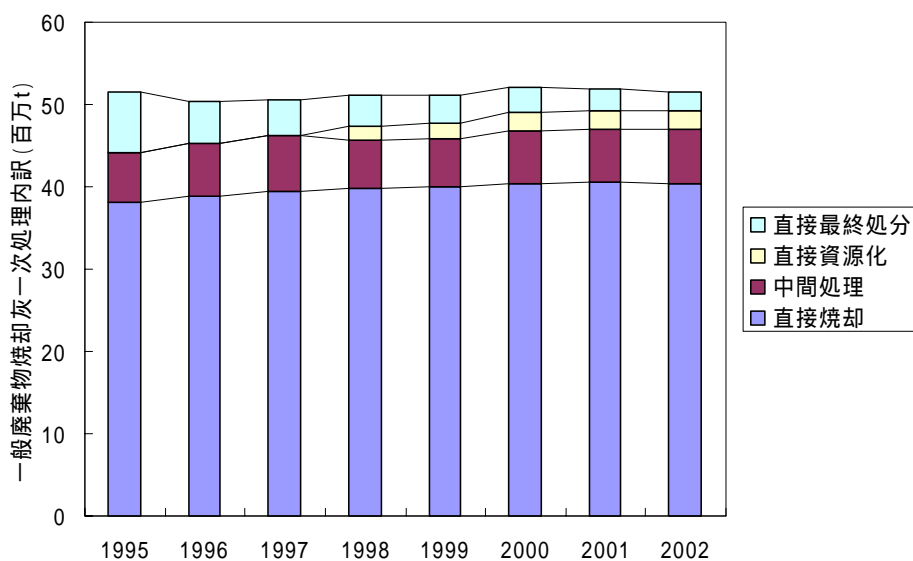


図 2-10 一般廃棄物一次処理量の推移 (出典：環境省^[11])

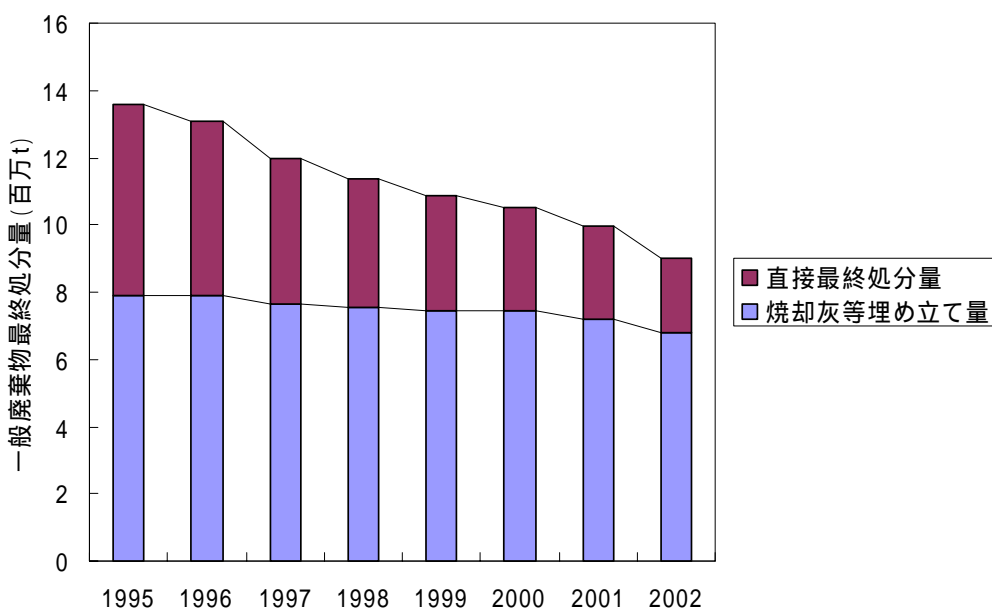


図 2-11 一般廃棄物最終処分量の推移 (出典：環境省^[11])

一次処理内訳とは、収集された廃棄物がはじめに処理される処理方法別で分類したもの。焼却灰の埋め立て量は計上されない

2.4.4 最終処分場

産業廃棄物・一般廃棄物別の最終処分量・最終処分場残余容量・残余年数の推移を図 2-12，図 2-13 に示す。

産業廃棄物の最終処分量は、1995～2002年にかけて 6800 万 t から 4000 万 t にまで減少しているが、絶対量が膨大なことに変わりはない。最終処分量のうち最も大きな割合を占めるのが汚泥であり、次い

でがれき類，鉱さい，ばいじんと続く。

最終処分場残余容量を1年間の最終処分量で除して得られる残余年数は3~4年と計算される。この数字は決して余裕のあるものとはいえない。とはいえ、毎年新規の処分場が建設されるため、残余年数は微増の状態にある。汚泥やがれき類は建設の容易な安定型処分場で処分可能であることから、これだけ大量の処分容量が毎年供給できると考えられる。ただし廃棄物統計が不備であることからこのような数値となっているが、実際には不正な処分が多いという指摘もなされている^[13]。

一般廃棄物の場合は、産業廃棄物に比べ最終処分量に対する残余容量が大きいいため、残余年数も10~14年と余裕がある。しかし地域によりばらつきも大きく、都市部では残余容量が逼迫しているところもある。

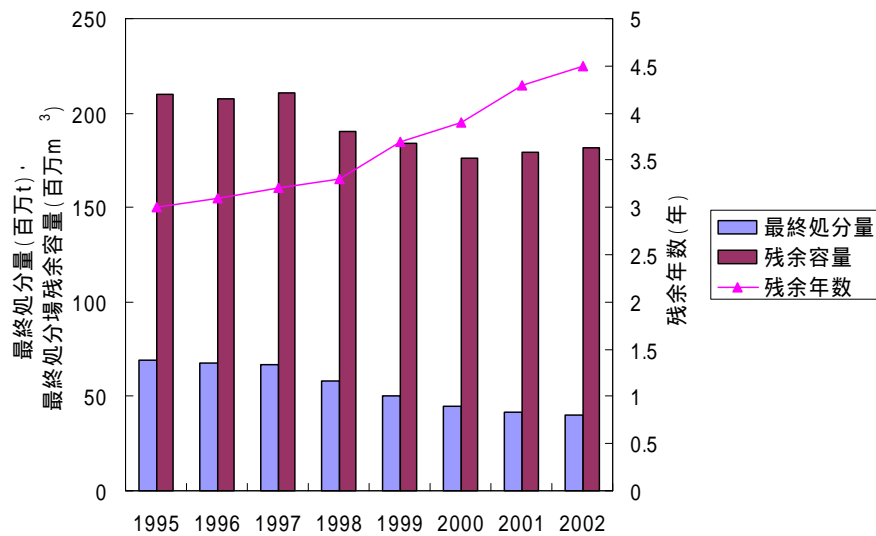


図 2-12 産業廃棄物の最終処分量・最終処分場残余容量・残余年数の推移（出典：環境省^[12]）

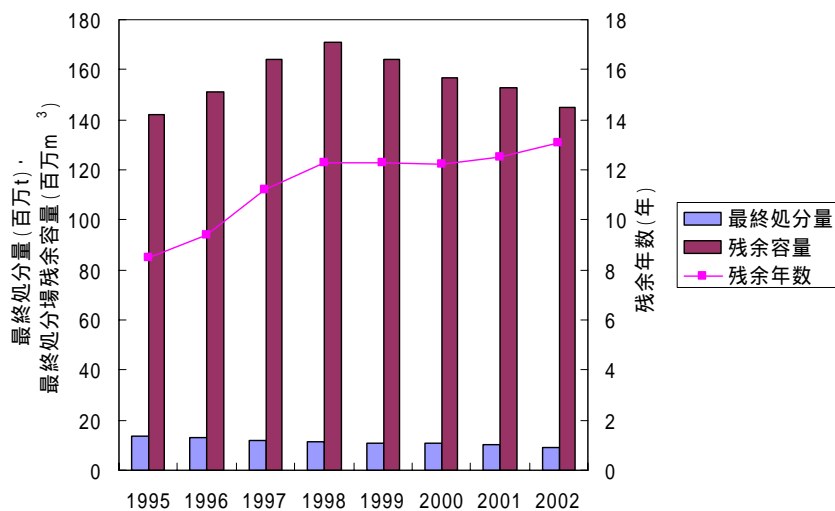


図 2-13 一般廃棄物の最終処分量・最終処分場残余容量・残余年数の推移（出典：環境省^[11]）

2.5 セメント原料化リサイクルの調査・研究の現状

本節では政府・自治体による新しい廃棄物処理方策としてのセメント原料化リサイクルに関する調査・研究の現状を概括する。

2.5.1 循環型社会形成のための指標

2003年3月に閣議決定された循環型社会形成推進基本計画には、施策の効果を測るための物質フロー指標と、施策の具体的な目標としての数値目標が定められた。指標および目標値決定の経緯については松野・森口^[15]を参照されたい。

物質フロー指標には

- (a) 資源生産性 $\frac{GDP}{\text{直接物質投入量}}$
- (b) 循環利用率 $\frac{\text{循環利用量}}{\text{循環利用量} + \text{直接物質投入量}}$
- (c) 最終処分量 最終処分量

の3つが採用された。それぞれの指標について、2010年度の数値目標が表 2-1 のように設定された。

表 2-1 循環型社会形成推進基本計画の物質フロー目標

	2000年度実績値	2010年度数値目標
資源生産性	28.2 万円/t	39 万円/t (40%増)
循環利用率	10.2 %	14 % (40%増)
最終処分量	5600 万t	2800 万t (半減)

最終処分量を10年間で半減させるなど、目標の達成には相当の努力が必要と考えられる。最終処分削減のためには、特に焼却灰や燃え殻などの再利用の困難な廃棄物のリサイクルを開発することが不可欠であると考えられる。

2.5.2 エコセメント

エコセメントとは、廃棄物焼却灰を主原料（原料の30～50%）として製造する特殊なセメントの名称である^[14]。焼却灰中の塩素を鉍物として利用するという考え方に基づくセメントである。1993年から旧通商産業省の支援による実証研究が始まり、2001年に千葉県市原市に工場が完成・操業を開始している。2006年からは多摩地区での操業開始が予定されている。

エコセメントと一般廃棄物焼却灰のセメント原料化リサイクルの違いについて簡単に述べておく。一般廃棄物焼却灰のセメント原料化が既存のセメント生産プロセスで一般廃棄物焼却灰を利用するものであるのに対して、エコセメントは専用の小規模プラントを都市近接地に建設して一般廃棄物焼却灰を利用するものである。

2.5.3 都市ごみ焼却灰の国内広域処理システム構築に関する調査

経済産業省は、平成15年度に財団法人日本立地センターに「都市ごみ焼却灰の国内広域処理システ

ム構築に関する調査」を委託した。その調査報告書が経済産業省ホームページで公開されている^[16]。

この報告書によれば、一般廃棄物焼却灰の新たな処理方法が求められる背景として

- (a) 新規の最終処分場を建設することへの周辺住民の合意を得ることが難しい現状において、焼却灰の発生量の抑制も進まないため、最終処分場の逼迫が懸念されること
- (b) 焼却灰中の重金属、ダイオキシン類等の有害物質を安全に処理する必要があること
- (c) 焼却灰の処理に求められる安全性の基準が高まることで最終処分コストが高まること懸念されること

をあげている。そして、このような問題に対する新規な焼却灰処理システムとして、都市部で発生した焼却灰を長距離輸送により遠隔地にあるセメント工場でセメント原料として利用するシステムの可能性を調査している。

焼却灰をセメント原料として利用するシステムとしては、エコセメント方式がある。エコセメント方式は、廃棄物を主原料とする専用のプラントを都市近隣地域に建設するというものである。これに対し、本研究や経済産業省が対象としているのは、廃棄物の長距離輸送が必要となるが、既存のセメント工場を利用するリサイクルの方式である。

この報告書では、首都圏 - 北海道および首都圏 - 九州の輸送・リサイクルというケースを設定し、コストを試算している。試算では、主灰の処理費用がトータルで 3.5 万円/t、前処理設備の投資回収年数が 10 年程度になるという結果であった。

2.5.4 焼却灰をモデルとした瀬戸内海エリアにおけるリサイクルシステムの具現化と静脈物流の構築調査

経済産業省中国産業局は、平成 13 年度に、臨海部に多くのセメント工場を有する瀬戸内海エリアで広域的な焼却灰リサイクルシステムの構築可能性を調査した^[17]。この調査では、一般廃棄物焼却灰処理の実情や広域リサイクルシステムへの関心度を把握するため、関係市町村へのアンケートがおこなわれた。調査結果のうち重要事項を箇条書きでまとめる。

- (a) 瀬戸内海エリアの都道府県の最終処分場残余年数は、大阪府が最短で 4.9 年、岡山県が 11.1 年。長い方では福岡県が 37.5 年、兵庫県が 21.7 年。このように最終処分場の逼迫度は自治体によりばらつきが大きい。
- (b) 焼却灰の輸送距離・輸送費用について調査した。輸送費用は 1500 ~ 15000 円/t とばらつきが大きい。
- (c) 焼却灰最終処分費用は、0 ~ 47500 円/t とばらつきが大きい。

上記のように、処理費用は自治体により大きな差があり、処理費用が高い自治体では新規リサイクルシステムの導入可能性があるといえる。

この調査では、焼却灰のセメント原料化システムでの処理コストを試算している。試算では、焼却灰（主灰・飛灰平均）トン当たり 55,000 円程度とやや高めの値となっている。

セメント原料化リサイクル・埋め立て処分・灰溶融という処分方法について CO₂ 排出量を試算している。試算では、セメント原料化リサイクルが灰溶融に比べて CO₂ 排出量が低いという結果を得ている。

2.6 廃棄物を原料として利用したセメントの安全性

廃棄物を原料としたセメントに関して懸念される問題は、重金属含有による安全性への影響に関するものである。本節ではこの問題を検討する。

2.6.1 土壌環境基準

セメントの重金属含有許容量を検討する場合に参照すべき基準として、土壌環境基準は安全性を最大限重視する立場での下限値（最も厳しい基準値）であると考えられる。土壌環境基準値は「人の健康を保護し、及び生活環境を保全するうえで維持することが望ましい基準」^[18]とされる。よってセメントの重金属含有量が土壌環境基準値以下であれば、セメントが環境中に放出されても生活環境に悪影響を及ぼす可能性は小さいと考えられる。実際に他の廃棄物リサイクル製品、例えば灰溶融スラグなどの安全性も土壌環境基準との比較で検討されている^[19]。

重金属にかかわる土壌環境基準値を表 2-2 に示す。

表 2-2 重金属類の土壌環境基準（出典：環境省^[18]）

重金属	基準値	備考
カドミウム	0.01mg	検液1Lあたり
鉛	0.01mg	検液1Lあたり
六価クロム	0.05mg	検液1Lあたり
総水銀	0.0005mg	検液1Lあたり
銅	125mg	農用地(田にかぎる)において、土壌1kgあたり

土壌環境基準は溶出試験による重金属の溶出量で定められる。検液とは、別に定める方法により調整された、土壌成分を溶出させた試料液のこと。検液 1L 中の土壌重量は 100g(液固比 10)

2.6.2 廃棄物を利用するセメント中の重金属含有量の管理策

廃棄物を利用するセメント中の重金属含有量の生産段階における管理策としては、次の 3 つがあげられる。

- (1) 受け入れる廃棄物を管理
- (2) 受け入れた廃棄物を適正処理
- (3) 生産された製品を管理

(1) セメント工場での廃棄物受け入れ基準の設定

生産されるセメントに影響が出ない範囲で利用する廃棄物の量・質を管理するという考え方である。都市ごみ焼却灰の国内広域処理システム構築に関する調査^[16]では、セメント工場での一般廃棄物焼却灰の受け入れ基準案を示している。この基準案は、焼却灰の重金属含有量、現状のセメントの重金属含有量を参考に作成されたものである。表 2-2 と表 2-3 の値を比較してみると、六価クロム・カドミウムで土壌環境基準より受け入れ基準の方が小さい値となっている。ただしこの基準案は、散水洗浄処理された焼却主灰についての基準値であり、焼却灰そのものの重金属含有量と比較することはできない。

表 2-3 一般廃棄物焼却灰受け入れ基準案^[16]

重金属	上限値	単位
Pb	1000 ppm(乾燥重量)	
Cu	1700 ppm(乾燥重量)	
Zn	1300 ppm(乾燥重量)	
Cd	20 ppm(乾燥重量)	
Cr+6	0 ppm(乾燥重量)	
T-Cr(総クロム類)	170 ppm(乾燥重量)	
T-Hg(総水銀類)	1 ppm(乾燥重量)	

一般廃棄物焼却灰の重金属含有量は灰によって大きなばらつきがある。文献^[20]によれば、ばいじん(飛灰)の鉛含有量は 1000～4000ppm、銅含有量は 400～2000ppm である。燃えがら(主灰)の鉛含有量はばいじんの 1/3 程度、銅含有量は 2 倍程度と報告されている。この数値と焼却灰受け入れ基準案の値を比較すると、主灰・飛灰ともそのままでは基準を満たさない。

表 2-3 の値はあくまで試案であり、すべてのセメント工場・焼却灰に適用されるべき性格のものではない。焼却灰を利用する個々の工場では、原料に占める焼却灰の利用率など自工場の状況に即して判断すべきものである。

森ら^[21]による一般廃棄物焼却灰中の成分が調査された報告がある。この調査では170施設から焼却灰261サンプルを対象に、蛍光X線分析により成分を測定した。Cr、Cu、Pbについて、ストーカ炉焼却灰(主灰・飛灰)の含有率調査結果を表 2-4に示す。表 2-4からも、主灰では銅含有量が多く、飛灰では鉛含有量が多い傾向が認められる。

表 2-4 一般廃棄物焼却灰中の重金属含有率^[21]

含有率(%);最大		
成分	ストーカ炉焼却灰	ストーカ炉飛灰
Cr ₂ O ₃	0.25	1.1
CuO	2.3	1.4
PbO	0.8	1.7

含有率(%);中央値		
	ストーカ炉焼却灰	ストーカ炉飛灰
Cr ₂ O ₃	0.05	0.05
CuO	0.7	0.05
PbO	0.05	0.1

出典元では箱ひげ図によるグラフで示されていた結果を目測により数値を読み取り表にまとめた。

表 2-4より一般廃棄物焼却灰1kg中の重金属含有量(mg)の値に変換した結果を表 2-5に示す。表 2-5の値は文献^[20]の値よりも大きくなっている。焼却灰の性状には大きなばらつきがあることが確認できる。

表 2-5 一般廃棄物焼却灰中の重金属含有量

含有量 (mg/kg); 最大		
成分	ストーカ炉焼却灰	ストーカ炉飛灰
全Cr	1,711	7,526
Cu	18,371	11,182
Pb	7,426	15,780

含有量 (mg/kg); 中央		
成分	ストーカ炉焼却灰	ストーカ炉飛灰
全Cr	342	342
Cu	5,591	399
Pb	464	928

含有量は次式から算出

$$\text{重金属含有量 (mg/kg)} = \text{含有率(\%)} / 100 \times 10^6 (\text{mg/kg}) \times \text{重金属重量比}$$

$$\text{重金属重量比: Cr} \quad \text{Cr/Cr}_2\text{O}_3 = 104/152, \text{Cu} \quad \text{Cu/CuO} = 63.5/79.5, \text{Pb} \quad \text{Pb/PbO} = 207/223$$

(2) 焼却灰の前処理技術

焼却灰をセメント原料として利用するための前処理として灰水洗処理という方法がある。灰水洗処理技術は、とくに飛灰について、塩素・重金属の除去を目的として、灰水洗と水洗後の濾液の処理を組み合わせたシステムである^[14]。前処理をおこなうことで、原料としての理由基準を満たさない焼却灰についても受け入れ可能となる。

(3) セメント中の重金属含有量基準

現段階ではセメントに対する重金属含有量の許容基準といったものは存在しない。しかし、廃棄物を使用したセメントの利用促進のためには、安全性の保証のためにも、製品の安全基準が設定される必要があると考えられる。

以上(1)～(3)をまとめると、セメント生産段階での管理策としては

- (a) セメントおよびセメント製品からの溶出量が環境基準を超えないようなセメント中の重金属含有量基準を決定する
- (b) セメント中の重金属含有量基準を超えないような使用原料（廃棄物を含む）の重金属含有量基準を決定する

の手順により受け入れ段階での基準を決定することが合理的であると考えられる。しかし、セメント中の重金属含有量と溶出量の関係を決定する要因は単純ではなく、とくに周囲環境（土壌の性質、pH等）に影響される部分も多い。

2.6.3 セメントの重金属含有量と溶出量

(1) 含有量と溶出量の関係

含有量と溶出量の関係を調査した報告に高橋^[22]がある。高橋は、セメント中の微量成分含有量と溶出量についての調査結果をまとめている。

表 2-6 セメント中の重金属含有量と溶出量^[22]

重金属	含有量 (mg/kg)	溶出量 (mg/l)	環境基準 (mg/l)	その他基準	基準許容
Cr(VI)	14.7	1.34	0.05		×
Cu	417	<0.0033	-	125mg/kg(農用地での含有量), 1.0mg/l(水道水基準)	
Zn	2044	0.01	-		-
As	57.5	0.0004	0.01		
Se	<1	0.0035	0.01		
Cd	18.4	<0.0023	0.01		
Hg	0.113	<0.00007	0.0005		
Pb	386	0.031	0.01		

表 2-6 は、調査したポルトランドセメントのうち、含有量が最大値を示したサンプルについて溶出試験をおこなった結果をまとめたものである。Cr(VI)、Cu、Pb で環境基準を上回る数値が出ている。その他の重金属類については、含有量最大のサンプルでも溶出量が基準を十分下回っているので問題ないと判断できる。

Cu の溶出量に関する土壌環境基準は存在しない。農地の土壌についてのみ、Cu 含有量が 125mg/kg 以下という基準が定められている。よって Cu 含有量の多いセメントは農地の土壌改良等には使用することが適切でない場合がある。Cr(VI) (六価クロム) の溶出量は環境基準を大きく上回っている。

(2) 六価クロム

セメント土壌固化材や廃コンクリートから環境基準以上の六価クロムが溶出する可能性があることがわかっており、これによる環境汚染が懸念されている。工業材料としての六価クロムは、金属の表面処理に適した酸化剤としてメッキや電池に使用されている。毒性が強く、発がん性物質とされる。セメント中の六価クロムは、セメント原料(天然資源)中の微量の三価クロムが焼成過程により六価に変化したものである^[23]。

国土交通省によりセメント系土壌固化材からの六価クロム溶出による検討がなされている。国土交通省報告書^[24]の内容を以下にまとめる。

地盤改良を目的とした固化材としてセメントを利用した場合、土壌環境基準(0.05mg/L、後述)を超える六価クロムが溶出する可能性が指摘されている。セメント改良土(セメント系固化材により改良された土壌)からの六価クロム溶出は次のように整理できる。

- (a) 通常は、セメントと水が反応してできるセメント水和物^[25]によりセメント中の微量物質は固定化され、環境中に溶出する量は十分小さい
- (b) しかし、土壌の種類によっては水和反応を阻害するものがある(火山灰質粘性土など。水和に必要な Ca イオンを吸着し水和反応を阻害するため)。この場合、六価クロムは水和物としての固定が不十分となり、環境中に溶出する
- (c) 水和反応が十分であれば、環境基準以上の六価クロムが環境中に溶出することはない。よって、モルタルやコンクリート試料からの溶出は環境基準以下である

複数種類のセメントと複数種類の土壌を組み合わせたセメント改良土試料(試料数 2544)

に対し、施工前溶出試験をおこなったところ、土壤環境基準を超える溶出があった試料は全体の5%程度であった。

既設のセメント改良土から試料を採取し溶出試験をおこなったところ、36現場中6現場から土壤環境基準を超える溶出があった。しかし、さらに周辺土壌からの溶出および地下水濃度を調査したところ、すべて環境基準以下のレベルであった。

コンクリート解体材について溶出試験をおこなったところ、一部試料で環境基準以上の六価クロム溶出が見られた(最大0.06mg/L)。ただしこの試験では、環境庁告示46号の試験法に準拠するため、試料を2mm以下まで粉碎するなど、実際の解体材利用状況と比べて過酷な条件を課したものである。六価クロム溶出が大きかった試料は、粉碎試料をさらに屋内で長時間放置し、試料の中性化を進行させたものであるとのことであった。

以上の試験結果を総合して、国土交通省報告書では次のように結論付けている。

- (a) 施工前の溶出試験結果では、様々な土と固化材の組合せの中にある一定程度の割合で六価クロムの溶出が土壤環境基準を超える試料が存在する。このため、施工前の溶出試験により六価クロムの溶出が土壤環境基準を超えないことを確認する必要がある。
- (b) セメントに起因する六価クロムは、周辺土壌において吸着・還元作用の影響を大きく受け、周辺地盤に溶出してもその移動が抑制され、時間の経過とともに減衰する。こうした六価クロムの周辺環境への影響に対し安全側に作用する要因により、既設のセメント改良土などで六価クロムの溶出のおそれがあっても、大量の浸透水の流入といったような六価クロムの溶出が促進される環境下でなければ、周辺環境への影響はない。

(3) その他重金属

太平洋セメント株式会社の環境報告書には、自社で生産したポルトランドセメントの重金属(鉛、亜鉛、クロム、銅、水銀、カドミウム)の含有量を抜き取り検査により調査した結果が示されている^[23]。調査結果ではセメント中の重金属含有量は土壤中の含有量の域を出てはいないことが示されている。しかし、調査サンプルの重金属含有量にはばらつきがみられることから、同一のプラントでも使用する原料や運転条件の違いによって重金属を多く含有する製品が出来てしまう可能性は否定できない。品質管理の水準を保つことが必要と考えられる。

セメント製品(ポルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュセメント、エコセメント)に対してはJIS規格が制定されているが、この規格はセメントの性能(凝結時間・安定性・圧縮強さ・主成分)について定めたもので、微量な重金属の含有量については定められていない。廃棄物を使用したセメントの利用促進のためには、製品の安全基準を設定し、安全性の保証がなされる必要がある。

(4) 天然原料中の重金属含有量

セメント中の重金属は天然原料由来のものと同廃棄物由来のものにわけられる。廃棄物使用量とセメント中の重金属含有量の関係を検討するためには、まず天然原料中の重金属含有量を把握する必要がある。

以下では天然減量中の重金属含有量について推計をおこなう。

高橋^[22]の報告によれば天然原料中の重金属含有量にもばらつきがみられる。推計では、重金属含有量を過小評価することを避けるためにできる限り慎重な(Conservative)評価をおこなう。推計は、まずセメント中の含有量(表 2-7)からクリンカ中の含有量を求め、求めたクリンカ中の含有量をすべて天然原料中の含有量として天然原料 1kg あたりの含有量を求めるという方法をとった。

表 2-7 セメント中の重金属含有量^[22]

単位(mg/kg)	ポルトランドセメント中の微量成分含有量			(参考)土壌含有量	
	最小	最大	平均	土壌(下限)	土壌(上限)
全Cr	52	204	98	5	1500
Cr(VI)	0.4	32.4	10.8	-	-
Cu	18	243	140	2	250
Zn	205	1435	511	1	900
As	3.3	106.3	18.9	0.1	40
Se	-	-	-	0.01	12
Cd	0.6	7.8	2	0.01	2
Hg	0.002	0.127	0.023	0.01	0.5
Pb	7	421	111	2	300

1995 年採取のサンプルによる

ポルトランドセメントはクリンカとセッコウの混合物である。簡単のため重金属はすべてクリンカ原料由来とみなす。ポルトランドセメントにおけるクリンカ原料の投入原単位は 1394kg/t-セメントである^[8]。クリンカ原料 1kg あたりの重金属含有量は、表 2-7 の値をクリンカ原料の投入原単位 1394kg で除したものとなる。表 2-8 に Cr, Cu, Pb についての値を示す。

表 2-8 クリンカ原料(天然原料) 1kg あたりの重金属含有量

単位(mg/kg)	最小	最大	平均
全Cr	37.3	146.3	70.3
Cu	12.9	174.3	100.4
Pb	5.0	302.0	79.6

表 2-8 の値は、原料間(石灰石、けい石等)の含有量を平均化した値である。表 2-5 の値と表 2-8 の値を比較すると、天然原料中の重金属含有量と比べて廃棄物中の重金属含有量が非常に大きいことがわかる。

2.6.4 セメント原料化リサイクルの潜在的問題

廃棄物のセメント原料化リサイクルにより、新たに発生することが懸念される問題には次の 2 つがある。

- (a) セメントの品質への影響
- (b) 廃コンクリートのリサイクルに対する阻害要因となる可能性

(a)、(b)の問題は具体的にはそれぞれ次のような問題である。

(a-1) コンクリート耐久性

(a-2) 土壌固化材として使用する場合の重金属溶出量

(b-1) 廃コンクリートを路盤材として利用する場合の重金属溶出量

(b-2) 廃コンクリートからの微粉をセメント原料として利用する場合の重金属含有量

この問題の重要性および対応法について以下に述べる。

(a-1) コンクリート耐久性

コンクリートの耐久性に影響する要因はセメント中の塩化物である。よって、廃棄物中の塩素含有量を適切に管理することが求められる。この点についてはすでに述べたように、塩素濃度についてはキルン炉の制約の方が製品中濃度の制約より厳しい。よって、クリンカ製造工程における塩素バイパスシステムにより、結果としてセメント中の塩素含有量は十分許容範囲内におさまる。

塩素バイパスシステムを備えたプロセスにおける原料全体での塩素濃度制約は 500ppm 以下というものである。一般廃棄物焼却灰飛灰を利用する場合、この制約に抵触する可能性があるため、飛灰については灰水洗処理等の前処理が必要となる。

(a-2) 土壌固化材として使用する場合の重金属溶出量

セメント系固化材から六価クロムが溶出する場合があることについてはすでに述べた。この六価クロムは天然原料由来（石灰石、粘土等）が主であるため、廃棄物を使用したことによって発生した問題ではない。六価クロム以外の重金属溶出については現在のところ特に大きな問題とはなっていない。しかし六価クロム同様、セメント中の含有量が増加すれば新たに発生する恐れもある。様々な使用形態における溶出試験に基づいて品質基準を定め、定めた基準に基づく品質管理が必要となる。

(b-1) 廃コンクリートを路盤材として利用する場合の重金属溶出量

路盤材として利用する場合の六価クロム溶出量は土壌固化材以下であることはすでに述べた。よって、土壌固化材として利用可能な六価クロム含有量の範囲で作られたセメントによるコンクリートを用いていけば、この問題が重大となることはない。言い換えれば、(b-1)の条件は(a-2)の条件より緩いため、(a-2)の条件に含まれるといえる。

(b-2) 廃コンクリートからの微粉をセメント原料として利用する場合の重金属含有量

廃コンクリートから骨材と微粉（廃セメント）を分離・回収するリサイクルシステムが検討されている¹²⁶⁾。このリサイクルシステムにおいて、微粉はクリンカ原料として利用される。廃コンクリートが廃棄物を利用したセメントから製造されたものである場合、この微粉中に含まれる重金属が問題となる可能性がある。このようなリサイクルシステムにおいては、微粉も廃棄物の一種として廃棄物受け入れ基準に基づく受け入れ管理下におき、セメント生産プロセスにおいて、総量としての廃棄物含有量管理が必要である。微粉からの重金属溶出量もセメント系固化材からの溶出量以下となると考えられるから、この問題も(a-2)の条件に含まれるといえる。

以上の検討の結果，廃棄物のセメント原料化リサイクルにより新たに発生することが懸念される問題は，セメントを土壌固化材として使用する場合の重金属溶出量が環境基準以下となる条件を満たすか（条件 a-2）という問題に集約できる．すなわち，セメント原料化リサイクルについて潜在的に存在すると考えられる問題に対しても 2.6.2 で示した品質管理策を取ることで対応できる．

2.6.5 検討の総括

セメント中の重金属含有量の基準値を設定するには慎重な検討が必要であることは言うまでもない．必要以上に厳しい基準は廃棄物のセメント原料化リサイクルの促進を阻害するが，過度に緩い基準は新たな環境リスクを発生させてしまう．すなわち，科学的知見に基づくバランスの取れた判断が求められる．

本節の検討より，セメントの重金属含有量が土壌の含有量を超過する可能性があること，廃棄物を原料として利用する場合にはその可能性が高まることが認められた．しかし，セメントが焼成工程を経た製品であること（クリンカは固化物の一種で重金属が溶出しにくい性質を持つ），コンクリートが硬化する過程で生成するセメント水和物が重金属を溶出しにくくすることを考えると，含有量が少々高くても溶出量が環境に影響を与える程大きくなければ問題ないと考えられる．セメント系土壌固化材からの六価クロムの溶出問題について検討した国土交通省の報告書^[24]において，施行段階での溶出量試験による溶出挙動の把握の必要性を提言しながらも，環境影響においては大きな問題となる可能性は小さいと結論付けている．

廃棄物を原料として利用するセメントの安全性を保証するためには，セメント中の重金属含有量基準を超えないような使用原料（廃棄物を含む）の利用量・品質基準を定め，その基準に基づく生産管理をおこなうことが必要である．なお現状において，太平洋セメント社では重金属の品質管理において，土壌中の含有量の範囲内におさめるようにしている^[23]．M社でも自社内基準を定め，廃棄物の受け入れ量を基準内に収まるように調整することで品質管理をおこなっているとのことである^[27]．

2.7 リサイクル全般に内在する諸問題

リサイクル全般に内在する問題として代表的なものに次のような問題をあげることができる．

- (1) リサイクルによる不純物の蓄積
- (2) リサイクル材の品質の低さ
- (3) リサイクルによる最終処分削減の実効性
- (4) リサイクルシステムの安定性（廃棄物の供給不安定性）

本節では以上の諸問題について，廃棄物のセメント原料化リサイクルに関わる論点・知見を整理する．

(1) リサイクルによる不純物の蓄積

素材のリサイクルを何度も繰り返すことで材料中に不純物が蓄積していき，結果として素材の品質が低下してしまう事態はリサイクル全般で起こりうる問題である．廃棄物のセメント原料化リサイクルにおいても，コンクリートの水平リサイクル（解体されたコンクリートを廃セメント分と骨材分に分離し，廃セメントをクリンカ原料として利用するもの）をおこなう場合には，不純物とくに重金属類の蓄積が

リサイクルを阻害する可能性が考えられる。

しかし、セメント・コンクリートという素材の特徴を考慮すると、この問題が重大なものとなる可能性は小さいと考えられる。主な理由として2点あげることができる。一つめの理由は、2.6.4で述べたように、セメントは生産段階で適切な品質管理をとることによりセメント中の成分を適正なレベルで管理することが可能であるという点である。二つめの理由は、コンクリートという素材のライフサイクルが長く循環の回数を重ねるまでには長時間を要するという点である。コンクリートのライフサイクルは数十年というスパンであるため、短期的には焼却灰等を原料とするセメントからできたコンクリートが解体され、再びセメント工場に持ち込まれることはほとんどないと考えられる。

長期的にはこのような廃セメントが大量に発生する可能性はある。この場合、生産するセメントの品質を維持するためにすべての廃棄物を受け入れられなくなる可能性は否定できない。これは、「(1)リサイクルによる不純物の蓄積」の問題を回避し製品の品質を維持することで「(3)リサイクルによる最終処分削減の実効性」の問題に影響が及ぶ状況ということが出来る。この点については(3)項で述べる。

(2) リサイクル材の品質の低さ

廃棄物のセメント原料化リサイクルのうち、クリンカについては品質管理によりセメント中の成分を適正なレベルで管理できることはすでに述べた。廃棄物（高炉スラグ、石炭飛灰）の混合材利用により生産されるセメントに高炉セメント・フライアッシュセメントがある。一般廃棄物焼却灰を主原料に生産される特殊セメントにエコセメントがある。高炉セメント・フライアッシュセメントは初期強度が小さいため、建築用には用いにくいとされる。一方で海水への抵抗性・小さい乾燥収縮などの特性により土木用に向いているとされる^[25]。エコセメントは塩化物イオンの濃度が0.1～1.5%と通常のポルトランドセメントの5～50倍と高いため、鉄筋を使用する構造物への使用は敬遠される。

高炉セメント・フライアッシュセメント・エコセメントの特性により用途が制限されるという事態はリサイクル材の品質の低さによる問題の一つと理解することもできる。リサイクル製品の供給と需要がバランスしていることは安定したリサイクルシステムに不可欠な条件であるため、リサイクル製品の用途に制限があるということは、システムが不安定なものとなる要因になり得る。このような問題に対しては、品質の高低を考慮した需要内訳を把握して需要と供給のマッチングを図ることが有効であると考えられる（図 2-14）。品質を考慮した需給という視点に立つことで、リサイクル促進の可能性やリサイクルシステムの安定性について評価することができるようになると考えられる。

品質を考慮した需給のマッチングが図られているリサイクルの代表的な例として、鉄のリサイクルをあげることができる。鉄は、高品質が要求される自動車の板金には転炉鋼（鉄鉱石を原料）、ある程度の不純物を許容する建築材料には電炉鋼（鉄くずを原料）というように品質別の需要と供給のマッチングができています。リサイクルする場合にはより品質の水準が低いものの原料として利用するカスケード型リサイクルは、リサイクルによる品質の低下という問題に対応する基本的な方法である。リサイクルシステムのマテリアルフロー分析（MFA）においては、様々な産業・地域・物質について、品質別の需要と供給のマッチングという観点から現状のフロー解析とその改善策の検討をおこなう研究は主要な課題となっている。

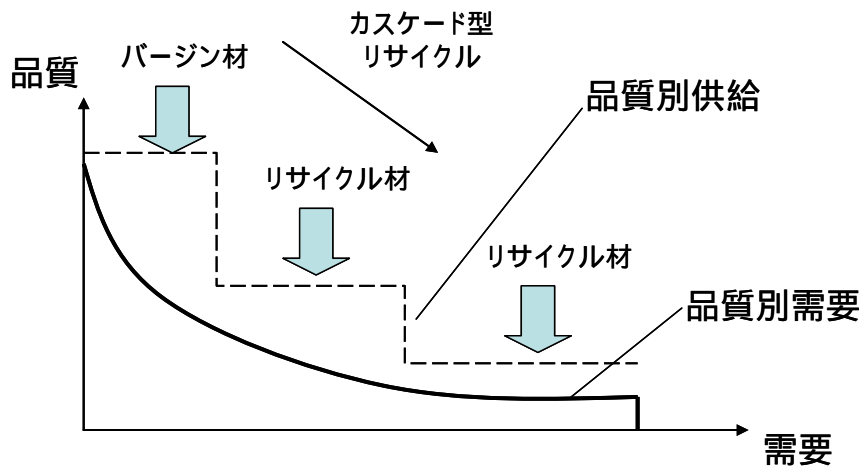


図 2-14 リサイクルにおける品質の肯定を考慮した需要と供給のマッチングの概念

(3) リサイクルによる最終処分削減の実効性

廃棄物のセメント原料化リサイクルは石炭飛灰、一般廃棄物焼却灰など他の用途で利用が困難な廃棄物をリサイクルする方法であり、最終処分削減に貢献するものと期待される。しかし、(1)リサイクルによる不純物の蓄積で述べたように、生産するセメントの品質を維持するためにすべての廃棄物を受け入れられなくなる可能性は否定できない。このときの廃棄物には過去の時点でリサイクルされたものも含まれる。リサイクルによる最終処分削減の実効性への懸念とは、言い換えるならばリサイクルが最終処分削減の時間的先送りにすぎぬのではないかという懸念である。

セメント原料として焼却灰などを利用したコンクリートは通常のコンクリートにくらべ再資源化が困難となる場合を検討した研究に横山^[28]がある。横山は廃棄物産業連関分析を動的に拡張した研究をおこなっている。廃棄物産業連関表に焼却灰等の建設資材へのリサイクルおよび建設廃棄物の再資源化を組み込み、初期時点のリサイクルが将来の廃棄物処分量に及ぼす影響についてシナリオ分析をおこなっている。ただし、産業連関分析の枠組みでこのような分析をおこなう必然性には議論の余地が残る。リサイクルについての技術的考慮がなされていない点も課題である。とはいえ焼却灰のリサイクルの将来への影響を考慮した研究は他にない。

2.6.4 で述べたように、セメントの生産段階で品質管理が適正におこなわれていれば、焼却灰等を利用した廃コンクリートを路盤材として再利用する場合も特に問題はないと考えられる。これに関して、廃コンクリートを路盤材に利用するような一種のカスケード型リサイクルについても最終処分削減の実効性を検討した研究がある。原ら^[29]は建設廃棄物に着目した道路におけるマテリアルバランスを分析している。これによれば、将来道路の新規建設が縮小し道路における資材需要が既設道路の更新に由来するものとなった場合には、正味で道路が受け入れる廃棄物量（最終処分削減量）は大きく減少する。このことから、道路は長期的には建設廃棄物の受け入れ先とはならず、最終処分削減のためには水平リサイクルが必要であると結論付けている。

長期的にはリサイクルにより最終処分が削減されないという問題は考慮すべき問題である。しかし、これはこのリサイクルの有効性を否定するものではなく、現在有効なものが将来的には効果が低下する

ことを考慮する必要性を示しているものと位置づけるのが妥当である。

わが国のマテリアルフロー^[30]のうち建設部門に投入されるマテリアルフローは最大である。現在までに蓄積された大量の建設物が将来廃棄物として発生することが懸念されており、建設産業に対するマテリアルフロー分析は主要な課題となっている。

建設産業に対するマテリアルフロー分析における未解明の問題として、コンクリートのマテリアルバランスの不整合という問題がある。マテリアルバランスの不整合とは、インプット（資材の投入）・ストック（建設物による固定）・アウトプット（廃棄）のそれぞれについて統計データを用いて推計した値が互いに一致しないという問題である。この不整合の説明にはいくつかのアプローチがある。島^[31]は90年代の景気低迷により建築物の解体が進まず、結果として建設廃棄物の発生量が抑制されたという状況を、比例ハザードモデルを応用した建築物の寿命モデルを用いて説明している。橋本^[32]はデータの不整合は統計に捕捉されていない廃棄物が大量に存在することに由来し、現実には自然界への排出、埋め立てに近い処理などにより散逸してしまったフローではないかという推測をしている。

（4） リサイクルシステムの不安定性（廃棄物の供給不安定性）

リサイクル全般に内在する問題として、システムの不安定性がある。原料としての廃棄物の供給不安定性、不安定性が形を変えた価格の不安定性は、リサイクルシステムを安定化させるために解決すべき課題である。

リサイクルシステムの不安定性を示す一例として、鉄鋼需要の低迷により鉄くず価格の下落とその後起きた中国の鉄くず需要の増大による鉄くず価格の高騰といった実例があげられる。故紙についても鉄くずと同じような状況が観察された例がある。鉄くずと違うのは、故紙は自治体回収などにより供給が需要の変動に対応しなくなることにより、回収業者の経営を圧迫するような事例があることなどである。

システムの不安定性の影響が大きいのは、専ら廃棄物を主原料に生産をおこなう生産者（例：電炉鋼メーカー）と需要と供給の不均衡により生ずる価格変化の影響を被る回収業者（例：故紙回収業者）である。故紙を利用する製紙メーカーは紙製品の需要に基づく生産計画を立て、故紙を生産に必要な分だけ利用する立場にある。故紙の供給が逼迫して必要な量を確保できなくとも、故紙の代替としてバージン材料を利用できる（本来逆であるが）ので、システムの不安定性の影響は小さい（ダンボールなど故紙を主原料に使用する製品は、バージン材料を利用できるがそのコストが高くなる場合には影響は大きいだろう。ただしこのケースは電炉鋼と同様専ら再生材を原料に生産をおこなう場合のものである）。

廃棄物のセメント原料化リサイクルの場合、廃棄物の供給量の変化がシステムの安定性に及ぼす影響は大きくないと考えられる。その理由は二つある。一つは、セメント生産が廃棄物を主原料とするものではないことである。セメント生産の主原料は石灰石などの天然鉱物であり、廃棄物はその代替として利用可能であるが、利用量には上限がある。廃棄物の供給量が小さい場合には、もともと使用していた天然鉱物を用いればよい。

二つ目の理由は、リサイクルシステムの不安定性の要因となりやすい廃棄物の回収・輸送プロセスをシンプルにできるため、比較的安定な回収・輸送プロセスを構築できるということである。廃棄物の回収・輸送プロセスがシンプルとなるのは、セメント産業が受け入れる廃棄物の排出元が大規模集中して

いるためである（製鉄所，石炭火力，焼却場）．このため，廃棄物の回収・輸送は排出者とセメント工場の二社間でおこなうことが可能となる．一方，鉄くずリサイクルや故紙リサイクルでは，廃棄物の発生が市中からであるため回収業者の存在がリサイクルシステムに不可欠である．しかし需要と供給の不均衡により生ずる価格変化の影響を被るのが回収業者であり，これがリサイクルシステムの不安定性の要因となる．

以上より，リサイクルシステムの中でも廃棄物のセメント原料化リサイクルはシステムの不安定性が小さいシステムであるといえる．現状においても，大口の排出者からは安定的な供給を受ける契約をおこなっているようである^[27]．

ただし，セメント産業としては，高炉スラグ等の利用の増加を必ずしも歓迎しない事情があるとの見方もある．石灰石はセメント会社が自社内で調達するケースが多いことから，調達を鉄鋼産業に依存することになる高炉スラグの利用増加（石灰石の利用減少）への抵抗感がある可能性は否定できない．とはいえ，高炉スラグの利用増加によりコストがより低下するのであれば，そこは経営判断の問題であろう（これは石炭飛灰や焼却灰でも変わらない）．リサイクルにより環境負荷が低減するのであれば，リサイクルをおこなうことにインセンティブを生じさせる制度の導入は有効であろう．

2.8 廃棄物のセメント原料化リサイクルに関する研究の課題

高炉スラグ，石炭灰といった産業廃棄物はすでに大量にセメント原料として利用されている．しかし，発生量も大量であるため，どちらの廃棄物でも発生量の5割程度にとどまっている．このようなリサイクルが環境負荷削減につながるものであるならば，一層の利用促進が望まれる．

一般廃棄物焼却灰については，エコセメントという特殊セメントの原料として利用する方法がすでに実用化されている．一方で，既存のセメント工場での利用はまだあまりおこなわれていない．大量の廃棄物受け入れキャパシティがあると考えられる既存のセメント工場での焼却灰利用は，廃棄物最終処分削減策として有望であるため，すでに紹介したように政府でも調査・研究を進めている．

廃棄物のセメント原料化リサイクルを環境負荷削減に有効で，かつ経済的に合理的なものとするためには，次のような視点に基づく研究が必要であると考えられる．

- (a) リサイクルによる環境負荷削減効果の定量評価
- (b) セメント産業による廃棄物の利用可能量の把握
- (c) セメント産業による廃棄物の利用が飽和に達し，異なる廃棄物間で競合が生じた場合の指針（どの廃棄物を利用すべきか）
- (d) 廃棄物の長距離輸送による環境負荷・コストの定量評価

第2章引用文献

- [1] セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, p.377, 技報堂出版株式会社, 1995.
- [2] 重見彰利, 製銑ハンドブック, p.25, 地人書館, 1979.
- [3] 石炭灰ハンドブック, p.I-25, 環境技術協会・日本フライアッシュ協会, 2005.
- [4] セメントの常識, セメント協会, 2004.
- [5] 島裕和: 高品質再生骨材によるコンクリートリサイクルシステムに関する研究, 東京大学大学院新領域創成科学研究科学学位論文, pp.102-161, 2004.
- [6] セメント産業(セメント協会作成パンフレット),(社)セメント協会, 2003.
- [7] セメント年鑑, セメント新聞社, 1951-1970 各年版.
- [8] セメントハンドブック(1999, 2004年版),(社)セメント協会, 2005.
- [9] 鉄鋼スラグ統計年報(鉄鋼スラグ協会ホームページ <http://www.slg.jp/index.htm>), 鉄鋼スラグ協会, 2005.
- [10] 石炭灰全国実態調査(平成15年度実績),(財)石炭利用総合センター, 2005.
- [11] 一般廃棄物の排出及び処理状況等について(平成14年度実績値) 環境省ホームページ <http://www.env.go.jp/recycle/waste/ippan.html>, 環境省廃棄物・リサイクル対策部, 2005.
- [12] 産業廃棄物の排出及び処理状況等について(平成14年度実績値) 環境省ホームページ <http://www.env.go.jp/recycle/waste/sangyo.html>, 環境省廃棄物・リサイクル対策部, 2005.
- [13] 石渡正佳: 産廃コネクション, WAVE出版, 2002.
- [14] 福原吉和: 都市ゴミ焼却灰のセメント資源化技術, 都市と廃棄物, 31(5), pp.76-87, 2001.
- [15] 松野裕, 森口祐一: 循環基本計画の物質フロー目標 - 指標選定と目標水準決定の経緯 -, 環境研究, No.130, pp.18-27, 2003.
- [16] 都市ごみ焼却灰の国内広域処理システム構築に関する調査報告書, 経済産業省ホームページ http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/150711-3_jilc.html, (財)日本立地センター, 2004.
- [17] 焼却灰をモデルとした瀬戸内海エリアにおけるリサイクルシステムの具現化と静脈物流の構築調査報告書, 経済産業省中国産業局, 2002.
- [18] 土壌の汚染にかかわる環境基準について(平成3年8月23日環境庁告示第46号/改平成7年環境庁告示第19号) 環境省ホームページ, <http://www.env.go.jp/kijun/dojou.html>.
- [19] 一般廃棄物の溶融固化物の再生利用の促進について(旧厚生省発表) 環境省ホームページ http://www.env.go.jp/recycle/kosei_press/h980327a.html, 1998.
- [20] 平成15年度調査研究事業報告書 <http://www.khj.or.jp/data/h15cyousajigyohoukoku.pdf>, (財)かながわ廃棄物処理事業団, 2004.
- [21] 森浩文, 田野崎隆雄, 中村和史: 都市ごみ焼却残渣の化学成分調査, 第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.488-490, 1999.
- [22] 高橋茂: セメントに含まれる微量成分の環境への影響, セメント・コンクリート, No.640, pp.20-29, 2000.

- [23] 太平洋セメント株式会社 環境報告書 2001年度版
<http://www.taiheiyo-cement.co.jp/env/envrpt2001/> , 2002 .
- [24] セメント系固化処理土に関する検討 最終報告書(案) , 国土交通省セメント系固化処理土検討委員会 , <http://www.mlit.go.jp/tec/kankyoku/kurom/pdf/hokoku.pdf> , 2003 .
- [25] セメントの常識 (セメント協会作成ブックレット) , (社)セメント協会 , 2004 .
- [26] Shima , H. , H.Tateyashiki , R.Matsushashi , Y.Yoshida : An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment by the Input-Output Analysis , Journal of Advanced Concrete Technology , 3(1) , pp.53-67 , 2005 .
- [27] 島裕和氏私信 , 2005年10月28日 .
- [28] 横山一代 , 廃棄物産業連関分析の動学的拡張 , 廃棄物学会論文誌 , Vol.15 , No.5 , pp.372-380 , 2004 .
- [29] 原卓也 , 吉田好邦 , 松橋隆治 : 建設廃棄物に着目した道路の材料バランス , 土木学会論文集 , No.734/VII-27 , pp.85-97 , 2003 .
- [30] 森口祐一 : 材料フロー分析からみた人間活動と環境負荷 , 環境システム研究 , Vol.25 , pp.557-568 , 1997 .
- [31] 島裕和 , 原卓也 , 吉田好邦 , 松橋隆治 : 比例ハザードモデルによる建築物の寿命推定及びコンクリート塊の発生量予測 , 日本建築学会計画系論文集 , 573巻 , pp.87-94 , 2003 .
- [32] 橋本征二 , 谷川寛樹 , 森口祐一 : 建設鉱物の材料バランス ~失われる材料ストックと再生砕石の需給に関する研究 , 第31回環境システム研究論文発表会講演集 , pp.497-502 , 2003 .

第3章 廃棄物セメント原料化リサイクルのライフサイクル分析

3.1 緒言

本章では、各種廃棄物（高炉スラグ、石炭飛灰、一般廃棄物焼却主灰および焼却飛灰、下水汚泥脱水汚泥・下水汚泥焼却灰）のセメント原料化リサイクルについてライフサイクル分析をおこない、廃棄物ごとにセメント原料化リサイクルによる環境負荷低減効果を評価する。特に一般廃棄物焼却灰（焼却主灰、焼却飛灰）については、埋め立て処理、灰溶融、エコセメントについても同様にライフサイクル分析をおこない、セメント原料化リサイクルとそれ以外の処理方法の比較・評価をする。環境負荷項目としてCO₂排出量、経済性の指標としてコストを対象とする。

3.2 では廃棄物処理・リサイクルのライフサイクルアセスメントに関する既往の研究のレビューをおこなう。3.3 では、CO₂排出量についてライフサイクル分析をおこなう。3.4 ではコストについてのライフサイクル分析をおこなう。3.5 は結言で本章の内容をまとめる。

3.2 既往の研究

3.2.1 ライフサイクルアセスメント

ライフサイクルアセスメント(LCA)は、「製品やサービスになどにかかわる、原料の調達から製造、流通、使用、廃棄、リサイクルに至るライフサイクル全体を対象として、各段階の資源やエネルギーの投入量と様々な排出物の量を定量的に把握し(インベントリ分析)、これらによる様々な環境影響や資源・エネルギーの枯渇への影響などを客観的に可能な限り定量化し(影響評価)、これらの分析・評価に基づいて環境改善などに向けた意思決定を支援するための科学的・客観的な根拠を与え得る手法」である^[1]。LCAを用いることによって、同一のサービスを提供する製品やシステムのうち、より環境負荷の低いものを選択するための情報を得ることができる。

LCAは主として2つのパートからなる。一つはインベントリ分析とよばれるもので、ライフサイクルの各プロセスでの資源、エネルギー、廃棄物のインプットとアウトプットを数え上げるための方法である。もう一つは影響評価とよばれるもので、インベントリ分析によって定量化された様々な環境負荷要因(資源消費、CO₂排出、有毒物質排出)による環境への影響を定量化するための方法である。影響評価では異なる環境負荷影響の重要度を比較する必要があるが、そのような比較を可能にするだけの科学的知見はまだ不足しており、影響評価の方法はまだ確立されていないのが現状である。

本来LCAはインベントリ分析と影響評価をあわせたものであるが、影響評価の難しさから、インベントリ分析だけを指してLCAとよぶ場合も多い。本研究でも、LCAはインベントリ分析を指す用語として用いている。

インベントリ分析には大きく分類して二つの方法がある。一つは積み上げ法とよばれるもので、関係するプロセス一つ一つについてデータを収集し、得られたデータを積み上げていくことで製品に由来する環境負荷の総和を求めるという方法である。積み上げ法では、対象とするプロセスを詳細に捕捉できる利点がある一方で、間接的な負荷について考慮しようとする膨大な労力が必要となるという問題が

ある。もう一つの方法は産業連関分析法とよばれるものである。この方法は、わが国の全産業間の相互取引を網羅的に記述した産業連関表を用いることで、積み上げ法では捕捉しきれない間接的な波及効果を簡便に算出できるという利点がある。ただし産業部門分類が最大でも 500 部門程度であるため、対象とするプロセスのデータを産業連関表に求めても詳細な情報は得られない。よって、LCA をおこなう場合には、特定のプロセスには積み上げ法を適用してデータ収集をおこない、間接的な効果も考慮する場合や環境負荷原単位を用いる場合に産業連関分析法を適用することが一般的である。その場合、前者のデータをフォアグラウンドデータ、後者のデータをバックグラウンドデータとよぶこともある^[2]。

本章では、各種廃棄物のセメント原料化リサイクルについて、積み上げ法によるインベントリ分析をおこなう。環境負荷項目として CO₂ 排出量、経済性の指標としてコストを対象とし、各プロセスのライフサイクル CO₂ 排出量とライフサイクルコストを求める。特に一般廃棄物焼却灰については、セメント原料化リサイクルとそれ以外の処理方法の比較を目的として、埋め立て処理、灰溶融、エコセメントについても LCA をおこなう。

3.2.2 セメント原料化の LCA の既往の研究

セメントの製造に伴う環境負荷の定量化を試みた研究として、佐野ら^[3]による、ポルトランドセメント・高炉セメント・石灰石微粉末添加フィラーセメントについての研究がある。この研究では、地球温暖化、エネルギー消費、天然資源消費、廃棄物処分場消費という 4 つのインパクトカテゴリを取り上げ、影響評価をおこない、総合的な環境負荷の定量化を試みている。インパクトの重み付け数値として複数のものを用いたが、重み付けのとり方によらず高炉セメントが最も環境負荷が小さいという結果が得られている。

石川ら^[4]は、天然資源のみ・現状での平均的廃棄物使用・エコセメント製造という 3 種類のセメントについて評価をおこなっている。この研究では、LCA をおこなっているが、LCA は境界設定の任意性の問題点があることから、その問題点を補う方法としてエクセルギー解析・TMR (Total Material Requirement: 関与物質総量) による評価をおこなっている。しかし、これらの分析手法が LCA の問題点をどう解決しているかについては十分に議論されているとはいえない。

佐野ら^[5]は、都市ごみ焼却灰 (一般廃棄物焼却灰) を灰水洗処理した上でセメントの原料として利用する技術、さらに加えて廃プラスチックを燃料として利用する技術の環境負荷定量化に関する研究をおこなっている。この研究では、都市ごみ焼却灰のセメント原料としてのリサイクルを焼却灰処理の一つと位置づけ、埋め立て処分・灰溶融処理と比較している。インベントリ分析をおこなった結果、灰水洗処理・廃プラスチック利用の技術が最も環境負荷が低いという結果を得ている。この研究では、各プロセスのマテリアルフローについて詳細なデータを収集しているが、コストについての評価はおこなわれていない。なおエコセメントと一般廃棄物焼却灰のセメント原料化の違いについては 2.5.2 を参照されたい。

天野ら^[6]は、廃棄物を利用した製品の環境負荷を LCA で評価する場合に発生するアロケーション問題について、セメント産業をケーススタディにして環境負荷配分方法を提案している。この論文では、環境負荷の配分方法について、重量配分と取引額配分の 2 種類の方法による、ポルトランドセメント・高炉セメント・フライアッシュセメントの CO₂ 排出量をもとめている。その結果、高炉セメントでは取

引額配分による CO₂ 排出量が重量配分の半分以下と評価している。これは、鉄鋼産業の産出物(副産物)としての高炉スラグは重量あたり価格が低いため、取引額配分では鉄鋼産業由来の負荷をほとんど負わないためである(逆に重量配分では鉄鋼産業由来の負荷を負うため、高炉セメントの負荷が大きくなり、高炉スラグが負った分だけ鉄鋼製品が負う負荷が小さくなる)。以上の結果より、この論文は取引額配分によりリサイクルを促進するような環境負荷評価を導くことができると結論付けている。この結論については

- (a) 廃棄物・副産物の価格が不安定なため取引額配分による環境負荷評価は困難ではないか
- (b) 廃棄物・副産物排出者と利用者の当事者間で交渉する方式の方が自由度が高くリサイクルのインセンティブも大きいのではないか

などの議論もある。この研究で調査された産業間の副産物・廃棄物の取引価格データは有用である。

Kikuchi^[7]は、一般廃棄物焼却灰および下水汚泥焼却灰のセメント原料としての利用可能性をパイロットプラントにより検討している。ここで検討されているセメントは、これら廃棄物を 30~50%程度利用したものであることから、エコセメントに相当するものと考えられる。この論文によれば、リサイクルプロセスからの排ガス、廃棄物利用のセメントからの重金属溶出のいずれも許容レベルである。

3.2.3 一般廃棄物処理の LCA の既往の研究

一般廃棄物処理システムのコスト・エネルギー消費量・二酸化炭素排出量評価について、北海道大学の松藤・田中のグループによる研究がある^{[8][9]}。松藤らは複数の処理方法を選択可能とし、処理施設の概略、ゴミ発生量の将来変化を考慮した評価ソフトを構築している。この評価ソフトはインターネット上で無料で公開されている。このソフトは、想定する廃棄物処理システムのコスト・エネルギー消費量・二酸化炭素排出量を簡易に計算するものである。与えられた条件の下でシステムを最適化する機能まではない。このソフトを用いて一般廃棄物広域処理におけるシナリオ分析をおこなっている。

京都大学の岩淵・東野・笠原らのグループは、仮想的なモデル都市を対象に、一般廃棄物処理処分システムの環境負荷評価をおこなっている^{[10][11]}。環境負荷項目としては CO₂、NO_x、SO_x を対象にしている。この研究では、ごみ排出量を推計するサブモデルと廃棄物処理プロセスからなるサブモデルを構築し、様々なシナリオの元での廃棄物処理由来の環境負荷を算出している。処理プロセスの中では、焼却処理が含まれる中間処理プロセス由来の環境負荷が全体の大半を占めるという結果を得ている。

鹿島建設・東京大学・東京理科大学の間宮・鎌田・井上らのグループは、廃棄物マネジメントを支援する建築・都市システムの構築に関する研究をおこなっている^{[12][13]}。廃棄物処理システムのさまざまな原単位データを収集し環境評価をおこなっている。自治体に情報開示請求をおこなって得られた詳細なデータは貴重である。

海外の研究例として、Finnveden^[14]による廃棄物処理の LCA がある。この研究では、有機性廃棄物、紙、プラスチックを対象に、マテリアルリサイクル、焼却処分、コンポスト、埋め立て処分など処理方法別の環境負荷を定量化している。インベントリ分析の結果を利用してインパクト分析をおこなっており、その結果、リサイクル・焼却処分・埋め立て処分の順に環境的に望ましい処理であるという結果を得ている。インパクトカテゴリとして毒性や大気汚染についても考慮しながら、埋め立て処分より焼却処分のほうがよいという結果は興味深い。ただし、考察において、この結果が評価期間や重み付け

係数の取り方で変わり得るという留保がつけられている。

3.3 ライフサイクル CO₂ 排出量

3.3.1 概要

ライフサイクル CO₂ 排出量の計算の概要を述べる。まず、3.3.2 でセメント生産プロセスにおいて各種廃棄物を利用した場合の CO₂ 排出量を計算する。ただしセメント生産プロセスでの CO₂ 排出量は運用由来のみを算出する。3.3.3 では一般廃棄物焼却灰の従来の処理方法である埋め立て処分および灰溶融減容化・埋め立てのライフサイクル CO₂ を求め、一般廃棄物焼却灰のセメント原料化の結果と比較する。さらに、各種廃棄物の長距離輸送の影響を評価するため、輸送距離について CO₂ 排出量の大小関係が逆転するブレイクイーブンポイントを求める。

3.3.2 セメント生産プロセス

第2章で述べたように、セメント生産プロセスでの廃棄物の利用方法は、原材料利用と混合材利用の2つがある(図3-1)。原材料利用はクリンカ製造工程で利用するもので、本研究で対象とするすべての廃棄物が利用可能である。混合材利用はセメント混合工程で利用するもので、高炉スラグと石炭飛灰が利用可能である。

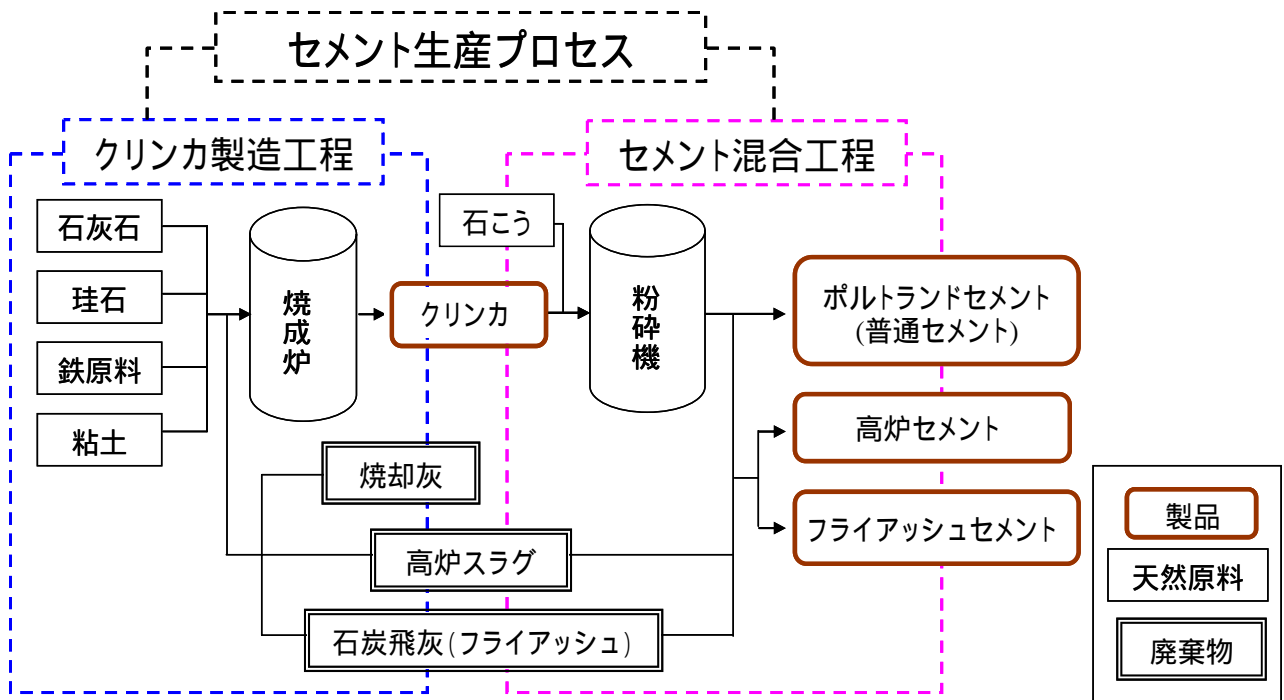


図 3-1 セメント生産プロセスの概要(第2章 図2-1再掲)

原材料利用では、各種原材料の利用量(廃棄物を含む)を調合計算によってもとめる。調合計算とは、クリンカの化学成分が求められる基準を満たすように原材料構成をもとめるための方法である。廃棄物

の利用は一種類ずつとし（複数の廃棄物を同時に利用しない）、その場合の最大限利用できる量を利用するという条件で計算をおこなった。調合計算の方法は島^[15]を参考にした。

(1) 調合計算

(i) 定式化

クリンカの化学成分は、セメントの品質を一定のものとするための目標値が定められている。目標値は化学組成そのものではなく、品質の制御を容易なものとするため、水硬率（HM）、珪酸率（SM）、鉄率（IM）で表される。HM、SM、IM はそれぞれ以下の式で表される。

$$HM = \frac{y_C}{y_S + y_A + y_F} \quad (3.1)$$

$$SM = \frac{y_S}{y_A + y_F} \quad (3.2)$$

$$IM = \frac{y_A}{y_F} \quad (3.3)$$

ここで y_C 、 y_S 、 y_A 、 y_F はそれぞれクリンカの CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 の化学組成（重量%）である。

クリンカ 1t あたりの原料使用量を x_i とおく（ただし i : 1 石灰石, 2 粘土, 3 けい石, 4 鉄原料）廃棄物の使用量 x_k （廃棄物 k ）とおく。各原材料、廃棄物の化学組成を表 3-1 のように表すと y_C 、 y_S 、 y_A 、 y_F は(3.4)～(3.7)で表される。

$$y_C = \frac{\sum_i a_{Ci} x_i + \sum_k a_{Ck} x_k}{\sum_i x_i + \sum_k x_k} \quad (3.4)$$

$$y_S = \frac{\sum_i a_{Si} x_i + \sum_k a_{Sk} x_k}{\sum_i x_i + \sum_k x_k} \quad (3.5)$$

$$y_A = \frac{\sum_i a_{Ai} x_i + \sum_k a_{Ak} x_k}{\sum_i x_i + \sum_k x_k} \quad (3.6)$$

$$y_F = \frac{\sum_i a_{Fi} x_i + \sum_k a_{Fk} x_k}{\sum_i x_i + \sum_k x_k} \quad (3.7)$$

なお，本研究では廃棄物は一種類ずつ利用するという条件のもとで計算をおこなうが，数式は複数の廃棄物利用にも適用できる一般化した形で記述する．複数の廃棄物を利用するケースは第4章で考慮する．

表 3-1 クリンカ原材料の化学成分を表す変数

化学成分 No.	石灰石 1	粘土 2	けい石 3	鉄原料 4	廃棄物 k k
Ig.loss	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}	a_{ik}
SiO ₂	a_{s1}	a_{s2}	a_{s3}	a_{s4}	a_{sk}
Al ₂ O ₃	a_{A1}	a_{A2}	a_{A3}	a_{A4}	a_{Ak}
Fe ₂ O ₃	a_{F1}	a_{F2}	a_{F3}	a_{F4}	a_{Fk}
CaO	a_{C1}	a_{C2}	a_{C3}	a_{C4}	a_{Ck}
Cl	a_{h1}	a_{h2}	a_{h3}	a_{h4}	a_{hk}

(3.4) ~ (3.7)を(3.1) ~ (3.3)に代入し整理すると(3.8) ~ (3.10)が得られる．

$$\sum_i \{a_{Ci} - HM(a_{Si} + a_{Ai} + a_{Fi})\} x_i + \sum_k \{a_{Ck} - HM(a_{Sk} + a_{Ak} + a_{Fk})\} x_k = 0 \quad (3.8)$$

$$\sum_i \{a_{Si} - SM(a_{Ai} + a_{Fi})\} x_i + \sum_k \{a_{Sk} - SM(a_{Ak} + a_{Fk})\} x_k = 0 \quad (3.9)$$

$$\sum_i (a_{Ai} - IM \times a_{Fi}) x_i + \sum_k (a_{Ak} - IM \times a_{Fk}) x_k = 0 \quad (3.10)$$

クリンカ 1t あたりの原材料使用量は Ig.loss (強熱減量) との関係から次式で表される．強熱減量とは加熱による重量減少の比率である．クリンカ製造工程ではキルン炉において 1000 以上にまで原材料が加熱される．石灰石であれば CO₂ が脱離する分だけ重量が減少する．

$$\sum_i (1 - a_{li}) x_i + \sum_k (1 - a_{lk}) x_k = 1 \quad (3.11)$$

原材料全体での塩素含有量についての制約は(3.12)で表される．Cl₀ が塩素含有率の上限である．

$$\frac{\left(\sum_i a_{hi} x_i + \sum_k a_{hk} x_k \right)}{\left(\sum_i x_i + \sum_k x_k \right)} \leq Cl_0 \quad (3.12)$$

(3.8) ~ (3.11)をまとめて行列の形式で表すと(3.13)となる．

$$\begin{pmatrix} \cdots a_{Ci} - HM(a_{Si} + a_{Ai} + a_{Fi}) \cdots \\ \cdots a_{Si} - SM(a_{Ai} + a_{Fi}) \cdots \\ \cdots a_{Ai} - IM \times a_{Fi} \cdots \\ \cdots 1 - a_{li} \cdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ x_i \\ \vdots \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdots a_{Ck} - HM(a_{Sk} + a_{Ak} + a_{Fk}) \cdots \\ \cdots a_{Sk} - SM(a_{Ak} + a_{Fk}) \cdots \\ \cdots a_{Ak} - IM \times a_{Fk} \cdots \\ \cdots 1 - a_{lk} \cdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ x_k \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

(3.13)を $x_1 \sim x_4$ について解いた形式で表すと(3.14)となる .

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdots a_{Ci} - HM(a_{Si} + a_{Ai} + a_{Fi}) \cdots \\ \cdots a_{Si} - SM(a_{Ai} + a_{Fi}) \cdots \\ \cdots a_{Ai} - IM \times a_{Fi} \cdots \\ \cdots 1 - a_{li} \cdots \end{pmatrix}^{-1} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cdots a_{Ck} - HM(a_{Sk} + a_{Ak} + a_{Fk}) \cdots \\ \cdots a_{Sk} - SM(a_{Ak} + a_{Fk}) \cdots \\ \cdots a_{Ak} - IM \times a_{Fk} \cdots \\ \cdots 1 - a_{lk} \cdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ x_k \\ \vdots \end{pmatrix} \right] \quad (3.14)$$

また(3.12)を整理すると(3.15)となる .

$$\sum_i (Cl_0 - a_{hi})x_i + \sum_k (Cl_0 - a_{hk})x_k \geq 0 \quad (3.15)$$

$x_1 \sim x_4$ は正の値であるという条件 [$x_i \geq 0$ ($i = 1 \cdots 4$)] を加える .

以上の数式を整理すると、廃棄物 k を最大に利用する場合の原料の利用量を求める調合計算は、次のような最大化問題として記述される .

maximize x_k

subject to :

$$\begin{pmatrix} \cdots a_{Ci} - HM(a_{Si} + a_{Ai} + a_{Fi}) \cdots \\ \cdots a_{Si} - SM(a_{Ai} + a_{Fi}) \cdots \\ \cdots a_{Ai} - IM \times a_{Fi} \cdots \\ \cdots 1 - a_{li} \cdots \end{pmatrix}^{-1} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cdots a_{Ck} - HM(a_{Sk} + a_{Ak} + a_{Fk}) \cdots \\ \cdots a_{Sk} - SM(a_{Ak} + a_{Fk}) \cdots \\ \cdots a_{Ak} - IM \times a_{Fk} \cdots \\ \cdots 1 - a_{lk} \cdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ x_k \\ \vdots \end{pmatrix} \right] \geq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{pmatrix} \cdots Cl_0 - a_{hi} \cdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdots a_{Ci} - HM(a_{Si} + a_{Ai} + a_{Fi}) \cdots \\ \cdots a_{Si} - SM(a_{Ai} + a_{Fi}) \cdots \\ \cdots a_{Ai} - IM \times a_{Fi} \cdots \\ \cdots 1 - a_{li} \cdots \end{pmatrix}^{-1} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cdots a_{Ck} - HM(a_{Sk} + a_{Ak} + a_{Fk}) \cdots \\ \cdots a_{Sk} - SM(a_{Ak} + a_{Fk}) \cdots \\ \cdots a_{Ak} - IM \times a_{Fk} \cdots \\ \cdots 1 - a_{lk} \cdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ x_k \\ \vdots \end{pmatrix} \right] \quad (3.17)$$

$$+ \sum_k (Cl_0 - a_{hk})x_k \geq 0$$

ここで(3.16)の左辺は(3.14)の右辺で表された項であり、(3.16)は $x_1 \sim x_4$ は正の値であるという条件を表す . (3.17)は、(3.15)に(3.14)を代入して整理したものである .

(ii) 計算結果

クリンカ原料となる鉱物および廃棄物の化学成分を表 3-2, 表 3-3 に示す。

表 3-2 クリンカ原材料の化学成分 1, 2, 3

	石灰石	粘土	けい石	鉄原料	キルン炉燃料灰
Chemical Composition(%)					
lg.loss	43.0	7.8	1.3	9.1	0
SiO ₂	1.1	64.3	91.1	16.4	49.1
Al ₂ O ₃	0.3	14.1	4.1	5.3	27.5
Fe ₂ O ₃	0.3	5.1	1.5	54.4	5.8
CaO	54.2	2.7	0.1	9.4	2.7
MgO	0.5	1.7	0.5	1.5	1.2
SO ₃	0	0.2	0	1.7	10.6
R ₂ O	0.03	2.63	0.69	0.53	2.2
K ₂ O	0	0	0	0	0
TiO ₂	0	0	0	0	0
MnO	0	0	0	0	0
P ₂ O ₅	0.02	0	0	0	0
ZnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr ₂ O ₃	0.01	0.03	0.04	0.04	0.04
CuO	0	0	0	0	0
Total	99.47	98.57	99.34	98.38	99

1 化学成分の値は重量%

2 化学成分値はセメント協会資料^[16]を参考にした

3 $R_2O = Na_2O + 0.658K_2O$ で、酸化ナトリウム換算のアルカリ量を表す

表 3-3 廃棄物の化学成分

Chemical Composition(%)	高炉スラグ	石炭飛灰	焼却主灰	焼却飛灰	下水汚泥 焼却灰	脱水汚泥
lg.loss	1.5	0.7	6.5	8.7	1.0	63
SiO ₂	35.2	58	58.3	25.9	32.4	15
Al ₂ O ₃	12.7	25.9	11.1	16.6	15.6	7
Fe ₂ O ₃	1	4.3	4.6	4.0	13.4	3
CaO	40.3	4	17.8	28.7	8.5	3
Cl	0	0	0.7	15.1	0.04	0.3
Cl(水洗処理後)	-	-	-	0.5	-	-
Total	90.7	92.9	99	99	70.94	91.3

化学成分は、セメント協会資料(高炉スラグ)^[16]、フライアッシュ協会資料(石炭飛灰)、経済産業省資料(一般廃棄物焼却灰)^[18]、下水道協会資料(下水汚泥焼却灰、脱水汚泥)を参考にした

表 3-3 に示すように、塩素含有量については一般廃棄物焼却灰および下水汚泥についてのものを考慮する。クリンカ原料の塩素含有率の制約は、塩素バイパスシステムの性能を考慮して 500ppm と設定した^[17]。本研究では塩素を含有する廃棄物は一般廃棄物焼却灰および下水汚泥であるが、それ以外の廃棄物および天然原料も微量の塩素を含有する可能性を考慮し、一般廃棄物焼却灰および下水汚泥由来の塩素含有率の制約を 450ppm とした。これはすなわち、天然原料・高炉スラグ・石炭飛灰由来の塩素含有率を最大 50ppm として扱っていることになる。天然原料・高炉スラグ・石炭飛灰由来の塩素含有率の取り扱いについては佐野ら^[5]を参考にした。

一般廃棄物焼却灰飛灰は、塩素濃度が非常に高いことから灰水洗処理を施すものとした。灰水洗処理後の飛灰の塩素濃度を 0.5%，飛灰 1t あたりの水洗飛灰発生率を 0.731 とした。飛灰については塩素含有量に関する制約は以下ようになる。

$$\text{飛灰量 (kg)} \times 0.5 (\%) / 100 \times 0.731 / \text{原料総和 (kg/t-クリンカ)} = 450 \times 10^{-6}$$

以上の灰水洗処理の塩素濃度計算法については佐野ら^[5]を参考にした。

本研究で用いるクリンカの品質の目標値は、普通セメントクリンカを想定した HM = 2.15, SM = 2.80, IM = 1.70 とした。この条件の下で調合計算をおこない、各廃棄物を原料とした場合の原料構成を求める。結果を表 3-4 に示す。

表 3-4 廃棄物種類別のクリンカ原料構成 (kg/t-クリンカ)

	廃棄物利用無し	高炉スラグ	石炭飛灰	焼却主灰	焼却飛灰	下水汚泥焼却灰	脱水汚泥
石灰石	1,199.4	983.3	1,207.1	1,175.4	1,093.8	1,159.1	1,174.7
粘土	294.2	0.5	0.0	223.3	35.1	141.5	148.3
けい石	14.6	106.7	132.0	4.1	141.3	76.9	73.2
鉄原料	18.8	39.1	32.3	17.9	25.8	0.6	16.3
対象廃棄物 (含水率)	0	289 (0)	140 (0)	97 (20)	184 (20)	120 (20)	252 (80)

(iii) 一般廃棄物焼却灰の重金属含有量

以上で設定したクリンカ原料構成における重金属含有量を試算する。対象は焼却主灰・焼却飛灰を利用するクリンカとする。対象とする重金属は、第 2 章 2.6.3 の検討で重要と判断された Cr, Cu, Pb の三種類とする。

天然原料の重金属含有量は文献^[22]で報告された測定値の平均値を用いる。焼却主灰・焼却飛灰の重金属含有量は文献^[21]で報告された測定値の最大値および中央値を用いる。用いた数値を表 3-5 に示す。

表 3-5 クリンカ原料・焼却主灰・焼却飛灰の重金属含有量（表 2-5，表 2-8 抜粋再掲）

成分	クリンカ原料(天然)の重金属含有量 (mg/kg)		主灰の重金属含有量 (mg/kg)		飛灰の含有量 (mg/kg)	
	平均		中央	最大	中央	最大
全Cr	70.3		342	1,711	342	7,526
Cu	100.4		5,591	18,371	399	11,182
Pb	79.6		464	7,426	928	15,780

以上の条件のもとでの試算によるセメントの重金属含有量を表 3-6 に示す。

表 3-6 クリンカ種類別のセメントの重金属含有量¹ (mg/kg-セメント)

主灰・飛灰の重金属含有量=中央値を使用						
成分	天然原料由来	主灰由来	合計	天然原料由来	飛灰由来	合計
全Cr	96	32	128	88	61	148
Cu	138	520	658	125	71	196
Pb	109	43	152	99	165	264

主灰・飛灰の重金属含有量=最大値を使用						
成分	天然原料由来	主灰由来	合計	天然原料由来	飛灰由来	合計
全Cr	96	159	256	88	1,334	1,422
Cu	138	1,710	1,848	125	1,982	2,107
Pb	109	691	800	99	2,797	2,896

1 含有量（合計値）は次式から算出（天然原料由来，主灰・飛灰由来はそれぞれ第1項，第2項の値）
 重金属含有量 (mg/kg-セメント) = [天然原料投入原単位 (kg/t-クリンカ) × クリンカ原料重金属含有量 (mg/kg) + 廃棄物投入原単位 (kg/t-クリンカ) × 廃棄物重金属含有量 (mg/kg)] × クリンカ投入原単位² (t-クリンカ/kg-セメント)

2 クリンカ原単位（1kgのセメント生産に投入されるクリンカ量）は
 (1000 - 36) / 1000 = 964 (kg/t-セメント) = 9.64×10^{-4} (t/kg-セメント) . 36kgは1000kgのセメント生産に投入されるセッコウ量（1995年平均値）¹⁸⁾，残りがクリンカ投入量と想定。

セメントの重金属含有量と溶出量に関する知見はまだ不足しており，現段階での知見から判断することはできないので，以下の検討はあくまで参考的な位置づけのものであることに留意されたい。ここでは，第2章 2.6.3 で示した高橋^[22]の報告をもとに，廃棄物を利用したセメントの重金属含有量について問題点を議論する。

なお表 3-5 に示した焼却飛灰の重金属含有量については前処理をしていない焼却飛灰の値となっている。溶出調査^[22]をみる限りでは，塩素については含有量の大半が液層に溶出するのに対し，重金属では液層に溶出する割合は小さい（表 3-7 参照）。そこで，できる限り慎重な（conservative）評価として，重金属含有量が最大の場合（水洗処理による含有量減少ゼロ）を想定するものとした。

表 3-7 焼却灰の成分と溶出量の関係^[22]

	成分 (mg/kg)	溶出量 (mg/l)
Ca	97000	1000
Cl	110000	11000
Cu	5800	ND
Pb	660	0.02
Cr6+	2.4	0.15
Cd	110	0.04

この溶出試験における液固比は不明．液固比 10 (環境庁第 46 号試験) の場合，溶出液 1L 中の焼却灰量は 100g であるため，焼却灰 1kg に対応する溶出量は 10L あたりのものとなる

全 Cr 含有量と六価クロム含有量および六価クロム溶出量

天然原料段階では六価クロム含有量はほぼゼロであり，主として三価の Cr (Cr₂O₃ など) が主となる．クリンカの焼成工程により，三価の Cr が酸化され六価の Cr に変化する．六価に変化する Cr の割合は 10% 程度であるとする (第 2 章表 2-7 参照) と，六価クロム含有量は 12.8 ~ 142.2ppm となる．

第 2 章表 2-7 より，ポルトランドセメントの六価クロム含有量は 0.4 ~ 32.4ppm であるから，焼却主灰・焼却飛灰の重金属含有量が中央値をとる場合には，ほぼ通常のポルトランドセメントと変わらない含有量であるといえる．中央値におけるセメント中の全 Cr 含有量に占める主灰由来の割合は 25%，飛灰由来の割合は 41% である．

Cu 含有量

第 2 章表 2-7 より，ポルトランドセメントの Cu 含有量は 18 ~ 243ppm である．焼却主灰・焼却飛灰の重金属含有量が中央値をとる場合でも，焼却主灰を利用するセメント中の Cu 含有量は 650ppm と大きい．ただし Cu は農地使用以外では Cu 含有量による基準 (水道水基準，第 2 章表 2-6 参照) を下回っているため，通常の 3 倍程度の Cu 含有量も許容できるものと判断できる．

Pb 含有量

第 2 章表 2-7 より，ポルトランドセメントの Pb 含有量は 7 ~ 421ppm である．焼却主灰・焼却飛灰の重金属含有量が中央値をとる場合には，ほぼ通常のポルトランドセメントと変わらない含有量であるといえる．

以上の試算から，焼却主灰・焼却飛灰の重金属含有量が中央値をとる場合には，表 3-4 のような焼却主灰・焼却飛灰の使用割合でもセメントの重金属含有量は許容範囲内におさまるものと認められた．このことから，極端に重金属含有量の大きい焼却灰を用いるものでない限り (表 2-5 の調査における平均的な焼却灰であれば)，本研究が想定する焼却主灰・焼却飛灰の使用割合はセメントの重金属含有量の調整という観点からも妥当であると判断できる．

(2) クリンカ製造工程のCO₂排出量

原料構成の結果をもとに、廃棄物種類別のクリンカ製造によるCO₂排出量を求める。

クリンカ製造工程で発生するCO₂は、石灰石の脱炭酸に由来するものと燃料燃焼に由来するものに分けられる。石灰石の脱炭酸由来のCO₂は単純に石灰石量に比例する。燃料燃焼に由来するCO₂は燃料消費量に比例し、燃料消費量はクリンカ焼成に必要な熱量によって決定される。

実際のプラントランニングでは供給熱量は必要熱量を上回る。本研究では必要熱量/供給熱量を熱効率と捉え、クリンカの種類によらず一定とする。熱効率が一定ならば、供給熱量および供給熱量に比例する燃料消費量は必要熱量に比例する。必要熱量の大部分は石灰石の脱炭酸反応に由来するため、必要熱量は石灰石量に比例するものと扱う。以上より、クリンカ製造工程でのCO₂排出量は使用される石灰石量に比例する形で表すことができる。

(i) 石灰石脱炭酸由来のCO₂

$$\begin{aligned} \text{石灰石脱炭酸 CO}_2 \text{ (t-CO}_2\text{/t-石灰石)} &= 0.542 \times 44 / 56 \\ &= 0.426 \end{aligned}$$

ここで、0.542は石灰石のCaO含有重量比(表3-2参照)である。44/56はCaOに対するCO₂の発生量の比である(CaO/CaCO₃ = 56/100 = 0.56であるから、平均的な石灰石中の炭酸カルシウム成分の重量比を0.542/0.56 = 0.968^[15]、それ以外の成分の重量比を0.032としている)。

(ii) 熱量由来のCO₂

推計に用いたデータを示す。

石灰石使用量 ^[23]	100,247,166 t
CO ₂ 排出量(セメント部門燃料由来) ^[24]	7,711,350 t-C
セメント部門由来熱量 ^[24]	3.184 × 10 ⁸ GJ (7,609,718TOE)

$$\begin{aligned} \text{石灰石 1 t 使用に対する供給熱量(GJ/t)} &= 3.184 \times 10^8 / 100,247,166 \\ &= 3.176 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{石灰石 1 t あたりの燃料由来 CO}_2 \text{ 排出量 (t-CO}_2\text{/t-石灰石)} &= 7711350 \times 44 / 12 / 100247166 \\ &= 0.282 \end{aligned}$$

脱炭酸に必要な熱量の理論値と実際の値(供給熱量)を比較する。

$$\begin{aligned} \text{石灰石の脱炭酸熱量 (GJ/t-石灰石)} &= 1 \times 10^6 \times 0.542 / 56 \times 1.779 \times 10^{-4} \\ &= 1.722 \end{aligned}$$

ここで、石灰石の脱炭酸反応に要する熱量1.779 × 10⁻⁴ (GJ/molCaCO₃)を用いた^[25]。

供給熱量と理論値の比は熱効率と解釈できる。マクロな物量統計に基づくクリンカ製造工程の熱効率

は

$$\begin{aligned} \text{熱効率} &= 1.722 / 3.176 \\ &= 0.542 \end{aligned}$$

となる。文献⁴⁾から引用したセメント工場熱収支を表に示す。このデータが全セメント工場の平均値か、代表的なセメント工場の値であるか不明であるが、クリンカ焼成熱が 53%であり、本研究の推計値 (0.542) と近い値を示している。

表 3-8 セメント工場の熱収支⁴⁾

有効利用エネルギー	80 %
クリンカ焼成	53 %
原料乾燥用	8 %
石炭乾燥用	1 %
廃熱発電回収	18 %
排エネルギー	20 %
排ガス持ち去り熱	9 %
クリンカー持ち去り熱	3 %
原料・冷却空気等顕熱	4 %
その他	4 %

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ 発生原単位 (t-CO}_2\text{/t-クリンカ)} &= (0.426+0.282) \times \text{石灰石量 (t)} \\ &= 0.708 \times \text{石灰石量 (t)} \end{aligned}$$

この式を用いて廃棄物種類別のクリンカ製造工程・石灰石脱炭酸由来の CO₂ 排出原単位を求めた。結果を表 3-9 に示す。

表 3-9 廃棄物種類別のクリンカ製造工程・石灰石脱炭酸由来の CO₂ 排出原単位

	なし	高炉 スラグ	石炭飛灰	焼却主灰	焼却飛灰	下水汚泥 焼却灰	脱水汚泥
CO ₂ 原単位 (kg/t-クリンカ)	849	696	855	832	774	821	832

(iii) 含水廃棄物の場合

以上の計算は原料が水分を含まない場合のものである。廃棄物のうち、焼却主灰・焼却飛灰、下水汚泥焼却灰、脱水汚泥は水分を含むため、この蒸発潜熱を考慮した必要熱量を計算する必要がある。焼却灰については含水率 20%、脱水汚泥については含水率 80%として計算をおこなう。また脱水汚泥は有機分を多量に含み、それ自体熱量の供給源となるので、その分も考慮した計算をおこなう。計算結果を表 3-10 に示す。

表 3-10 廃棄物種類別のクリンカ製造工程・含水廃棄物由来の CO₂ 排出原単位^{1, 2, 3}

	焼却主灰	焼却飛灰	下水汚泥 焼却灰	脱水汚泥
廃棄物量[固形分](kg/t-クリンカ)	97	184	120	150
含水率(%)	20	20	20	80
含水量(kg/t-クリンカ)	24.1	46.0	30	600
[廃棄物総重量](kg/t-クリンカ)	(120.7)	(229.82)	(150)	(750)
潜熱(MJ/t-クリンカ)	55	104	68	1,357
顕熱(MJ/t-クリンカ)	13	24	16	315
必要熱量合計(MJ/t-クリンカ)	67	128	84	1,672
汚泥固形分量(kg/t-クリンカ)	0	0	0	252
汚泥熱量(MJ/t-クリンカ)	0	0	0	3,580
差し引き(MJ/t-クリンカ)	-67	-128	-84	1908
CO₂変化(kg/t-クリンカ)	6	12	8	-173

1 下水汚泥低位発熱量は 14.2(MJ/DS-kg)を使用

2 水の蒸発熱は 2.26(MJ/kg), 水比熱は 4.20(MJ/kg-), 水蒸気比熱は 1.89(MJ/kg-)を使用

3 炉に投入前に乾燥させることを想定し, 20 度 200 度まで加熱に要する熱量を求めた

(iv) CO₂ 排出原単位

以上の計算より求めた廃棄物種類別のクリンカ製造工程の CO₂ 排出原単位を表 3-11 に示す。

表 3-11 廃棄物種類別のクリンカ製造工程の CO₂ 排出原単位

	天然原料 のみ	高炉スラグ	石炭飛灰	焼却主灰	焼却飛灰	下水汚泥 焼却灰	脱水汚泥
CO ₂ 原単位 (kg/t-クリンカ)	849	696	855	838	786	828	659
CO ₂ 排出量比 (天然原料のみ = 1)	-	82%	101%	99%	93%	98%	78%

(3) セメント混合工程の CO₂

クリンカに石こう・廃棄物を混合するセメント混合工程での CO₂ 排出量を計算する。セメント混合工程では燃料消費・脱炭酸等が行われなため、直接的に発生する CO₂ 排出量はゼロである。電力や石こう等の原料使用により間接的に発生する CO₂ については次章の産業連関分析で扱う。本節では、セメント混合工程で使用されるクリンカ製造由来の CO₂ 排出量を各セメント混合工程の CO₂ 排出量とする(すなわち CO₂ 排出量はクリンカ使用量に比例する)。クリンカ CO₂ 排出原単位は廃棄物を使用しないクリンカの 849 (kg-CO₂/t-クリンカ)を用いる。

セメント混合工程で混合される廃棄物は高炉スラグと石炭飛灰(フライアッシュ)の 2 種類である。これらの廃棄物を混合したセメントはそれぞれ特徴的な性質を有し、高炉セメント、フライアッシュセメントとよばれる^[27]。高炉セメントは一般にポルトランドセメントに比して初期強度が小さく、長期強度は大きくなる。また、海水に対する抵抗性があること、水和反応によって出来る組織が緻密であるこ

とから、これらの特性が生きる土木工事で使用されることが多い。フライアッシュセメントは流動性がよく、打ち込みやすいコンクリートを作るのに適している。水和熱および乾燥収縮を小さく出来る特徴を持ち、ダム等のマスコンクリートや水密性を要求される構造物に使用されることが多い。またポルトランドセメントにも少量の高炉スラグが混合される場合も多い。

以上3種類のセメントについて、原料構成とCO₂排出量を計算まとめた結果を表3-12に示す。混合セメントにおける廃棄物の混合比はさまざまなものがあるが、ここでは代表的な混合比のものを考慮した。

表 3-12 各種セメントの原料構成とCO₂排出量

	普通ポルトランド セメント	高炉セメント	フライアッシュ セメント
クリンカ	0.95	0.58	0.77
石こう	0.04	0.02	0.03
高炉スラグ	0.02	0.40	0
石炭飛灰	0	0	0.20
CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t-セメント)	3,605	2,204	2,939
CO ₂ 排出量比(ポルト ランドセメント=1)	-	61%	82%

3.3.3 一般廃棄物焼却灰処分方法のライフサイクル分析

本項では、一般廃棄物焼却灰の埋め立て処分および灰溶融減容化・埋め立て処分についてライフサイクル分析をおこなう。一般廃棄物焼却灰は焼却主灰と焼却飛灰の2種類に分けられる。焼却主灰は燃え殻ともよばれ、焼却炉の下部から排出される残渣である。焼却飛灰はばいじんともよばれ、排煙処理装置、電気集塵機等から発生するものである。焼却される廃棄物の性状や焼却炉の種類によって焼却主灰・焼却飛灰の発生比率は異なるが、本研究では既往の調査^[28]をもとに一般廃棄物焼却灰の主灰：飛灰比を8：2とした。

本項でのライフサイクル分析のバウンダリを図3-2に示す。

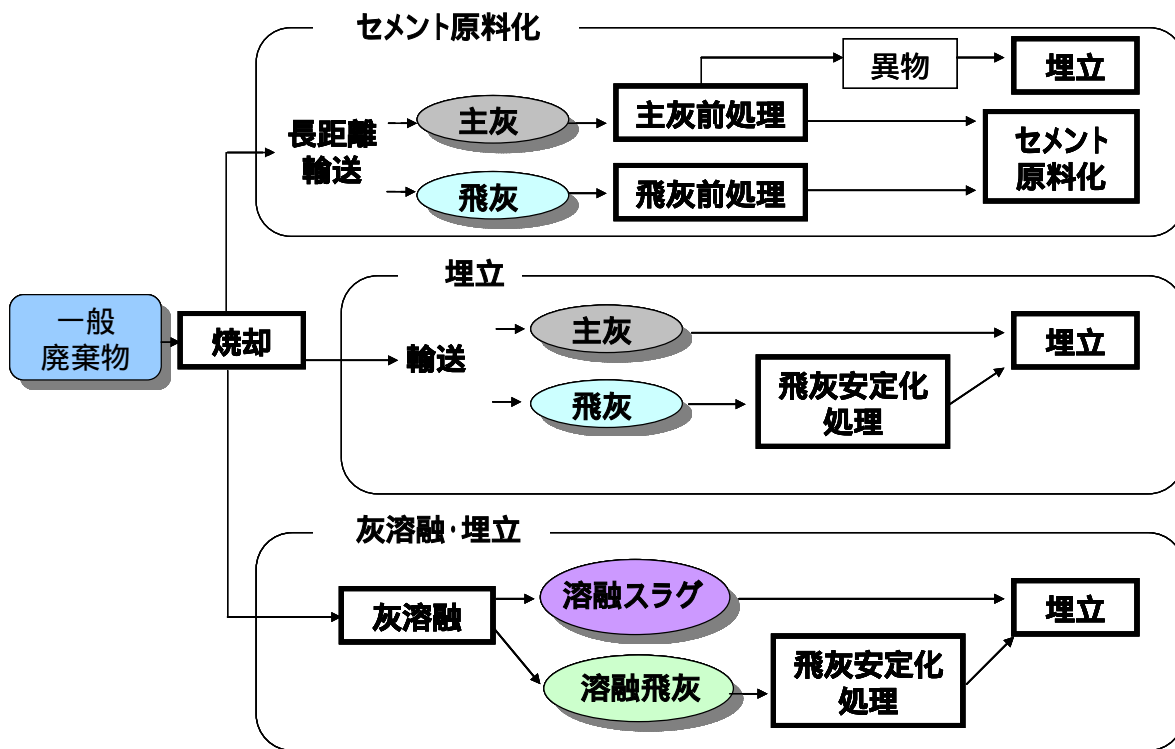


図 3-2 一般廃棄物処理のライフサイクル分析のバウンダリ

(1) セメント原料化リサイクル

クリンカ製造工程についてはすでに計算した．ここでは，飛灰前処理のインベントリ分析から飛灰前処理に伴う CO₂ 排出量を求める．

一般廃棄物焼却灰をクリンカ原料として使用する場合，塩素含有量の多さが問題となる．特に焼却飛灰は塩素含有量が多いため，灰水洗処理により塩素濃度をクリンカ原料としての受け入れ許容量まで下げるといふプロセスが必要となる．データは太平洋セメントの灰水洗処理について分析した研究論文^[5]から引用した．結果を表 3-13 に示す．

表 3-13 灰水洗処理の CO₂ 排出量

投入	物量	CO ₂ 原単位 (kg-CO ₂ /物量単位)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	
キレート剤	0.12 kg	2.66	0.32	¹
塩化第二鉄	0.28 kg	0.18	0.05	²
塩酸	0.29 kg	0.18	0.05	²
苛性ソーダ	0.82 kg	0.88	0.72	²
A重油	4.4 l	2.77	12.19	²
電力	51.6 kWh	0.38	19.50	²
下水	2.2 m ³	0.27	0.60	³
合計			33.4 kgCO ₂	a
飛灰処理量			217 kg	b
灰水洗処理CO ₂ 排出量原単位			0.15 t-CO ₂ /t	a/b

1 キレート剤の CO₂ 原単位は文献^[5]を参照

2 文献^[24]のデータを使用

3 下水処理の CO₂ 原単位は下水道統計^[30]より，日本全国の下水処理量と下水処理に投入された電力・燃料由来 CO₂ および N₂O，CH₄ 発生量の CO₂ 換算量から求めた値

(2) 埋め立て処分

埋め立て処分に関わる物量投入を記述している資料^[31]を元に，CO₂ 排出量に与える影響の大きなものを抜き出し，埋め立て処分の LCCO₂ を算出した．この資料は横浜市の埋め立て処分場のデータを元にしたものである．財の CO₂ 原単位は 1995 年産業連関表に基づく原単位を用いた．この CO₂ 原単位は百万円あたりの直接間接の CO₂ 排出量である．この価格あたりの原単位の物量あたりの原単位への換算には，産業連関表に付属する財の平均単価表を用いた．

埋め立て処分の物量投入（施設建設と処分場運用の 2 つにわけて）と CO₂ 排出量を求めた結果を表 3-14 に示す．

表 3-14 埋め立て処分場のライフサイクル CO₂ 排出量

処分場建設				処分場運用			
投入	物量	CO ₂ 原単位 (t-CO ₂ /物量単位)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	投入	物量	CO ₂ 原単位 (t-CO ₂ /物量単位)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)
遮水シート	399 t	0.55	218	電力	2,711 MWh	0.378	1,025
コンクリート	3,150 m ³	0.28	889	軽油	94 kl	2.643	248
鋼材	680 t	0.95	648	苛性ソーダ	417 t	0.883	369
		計	1,755	硫酸アルミ	470 t	0.177	83
		耐用年数	35年	炭酸ソーダ	505 t	0.253	128
		年あたり建設CO ₂	50			合計(年あたり運用CO ₂)	1,853

埋立処分全体	
	年あたり排出量
建設	50 t-CO ₂
運用	1853 t-CO ₂
合計	1903 t-CO ₂
埋立処分量	375,914 t/年
焼却灰埋立1トン当 たりCO ₂ 排出量	0.0051 t-CO ₂ /t

(3) 灰溶融処理の CO₂ 排出量

一般廃棄物焼却灰の最終処分に有効な処理方法として、焼却灰の溶融処理はすでに広く導入されている。灰溶融とは、焼却灰を 1200 以上の高温で溶融させた後に冷却することでガラス状のスラグとする処理である。この処理により灰の体積がおよそ半分になるため、処分場の延命に有効とされる。またスラグ中に重金属を閉じ込め、溶出しにくくする効果もある^[32]。灰溶融処理のインベントリについても文献^[5]に基づき CO₂ 排出量を求めた。結果を表 3-15 に示す。

表 3-15 灰溶融処理の CO₂ 排出量

重油式				電気式			
投入	物量	CO ₂ 原単位 (kg-CO ₂ /物量単位)	CO ₂ 排出量(t-CO ₂)	投入	物量	CO ₂ 原単位 (kg-CO ₂ /物量単位)	CO ₂ 排出量(t-CO ₂)
重油	231 t	2.77092	0.64008252	電力	876 kWh	0.378	0.331128
電力	152 kWh	0.378	0.057456			合計	0.33 kgCO ₂
		合計	0.7 kgCO ₂			灰溶融処理CO ₂ 排出 量原単位(電気式)	0.33 t-CO ₂ /t
		灰溶融処理CO ₂ 排出 量原単位(重油式)	0.70 t-CO ₂ /t				

灰溶融処理の方式にはエネルギー源として重油を用いるものと電力を用いるものの2種類が存在するが、さらにそれぞれの方式で多くの溶融炉が存在する。そのために灰溶融処理の CO₂ 原単位もばらつきがあるのが現状である。溶融炉のカタログ値^[28]をもとにいくつかの溶融炉について CO₂ 原単位を比較した。

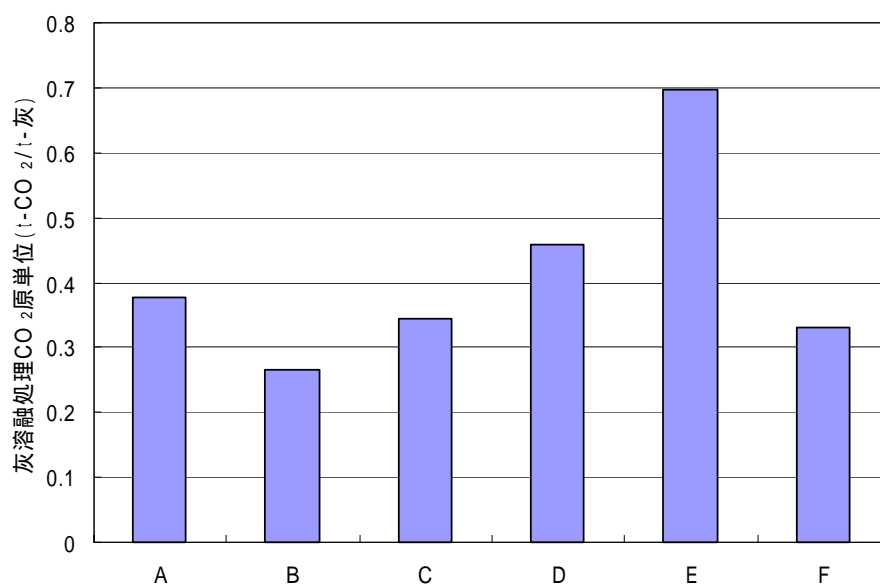


図 3-3 焼却灰溶融炉の CO₂原単位

A～Fはこの溶融炉を導入した市町村を指す

(4) 結果のまとめ

セメント原料化，埋め立て，灰溶融・埋め立て処理の3つのライフサイクル CO₂を比較した．結果は焼却灰 1t（主灰 0.8t，飛灰 0.2t）を処理する場合のものである．結果を表 3-16 に示す．ただしセメント原料化リサイクルでは灰の輸送を考慮していない（次項で考慮するため）．

表 3-16 一般廃棄物焼却灰処理のライフサイクル CO₂
セメント原料化リサイクル

	処理量	単位	CO ₂ 原単位	単位	CO ₂ 排出量	単位
主灰前処理	0.8	t	-	t-CO ₂ /t	-	t-CO ₂
飛灰前処理	0.2	t	0.15	t-CO ₂ /t	0.0308	t-CO ₂
主灰クリンカ	0.72	t	-0.112751	t-CO ₂ /t	-0.0812	t-CO ₂
飛灰クリンカ	0.2	t	-0.343566	t-CO ₂ /t	-0.0687	t-CO ₂
異物処理						
輸送	20	km	0.000174	t-CO ₂ /t-km	0.0003	t-CO ₂
埋立	0.08	t	0.005062	t-CO ₂ /t	0.0004	t-CO ₂
合計					-0.118	t-CO₂

埋立

	処理量	単位	CO ₂ 原単位	単位	CO ₂ 排出量	単位
施設建設	1	t	0.00013	t-CO ₂ /t	0.00013	t-CO ₂
飛灰前処理	0.2	t	0.07890	t-CO ₂ /t	0.01578	t-CO ₂
輸送	20	km	0.00017	t-CO ₂ /t-km	0.00487	t-CO ₂
埋立運用	1.4	t	0.00493	t-CO ₂ /t	0.00690	t-CO ₂
合計					0.02769	t-CO₂

灰溶融・埋立

	処理量	単位	CO ₂ 原単位	単位	CO ₂ 排出量	単位
灰溶融	1	t	0.361566	t-CO ₂ /t	0.3616	t-CO ₂
溶融飛灰前処理	0.05	t	0.078901	t-CO ₂ /t	0.0039	t-CO ₂
輸送	20	km	0.000174	t-CO ₂ /t-km	0.0019	t-CO ₂
埋立施設建設	0.55	m ³	0.000133	t-CO ₂ /m ³	0.0001	t-CO ₂
埋立運用	0.55	m ³	0.004929	t-CO ₂ /m ³	0.0027	t-CO ₂
合計					0.3702	t-CO₂

3.3.4 一般廃棄物焼却灰セメント原料化リサイクルの輸送距離と CO₂削減量の関係

一般廃棄物焼却灰の処理方法を埋め立て処分からセメント原料化リサイクルへ転換した場合の CO₂削減効果を評価した。ここでは長距離輸送による影響に着目し、輸送方法別の輸送距離と CO₂排出量の関係を求めた。輸送方法別の CO₂排出原単位は次の値を用いた^[29]。なお廃棄物の種類によらずトン・キロあたりの CO₂排出原単位は同一の値とした。

道路輸送	1.74×10^{-4} t-CO ₂ /t-km
鉄道輸送	2.10×10^{-5} t-CO ₂ /t-km
内航輸送	3.80×10^{-5} t-CO ₂ /t-km

結果を図 3-4 に示す。

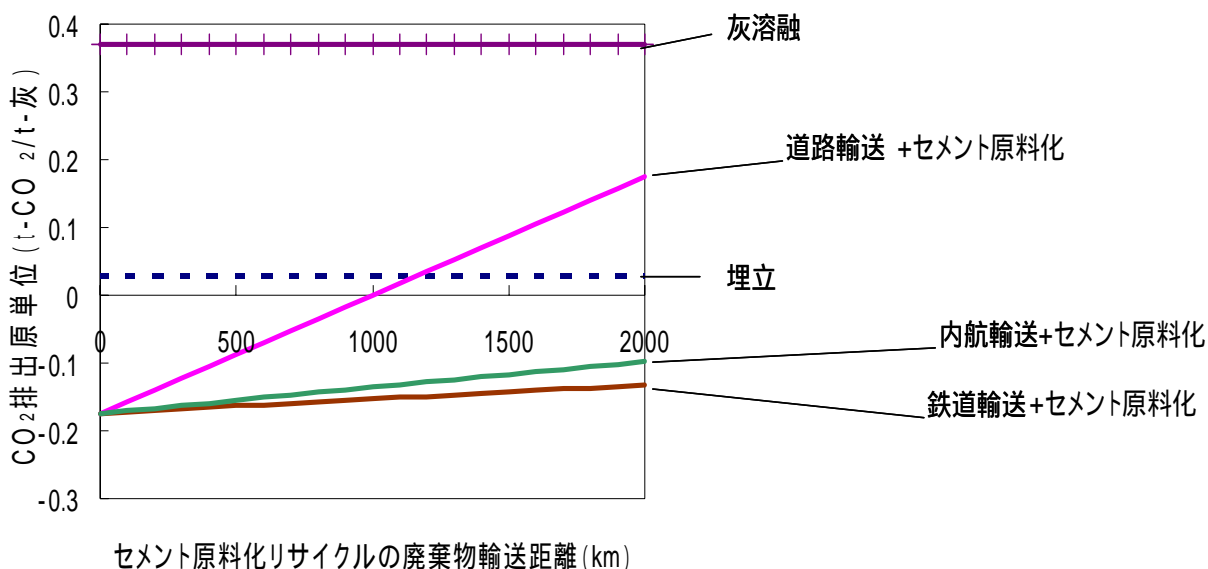


図 3-4 一般廃棄物焼却灰セメント原料化リサイクルの輸送距離と CO₂ 削減量の関係

グラフより CO₂ 排出原単位の大きい道路輸送においてもブレークイーブンとなる輸送距離は約 1100km と長距離にわたる。内航輸送，鉄道輸送を用いた場合，一般廃棄物焼却灰のセメント原料化リサイクルは 2000km を超えても CO₂ 削減に有効である。

3.3.5 一般廃棄物処理全体における焼却灰処分の位置づけ

本項では，ライフサイクル CO₂ 排出量という観点で一般廃棄物処理を見たときの全体における焼却灰処分の位置づけを検討する。その目的は，焼却灰に対する従来の処分方法である埋め立て処分からセメント原料化への代替を進めた場合にそのインパクトの大きさを評価することにある。焼却灰の処分方法の転換のインパクトを評価するためには一般廃棄物処理全体との対比で検討する必要がある。そこで本節では，一般的な一般廃棄物処理システムの各プロセスについての各種データを用い，各プロセスのライフサイクル CO₂ 排出量を求めた。

一般的な一般廃棄物処理システムについて包括的なインベントリ分析をおこなった。資料は文献を用いた^[31]。結果を整理したグラフを図 3-5 に示す。

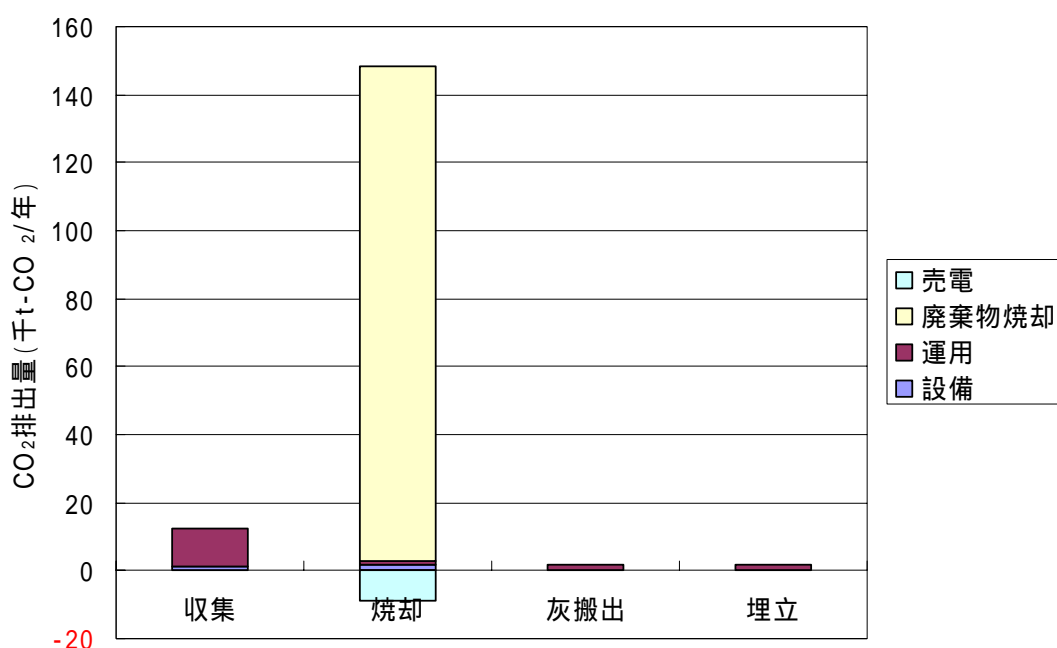


図 3-5 一般廃棄物処理システムのライフサイクル CO₂ 1, 2, 3

- 1 廃棄物発生量 102 万 t (収集人口 327 万人の都市) の処理システムにおける CO₂ 排出量
- 2 廃棄物焼却の CO₂ は廃棄物中の廃プラスチックの焼却により発生する CO₂ を計上 (廃棄物の廃プラスチック含有率は 16.9%)。廃プラスチックの CO₂ 排出係数は環境省値を使用^[33]
- 3 焼却・運用 CO₂ には、買電由来の CO₂ を含み、自家発電についてはカウントしていない

グラフより、廃棄物処理システムにおいて CO₂ 発生源となるのは主として焼却プロセスであることが分かり、灰輸送・埋め立て処分の CO₂ は量として微々たるものであるということがわかった。廃棄物発電をおこなった場合でも売電にまわすことによる CO₂ 削減量は廃棄物からの CO₂ 発生量に比較して小さいという結果が得られた。これは発電効率 15%、所内利用率 80%ということによる。

CO₂ 排出量、削減効果の大きさなどはどこをベースラインにするかで数値は変わるが、廃棄物処理における CO₂ 排出量は焼却プロセスがほぼ支配的であるといえる。

3.4 ライフサイクルコスト分析

3.4.1 概要

ライフサイクルコストの算出の手順を述べる。まず 3.4.2 で一般廃棄物処理の各プロセスのコスト構成を推計する。3.4.3 ではセメント原料化のコストを推計する。3.4.4 では一般廃棄物焼却灰処分のコストを求める。3.4.5 では輸送距離とコストの関係を示す。

3.4.2 一般廃棄物処理のコスト構成

廃棄物処理の各プロセスのコスト構成について、統計データを元に分析する。この分析により、一般廃棄物処理コスト全体に占める各プロセスの構成を概観でき、最終処分コストの相対的大きさを把握できる。

まず平成10年度の全国市町村の一般廃棄物処理事業経費データより、収集、中間処理、最終処分の各プロセス別の費用を集計した。それぞれの費用は(a)建設・改良費、(b)処理および維持管理費に分けて集計されているため、CO₂排出量の算出と同様に初期費用と運用費用に分けて計上することができる。

市町村の会計は単年度方式であるため、建設・改良費はその年度の支出のみが計上される。そのため、耐用年数と総建設費等から年あたりの初期費用を見積もることが困難である。そこで、全国の集計値を用いることで、平均した初期費用を得られると考え、集計値でのデータをまとめることとした。

結果を図3-6に示す。

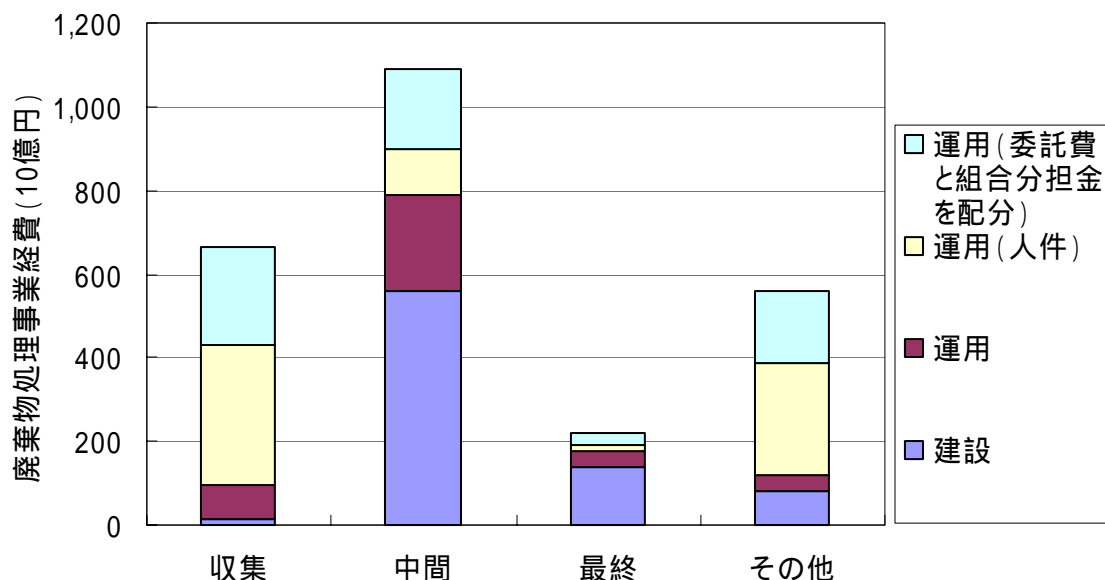


図 3-6 廃棄物処理事業経費の集計 1、2

- 1 運用費のうち、人件費は総額を人員で比例配分。ただし事務職員分はその他に配分した。
- 2 運用費のうち、委託費（民間に処理を委託した場合に支払った費用）と組合分担金（複数市町村からなる事務組合で清掃事業をしている場合に個々の市町村が分担する費用）は処理プロセスごとの内訳が不明であったので、各プロセスの運用費と人件費の和で比例配分した。

コストはCO₂排出量と異なり、収集、中間、最終処分とも無視できない大きさとなるという結果が得られた。個々の処理プロセスについてはモデルがあるので、それを用いてコストを試算する。

埋め立て処理費用は埋め立て処分価格から推計可能である。

3.4.3 セメント原料化プロセス

廃棄物のセメント原料化プロセスのコストについて試算をおこなった結果を示す。

混合セメント生産プロセスのコストは、産業連関表に基づき推計する。使用する廃棄物別のクリンカ製造プロセスのコストは、天然原料の代替により削減(あるいは増加)されるコストと前処理コストを計上する。高炉スラグと石炭飛灰を利用する場合は、前処理プロセスが不要であるため、天然原料代替のみを考慮する。一般廃棄物焼却灰については前処理コストも計上する。

(1) 混合セメント生産プロセス

普通のセメントと混合セメントの生産プロセスはともにクリンカと添加物(石膏やその他混合材)の混合工程であり、工程自体に違いはない。そのため、ポルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュセメントの生産コストの差は、使用するクリンカ量に依存する。

クリンカのコストは、公表されているデータが無い場合、島が作成したコンクリート関連拡張産業連関表⁹から推計した。クリンカ製造工程の原材料投入費用と付加価値額の和をクリンカ生産量で除することでクリンカ生産コストを求めた。

各セメントの使用原料構成は3.3節で計算した値を用いた。

結果を図3-7に示す。

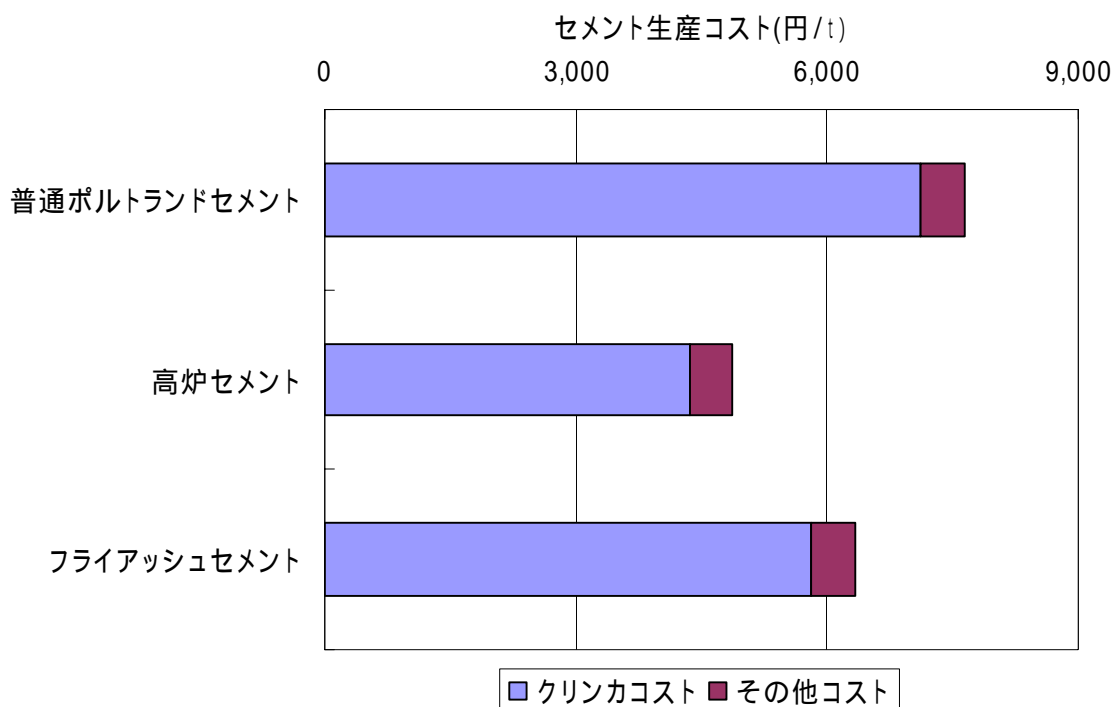


図 3-7 セメント種類別セメント生産コスト

普通ポルトランドに比較し、廃棄物の混合によりクリンカの使用量が少なくて済む混合セメントは生産コストが大きく削減される。ただし、この計算には廃棄物調達コストが含まれていないので、この分

が計算に入ると、混合セメントの生産コストはこれより大きくなる。混合セメントの販売価格は普通ポルトランドセメントに比べ若干低めの値になっているため、生産コストでは廃棄物調達コストを含めても普通ポルトランドセメントより小さいものと考えられる。

(2) クリンカ製造工程1 (高炉スラグ・石炭飛灰使用)

廃棄物を使用するクリンカ製造工程のうち、前処理不要のものについてのコストを計算する。この工程でも工程間の差異は使用原料の差異に由来する。これらについても、島が作成したコンクリート関連拡張産業関連表^[15]から推計した。

結果を図 3-8 に示す。

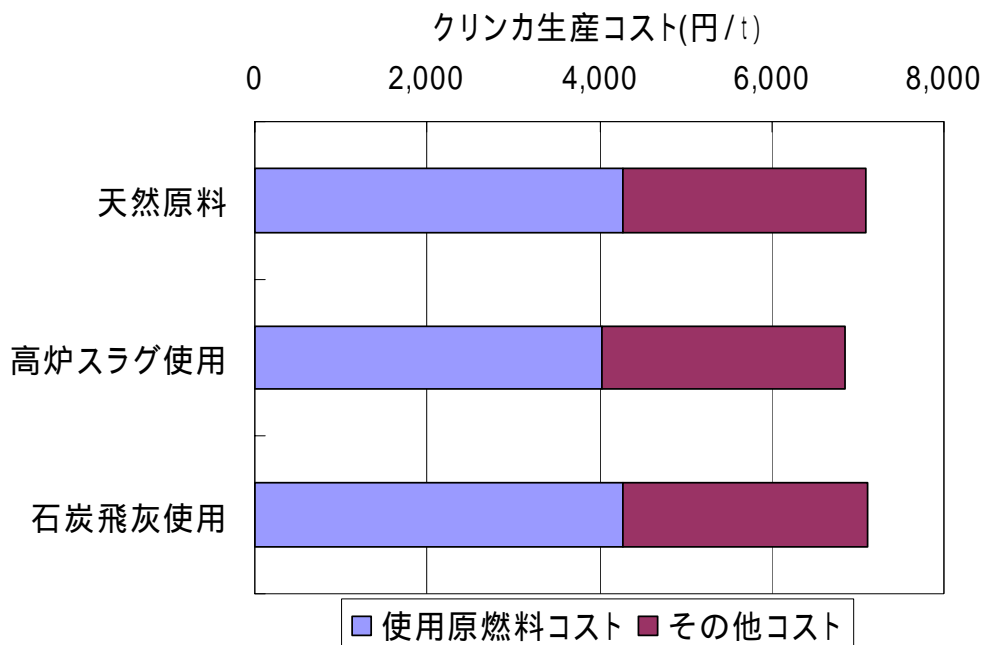


図 3-8 廃棄物種類別クリンカ生産コスト その1

セメント生産コストと比べて使用原料間に大きな差異はない。天然原料使用のクリンカに比べ、高炉スラグ使用のクリンカは約 200 円低く、石炭飛灰使用のクリンカは約 10 円高いという結果となった。

(3) クリンカ製造工程2 (一般廃棄物焼却灰使用)

一般廃棄物焼却灰(焼却主灰・焼却飛灰)をクリンカ製造工程で使用する場合には、塩素・重金属除去のための前処理が必要となる。前処理設備の設備投資額は経済産業省中国産業局による調査資料^[18]の値を用いた。

考慮するフローは次のようになる。

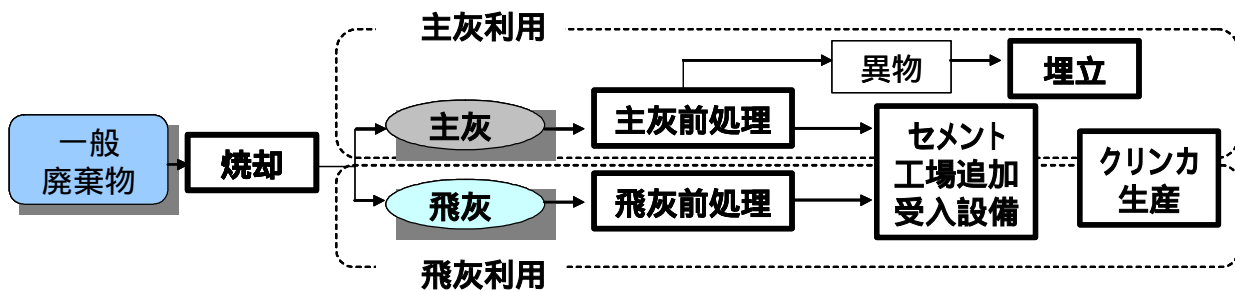


図 3-9 一般廃棄物焼却灰のセメント原料化フロー

コスト計算の内訳を表 3-17 に示す。

表 3-17 コスト計算の内訳

焼却主灰・前処理コスト				焼却飛灰・前処理コスト			
主灰・前処理				飛灰・前処理			
項目	費用	単位	備考	項目	費用	単位	備考
設備投資	2,000 百万円		a	設備投資	2,000 百万円		a
設備年価	234 百万円		b (1)	設備年価	234 百万円		b (1)
年間処理	30,000 t		c	年間処理	10,000 t		c
耐用年数	10 年		d	耐用年数	10 年		d
トン当たり設備費	7,815 円/t		e=b/c	トン当たり設備費	23,446 円/t		e=b/c
運用費	7,815 円/t		f (2)	運用費	23,446 円/t		f (2)
合計	15,631 円/t		g = e+f	合計	46,892 円/t		g = e+f

セメント工場追加設備コスト				焼却主灰・異物処理コスト			
主灰・飛灰共通				主灰・異物処理			
項目	費用	単位	備考	項目	費用	単位	備考
設備投資	1,000 百万円		a	異物発生量	0.063 t/t-主灰		a
設備年価	117 百万円		b (1)	輸送費用	2,400 円/t		b
年間処理	50,000 t		c	埋立費用	15,000 円/t		c
耐用年数	10 年		d	主灰トン当たり処理費	1,096 円/t-主灰		d=a·(b+c)
トン当たり設備費	2,345 円/t		e=b/c	主灰トン当たり設備費	1,096 円/t-主灰		e (3)
運用費	2,345 円/t		f (2)	合計	2,192 円/t-主灰		f = d+e
合計	4,689 円/t		g = e+f				

一般廃棄物焼却灰セメント原料化コスト

焼却主灰	焼却飛灰
22,512	51,581

1 年価とは、耐用年数を償却期間とし、一定利率の元で、その期間に均等額の償却をおこなう場合の1年あたりの償却額をさす。年価 P 、償却期間 T 、利率 i 、投資額 M の時の年価を求める式は以下の通り。本研究では利率 $i=0.03$ を用いた。以後の計算でも特に断らない限り、年価計算における利率は $i=0.03$ を用いる。

$$P = \frac{iM}{[1 - (1/1+i)^T]}$$

- 2 運用費はトン当たりの設備費に等しいと仮定した。
- 3 主灰異物処理トン当たりの設備費はトン当たりの処理費に等しいと仮定した。

焼却主灰・焼却飛灰を使用するクリンカ製造工程のコスト推計結果を図 3-10 に示す。

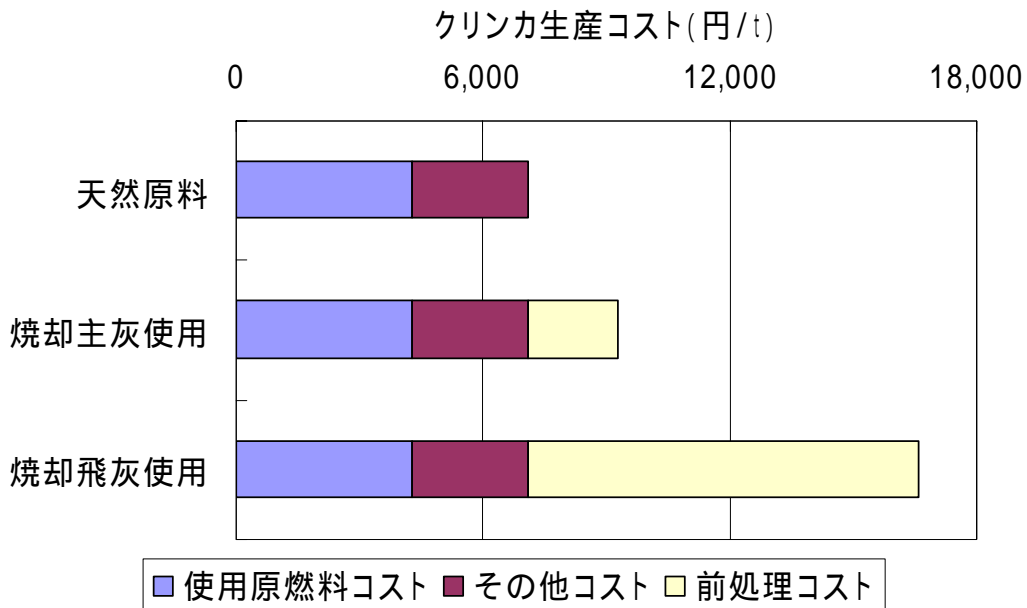


図 3-10 廃棄物種類別クリンカ生産コスト その2

焼却灰の前処理が入ることで、クリンカ製造工程のコストが大きく増加する結果となった。

3.4.4 一般廃棄物焼却灰処分のコスト

本項では、セメント原料化以外の一般廃棄物焼却灰処分のコストを見積もる。対象とする処分方法として、埋め立て処分、灰溶融、エコセメントを取り上げる。

埋め立て処分は、一般廃棄物焼却灰の処分方法として通常適用される管理型処分についてのコストとする。飛灰の安定化処理も考慮する。

灰溶融処理では、現状において様々な方式のプラントが稼働しており、処理コストも一様ではない。本項では、灰溶融処理コストの代表値として、利用可能な資料に示されている複数の値のうち中央値を採用する。

エコセメントは、セメント原料化の一種であるが、本研究のセメント原料化が既存のセメント工場での灰を利用するのに対し、エコセメントでは、大都市近隣地区に一般廃棄物焼却灰の利用に特化した小規模プラントを新規に建設し、焼却灰を大量に利用可能な特殊なセメントを生産するものである。既存のセメント工場では、原料の1割程度が一般廃棄物焼却灰利用の上限であるのに対し、エコセメントでは焼却灰を50%程度利用することができる。本研究のセメント原料化は既存の設備を利用できるが、セメント工場までの長距離輸送が必要となる。一方エコセメントは、新規プラントを建設する必要があるが焼却灰の輸送は短距離で済む。この両者の経済性を比較する。

(1) 埋め立て処分コスト

間宮ら^[12]の論文の埋め立て処分場建設費用を用いた。

計上する費用は、処分場建設費、安定剤費、その他運用費である。焼却主灰では安定剤を用いる必要が無いが、焼却飛灰では用いる必要があるため、処理費用がそれだけ高くなる。

結果を表 3-18 に示す。

表 3-18 一般廃棄物焼却灰埋め立て処分コスト(上・焼却主灰, 下・焼却飛灰)

項目	値	単位	備考
施設建設単価	10000	円/m ³	a
耐用年数	20	年	b
設備年価	13,443	円/m ³	c
運用費	1500	円/t	d
合計	14,943	円/t	e=c+d 1

項目	値	単位	備考
施設建設単価	10,000	円/m ³	a
耐用年数	20	年	b
設備年価	13,443	円/m ³	c
運用費	1,500	円/t	d
安定剤	19,943	円/t	e
合計	34,886	円/t	f=c+d+e 1

1 焼却灰の比重を 1t/m³ とした

(2) 灰溶融処理コスト

灰溶融処理では、主灰・飛灰にわたったデータが無かったため、両者を一括して処理した場合のコストを求めた。

結果を表 3-19 に示す。

表 3-19 一般廃棄物焼却灰溶融処理コスト

項目	値	備考
焼却灰処理量(t/年)	5,353	a
建設費用(億円)	35	b
耐用年数	20	c
設備年価(億円)	2.35	d
設備費用(円/t)	43,948	e=d/a
運用費用(円/t)	38,700	f
合計	82,648	g=e+f

(3) エコセメント

三多摩エコセメント事業計画書^[34]に記載のデータに基づきコストを求めた。

結果を表 3-20 に示す。

表 3-20 一般廃棄物焼却灰エコセメント化コスト

項目	値	単位	備考
焼却灰処理量	99,000 t/年		a
施設建設	265 億円		b
耐用年数	20 年		c
施設費年価	17.81 億円/年		d
運営費	32 億円/年		e
トン灰当たり経費	50,315 円/t		$f=(d+e)/a$
エコセメント生産量	156,000 t/年		g
エコセメント販売価格	7,000 円/t		h
販売収入	10.92 億円/年		$i=g \cdot h$
焼却灰処理費	39,285 円/t		$j=(d+e-i)/a$

以上、一般廃棄物焼却灰処分費用について計算した結果をまとめる。処理方法間での費用を比較した図 3-11 を示す。

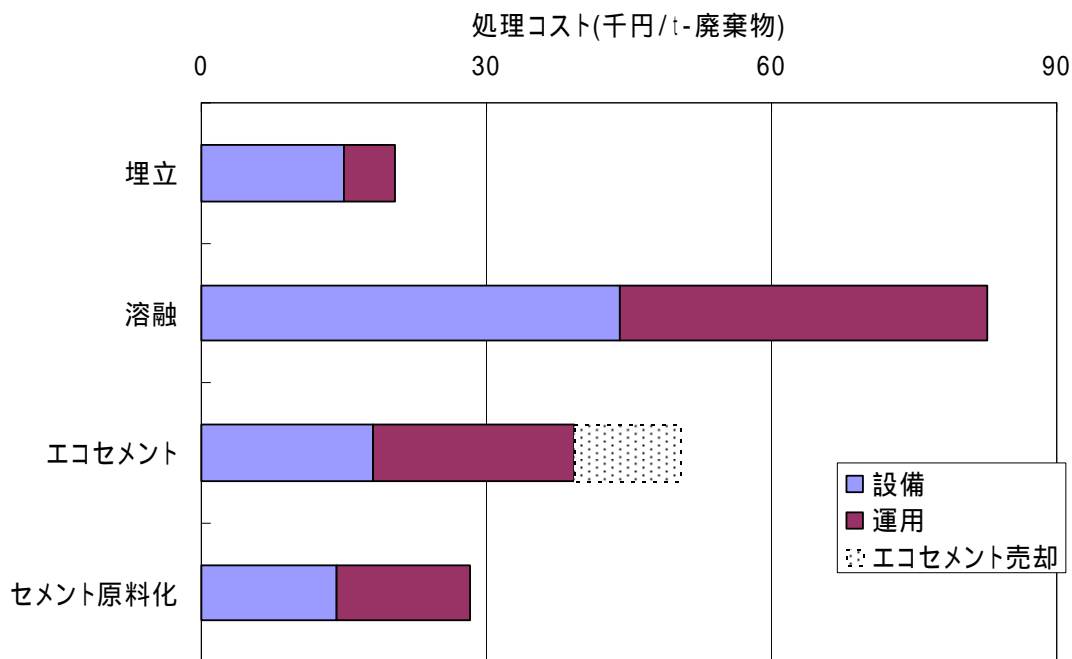


図 3-11 一般廃棄物焼却灰処理方法別コストの比較

埋め立て処分が最もコストが小さいという結果が得られた。埋め立て処分以外ではセメント原料化が最もコストが小さいという結果が得られた。以上より、埋め立て処分場が逼迫した場合には、セメント原料化が代替オプションとして最も有望であると考えられる。

3.4.5 輸送距離とコストの関係

一般廃棄物焼却灰の処理方法を埋め立て処分からセメント原料化リサイクルへ転換した場合のコス

トへの影響を評価した。ここでは長距離輸送による影響に着目し、輸送方法別の輸送距離とコストの関係性を求めた。輸送方法別のコストは次の式に従うものとした。この輸送距離についての一次関数として表される輸送コスト関数は、輸送業界資料^{[35][36][37]}に基づき設定した。なお廃棄物の種類によらずトン・キロあたりのコストは同一の値を用いた（輸送コスト関数設定の詳細は第5章を参照されたい）。

表 3-21 輸送コスト関数の一覧

輸送コスト	
道路輸送 (¥/t)	$= 1500 + 18.5 \times d(\text{km})$
鉄道輸送 (¥/t)	$= 951 + 4.34 \times d(\text{km})$
内航輸送 (¥/t)	$= 1300 + 4.26 \times d(\text{mile})$

1 mile (海里) = 1852m

輸送距離とコストの関係を図 3-12 に示す。

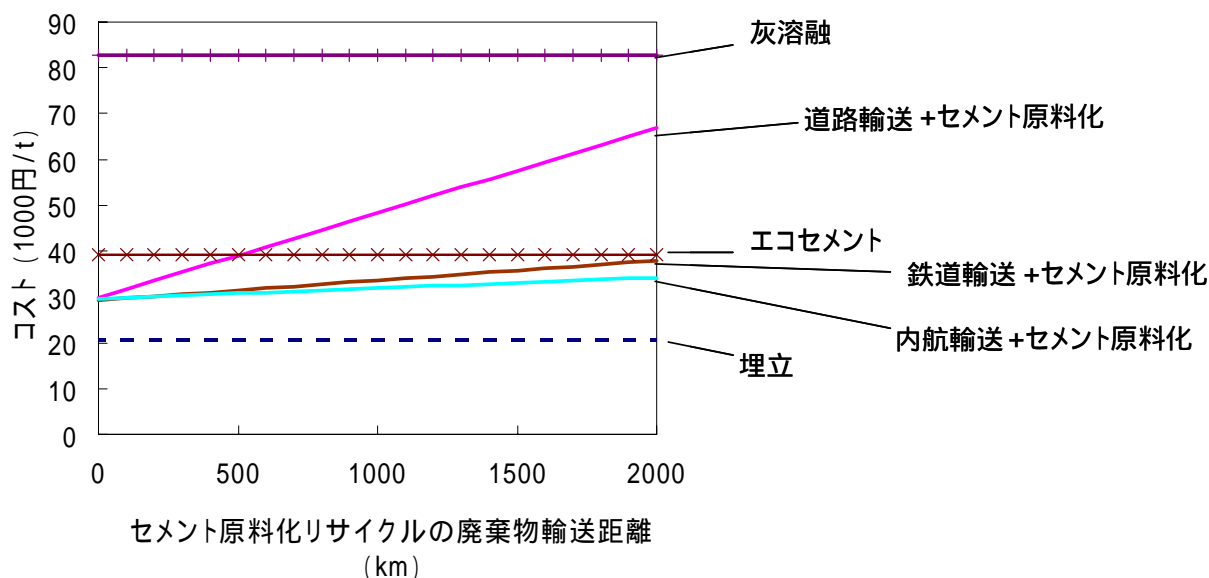


図 3-12 輸送コストを考慮した一般廃棄物焼却灰セメント原料化のコスト比較

セメント工場までの輸送距離が 0km の場合には、一般廃棄物焼却灰処理のコストは、左から小さい順に

埋め立て処分 < セメント原料化 < エコセメント < 灰溶融

となった。輸送距離が増加に伴いセメント原料化のコストは増加し、道路輸送で 500km をこえた地点で、エコセメントがセメント原料化よりコストが小さくなった。鉄道輸送、内航輸送に関しては 2000km を超えてもセメント原料化のほうがエコセメントよりコストが小さいという結果となった。

以上の結果より、セメント原料化は、埋め立て処分に次いでコストの小さい焼却灰処分方法であることが分かった。セメント工場までの長距離輸送を考慮しても、エコセメントより安価となるという結果が得られた。

3.5 結言

本章では、各種廃棄物（高炉スラグ、石炭飛灰、焼却主灰・焼却飛灰、下水汚泥脱水汚泥・下水汚泥焼却灰）のセメント原料化リサイクルについてライフサイクル分析をおこない、ライフサイクル CO₂ 排出量およびライフサイクルコストを求めた。一般廃棄物焼却灰処理について、セメント原料化リサイクルと他の処分方法との比較をおこない、セメント原料化リサイクルの有効性を評価した。

以上の分析より以下の知見を得た。

- (a) 高炉スラグのセメント原料化は、高炉セメントの混合材として利用するにせよ、クリンカ原料として利用するにせよ、CO₂ 削減に有効である。これは、高炉スラグがカルシウムを多く含有することから、石灰石の代替原料としての利用可能量が大きいためである。高炉スラグはもとも製鉄所で使用される石灰石に由来するため、高炉スラグ中のカルシウムと結合していた CO₂ は、製鉄所で大気中に放出された CO₂ ということになる。このことから、高炉スラグを CO₂ 削減に有効に利用することが合理的であると考えられる。土木材料など CO₂ 削減にほとんど寄与しない方法で利用することは、脱 CO₂ 反応を経たカルシウムの利用方法としては合理的でないと考えられる。
- (b) 石炭飛灰・一般廃棄物焼却灰・下水汚泥焼却灰のセメント原料化は、CO₂ 排出量の削減には大きく寄与しないものの、少なくとも CO₂ 排出量の増加への影響はない。すなわち、これらの廃棄物のセメント原料化リサイクルは、CO₂ 排出量を増加させることなく最終処分量の削減に有効なリサイクルである。
- (c) 一般廃棄物焼却灰のセメント原料化は、コスト面で埋め立て処分に次いで安価な処分方法である。エコセメント・灰溶融など他の処理方法よりもコスト・CO₂ 排出量の点で有利であるため、埋め立て処分場が逼迫した場合には、有望な代替オプションとなると考えられる。

第3章引用文献

- [1] 石谷久, 赤井誠監修: ライフサイクルアセスメント, 社団法人 産業環境管理協会, 2001 .
- [2] 稲葉敦: LCA の現状と今後 - ライフサイクル思考による環境調和型社会の構築に向けて, 電気学会誌 Vol.123, No.1, 2003 .
- [3] 佐野奨, 市川牧彦, 下山善秀, 小沼栄一: セメントおよびコンクリートのエコバランス, *Cement Science and Concrete Technology*, No.53, 1999 .
- [4] 石川恵子ほか4名: セメント製造における廃棄物再利用の評価, *日本金属学会誌*, 67(9), pp.428-431, 2003 .
- [5] 佐野奨ほか4名: 都市ごみ焼却灰および廃プラスチックの処理・有効活用技術に関する環境負荷の定量化, *廃棄物学会論文誌*, 13(3), pp.131-140, 2002 .
- [6] 天野耕二, 伊藤昌隆, 柳沢幸雄: 廃棄・副産物の経済価値を考慮した環境負荷量の評価 - セメント産業を事例として -, *土木学会論文集*, No.636/VII-13, pp.15-21, 1999 .
- [7] Kikuchi, R.: Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker, *Resources, Conservation and Recycling*, 31, pp.137-147, 2001 .
- [8] 松藤敏彦, 田中信壽: 一般廃棄物処理システムのコスト・エネルギー消費量・二酸化炭素排出量評価手法の提案, *土木学会論文集*, No.678/VII-19, pp.49-60, 2001 .
- [9] 羽原浩史, 松藤敏彦, 田中信壽, 井上真智子: コストおよびエネルギー消費量による一般廃棄物広域化シナリオの比較に関する研究, *環境システム研究論文集*, Vol.30, pp.323-332, 2002 .
- [10] 岩淵善美, 東野達, 仁井本貴庸, 笠原三紀夫: 一般廃棄物の広域化処理に関する環境負荷評価, *空気調和・衛生工学会論文集*, No.88, pp.13-23, 2003 .
- [11] 岩淵善美, 東野達, 笠原三紀夫: モデル都市におけるリサイクルを考慮した一般廃棄物処理・処分システムの環境負荷削減の評価, *空気調和・衛生工学会論文集*, No.91, pp.97-107, 2003 .
- [12] 間宮尚, 鎌田元康, 井上隆, 木原勇信, 小林謙介, 長谷川善明: 廃棄物マネジメントを支援する建築・都市システムの構築 第3報 - 一般廃棄物処理にかかわる環境負荷原単位の検討, *空気調和・衛生工学会論文集*, No.88, pp.53-62, 2003 .
- [13] 間宮尚, 鎌田元康, 井上隆, 木原勇信, 小林謙介, 長谷川善明: 廃棄物マネジメントを支援する建築・都市システムの構築 第4報 - 生ゴミのディスポーザ処理の廃棄物・下水処理を含めた視点による環境評価, *空気調和・衛生工学会論文集*, No.91, pp.31-40, 2003 .
- [14] Finnveden, G., J.Johansson, P.Lind, A.Moberg: Life cycle assessment of energy from solid waste- part1: general methodology and results, *Journal of Cleaner Production*, 13, pp.213-229, 2005 .
- [15] 島裕和: 高品質再生骨材によるコンクリートリサイクルシステムに関する研究, 東京大学新領域創成科学研究科学学位論文, pp.102-161, 2004 .
- [16] 建設副産物利用促進専門委員会報告, コンクリート塊から発生する微粉末の有効利用(その2), セメント協会, p.45, 1998 .

- [17] NEDO 研究開発実施プロジェクト資料, <http://www.nedo.go.jp/kankyo/project/03/gaiyou02.pdf>, 2002 .
- [18] 焼却灰をモデルとした瀬戸内海エリアにおけるリサイクルシステムの具現化と静脈物流の構築調査報告書, 経済産業省中国産業局, 2002 .
- [19] 高橋茂:セメントに含まれる微量成分の環境への影響,セメント・コンクリート, No.640, pp.20-29, 2000 .
- [20] 森浩文, 田野崎隆雄, 中村和史: 都市ごみ焼却残渣の化学成分調査, 第 10 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.488-490, 1999 .
- [21] セメントハンドブック(2000年版), p.21, (社)セメント協会, 2000 .
- [22] 産業リサイクル事典, pp.578-579, 2000 .
- [23] 総務庁:平成7年産業連関表(物量表), 1999 .
- [24] 南斎規介, 森口祐一, 東野達: 産業連関表による環境負荷原単位データブック, 国立環境研究所地球環境研究センター, 2002 .
- [25] セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, 技報堂出版株式会社, p.319, 1995 .
- [26] セメントの常識, セメント協会, p.9, 2004 .
- [27] セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, 技報堂出版株式会社, pp.400-403, 1995 .
- [28] 石川禎昭編著: ゴミ処理溶融技術, 日報企画販売, 2001 .
- [29] 国土交通省, 輸送機関別二酸化炭素排出原単位:
<http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/butsuryu-deta.html> (アクセス日 2004.11.30)
- [30] 平成13年度版下水道統計, (社)日本下水道協会, 2002 .
- [31] 生活資源のライフサイクルエネルギーに関する調査, 社団法人資源協会, 1994 .
- [32] 鈴木敏夫: 東京23区部における焼却灰全量溶融への取組み, 資源環境対策, 39(2), pp.36-42, 2003 .
- [33] 平成14年度温室効果ガス排出量算定方法検討会廃棄物分科会報告書, 環境省, 2002 .
- [34] エコセメント事業実施計画, 東京都三多摩地域廃棄物広域処分組合, 2002 .
- [35] すぐ役立つ実勢/トラック運賃料金マニュアル, 輸送経済新聞社, 2000 .
- [36] コンテナ時刻表, 日本貨物鉄道株式会社, 2003 .
- [37] 内航海運からみた素材産業の物流コスト効率化に関する調査報告書, 日本内航海運組合総連合会, 2004: <http://www.naiko-kaiun.or.jp/info/topics/report/> (アクセス日 2004.11.30) .

第4章 拡張型産業連関分析

4.1 緒言

本章では拡張型産業連関分析による廃棄物セメント原料化リサイクルの環境負荷低減効果の評価をおこなう。

4.2 では産業連関分析の概要を簡単に説明する。4.3 では産業連関分析を環境問題の分析に適用した先行研究について幅広くレビューをおこなう。4.4 では本研究で用いた拡張型産業連関モデルの構造について述べる。4.5 ではシナリオ分析の結果を示す。4.6 は結言で本章の内容をまとめる。

4.2 産業連関分析の概要

産業連関分析はアメリカの経済学者 W.W.Leontief^[1]によって創始された分析手法である。経済理論的には、Walras による一般均衡理論（経済主体間の相互依存関係を連立方程式体系としてモデル化・分析する経済理論）の具体的な実証分析への適用手法であると位置づけられる。

産業連関分析は、「国民経済をいくつかの部門ないし産業に分割し、それら部門間の循環する財貨・サービスの流れを体系的に記述することによって、部門間の生産構造の関係、すなわち投入産出の関係を明らかにする」^[2]ための分析手法である。産業連関表は、産業連関分析をおこなうための数値を提供するいわばデータベースのような存在である。産業連関表は一国の経済における産業部門間の経済的相互取引を記述した統計表である。Leontief により 1936 年に最初の産業連関表（アメリカ経済）が公表されて以来、経済分析に対する有用性の評価が確立し、世界各国で産業連関表が作成されている。わが国では昭和 26 年表が最初に作成された産業連関表で、以後、5 年に一度、西暦下一桁 0 と 5 の年の産業連関表が作成され続けて今日に至っている。わが国の産業連関表は、もっとも部門分類が細かい取引基本表で 400～500 部門程度の分類がなされている。

産業連関表の概略を図 4-1 に示す。

産業連関表の見方を説明する^[3]。産業連関表を横の「行 (row)」にそって読むと、ある産業部門の生産物がどの産業にどれだけ配分され（中間需要）、最終需要にどれだけまわったか、すなわち生産物の配分構成がわかる。産業連関表を縦の「列 (column)」にそって読むと、ある産業部門の生産のためにどの産業の生産物がどれだけ投入され（中間投入）、雇用者への賃金や資本の償却、営業余剰などの付加価値がどれだけ発生したか、すなわち産業の投入構成がわかる。最終需要の総和と付加価値の総和はともに GDP に等しい。

		産業部門 (中間需要)	最終需要	輸入 控除	総 生産
		1.2.3..... n	消費、投資、 輸出など		
産業部門 (中間投入)	1	$\mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{pmatrix}$	$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix}$		$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix}$
	n				
付 加 価 値	雇用者 所得、 営業余 剰など	$\mathbf{V} = (V_1 \quad \cdots \quad V_n)$			
総生産		$\mathbf{X} = (X_1 \quad \cdots \quad X_n)$			

図 4-1 産業連関表の概略

4.2.1 基本モデル

産業連関モデルの基本となるモデルには数量モデルと価格モデルがある。数量モデルは生産物の需給バランスに基づくモデルである。価格モデルは産業の収支バランスに基づくモデルである。ここでは数量モデルについてのみ説明し、価格モデルについては 4.3.2 で説明する。

一国経済における各産業の総生産・中間需要・最終需要の関係は(4.1)で表される。

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{F} \quad (4.1)$$

ただし

生産量ベクトルを $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix}$ ，投入係数行列を $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$ ，最終需要ベクトルを

$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix}$ とおく。投入係数は、産業部門 j での単位生産あたりに産業部門 i から産業部門 j へ投入され

る中間投入のことで $a_{ij} = x_{ij} / X_j$ で定義される。添え字 $1 \sim n$ は産業部門を表す。

(4.1)を X について解くと(4.2)が得られる .

$$X = (I - A)^{-1}F \quad (4.2)$$

ただし, $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ (単位行列)である .

(4.1)は X について再帰的關係になっている . 左辺の X を右辺に代入するという操作をすると ,(4.1)は次のように展開される .

$$\begin{aligned} X &= AX + F \\ &= F + AF + A^2X \\ &= F + AF + A^2F + A^3X \\ &= \dots \\ &= (I + A + \dots + A^n + \dots)F \end{aligned} \quad (4.3)$$

(4.3)は ,最終需要 F があたえられたとき、産業構造 A を通じた需要の無限の波及効果の結果として総生産量 X が定まることを表している .

4.2.2 Leontief 型産業連関表

Leontief による産業連関表は ,産業と生産物が一対一に対応する原則に基づいている . この原則に基づくため ,産業部門はアクティビティベースに分類される . アクティビティとは ,ある生産物を生産するために必要な中間財の組み合わせのこと (産業連関表の一つ一つの縦の列ベクトル)で ,一つのアクティビティが一つの生産物に対応するように部門分類がなされる . 一つの産業でも異なる生産物を生産する場合には ,それぞれの生産物に対応したアクティビティに分割される . 例えば ,機械産業が自動車と工作機械を製造している場合に ,生産物として自動車と工作機械を区別して考慮する場合には機械産業も自動車製造のアクティビティと工作機械のアクティビティに分割される . この分割にあわせて統計データも集計され ,産業連関表が作成されることになる . このことから ,Leontief 型産業連関表では ,部門名は生産物の名前をさすものであるといえる (産業間の取引を記述したものが産業連関表であると述べたが ,正確には生産物に一対一に対応するアクティビティ間の取引を記述したものとなる) .

しかし ,現実には一アクティビティ = 一生産物の原則が保たれるようにアクティビティを分割することが困難である場合がある . いわゆる結合生産とよばれる問題で ,一つのアクティビティが同時に複数の生産物を生産する場合のことである . 鉄鋼産業における鉄鋼とスラグや石炭製品産業におけるコークスと石炭ガスなどが代表的である . この例で鉄鋼やコークスなどの主産物に対して ,スラグや石炭ガスは屑・副産物とよばれる (ここでの屑・副産物を主生産物として生産するアクティビティが存在する場合には副産物 ,存在しない場合には屑とよばれる . この場合 ,スラグは屑で石炭ガスは天然ガス等と同一分類の生産物として扱う場合には副産物となる) .

Leontief 型産業連関表では ,結合生産に対して「ストーン (Stone) 方式」という処理方法が用いら

れる。ストーン方式は、屑・副産物の「発生額を発生部門の列と競合部門の行との交点にマイナス計上し、かつその産出内訳を需要部門ごとにプラス計上する方式」^[4]である。数値例を図 4-2 に示す。

ストーン方式では、部門 1 の生産増加が部門 2 の生産を抑制する方向に働き、部門 2 の生産増加が部門 1 の生産に影響を与えないという点では実態に即している。しかし、マイナスの投入係数が生じるため、マイナスの生産という解が得られる場合ができてしまうという問題がある。

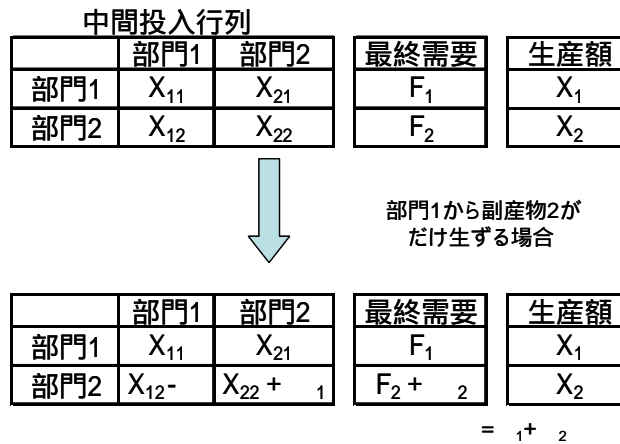


図 4-2 ストーン方式の数値例

4.2.3 SNA 産業連関表

SNA とは Systems of National Accounts (国民経済計算) の略で、各国の経済統計作成の基準となる統計システムである。1968 年に国連が 68SNA とよばれる基準を作成した際に、産業連関表も SNA を構成する一統計として統合された。

SNA 産業連関表では、産業分類と商品分類を組み合わせた分類方式となっている。すなわち、SNA 産業連関表は、どの産業からどの商品が産出されたかを記述する産業 × 商品の形の産出表 (V 表) と、どの商品がどの産業に投入されたかを記述する商品 × 産業の投入表 (U 表) の 2 種類の表からなる。

SNA 産業連関モデルの詳細については文献^[5]を参照されたい。

		産出			
		商品	産業	最終需要	生産額
投入	商品		U	f	q
	産業	V			g
	付加価値		y		
	生産額	q'	g'		

図 4-3 SNA 産業連関表の概略

4.2.4 プロセス連関分析

プロセス連関分析¹⁶⁾は、結合生産の問題に対して、投入行列・産出行列という2つの行列を用いることで簡便に分析をおこなうことを可能にする方法である。2種類の行列を用いるという点でSNA産業連関モデルと類似しているが、SNA産業連関モデルが煩雑かつ産業と商品の部門数が一致していなければならないのに対し、プロセス連関分析は以下の特徴を持つ。

- (a) 直感的に理解しやすい
- (b) 産業と商品の部門数が一致する必要がない
- (c) 分析対象として工業プロセス等をモデル中に組み込むことが容易

プロセス連関分析は、もともと工業プロセス等の環境影響評価（ライフサイクルアセスメント）を産業連関モデルの枠組みでおこなうという考えに基づくもので、理論的厳密さを少々犠牲にした分、操作性・拡張性にすぐれた方法である。

基本モデル(4.1)および(4.2)に対応するプロセス連関モデルは(4.4)および(4.5)で表される。

$$AX + F = EX \quad (4.4)$$

$$X = (E - A)^{-1}F \quad (4.5)$$

ただしEは産出係数行列である。

ここで、プロセス連関モデルと基本モデルの部門分類が同一であれば、係数行列E-Aはストーン方式による基本モデルI-Aと同一であり、結合生産の取り扱いに違いはない。この点からも、プロセス連関モデルは工業プロセス等の評価において操作性・拡張性にすぐれた方法であるという理解が適切であろう。

本研究ではプロセス連関モデルの考え方に基づく拡張型産業連関モデルを構築する。産業と商品の部門数が一致しない場合には、最適化により解を決定する方法とシナリオにより解を決定する方法があるが、本研究では、後者のシナリオにより解を決定する方法を用いる。シナリオによる方法は、ソルバー等を用いることで容易に最適解を得ることができるのに加え、最適解にいたるまでの経路上の状態についても解を得ることができる点でより包括的な方法であるからである。

4.3 先行研究

本節では産業連関分析の先行研究についてレビューをおこなう。4.3.1では産業連関分析の主たる応用例を紹介し、産業連関分析を用いることの利点について説明する。4.3.2以降で環境問題の分析へ適用例を示す。4.3.2では付帯表型のモデルの研究例を紹介する。4.3.3では構造分解分析について示す。4.3.4、4.3.5、4.3.6ではリサイクル・廃棄物処理・マテリアルフロー分析に関わる研究例を示す。

4.3.1 産業連関分析の応用

産業連関分析を最も簡単に説明するならば、「与えられた最終需要を満足する各部門の生産量を求める方法」ということができるだろう。別の表現をするならば、「多部門最終需要Fと多部門生産量Xの関係が投入産出行列によって規定されるモデルに基づく経済・環境分析手法」ともいえるだろう。産業連関分析の主要な応用例である地域産業連関分析は、基本的な産業連関分析を単純に拡張したもので、

地域別・多部門最終需要と地域別・多部門生産量の関係が地域間投入産出行列によって規定されるモデルとすることができる。

森嶋⁷⁾は産業連関分析の目的として以下の事項をあげ、「与えられた最終需要を満足する各部門の生産量を求める」ことでどのような意味のある情報が得られるかを例示している。

- (a) 各部門の産出価値額の連立方程式による決定理論（将来の産出価値額をも推定可能）
- (b) 政府の経済政策効果を測定
- (c) 政府の経済計画の矛盾性の発見およびその修正策の策定
- (d) 失業救済策の立案

とくに(c)は現在の視点からは奇異に見えるかもしれない。森嶋の記述が、先の戦争が「生産力による敗北」であった、という文章から始められていることから考えると、(c)項が意図するものは、必要とされる最終需要を満たすための各部門の生産計画が達成可能なものか、産業連関分析から得られる結果と現実の生産量の制約とを付き合わせることで判断できる、ということではないだろうか（必要な生産が制約により達成不可能である場合には、必要な最終需要を満たすことはできない、というわけである）。

4.3.2 付帯表型産業連関分析

付帯表とは、雇用や資本など本源的生産要素として取り扱われるものについて、各部門の直接投入量を記述したものである。この付帯表に逆行列係数を掛けることで、最終需要1単位あたりの本源的生産要素（primary input）の必要投入量を考慮することができる。本項では付帯表型産業連関分析として以下を紹介する。

- (1) 価格モデル
- (2) Leontief パラドックス
- (3) 内包型エネルギー（embodied energy）
- (4) 内包型環境負荷（インベントリ分析におけるバックグラウンドデータ）

(1) 価格モデル

価格モデルは、各部門の付加価値率と最終需要製品の価格の関係を表すモデルである。(4.6)で表される。

$$\mathbf{p} = \mathbf{v}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (4.6)$$

ただし

$\mathbf{v} = (v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n)$: 各部門の付加価値率からなる n 次元行ベクトル (n =部門数)

$\mathbf{p} = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n)$: 各部門の価格からなる n 次元行ベクトル

である。価格ベクトル \mathbf{p} は \mathbf{v} に変化を与えない初期時点においては、成分がすべて1である。付加価値税や原油価格の変化など、 \mathbf{v} が外生的要因により変化した場合の価格への影響を評価する場合に価格モデルが利用される。

基本モデルと価格モデルの間には

$$\mathbf{v}\mathbf{X} = \mathbf{p}\mathbf{F} = GDP \quad (4.7)$$

の関係が成り立つ。基本モデルと価格モデルの関係は双対関係にあるともいう。

(2) Leontief パラドックス^[8]

Leontief パラドックスとは、Leontief がアメリカ経済の構造を分析して得られた帰結（アメリカの平均的輸入財が平均的輸出財よりも資本集約的である）が、国際貿易の理論と反したことからパラドックスとよばれるようになったものである。

Leontief は、アメリカの輸出商品と輸入商品のそれぞれの生産に使用される労働と資本の総投入量を次式から求めた。

$$\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{L}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (4.8)$$

$$\tilde{\mathbf{K}} = \mathbf{K}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (4.9)$$

ただし

$\mathbf{L} = (l_1 \quad l_2 \quad \dots \quad l_n)$: 各部門の単位生産あたりの労働投入量からなる n 次元行ベクトル (n =部門数)

$\tilde{\mathbf{L}} = (\tilde{l}_1 \quad \tilde{l}_2 \quad \dots \quad \tilde{l}_n)$: 各部門の最終製品単位あたりの直接・間接労働投入量からなる n 次元行ベクトル

$\mathbf{K} = (k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n)$: 各部門の単位生産あたりの資本投入量からなる n 次元行ベクトル

$\tilde{\mathbf{K}} = (\tilde{k}_1 \quad \tilde{k}_2 \quad \dots \quad \tilde{k}_n)$: 各部門の最終製品単位あたりの直接・間接資本投入量からなる n 次元行ベクトル

この分析から得られた結論は、アメリカの平均的輸入財が平均的輸出財よりも資本集約的である、というものである。しかしこの結論は、国際貿易の定説であった、比較優位説²に反するものであった。比較優位説によれば、アメリカは資本集約的財を輸出し、労働集約的財を輸入すると考えられていたが、産業連関表による実証分析で、実際にはこの理論に反することが示唆された。

(3) 内包型エネルギー (embodied energy)

産業連関表を用いて各産業部門が産出する財の内包型エネルギーを計測する方法は Bullard and Herendeen^{[9][10]}により提案された。財の内包型エネルギーとは、最終需要で消費される財の生産のために直接・間接で必要となるエネルギーを指す。間接的なエネルギーとは、中間投入の財の生産に必要なエネルギーのことである。これはまさに LCA 的な概念そのものであるといえる（ただし、LCA においてはさらに製造設備の製造なども考慮している）。Bullard and Herendeen の論文が掲載された同じ特集に、LCA の草分け的研究である原子力発電のエネルギー収支分析の論文^[11]があるのは、まさに両者の密接な関係を示すものといえる（Energy Policy(1975)におけるエネルギー分析特集号）。

内包型エネルギーは以下のようにして導出される。

ある 1 つの部門 j について、エネルギーのバランス（図 4-4）を表したものが(4.10)である。

²比較優位説とは、生産要素として資本と集約があり、資本が相対的に豊富な国は資本集約的な財を輸出し、労働が相対的に豊富な国は労働集約的な財を輸出するというものである。

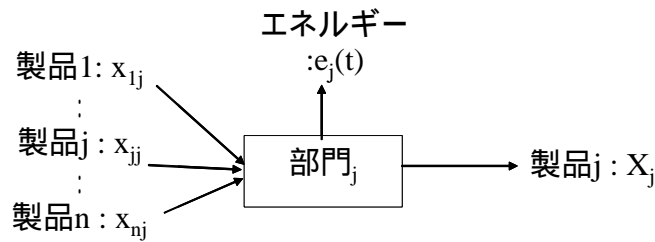


図 4-4 部門jでのエネルギーバランス

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot x_{ij} + e_j \cdot x_j = \varepsilon_j \cdot x_j \quad (4.10)$$

ただし

x_j : 製品jの総生産量 = プロセスjの稼働量

x_{ij} : 部門jに投入される製品iの量 (ただし $x_{ij} = a_{ij} \cdot x_j$)

ε_i : 製品iの内包型エネルギー原単位

e_j : 部門jで直接消費されるエネルギー原単位 (直接エネルギー原単位)

(4.10)の各項は

投入資材が負う間接的エネルギー消費量 (投入資材の生産で発生するエネルギー消費量)

+ 部門jでの直エネルギー消費量 = 製品の直接・間接エネルギー消費量

を表している。これが(4.10)は部門jでのエネルギー消費量のバランスを表しているということの意味である。

(4.10)は全ての部門について成り立つので、これを行列であらわすと(4.11)、(4.12)が得られる。

$$\varepsilon^T \mathbf{A} + \mathbf{e}^T = \varepsilon^T \quad (4.11)$$

$$\varepsilon^T = \mathbf{e}^T (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (4.12)$$

ただし

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} : \text{投入係数行列 (ただし } a_{ij} = x_{ij} / x_j \text{)}$$

$$\varepsilon^T = (\varepsilon_1 \cdots \varepsilon_n)$$

$$\mathbf{e}^T = (e_1 \cdots e_n)$$

(右上の T は転置(行と列の入れ替え)を表す記号)

である。

(4.12)より、直接エネルギー原単位から内包型エネルギー原単位を求めることができる。

産業部門全体からのエネルギー消費量 TotalE'は(4.13)で表される。

$$TotalE' = \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{X} = \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \mathbf{F} \quad (4.13)$$

一国のエネルギー消費量 TotalE は、これに最終需要部門での直接消費量を加えて(4.14)で表される。

$$\begin{aligned} TotalE &= \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{X} + \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{F} \\ &= (\boldsymbol{\varepsilon}^T + \mathbf{d}^T) \cdot \mathbf{F} \end{aligned} \quad (4.14)$$

ただし

\mathbf{d} : エネルギー消費係数ベクトル

以上で示した内包型エネルギー原単位の導出方法は、価格モデルや製品の労働・資本投入量の計測と同様の形式で、各産業部門の直接エネルギー消費原単位 $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ と $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ から導かれる。

(4) 内包型環境負荷 (インベントリ分析におけるバックグラウンドデータ)

内包型エネルギーを求める方法と同様に、各部門の直接環境負荷から最終需要で消費される財が負う内包型環境負荷 (直接・間接の環境負荷) を求める研究がある。環境負荷としては、CO₂ 排出量、大気汚染物質排出量、土地利用量 (エコロジカルフットプリント)、廃棄物排出量などが取り上げられている。このように産業連関分析の応用から求められた内包型環境負荷原単位は LCA のインベントリ分析において、バックグラウンドデータとして用いられることが多い。バックグラウンドデータとは、インベントリ分析においてフォアグラウンドデータとの対で用いられる語である。フォアグラウンドデータが LCA 実施者により収集されるデータ (例: LCA 対象製品の製造に使用される素材量) であるのに対し、バックグラウンドデータは他者による調査データ (素材の製造による環境負荷発生量) を指す。適当なバックグラウンドデータが存在しない場合に産業連関分析から得られた内包型環境負荷を使用する方法が簡便であることから多く用いられているのである。現在わが国では、産業連関表による CO₂ 排出原単位などについて、いくつかの機関からデータベースとして公表されている^{[12][13][14]}。

ただし、産業連関表の部門分類は最大でも 400 ~ 500 程度であり、詳細に分類された製品についての値を得ることはできない。すなわち、産業連関表から得られる内包型環境負荷は、いわば多様な製品をひとまとめに括った上での平均的な環境負荷を表したものといえる。産業連関分析から得られる環境負荷と意図する製品の環境負荷との間に存在する誤差によりインベントリ分析の結果にも誤差が発生する可能性が指摘されており、この誤差がどの程度の大きさかを見積もった研究がなされている^{[15][16][17][18][19]}。

産業連関表のデータに起因する誤差だけでなく、部門分類という操作そのものにより発生する誤差も存在することが知られている。この誤差は部門統合誤差あるいは部門統合バイアス^{[20][21]}とよばれ、理論的な面では古くに研究されていたが実際のデータを用いて検証した例は少ない。産業連関分析の部門統合誤差に関する検討と次項で述べる構造分解分析への影響に関しては本論文の付録³で述べる。

³ Appendix3 を参照のこと。

4.3.3 構造分解分析

産業連関分析の応用の一つである構造分解分析 (Structural Decomposition Analysis, SDA) は、経済の構造変化を生産技術構造の変化と最終需要構造の変化に分解して各々の寄与度を計測する方法である。構造分解分析は、一つの変数の変化を複数の要因の変化に分解し要因の寄与度を計測する要因分析の一種といえることができる。要因分析の例としては一国あるいは地域の CO₂ 排出量を

- (a) 人口
- (b) 一人当たり GDP
- (c) GDP あたりエネルギー消費
- (d) エネルギー消費あたり CO₂ 排出量

の要因に分解する Kaya equation^[22]による例がある。

$$CO_2\text{emission} = \frac{CO_2}{Energy} \times \frac{Energy}{GDP} \times \frac{GDP}{Population} \times Population \quad (4.15)$$

一次元の指標の要因分析を構造分解分析と区別して指標分解分析 (Index Decomposition Analysis, IDA) とよぶ場合もある。要因分析手法は、過去の環境負荷の変化要因を分析することに加え、将来の排出シナリオを考慮する場合にも利用される^[23]。

SDA は IDA を多部門に拡張した分析手法であるといえる。SDA では、IDA で考慮できない生産技術構造の変化、最終需要構造の変化を考慮することができる。IDA と SDA の関係については文献^{[24][25]}を参照されたい。

SDA の式展開を以下に示す。

産業部門別の環境負荷発生量について、最終需要 F によって産業部門の生産活動が誘発されそれにより環境負荷が発生すると考えると、各部門の最終需要によって誘発される環境負荷発生量は(4.16)で表される。

$$T = e(I - A)^{-1} \hat{F} \quad (4.16)$$

ただし

$e = (e_1 \quad \dots \quad e_n)$: 直接環境負荷原単位ベクトル

$T = (T_1 \quad T_n)$: 最終需要誘発環境負荷発生量ベクトル

\hat{F} : 対角化された最終需要行列

2 時点 $t \sim t+1$ における環境負荷発生量の変化は次式で表される。

$$\Delta T = e_{t+1}(I - A_{t+1})^{-1} \hat{F}_{t+1} - e_t(I - A_t)^{-1} \hat{F}_t \quad (4.17)$$

(4.17)は次のように各要因の変化に分解することが出来る。

$$\Delta T = \Delta e(\mathbf{I} - \mathbf{A}_t)^{-1} \mathbf{F}_t + \mathbf{e}_t \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{F}_t + \mathbf{e}_t (\mathbf{I} - \mathbf{A}_t)^{-1} \Delta \mathbf{F} + \mathbf{J} \quad (4.18)$$

この分解式では、環境負荷発生量の変化を

- (a) 直接負荷原単位要因 Δe
- (b) 逆行列要因（波及効果要因） $\Delta(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$
- (c) 最終需要要因 $\Delta \mathbf{F}$

に分解している。J は複数の変化による影響をまとめたもので交差項（あるいは交絡項）とよばれる⁴。以上のように環境負荷発生量の変化を産業構造の変化に帰着させる方法が要因分析とよばれるものである。

わが国の産業連関表に基づく SDA として、加河ら^{[27][28]}、田村^[25]、Yabe^[29]による研究がある。加河らは、ハイブリット型 SNA 産業連関モデルを構築し、1990 年と 1995 年の変化を分析している。この分析から、個別産業では省エネルギー型に変化しているのに対し、最終需要構造の変化によるエネルギー消費増加の影響が大きいという結論を得ている。田村による研究も同様の結論を得ている。Yabe は、各産業の相互関係の変化が CO₂ 排出量に及ぼした影響を計測している。

環境負荷として廃棄物発生量を対象とした研究には森川ら^[30]があるが、この研究で対象となっているのは産業連関表屑・副産物表に記載された廃棄物だけである。産業廃棄物全般を対象とした例はない。本論文の付録⁵において産業廃棄物全般に対して SDA を試みた結果を示す。

4.3.4 リサイクル・廃棄物処理の産業連関分析

(1) Leontief 型公害分析用連関モデル

リサイクル・廃棄物処理の問題に産業連関分析を適用した研究は Leontief^[31]が最初とされる。この研究は、通常の産業連関モデルに汚染物質除去部門を付加したもので、産業から発生する汚染物質と汚染物質除去部門の活動量の相互依存関係をモデル化したものである。Leontief 型公害分析用産業連関モデルの概要を図 4-5 に示す。

Leontief^[31]で提示されたモデルは実証的なものではなく、概念モデルであったが、このモデルの発表を受けて、わが国では硫酸化物等を対象とした産業連関表が作成された。

Leontief 型公害分析用産業連関モデルの要点は以下にまとめられる。

- (a) 想定する汚染物質受容量に対応する汚染除去部門の稼働量を算定できる
- (b) 汚染除去部門の稼働の影響を加味した各製品の内包型環境負荷を算定できる（汚染除去部門を考慮することで各製品の内包型環境負荷は増加する）

⁴ この交差項の解釈の問題は、構造分解分析に固有の問題として知られる。

また、分解式は交差項を適宜展開することで、次式のように異なる形で得ることが出来る。

$$\Delta T = \Delta e(\mathbf{I} - \mathbf{A}_{t+1})^{-1} \mathbf{F}_{t+1} + \mathbf{e}_{t+1} \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{F}_{t+1} + \mathbf{e}_{t+1} (\mathbf{I} - \mathbf{A}_{t+1})^{-1} \Delta \mathbf{F} + \mathbf{J}'$$

= ...

一般に n 個の要因がある場合には n! 個の分解式が可能である。このように、要因に重み付けする基準時点の違いで複数の等価な分解式が存在するという問題も構造分解分析に固有の問題である^[26]。

⁵ Appendix2 を参照のこと。

- (c) 汚染除去部門の稼働の影響を加味した各製品の価格を価格モデルから算定できる（汚染除去部門を考慮することで各製品の均衡価格は増加する）

このような利点を持つモデルに対して、次のような批判がある。

- (a') 産業連関表に追加する汚染除去部門の作表が精度よく出来るか
 (b') 汚染除去部門と産業部門との相互作用を目的とした産業連関分析は、その稼働規模があまりに違うことから、汚染除去部門を考慮したところで大きな変化は見られず、トリビアルな解しか得られないのではないか

リサイクル・廃棄物産業連関モデルの妥当性については次項で述べる。

	産業1	産業2	汚染除去	最終需要	生産
産業1	X_{11}	X_{21}	X_{31}	F_1	X_1
産業2	X_{12}	X_{22}	X_{32}	F_2	X_2
汚染物質	W_{13}	W_{23}	W_{33}	$-F_3$	X_3

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} + F_1 = x_1$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{32} + F_2 = x_2$$

$$w_{31} + w_{32} + w_{33} - F_3 = x_3$$

汚染物質の最終需要は受容量に相当する。発生量 $\sum w_{3i}$ と受容量 F_3 の差が汚染除去部門の生産量（稼働量）となる

図 4-5 Leontief 型公害分析用産業連関モデルの概要

(2) 廃棄物産業連関モデル

Leontief 型公害分析用産業連関モデルをベースに産業廃棄物・一般廃棄物の処理を産業連関モデルに組み込んだものが中村による廃棄物産業連関モデル^[32]である。Leontief 型モデルでは汚染種と汚染除去部門に一对一の対応を想定していたが、廃棄物産業連関モデルでは廃棄物の種類と廃棄物処理部門が必ずしも一对一の対応関係になくともよいようにモデル化されている（一般に廃棄物種類の方が多い）。その方法とは、廃棄物の種類ごとに廃棄物処理部門別処理割合をあらかじめ設定するというものである。この廃棄物種類ごとの廃棄物処理割合を表した行列は配分行列とよばれ、廃棄物処理シナリオに対応する。廃棄物産業連関モデルは、様々な廃棄物処理シナリオにおける環境負荷発生量を評価し、望ましい廃棄物処理シナリオを検討するためのモデルであるといえる。

中村はこの廃棄物産業連関モデルを用いて、一般廃棄物・産業廃棄物の処理シナリオとして

- (a) 廃棄物処理広域化
 (b) 廃棄物分別徹底化
 (c) 廃プラスチック高炉還元利用

を設定し、シナリオ分析をおこなっている。結果として、シナリオによらず一般産業の稼働量の変化率は 1%未満と微小である。変化が大きいのは、焼却灰発生量や埋め立て量など、廃棄物処理部門の変数である。この分析に関しては、廃棄物処理部門が一般産業に及ぼす影響という点では、インパクトの大

きい結果は得られていない。すなわち、廃棄物処理部門のみをモデル化した場合と廃棄物処理と産業連関モデルを結合した場合とで得られる結果に大きな違いはないのではないかと批判には十分に答えられない。

近藤・中村^[33]は、廃棄物産業連関モデルを線形計画モデルに拡張した WIO-LP モデルを構築している。WIO-LP モデルの目的は以下のようにまとめられる。

- (a) 特定の環境負荷を削減するために最適なシナリオを探索する
- (b) 実現可能なシナリオの集合をもとめる

近藤・中村は、WIO-LP モデルを用い、CO₂ 排出量削減と埋め立て処分量削減のトレードオフ関係を求めている。言い換えると、廃棄物処理シナリオの変更により達成可能な CO₂ 排出量削減・最終処分量削減の集合を求めている。

慶応義塾大学産業研究所のグループ^[34]では、鉄鋼・セメント・電力等の産業で発生する副産物の産業間リサイクルを記述するサブモデルを産業連関表に組み込んだモデルを構築している。このモデルを用い、リサイクル率の上昇と CO₂ 排出量の変化の関係をシミュレーションにより分析している。

産業連関分析を線形計画モデルに拡張した研究として松橋ら^[35]がある。松橋らは、通常の産業連関表に産業廃棄物の発生を表す行と廃棄物種類ごとに複数の処理・リサイクル部門を表す列を付加した拡張産業連関モデルを構築した。このモデルは廃棄物の種類より廃棄物処理・リサイクル部門の数の方が多いため、このモデルを用いた分析では、付加価値額最小化 $vx \rightarrow \min$ を目的関数として解を決定している。この目的関数は企業の費用最小化行動により状態が決定されるという前提に基づくものである。

(3) シナリオ分析型モデルと最適化型モデル

産業連関モデルは基本的に、一定の前提条件の下で各産業の生産額や各産業の CO₂ 排出量を計算するためのツールである。このような意味で、この“計算”は“予測 (prediction, forecast)”というより“推計 (projection)”とよぶ方が適切であろう。ここで“推計”とは、一定の条件・数式に基づいてある現象の変化後の状態 (近未来、あるいは一部条件が変化した場合の状態) を求めることを意味する用語である。

産業連関モデルの拡張は、それぞれの分析目的に応じた計算をおこなうためになされる操作である。拡張に付随して従来の計算が適用できなくなった場合にはそれを補うことが必要となる。具体的には、産業連関モデルの拡張により、通常正方形行列であった投入産出係数行列が非正方形行列となることで単純に逆行列をとって解を得ることができないため、別の方法を用いて解を求める必要があるということである。

解を求める方法の違いにより、拡張型産業連関モデルは大きく 2 種類に分けられる。最適化型モデル (線形計画モデル) とシナリオ分析型モデルである。最適化モデルでは、ある基準 (目的関数) を最適にするような解が決定される。このとき、目的関数の設定には 2 つの考え方がある。一つは、最適解の探索 (CO₂ 排出量のもっとも小さい解など) のために設定するというものである。もう一つは各産業の生産 (= モデルの解) の決定基準として目的関数を設定するというものである。この場合、一般的には、コスト最小となるように解が決定されるという前提により目的関数が設定される。

一方、シナリオ分析モデルは、産業連関モデル内にシナリオを表す変数を付加し、その変数に対応す

る結果を求める方式である。たとえばリサイクル率を表す変数を付加し、リサイクル率に対応する結果を求めることで、リサイクルとCO₂排出量の関係を分析することができる。

最適化モデルとシナリオ分析モデルは、原理的には最適化モデルが境界条件を明らかにすることに適しているのに対して、シナリオ分析モデルは内部の解を明らかにするものであるということが出来る。しかしながら最適化モデルでも制約条件を変えることで境界条件内部の解を得ることが出来るし、シナリオ分析モデルでも試行錯誤により境界条件を得ることが出来る。あるいはソルバー、ゴールシーク等により境界上での解を得ることが出来る。

すでに述べた既往の研究例では、シナリオ分析型モデルにあたるのが近藤・中村^[33]、慶応義塾大学産業研究所グループ^[34]であり、最適化型モデル（最適化による解の決定）にあたるのが松橋ら^[35]である。本研究のモデルはシナリオ分析型モデルにあたるが、後述する環境負荷削減のフロンティア曲線を求める際には解の境界条件を求める必要があり、最適化による解探索をおこなっているということも出来る。具体的には、エクセル上で構築されたモデルに対して、エクセルのアプリケーションであるゴールシークを用いて、一定の条件（各産業の生産額はゼロ以上等）の下でのシナリオのパラメータ（廃棄物のリサイクル率等）の最大値（あるいは最小値）を求めるという計算をおこなっている。

4.3.5 ハイブリッド・物量産業連関

Leontief が提唱した産業連関表は本来物量フローを通じた部門間の相互取引関係が想定されているが、実務的には金額ベースで計測される経済統計を加工して作成される。そのため産業間の相互依存関係の強度が取引額の大小として記述されていることになる。そこで産業連関分析では、これを円価値単位（ドルならばドル価値単位）としてあたかも物量として扱うという見なし操作がおこなわれる。しかし、このような見なし操作をおこなわずとも、物量データを用いて産業部門間の相互依存関係を記述する試みがなされている。

本項では、物量産業連関表(Physical Input Output Table, PIOT)と貨幣産業連関表(Monetary Input Output Table, MIOT)の関係を議論する。以下の議論はHara^[39]に基づく。

(1) 一物一価成立時

産業連関モデルにおいて、一物一価が成り立っている場合には、PIOT から得られる内包型環境負荷とMIOT から得られる内包型環境負荷は等しい。以下でこの関係が成り立つことを示す。

(4.1)の基本モデルに基づいた議論をおこなう。(4.1)の基本モデルが物量ベースのモデルであるとする。PIOT とMIOTの間には次の関係が成り立つ。

$$X' = PX \quad (4.19)$$

$$F' = PF \quad (4.20)$$

ただし

X：物量ベースの生産量ベクトル

F：物量ベースの最終需要量ベクトル

X'：金額ベースの生産額ベクトル

F'：金額ベースの最終需要額ベクトル

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & p_n \end{pmatrix} : \text{価格 (対角化) 行列, ただし } p_i = x'_i / x_i = f'_i / f_i$$

(4.1), (4.19), (4.20)から(4.21)が得られる.

$$\mathbf{X}' = \mathbf{PAP}^{-1}\mathbf{X}' + \mathbf{F}' \quad (4.21)$$

(4.21)は金額ベースの需給均衡式であるから, (4.22)のように表すことができる.

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}'\mathbf{X}' + \mathbf{F}' \quad (4.22)$$

ただし MIOT の投入係数行列と PIOT の投入係数行列は次の関係にある.

$$\mathbf{A}' = \mathbf{PAP}^{-1} \quad (4.23)$$

ここで, 内包型環境負荷のバランス式は, PIOT, MIOT おのこのについて成り立つ.

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \mathbf{e}^T(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (4.24)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}'^T = \mathbf{e}'^T(\mathbf{I} - \mathbf{A}')^{-1} \quad (4.25)$$

各部門の直接環境負荷は, 物量で測られるものであるから, PIOT と MIOT は次の関係にある.

$$\mathbf{e}'^T = \mathbf{e}^T\mathbf{P}^{-1} \quad (4.26)$$

$$(\because \mathbf{e}'^T\widehat{\mathbf{X}}' = \mathbf{e}^T\widehat{\mathbf{X}} \Leftrightarrow \mathbf{e}'^T\mathbf{P}\widehat{\mathbf{X}} = \mathbf{e}^T\widehat{\mathbf{X}})$$

ただし

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = (\varepsilon_1 \cdots \varepsilon_n)$$

$$\mathbf{e}^T = (e_1 \cdots e_n)$$

ε_i : 製品 i の内包型環境負荷原単位

e_j : 部門 j で直接発生する環境負荷原単位 (直接環境負荷原単位)

$\hat{\mathbf{P}}$: 対角化行列

である (再掲).

(4.23), (4.25), (4.26)より(4.27)が得られる.

$$\boldsymbol{\varepsilon}'^T = \boldsymbol{\varepsilon}'^T\mathbf{PAP}^{-1} + \mathbf{e}'^T\mathbf{P}^{-1} \quad (4.27)$$

(4.27)の両辺に右から \mathbf{P} を乗ると(4.28)が得られる.

$$\boldsymbol{\varepsilon}'^T\mathbf{P} = \boldsymbol{\varepsilon}'^T\mathbf{PA} + \mathbf{e}'^T \quad (4.28)$$

(4.28)を整理すると(4.29)となる.

$$\boldsymbol{\varepsilon}'^T\mathbf{P} = \mathbf{e}'^T(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (4.29)$$

(4.24)と(4.29)から次の関係が得られる。

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \boldsymbol{\varepsilon}'^T \mathbf{P} \quad (4.30)$$

以上より、部門 i の最終需要 f_i または f'_i に誘発される環境負荷 E_i は次のように表される。

$$E_i = \varepsilon_i \cdot f_i = \varepsilon'_i p_i \cdot p_i^{-1} f'_i = \varepsilon'_i \cdot f'_i \quad (4.31)$$

(4.31)より、一物一価が成り立っている場合には、PIOT から得られる内包型環境負荷と MIOT から得られる内包型環境負荷は等しいことが示された。

(2) 一物一価不成立時

一物一価が成り立っていない場合には、PIOT と MIOT の関係を価格対角化行列でつなげることはできない。部門取引についての価格行列の成分 p_{ij} を用いて次式で表される。

$$\begin{pmatrix} a'_{11} & \cdots & a'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{n1} & \cdots & a'_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11}a_{11} & \cdots & p_{1n}a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}a_{n1} & \cdots & p_{nn}a_{nn} \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

ただし

p_{ij} : 部門 i と部門 j の間の取引価格

一般に、MIOT と PIOT は(4.32)で表されるような関係にあるため、とくに同一財で部門間の価格差が大きい場合には物量表示をすることが望まれる。

(3) ハイブリッド産業連関表

通常の産業連関表は MIOT であるため、とくに考慮の対象とする製品の部門間の価格差が大きく、その製品の物量データが存在する場合には、その製品のフローのみを物量データにいかえた産業連関表を作成する操作がなされる場合がある。このような産業連関表を MIOT, PIOT に対してハイブリッド産業連関表とよぶ (HIOT の表記は一般的でない)。

既述の Bullard and Herendeen^{[9][10]}や加河ら^{[27][28]}もエネルギー関連部門を物量単位としたハイブリッド産業連関表を構築している。

(4) PIOT と MIOT の差異に関する議論

Hubacek and Giljum^{[40][41]}はドイツ経済について重量表示の PIOT を試作し、エコロジカルフットプリント (内包型土地利用量) の試算に用い、MIOT から得られる結果との相違について考察した。Hubacek and Giljum によれば、PIOT は MIOT よりも物量フローをよく表しているため、PIOT に基

づく結果を用いることが妥当であると結論した。この結論に対し、Suh^[42]は疑問を呈した。計算方法が同一であれば、PIOT と MIOT に違いはないはずで、Hubacek and Giljum の論文における PIOT と MIOT の違いは廃棄物の取り扱いに由来する、という指摘をした。これに対し Weisz and Duchin^[43]は、PIOT と MIOT の差異は一物一価の不成立に依存するもので、廃棄物の取り扱いにより生じる差異は計算方法の整理により解決できると述べた。Weisz and Duchin によれば、Hubacek and Giljum の作成した PIOT は 3 部門と極度に統合されていることが部門間での価格差を大きくし、そのことが MIOT の結果との乖離を生じさせた。以上の議論から、PIOT を作成する場合には適切な部門分割、適切な物量単位の採用、適切なデータソースの使用が不可欠であるという理解が共有されるにいたっているのが現状である。

4.3.6 その他のリサイクル・廃棄物処理分析における産業連関表の利用例

産業連関表を用いたリサイクルの環境分析には鉄鋼産業を対象とした例が多く、先行研究として松橋ら^[36]、戸井ら^[37]、吉田ら^[38]がある。松橋らは、将来の鉄屑回収量を推計するために、産業連関表を用いて各製品への鉄鋼投入量を算定している。これは後述するマテリアルフロー分析に産業連関表を利用するアプローチといえる。戸井らは、産業連関表の鉄鋼部門を詳細に分割し、一貫製鉄法と電炉法という異なる製鉄によるプロセスの直接・間接 CO₂ 排出量を評価している。吉田らは、結合生産を明示的に扱える三次元産業連関表を開発し、三次元産業連関価格モデルにより、鉄鉱石や化石燃料の価格上昇による鉄鋼価格上昇の鉄屑リサイクルによる緩和効果を分析している。

廣部ら^[44]は産業廃棄物のリサイクルによる環境負荷低減効果を産業連関表を用いて推計している。廃棄物をリサイクルすることにより、産業連関表中のバージン財製造部門、廃棄物処理部門の産出額が変化、その波及効果を収束計算により求めるモデルを作成している。作成したモデルを用い、マテリアルリサイクル、サーマルリサイクルの環境負荷（エネルギー消費、CO₂、NO_x、SO_x、廃棄物排出）低減効果を推計し、重油代替サーマルリサイクルがエネルギー消費削減に有効であるのに対し、電気代替サーマルリサイクルが CO₂、NO_x、SO_x 削減に有効であるという結果を得ている。

安達ら^[45]は産業連関表を基にしたモデルにより、一般廃棄物を産業間でリサイクルするシステムについて、廃棄物リサイクルの最終処分削減量および GDP への影響を評価している。モデルを用いて費用対効果が優れた各産業部門でのリサイクル量を算定している。

4.4 拡張型産業連関モデル

4.4.1 モデルの概要

はじめに本研究で構築したモデルの概要を説明する。

本モデルは平成 7 年度産業連関表 32 部門表^[23]を基としている。ただしセメント部門と砂利砕石部門はそれぞれ窯業土石部門、鉱業部門から分離して適宜詳細化している。とくにセメント部門はさらにクリンカ製造工程とセメント混合工程の二つに分け、それぞれ使用原料別に製造部門を設定している。廃棄物を利用するセメント部門での廃棄物の投入係数はセメント原料の調合計算に基づいて決定している。これに関連して各産業からの廃棄物の発生とセメント部門でのリサイクル、処理部門での処理のフローを表す行を追加した。さらに同一財を生産する複数のプロセスの稼働量を設定するためのシナリオ

行を追加している。シナリオ行を追加することで拡張産業連関モデルの列数と行数が一致し、逆行列を求めることで解を得ることが出来るようになる。

なお、本研究ではセメント原料に利用される廃棄物として

- (a) 高炉製鉄所から排出される高炉スラグ
- (b) 石炭火力発電所から排出される石炭飛灰
- (c) 一般廃棄物焼却場から排出される焼却主灰
- (d) 一般廃棄物焼却場から排出される焼却飛灰

の4種類を扱う。高炉スラグ・石炭飛灰は有価で取引される場合には副産物とよばれるが、需要が下回った場合にはなんらかの処分が必要とされるという点では潜在的廃棄物といえるものであることから、本研究では廃棄物という呼称で統一する。

モデルの概略を図 4-6 に示す。

産出係数行列E

部門数	部門数	32	11	4
		32部門	砂利碎石・セメントプロセス	廃棄物処理
32	32部門	E_I	0	0
3	砂利碎石・セメント製品	0	E_{IV}	0
4	廃棄物	W	0	0
8	シナリオ行	0	0	0

投入係数行列A

部門数	部門数	32	11	4
		32部門	砂利碎石・セメントプロセス	廃棄物処理
32	32部門	A_I	A_{III}	0
3	砂利碎石・セメント製品	A_{II}	A_{IV}	0
4	廃棄物	0	R	I
8	シナリオ行	S_I	S_{II}	S_{III}

最終需要行列F

最終需要
F_1
F_2
G
S_{IV}

生産額・稼働量ベクトルX

生産額・稼働量	X_1	X_2	X_3
---------	-------	-------	-------

図 4-6 拡張産業連関モデルの概略

上図に表されているように、需給均衡式は通常のプロセス連関分析と同様に(4.4)で表される。

$$AX + F = EX \quad (4.4)$$

(4.4)を部分行列形式で表すと(4.33)で表される．

$$\begin{pmatrix} A_I & A_{III} & 0 \\ A_{II} & A_{IV} & 0 \\ 0 & R & I \\ S_I & S_{II} & S_{III} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ G \\ S_{IV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_I & 0 & 0 \\ 0 & E_{IV} & 0 \\ W & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

ここで、 X は各産業の生産額(ただし、砂利砕石部門・セメント部門では生産量、廃棄物処理部門では処理量)であり、添え字1～3はそれぞれ一般産業、砂利砕石・セメントプロセス、廃棄物処理プロセスに対応している。 A は投入係数行列、 E は産出係数行列、 W は廃棄物発生行列、 R はセメントプロセスでの廃棄物投入係数行列、 G は一般廃棄物焼却灰の発生行列である。添え字I～IVは部分行列の区別のためのものである。

シナリオ行列 S は、同一財を生産する複数のプロセスが存在する場合にそれぞれのプロセスの稼働率を規定するためのもので、 S 中の変数を設定することでさまざまな処理パターンでの環境負荷を求めることが出来る。詳細は4.4.6で述べる。

(4.33)を展開し部分行列の積の形で表すと、財・物質別の需給均衡式として表される。

・通常の財の需給均衡式

$$A_I X_1 + A_{III} X_2 + F_1 = E_I X_1 \quad (4.34)$$

・砂利砕石・セメント製品の需給均衡式

$$A_{II} X_1 + A_{IV} X_2 + F_2 = E_{IV} X_2 \quad (4.35)$$

・廃棄物の需給均衡式(物質収支式)

$$R X_2 + X_3 + G = W X_1 \quad (4.36)$$

・シナリオ方程式

$$S_{IV} = S_I X_1 + S_{II} X_2 + S_{III} X_3 \quad (4.37)$$

最終需要に拡張産業連関モデルの係数行列の逆行列をかけることで、所与の最終需要・シナリオのもとでの各部門の生産量、廃棄物の利用量・最終処分量が得られる。さらに、各部門の生産量にCO₂発生原単位を乗じることでCO₂発生量が得られる。ただし一般産業部門のCO₂発生原単位は国立環境研究所のデータを用いた。セメント生産プロセスのCO₂発生原単位は第3章で得られた値を用いた。

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_I - A_I & -A_{III} & 0 \\ -A_{II} & E_{IV} - A_{IV} & 0 \\ W & -R & -I \\ -S_I & -S_{II} & -S_{III} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ G \\ S_{IV} \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

$$TotalCO_2 = (e_1 \quad e_2 \quad e_3) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (4.39)$$

4.4.2 拡張産業連関モデル構築の詳細-1（一般産業部門）

(1) 金額ベース連関表の部門分類改編

平成7年度産業連関表32部門表のうち、セメント部門と砂利砕石部門はそれぞれ窯業土石部門、鋳業部門から分離して適宜詳細化した。とくにセメント部門はさらにクリンカ製造とセメント製造の二つに分け、それぞれ使用原料別に製造部門を設定した。セメント部門と砂利砕石部門はそれぞれ窯業土石部門、鋳業部門から分離して適宜詳細化した。すなわち、窯業土石部門と鋳業部門については、取引基本表を基に、列ベクトルとしてはセメント部門とその他窯業土石部門、砂利砕石部門とその他鋳業部門に分離し、投入財量を32部門に統合することで作成した。このようにして30部門+4部門表を作成した(図4-7)。

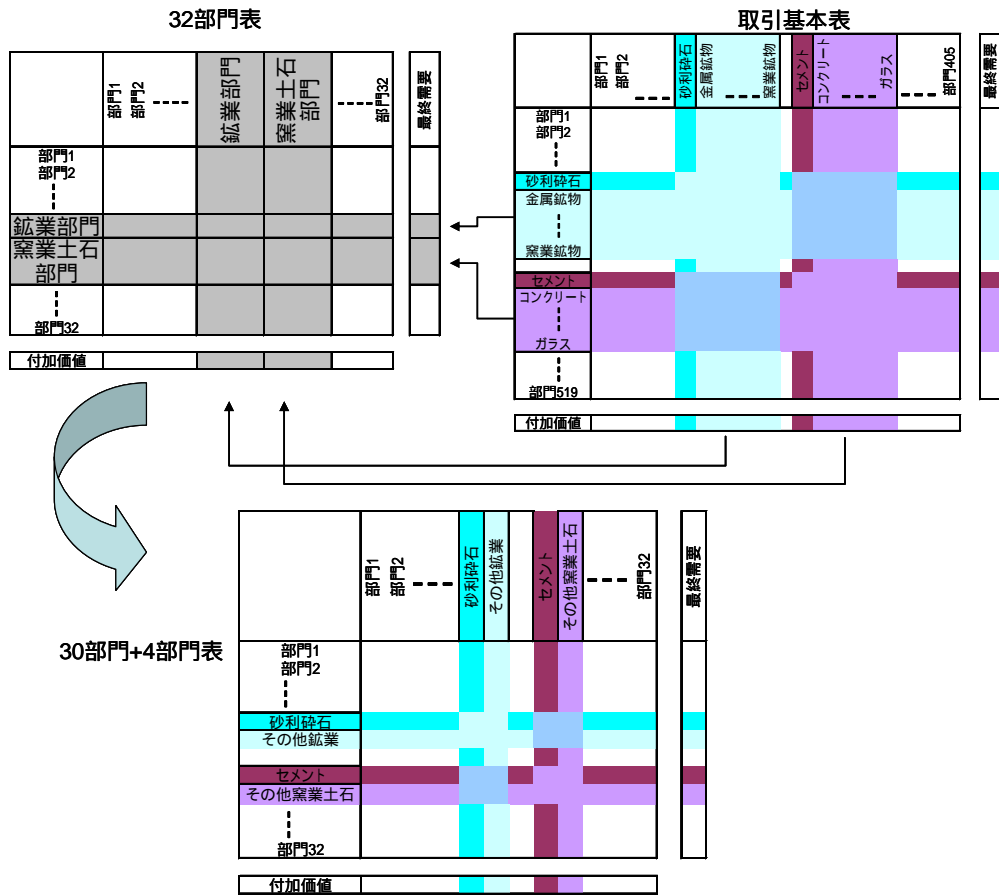


図 4-7 拡張産業連関モデル構築の詳細 1 部門分類の改編

(2) 物量変換

セメント部門および砂利砕石部門から他部門への投入量を物量表の値と入れ替えた(図 4-8)。

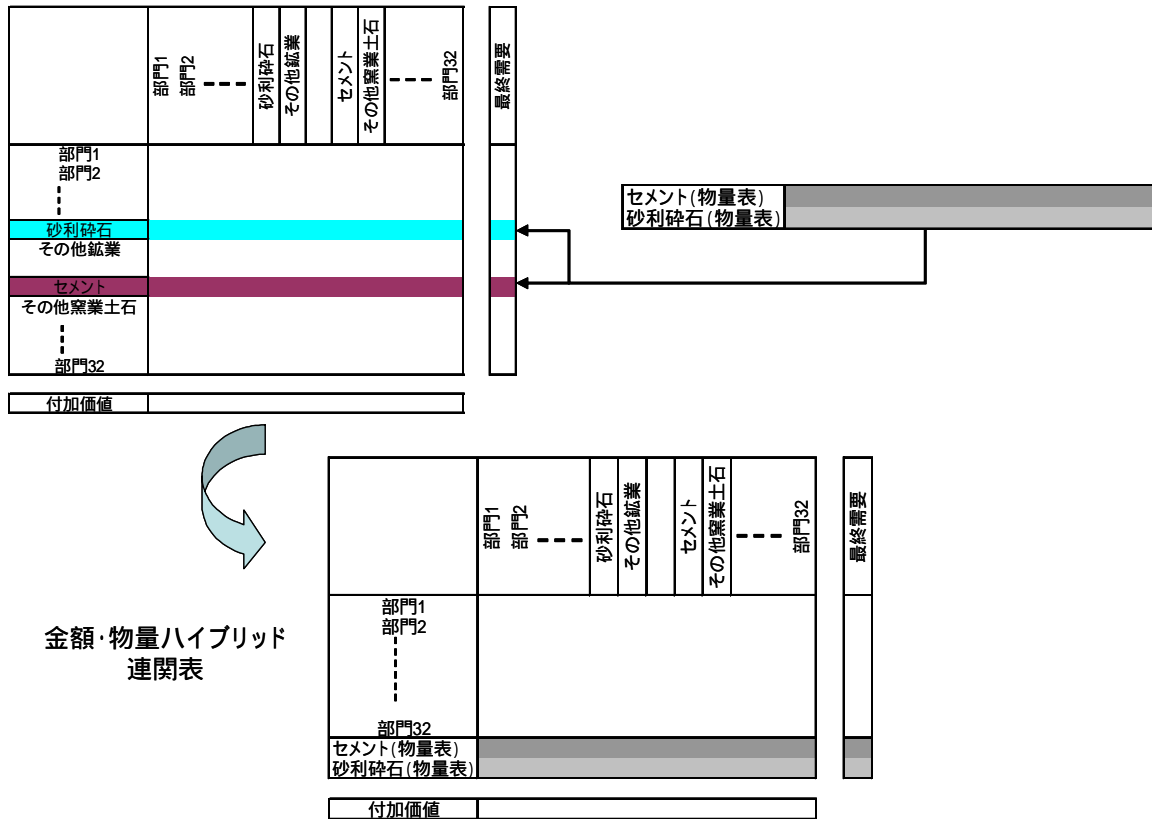


図 4-8 拡張産業連関モデル構築の詳細 2 一部物量変換

4.4.3 拡張産業連関モデル構築の詳細-2 (セメント生産プロセス)

一部門として分類されていたセメント部門を原料として利用する廃棄物種類別に詳細に分割した。まず大きくクリンカ製造工程とセメント混合工程に分割した。セメント部門への中間投入量はすべてクリンカ製造工程に帰属するものとした。セメント混合工程への通常の財の中間投入量はゼロとした(クリンカおよび高炉スラグ・石炭飛灰がセメント混合工程の中間投入物である)。

(1) クリンカ製造工程

廃棄物を利用する原単位ごとにプロセスを設定する。クリンカ製造工程をこの複数のプロセスベクトルの一次結合として表すことができる。

調合計算の制約によって規定される実行可能解領域(廃棄物の利用可能範囲)に一致するには、この実行可能領域の端点をベクトルとするベクトルの集合の一次結合で表すことが必要十分である。プロセス設定の方法を以下で説明する。

第3章で示した廃棄物利用原単位を求める調合計算の数式(3.16), (3.17)を、クリンカ生産量 T における廃棄物利用量を求める式に変換したものを(4.40), (4.41)に示す。

$$\begin{pmatrix} \dots a_{Ci} - HM(a_{Si} + a_{Ai} + a_{Fi}) \dots \\ \dots a_{Si} - SM(a_{Ai} + a_{Fi}) \dots \\ \dots a_{Ai} - IM \times a_{Fi} \dots \\ \dots 1 - a_{li} \dots \end{pmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ T \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dots a_{Ck} - HM(a_{Sk} + a_{Ak} + a_{Fk}) \dots \\ \dots a_{Sk} - SM(a_{Ak} + a_{Fk}) \dots \\ \dots a_{Ak} - IM \times a_{Fk} \dots \\ \dots 1 - a_{lk} \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ x_k \\ \vdots \end{pmatrix} \end{bmatrix} \geq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.40)$$

$$\begin{pmatrix} \dots Cl_0 - a_{hi} \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dots a_{Ci} - HM(a_{Si} + a_{Ai} + a_{Fi}) \dots \\ \dots a_{Si} - SM(a_{Ai} + a_{Fi}) \dots \\ \dots a_{Ai} - IM \times a_{Fi} \dots \\ \dots 1 - a_{li} \dots \end{pmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ T \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dots a_{Ck} - HM(a_{Sk} + a_{Ak} + a_{Fk}) \dots \\ \dots a_{Sk} - SM(a_{Ak} + a_{Fk}) \dots \\ \dots a_{Ak} - IM \times a_{Fk} \dots \\ \dots 1 - a_{lk} \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ x_k \\ \vdots \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

$$+ \sum_k (Cl_0 - a_{hk}) x_k \geq 0$$

簡単のため(4.40) , (4.41)を(4.42)と表す .

$$\mathbf{b} - \mathbf{B}\mathbf{X} \geq \mathbf{0} \quad (4.42)$$

ただし , \mathbf{b} は定数項の 5 次元ベクトルである . \mathbf{b} は廃棄物使用量がゼロの時の原材料使用原単位および

塩素濃度許容量である . $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \vdots \\ x_k \\ \vdots \end{pmatrix}$ で , 4 種類の廃棄物使用量 (高炉スラグ , 石炭飛灰 , 焼却主灰 , 焼却

飛灰) を表す 4 次元ベクトルである .

この連立不等式の解領域は端点をベクトルとする線形結合として表される .

$$\mathbf{X} = \sum_{j=1} t_j \mathbf{Z}_j \quad (4.43)$$

ただし $\mathbf{Z}_j = \begin{pmatrix} \vdots \\ z_{kj} \\ \vdots \end{pmatrix}$ で解領域の端点をあらわす . ベクトルの成分 z_{kj} は , 高炉スラグ , 石炭飛灰 , 焼却

主灰 , 焼却飛灰の使用原単位を表す . $t_0 + \sum_{j=1} t_j = T$ である . T はクリンカ生産量である . t_0 は廃棄物を

利用しないクリンカ生産量に相当する . $T=1$ のときには \mathbf{X} は廃棄物使用原単位ベクトルとなる .

(4.42)と(4.43)の関係を , 2 種類の廃棄物 (\mathbf{p} , \mathbf{q}) の場合を例に図で表したものを図 4-9 に示す . この例では , 2 本の制約式と 2 本の軸で囲まれた領域が解領域となる . この 2 本の制約式は , 廃棄物を最大限利用した場合には不等式の左辺の値がゼロとなる式であり , 廃棄物利用の上限を決定する要因を表すものである . 解領域は , この制約式の交点 (解領域の端点) と原点を結ぶベクトルの線形結合で表すことができる .

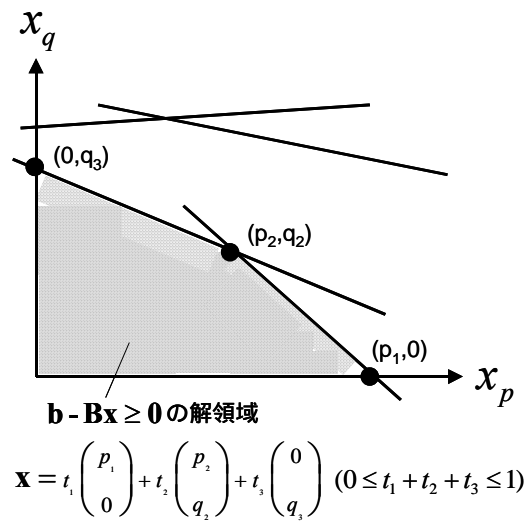


図 4-9 調合計算により求められる廃棄物使用量のベクトル表現の例

端点の探索方法は線形計画法におけるスラック変数を導入したうえでの総当り法をとることになる。4変数、5本方程式=5つのスラック変数を合わせた9変数のうち、4つの変数にゼロを代入した時の解がすべて非負をとるとき、その解は端点となる。

端点の探索においては、本モデルの場合、 $9C_5 = 126$ 個の組み合わせを総当りしなければならないが、以下に述べる理由により実際の計算ではかなり簡略化される。それは、ボトルネックとなる要因（制約式がゼロとなる要因）が共通のものが存在するからである。高炉スラグと石炭飛灰は粘土使用量がボトルネックとなる（高炉スラグおよび石炭飛灰の使用量は粘土使用量がゼロとなることにより上限が制約される）。焼却主灰と焼却飛灰は塩素濃度が制約となる。このモデルでの制約となり得る要因は2つ（粘土使用量と塩素濃度）であることから、(4.42)の解領域はこの2つの制約式が表す平面に囲まれた領域となる。端点は2つの制約式の交点、あるいは制約式と各変数の軸との交点となることから、端点は次の8種類に限定されることがわかる。

表 4-1 解領域の端点

No.	高炉スラグ	石炭飛灰	焼却主灰	焼却飛灰
1	z_{11}	0	0	0
2	0	z_{22}	0	0
3	0	0	z_{33}	0
4	0	0	0	z_{44}
5	z_{15}	0	z_{35}	0
6	z_{16}	0	0	z_{46}
7	0	z_{27}	z_{37}	0
8	0	z_{28}	0	z_{48}

(4.42)の左辺の値は原材料使用量である。(4.42)より、原材料使用量の値は使用する廃棄物量により一意に定まることがわかる。すなわち石灰石使用量について廃棄物使用量で一意に定まることから、廃棄物使用量とCO₂排出量の関係も一意に定まる。言い換えれば、各クリンカプロセスの稼働量 t_j が異なるが (例; $\sum_j t_j Z_j = \sum_j t'_j Z_j$)、廃棄物の使用量が同一となる場合が存在し、その場合プロセス稼働量の相違によらずCO₂排出量は等しいということである。

以上の方法で設定したクリンカ製造工程の廃棄物利用原単位とCO₂排出原単位を示す。

表 4-2 クリンカ製造工程の廃棄物利用原単位とCO₂排出原単位

No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	天然	高炉スラグ	石炭飛灰	焼却主灰	焼却飛灰	高炉・焼却主灰	高炉・焼却飛灰	石炭飛灰・焼却主灰	石炭飛灰・焼却飛灰
高炉スラグ	0	0.289	0	0	0	0.224	0.039	0	0
石炭飛灰	0	0	0.140	0	0	0	0	0.107	0.018
焼却主灰	0	0	0	0.097	0	0.090	0	0.095	0
焼却飛灰	0	0	0	0	0.184	0	0.180	0	0.182
CO ₂ 排出	0.849	0.696	0.855	0.786	0.838	0.720	0.766	0.843	0.787

単位：t-廃棄物/t-クリンカ，tCO₂/t-クリンカ

(2) セメント混合工程

セメント混合工程は、セメントの種類（ポルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュセメント）ごとに廃棄物利用原単位を設定した。数値は、島^[47]を参考にした。

4.4.4 拡張産業連関モデル構築の詳細-3（廃棄物利用プロセス）

クリンカ製造工程以外の廃棄物利用プロセスについて述べる。

(1) 廃棄物発生源単位

各産業部門からの廃棄物発生量を計上した。高炉スラグは鉄鋼部門からのみの発生とし、石炭灰は各産業の燃料用石炭消費量と石炭の石炭灰発生原単位から算出した。各産業の石炭消費量は物量表の値を用いた。

(2) 砂利砕石生産プロセス

一部門として分類されていた砂利砕石部門を(a)天然資源原料、(b)高炉スラグ原料、(c)石炭飛灰原料の3つに分割した。ただし、通常の財の投入量はすべて(a)天然資源原料に帰属するとし、高炉スラグ・石炭飛灰を原料とするプロセスでの投入量はゼロとした。これは、簡易的取り扱いとなるが、廃棄物のセメント産業での利用に注目するという本研究の目的の下では正当化できる。高炉スラグ・石炭飛灰を原料とするプロセスでの投入量はゼロとすることは、セメント産業での利用増加の影響として、他産業での廃棄物利用の減少によるマイナス要因を最大に見積もるケースに相当する。すなわち、できる限り控えめな（conservative）評価ということになる。

(3) 最終処分プロセス

廃棄物が産業部門で利用されない場合には最終処分されると想定し、廃棄物別に最終処分プロセスを追加した。ただし、プロセスでの通常の財の投入量はゼロとしている。これも簡易的取り扱いであるが、廃棄物のセメント産業での利用に注目するという本研究の目的の下では妥当である（図 4-10）。

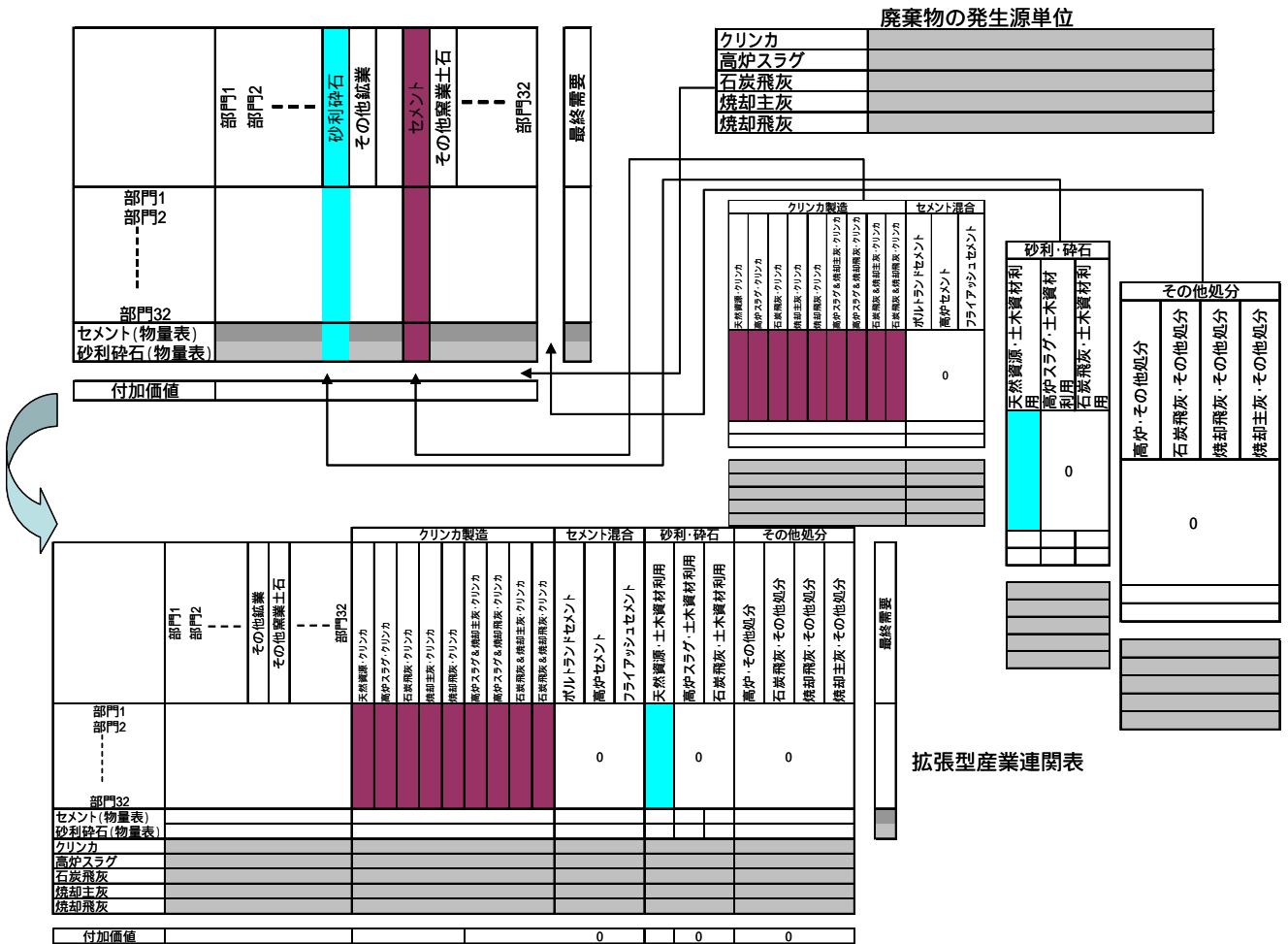


図 4-10 拡張産業連関モデル構築の詳細 3 廃棄物利用プロセスの導入

4.4.5 拡張産業連関モデル構築の詳細-4 (シナリオ行列)

拡張産業連関表は行数と列数が一致しないため、通常の産業連関分析のように逆行列をとることができず、このままでは分析に利用することができない。この問題を解決するためには大きく二つの方法がある。一つは線形計画モデルとし、最適解を求めることで解を得るという方法である。もう一つは行あるいは列を付加して行数と列数を一致させるというものである。この場合、付加した行あるいは列は新たな制約条件となり、分析のシナリオに対応することになる。

前項までで作成した拡張産業連関表は

行数：通常財 32 + 廃棄物 4 + 砂利砕石 1 + セメント 1 + クリンカ 1 = 39

列数：通常産業 32 + クリンカ・セメント部門 12 + 砂利砕石 3 + 最終処分 4 = 51

である。よって、行数と列数を一致させるために、12本のシナリオ行を付け加えた。

拡張産業連関表において列数の数が多いということは、一般に一つの財を複数の部門が生産する状況
を表現しているためである（行数が多い場合は一つの部門で複数の財を生産する結合生産の状況を表現
しているため）。

本研究での拡張産業連関表では、セメントを3つのプロセスで、クリンカを9つのプロセスで、砂利
砕石を3つのプロセスで生産している状況を表現しているため、廃棄物を利用するプロセスの生産量を
あらかじめ与える形でシナリオ行を付加した。

4.4.6 シナリオ設定

シナリオ設定の詳細を示す。

シナリオ行は12本。セメントについて2本、クリンカ8本、砂利砕石2本である。設定方法は、セ
メント生産量に占める割合として混合セメント生産量を指定するもの、クリンカ生産量に占める割合と
してクリンカ生産量を指定するもの、廃棄物を原料とする砂利砕石生産量を直接指定するものである。

12のシナリオ変数によって、この値を指定できるようにする。

表 4-3 シナリオ変数一覧

シナリオ変数	備考
S ₁	セメント生産量に占める高炉セメント生産量の割合
S ₂	セメント生産量に占める石炭飛灰セメント生産量の割合
S ₃	高炉スラグ発生量に占めるクリンカ原料としての使用量の割合
S ₄	石炭飛灰発生量に占めるクリンカ原料としての使用量の割合
S ₅	焼却主灰発生量に占めるクリンカ原料としての使用量の割合
S ₆	焼却飛灰発生量に占めるクリンカ原料としての使用量の割合
S ₇	焼却主灰発生量に占める高炉スラグ&焼却主灰・クリンカプロセスによる焼却主灰使用量の割合
S ₈	焼却飛灰発生量に占める高炉スラグ&焼却飛灰・クリンカプロセスによる焼却飛灰使用量の割合
S ₉	焼却主灰発生量に占める石炭飛灰&焼却主灰・クリンカプロセスによる焼却主灰使用量の割合
S ₁₀	焼却飛灰発生量に占める石炭飛灰&焼却飛灰・クリンカプロセスによる焼却飛灰使用量の割合
S ₁₁	高炉スラグ発生量に占める砂利砕石原料としての使用量の割合
S ₁₂	石炭飛灰発生量に占める砂利砕石原料としての使用量の割合

シナリオ変数は(4.44)～(4.55)で定義される。

$$S_1 = \frac{x_{39}}{x_{38} + x_{39} + x_{40}} \quad (4.44)$$

$$S_2 = \frac{x_{40}}{x_{38} + x_{39} + x_{40}} \quad (4.45)$$

$$s_3 = \frac{r_{1,34}x_{34}}{\sum_{j=1}^{32} w_{1j}x_j} \quad (4.46)$$

$$s_4 = \frac{r_{2,35}x_{35}}{\sum_{j=1}^{32} w_{2j}x_j} \quad (4.47)$$

$$s_5 = \frac{r_{3,36}x_{36}}{g_{38}} \quad (4.48)$$

$$s_6 = \frac{r_{4,37}x_{37}}{g_{39}} \quad (4.49)$$

$$s_7 = \frac{r_{3,38}x_{38}}{g_{38}} \quad (4.50)$$

$$s_8 = \frac{r_{4,39}x_{39}}{g_{39}} \quad (4.51)$$

$$s_9 = \frac{r_{3,40}x_{40}}{g_{38}} \quad (4.52)$$

$$s_{10} = \frac{r_{4,41}x_{41}}{g_{39}} \quad (4.53)$$

$$s_{11} = \frac{x_{46}}{\sum_{j=1}^{32} w_{1j}x_j} \quad (4.54)$$

$$s_{12} = \frac{x_{47}}{\sum_{j=1}^{32} w_{2j}x_j} \quad (4.55)$$

表 4-4 に変数一覧を示す .

表 4-4 シナリオ変数の定義式に関わる変数一覧

変数	説明
x_{33}	天然資源・クリンカ生産量
x_{34}	高炉スラグ・クリンカ生産量
x_{35}	石炭飛灰・クリンカ生産量
x_{36}	焼却主灰・クリンカ生産量
x_{37}	焼却飛灰・クリンカ生産量
x_{38}	高炉スラグ & 焼却主灰・クリンカ生産量
x_{39}	高炉スラグ & 焼却飛灰・クリンカ生産量
x_{40}	石炭飛灰 & 焼却主灰・クリンカ生産量
x_{41}	石炭飛灰 & 焼却飛灰・クリンカ生産量
x_{42}	ポルトランドセメント生産量
x_{43}	高炉セメント生産量
x_{44}	フライアッシュセメント生産量
x_{45}	天然資源・砂利砕石生産量
x_{46}	高炉スラグ・砂利砕石生産量
x_{47}	石炭飛灰・砂利砕石生産量
$r_{1,34}$	クリンカ・高炉スラグ投入原単位
$r_{2,35}$	クリンカ・石炭飛灰投入原単位
$r_{3,36}$	クリンカ・焼却主灰投入原単位(焼却主灰・クリンカ)
$r_{4,37}$	クリンカ・焼却飛灰投入原単位(焼却飛灰・クリンカ)
$r_{3,38}$	クリンカ・焼却主灰投入原単位(高炉スラグ & 焼却主灰・クリンカ)
$r_{4,39}$	クリンカ・焼却飛灰投入原単位(高炉スラグ & 焼却飛灰・クリンカ)
$r_{3,40}$	クリンカ・焼却主灰投入原単位(石炭飛灰 & 焼却主灰・クリンカ)
$r_{4,41}$	クリンカ・焼却飛灰投入原単位(石炭飛灰 & 焼却飛灰・クリンカ)
w_{1j}	高炉スラグ発生原単位 . $j=1-32$
w_{2j}	石炭飛灰発生原単位 . $j=1-32$
w_{3j}	焼却主灰発生原単位 . $j=1-32$. すべてゼロ値
w_{4j}	焼却飛灰発生原単位 . $j=1-32$. すべてゼロ値
g_{38}	焼却主灰発生量
g_{39}	焼却飛灰発生量

シナリオ行列を用いてシナリオを表したシナリオ方程式(4.37)は、(4.44)～(4.55)と同値である。(4.44)～(4.55)の各式の右辺分母を左辺のシナリオ変数に乘じ、式を整理すればシナリオ方程式(4.37)となる。

4.4.7 現状のシナリオ変数値

1995年の廃棄物利用の現状値を用い、シナリオ変数の実績値を求めた。推計の手順を以下の通りである。

- (i) 種類別のセメント生産量実績値より $x_{38} \sim x_{40}$ が決定され、セメント混合工程での各廃棄物使用量が決定される。
- (ii) 廃棄物のセメント原料利用量実績値と(i)で決定されたセメント混合工程での使用量の差から廃棄物のクリンカ製造工程での使用量が決定され、各工程の稼動量が決定される。

(iii) クリンカ需要量と各クリンカ製造工程稼働量の差から天然資源利用クリンカ製造工程の稼働量が決定される。

以上の手順で求めた 1995 年現状値を示す。

表 4-5 シナリオ変数の 1995 年現状値

シナリオ行	シナリオ変数	1995年現状値
高炉スラグ・セメント	S ₁	0.183
石炭飛灰・セメント	S ₂	0.010
高炉スラグ・クリンカ	S ₃	0.237
石炭飛灰・クリンカ	S ₄	0.408
焼却主灰・クリンカ	S ₅	0
焼却飛灰・クリンカ	S ₆	0
高炉スラグ・砂利碎石	S ₇	0.420
石炭飛灰・砂利碎石	S ₈	0.237
高炉スラグ+焼却主灰・クリンカ	S ₉	0
高炉スラグ+焼却飛灰・クリンカ	S ₁₀	0
石炭飛灰+焼却主灰・クリンカ	S ₁₁	0
石炭飛灰+焼却飛灰・クリンカ	S ₁₂	0
廃棄物利用量(t)		1995年現状値
高炉スラグ・セメント		8,064,721
石炭飛灰・セメント		187,234
高炉スラグ・クリンカ		5,562,675
石炭飛灰・クリンカ		2,908,146
焼却主灰・クリンカ		0
焼却飛灰・クリンカ		0

表 4-6 環境負荷排出量の 1995 年現状値

環境負荷	排出量
CO ₂ 排出量	1,104,815,207 t-CO ₂
最終処分量	8,022,621 t

4.5 シナリオ分析

4.5.1 CO₂ 排出削減効果

構築した拡張型産業連関モデルを用い、セメント産業での廃棄物利用による CO₂ 排出削減ポテンシャルを推計した。混合セメントの最終需要は 1995 年の現状値で固定し、クリンカ製造工程の稼働量を変化させ、クリンカ製造工程での廃棄物の利用量が変化した場合の CO₂ 排出量の変化を求めた。設定したシナリオの概要を表 4-7 に示す。表に示していないシナリオ変数は 1995 実績値から変化させていない。

シナリオ 1-1 では、現状で砂利・碎石として利用されていた高炉スラグがすべてクリンカ原料として利用される。シナリオ 1-2 では、クリンカ原料として利用されている石炭飛灰がすべて最終処分に回り、発生した焼却主灰・飛灰がすべてクリンカ原料として利用される。このシナリオは、第 3 章の LCA の結果に基づくと CO₂ 排出量を最小するシナリオとなる（石炭飛灰のクリンカ原料としての利用は CO₂

増加となり、それ以外の廃棄物の利用はCO₂減少に有効となるため)。

表 4-7 シナリオ設定1 CO₂ 排出削減効果

シナリオ	概要	結果
1995実績		-
シナリオ1-1	高炉スラグ最大利用	道路路盤材として利用される高炉スラグ クリンカ原料として利用
シナリオ1-2	CO ₂ 最小化	クリンカ原料として利用される石炭飛灰 最終処分 最終処分される焼却主灰・焼却飛灰 クリンカ原料として利用

シナリオごとの廃棄物の利用・処分の内訳結果を図 4-11 に示す。各シナリオのCO₂削減量を図 4-12 に示す。

シナリオ 1-1 の高炉スラグの利用増加により、CO₂ 排出量は約 520 万 t-CO₂ 削減されるという結果が得られた。シナリオ 1-2、シナリオ 1-3 による削減効果は小さい。

1995 年実績とシナリオ 1-3 の CO₂ 排出量の差は 620 万 t-CO₂ である。この値がすなわちセメント産業での廃棄物利用による CO₂ 排出削減ポテンシャルである。

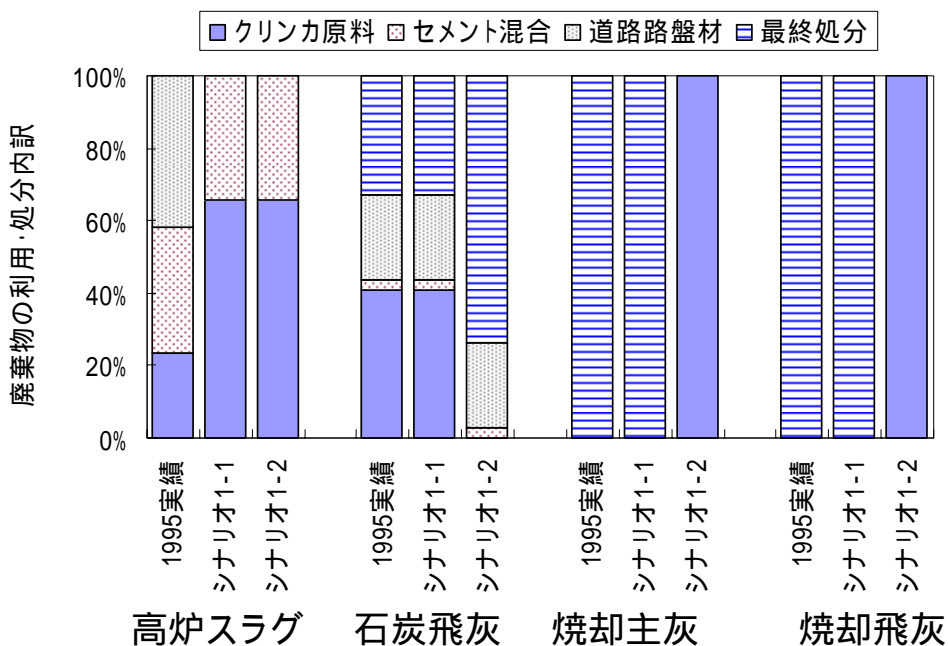


図 4-11 廃棄物の利用・処分の内訳(1)

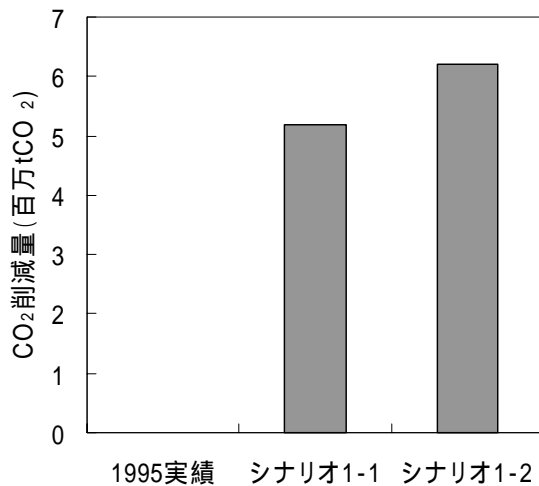


図 4-12 各シナリオの CO₂ 削減量

4.5.2 最終処分量削減効果

現状から出発して、セメント産業での廃棄物利用による CO₂ 排出削減ポテンシャルを推計した。混合セメントの最終需要は 1995 年の現状値で固定し、クリンカ製造工程での廃棄物の利用量が変化した場合の CO₂ 排出量の変化を求めた。石炭飛灰の砂利・砕石利用量の上限は 1995 現状値とした。設定したシナリオの概要を表 4-8 に示す。表に示していないシナリオ変数は 1995 実績値から変化させていない。

シナリオ 2-1 では、1995 年の現状で最終処分されている石炭飛灰がすべてクリンカ原料として利用され、発生した焼却飛灰がすべてクリンカ原料として利用され、発生した焼却主灰がクリンカ原料として全量利用される設定としている。シナリオ 2-2 では、CO₂ 削減のため高炉スラグを最大限に利用したうえで、発生した焼却主灰・焼却飛灰をクリンカ原料として利用可能な上限まで利用すると設定している。シナリオは第 3 章の LCA の結果に基づいて、最終処分削減効果の大きい廃棄物の順に並んでいる（クリンカ 1t あたり利用可能な廃棄物の原単位の大きさ順）。

表 4-8 シナリオ設定 2 最終処分削減効果

シナリオ	概要	結果
1995実績		-
シナリオ2-1	最終処分最小化	最終処分される石炭飛灰 クリンカ原料として利用 最終処分される焼却主灰・焼却飛灰 クリンカ原料として利用
シナリオ2-2	高炉スラグ最大利用のもと で最終処分最小化	道路路盤材として利用される高炉スラグ クリンカ原料として利用 最終処分量を最小 クリンカ原料として利用される石炭飛灰(一部) 最終処分 最終処分される焼却主灰・焼却飛灰 クリンカ原料として利用

シナリオごとの廃棄物の利用・処分の内訳を図 4-13 に示す。各シナリオの最終処分量を図 4-14 に示す。

シナリオ 2-1 では廃棄物のクリンカ原料利用量を増加させることで、1995 年実績と比較して最終処

分量は約 800 万 t 削減されるという結果が得られた。発生した石炭飛灰・焼却主灰・焼却飛灰をすべて受け入れることができ、最終処分量が 0 となる。CO₂ 排出削減効果の大きい高炉スラグを最大に利用したうえで、さらに可能な廃棄物を利用するシナリオ 2-2 では、1995 年実績と比較して最終処分量は約 500 万 t 削減されるという結果となった。高炉スラグを利用した分、他の廃棄物の利用可能な量が減少したため、シナリオ 2-1 に比べ最終処分削減効果は小さくなった。

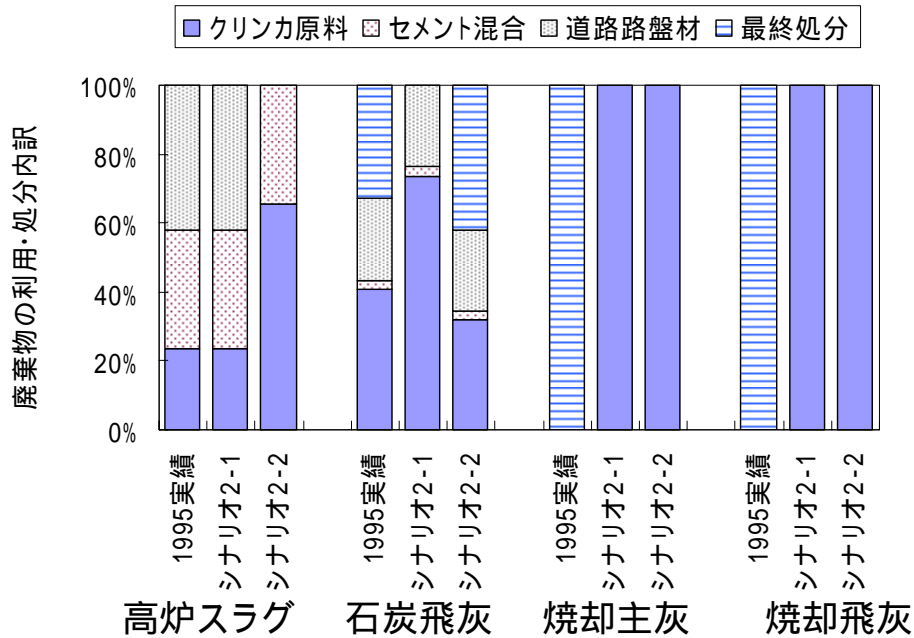


図 4-13 廃棄物の利用・処分の内訳(2)

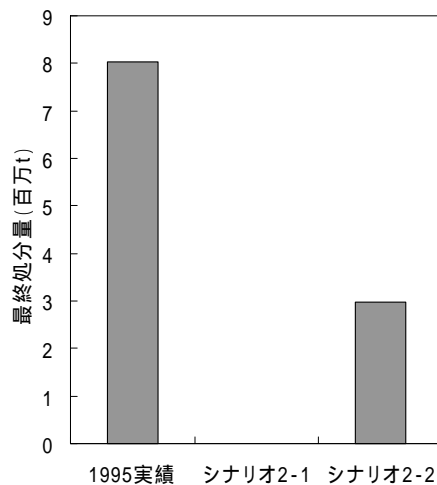


図 4-14 各シナリオの最終処分量

4.5.3 廃棄物のセメント原料利用によるCO₂排出削減と最終処分削減の間のトレードオフ関係

4.5.2 より，廃棄物によってCO₂排出削減効果が異なるため，CO₂排出削減と最終処分削減の間にはトレードオフ関係が生じることがわかった．そこで，クリンカ製造工程で廃棄物を最大限利用するシナリオをいくつか設定し，CO₂排出量と最終処分量をプロットした．ただし混合セメントの最終需要は1995年の現状値で固定し，クリンカ製造工程での廃棄物の利用量が変化した場合のCO₂排出量の変化を求めた．石炭飛灰の砂利・砕石利用量の上限は1995現状値とした．

結果を図4-15に示す．

グラフは横軸を最終処分量，縦軸をCO₂排出量にとって各シナリオの結果をプロットしたものである．各シナリオの点をつないだ折れ線が廃棄物を最大限に利用した場合のフロンティア曲線となる．1995年現状値はフロンティアの内部に位置するため，廃棄物の利用を増加させることでCO₂排出削減，最終処分削減のどちらも可能である．しかし，廃棄物の利用量がクリンカ製造工程での廃棄物利用可能量の上限に達した場合には，ある廃棄物の利用量を増加させることは別の種類の廃棄物利用量を減少させることになるため，結果としてCO₂排出削減と最終処分削減のどちらも満たすことはできなくなる．

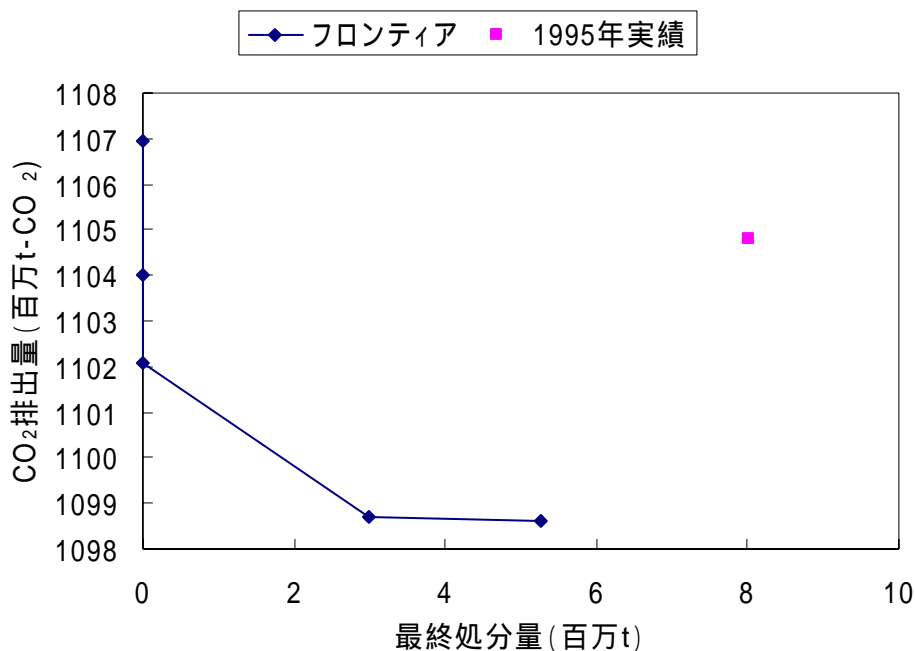


図 4-15 CO₂排出削減と最終処分削減の間のトレードオフ関係

4.5.4 産業の生産規模の変化

ここまでのシナリオではセメントの生産量や産業の最終需要は1995年の現状値で固定していたが，拡張型産業連関モデルでは，最終需要の変化による他産業の生産規模の変化の影響を考慮することができる．そこで，セメント産業の生産規模，およびセメント原料となるクリンカの排出源である鉄鋼産業の生産規模が変化した場合のCO₂排出削減ポテンシャルを推計した．設定したシナリオを表4-9に示す．なお，この分析では高炉セメントの生産量が変化可能として，発生した高炉スラグを高炉セメントの混合材として利用することで高炉セメントを最大限生産した場合(CO₂排出量の下限值)と高炉セメ

ントの生産量をゼロとした場合（CO₂排出量の上限值）を示した。

表 4-9 シナリオ設定 4 セメント産業と鉄鋼産業の生産規模の変化

シナリオ名	備考
1995年実績	
セメント-20%	セメント生産量20%減
セメント+20%	セメント生産量20%増
鉄鋼-20%	鉄鋼生産額20%減
鉄鋼+20%	鉄鋼生産額20%増
セメント・鉄鋼-20%	セメント生産量20%減・鉄鋼生産額20%減
セメント・鉄鋼+20%	セメント生産量20%増・鉄鋼生産額20%増

結果を図 4-16 に示す。

グラフ中の横線は 1995 年実績値である。棒グラフは高炉セメントの生産量がゼロから最大値まで変化した場合の CO₂ 排出量の変化の幅を示している。

セメントの生産量が 20%増減する場合と鉄鋼の生産量が 20%増減する場合とでは鉄鋼の方が CO₂ 排出量への影響が大きいことがわかる。鉄鋼の生産量の変化は副産物の高炉スラグの発生量の変化にもつながるため、鉄鋼生産が増加した場合は CO₂ 排出量の変化幅も増加し、逆に鉄鋼生産が減少した場合は CO₂ 排出量の変化幅も減少する。

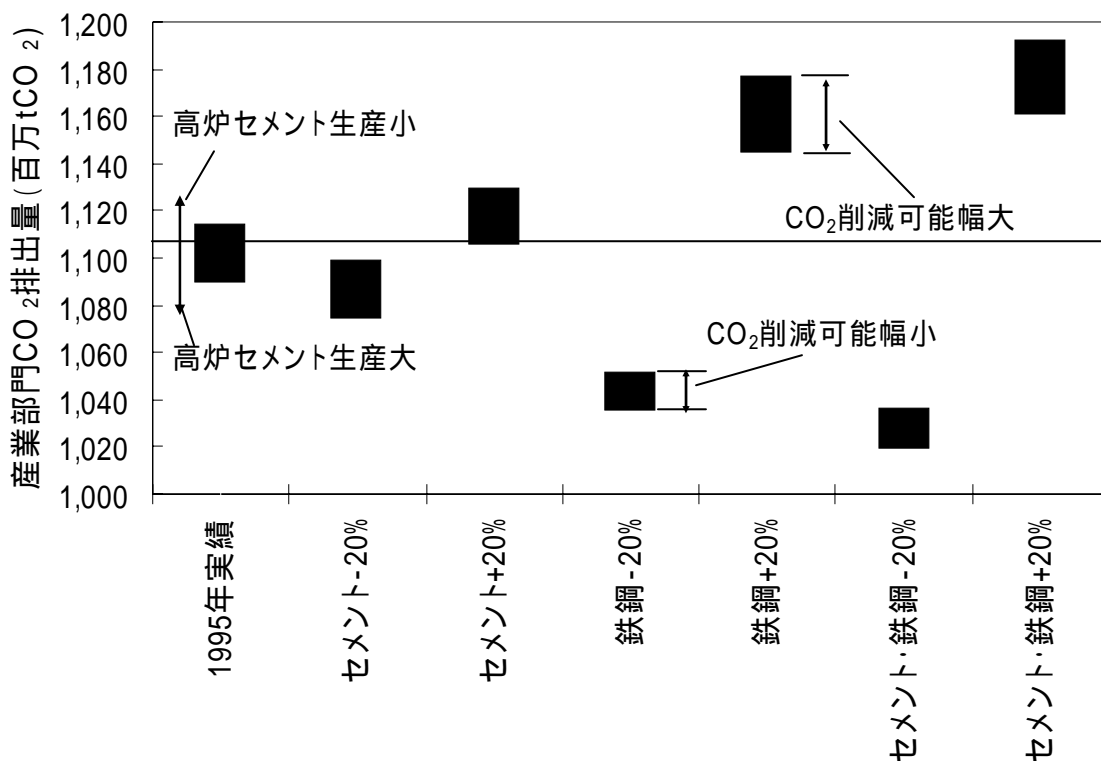


図 4-16 セメント産業・鉄鋼産業の生産規模と CO₂ 排出量の関係

4.6 結言

本章では拡張型産業連関モデルを構築し、セメント産業による廃棄物リサイクルの環境負荷削減ポテンシャルを推計した。

シナリオ分析より、セメント産業による廃棄物利用量を 1995 年実績値から増加させることで、CO₂ 排出削減、最終処分削減のどちらも可能であることが見出された。拡張型産業連関モデルでは、セメント産業でのリサイクル促進に有効な施策について知見を得ることのできる分析は困難である。そこで第 5 章で、個別の廃棄物発生源と個別のセメント工場を考慮し、廃棄物の輸送を詳細に記述したモデルを用い、リサイクル促進に有効な施策について検討をおこなう。

第4章引用文献

- [1] Leontief, W.W. : Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States, *The Review of Economic Statistics*, Vol.18, No.3, pp.105-125, 1936.
- [2] 新飯田宏：産業連関分析入門，東洋経済新報社，1978。
- [3] 宮沢健一（編）：産業連関分析入門，日経文庫，1995。
- [4] 吉岡完治，大平純彦，早見均，鷺津明由，松橋隆治：環境の産業連関分析，日本評論社，2003。
- [5] HANDBOOK OF INPUT-OUTPUT TABLE COMPILATION AND ANALYSIS, Department for Economic and Social Affairs, Statistics Division, New York, 1999。
- [6] 吉岡理文：プロセス連関モデルを用いたLife Cycle Assessment手法の研究，東京大学工学系研究科学位論文，1996。
- [7] 森嶋通夫：産業連関分析入門，創文社，1956。
- [8] Leontief, W.W. (新飯田宏訳)：産業連関分析，岩波書店，1969。
- [9] Bullard, C.W., R.A.Herenden : The energy cost of goods and services, *Energy Policy*, Vol.3, No.4, pp.268-278, 1975。
- [10] Bullard, C.W., R.A.Herenden : Energy Impact of Consumption Decisions, *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, Vol.63, No.3, pp. 484-493, 1975
- [11] Chapman, P.F : Energy analysis of nuclear power stations, *Energy Policy*, Vol.3, No.4, pp.285-293, 1975。
- [12] 池田明由，篠崎美貴，菅幹雄，早見均，藤原浩一，吉岡完治：環境分析用産業連関表 第2章 生産誘発によるCO₂排出量，pp.33-51，慶応義塾大学産業研究所，1996。
- [13] 本藤祐樹，外岡豊，内山洋司：産業連関表を用いたわが国の生産活動に伴う環境負荷の実態分析，電力中央研究所，1998。
- [14] 南斎規介，森口祐一，東野達：産業連関表による環境負荷原単位データブック，国立環境研究所地球環境研究センター，2002。
- [15] Bullard, C.W. and A.V.Se bald : Monte Carlo Sensitivity Analysis of Input-Output Models, *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 70, No. 4, pp.708-712, 1988。
- [16] Lenzen, M. : Errors in conventional and input output based life cycle inventories, *Journal of Industrial Ecology*, 127-148, Vol.4, No.4, 2000。
- [17] 本藤祐樹，酒井信介，丹野史郎：産業連関表を用いて推計されたCO₂排出原単位の感度分析，エネルギー資源，Vol.22, No.4, pp.66-72, 2001。
- [18] 吉田好邦，石谷久，松橋隆治，大熊裕之，工藤祐輝，盛田幸治，古池亜彌，小林紀：産業部門におけるエネルギー消費量の不確かさを考慮したLCAの信頼性評価，Vol.22, No.5, pp.26-31, 2001。
- [19] 南斎規介，東野達，笠原三紀夫：産業連関表によるCO₂排出原単位の誤差とライフサイクルインベントリ分析の信頼性評価，Vol.22, No.5, pp.32-38, 2001。
- [20] Ara, K : The Aggregation problem in Input-Output Analysis, *Econometrica*, Vol.27, No.2, pp.257-262, 1959。

- [21] Morimoto ,Y.: On Aggregation Problems in Input Output Analysis ,Review of Economic Studies , 119-126 , Vol.37 , No.109 , 1970 .
- [22] Kaya ,Y. : Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth ,Interpretation of proposed scenarios , Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris , 1990 .
- [23] Climate Change 2001: Mitigation http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/index.htm ,IPCC , 2001 .
- [24] Hoekstra , R. and J. van der Bergh : Comparing structural and index decomposition analysis , Energy Economics , Vol.25 , pp.39-64 , 2003 .
- [25] 田村誠：技術変化の影響評価，東京大学大学院総合文化研究科学学位論文，2004 .
- [26] Rose ,A. and S. Casler : Input-Output Structural Decomposition Analysis: A critical Appraisal , Economic Systems Research , Vol.8 , No.1 , pp.33-62 , 1996 .
- [27] 加河茂美，稲村肇：ハイブリッド型SNA産業連関モデルに基づくエネルギー利用構造の分解分析，土木学会論文集，No.674/IV-51，pp.17-33，2001 .
- [28] 加河茂美，稲村肇，Gloria P.Gerilla：エネルギー需要構造の内部分解分析，土木学会論文集，No.695/IV-54，pp.17-29，2002 .
- [29] Yabe , N : An analysis of CO₂ emissions of Japanese industries during the period between 1985 and 1995 , Energy Policy , 32 , pp.595 - 610 , 2004 .
- [30] 森川貴史，加河茂美，稲村肇，森口祐一：国内経済が内包する廃棄物の需給構造分析，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.77-91，2003 .
- [31] Leontief , W.W. : Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach , The Review of Economics and Statistics , Vol.52 , No.3 , pp.262-271 , 1970 .
- [32] 中村慎一郎：廃棄物処理と再資源化の産業連関分析，廃棄物学会論文誌，Vol.11，No.2，pp.84-93，2000 .
- [33] 近藤康之，中村慎一郎：廃棄物産業連関分析(WIO)と廃棄物管理最適化，電気学会論文誌C，Vol.124，No.10，pp.2187-2194，2004 .
- [34] 池田明由，篠崎美貴，菅幹雄，早見均，藤原浩一，吉岡完治：環境分析用産業連関表 第6章 鉄くず・高炉スラグ・フライアッシュのリサイクル，pp.127-153，慶応義塾大学産業研究所，1996 .
- [35] 松橋隆治，吉田好邦，石谷久：日本における循環型産業システムの実現可能性に関する研究，電気学会論文誌C，Vol.122，No.11，pp.1976-1985，2002 .
- [36] 松橋隆治，石谷久，古垣一成：鉄屑のリサイクルを考慮に入れた鉄鋼業の省エネルギー可能性評価，エネルギー資源，Vol.14，No.6，pp.68-73，1993 .
- [37] 戸井朗人，片桐広貴，中村達生，佐藤純一：産業連関表を用いた製鉄プロセスの環境負荷分析，鉄と鋼，Vol.83，No.10，pp.73-78，1997 .
- [38] 吉田好邦，石谷久，松橋隆治：鉄屑リサイクルシステムへの三次元産業連関分析の応用，エネルギー資源，Vol.19，No.6，pp.69-75，1998 .
- [39] Hara , T : Life Cycle Assessment based on Input-Output model , YSSP 2003 Final Report ,

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) , 2003 (Internal) .

- [40] Hubacek , K and S.Giljum : Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities , *Ecological Economics* , Vol.44 , pp.137-151 , 2003 .
- [41] Giljum , S. , K.Hubacek , L.Sun : Beyond the simple material balance: a reply to Sangwon Suh's note on physical input-output analysis , *Ecological Economics* , Vol.48 , pp.19-22 , 2004 .
- [42] Suh , S. : A note on the calculus for physical input-output analysis and its application to land appropriation of international trade activities , *Ecological Economics* , Vol.48 , pp.9-17 , 2004 .
- [43] Weisz , Helga. and F.Duchin : Physical and Monetary Input-Output Analysis: What Makes the Difference? , <http://www.rpi.edu/dept/economics/www/workingpapers/rpi0422.pdf> Rensselaer Working Papers in Economics , Dept of Economics , Troy University , 2005 .
- [44] 廣部祐司 , 内山洋司 : 産業廃棄物リサイクルによる環境負荷の低減効果分析 , *エネルギー・資源* , Vol.20 , No.5 , pp.68-75 , 1999 .
- [45] 安達毅 , 茂木源人 , 小谷明生 , 山富二郎 : 一般廃棄物リサイクルの産業間における最適負担配分モデル , *資源と素材* , Vol.115 , No.13 , pp.951-957 , 1999 .
- [46] 総務庁 : 平成7年産業連関表 , 1999 .
- [47] 島裕和 : 高品質再生骨材によるコンクリートリサイクルシステムに関する研究 , 東京大学大学院新領域創成科学研究科学学位論文 , 2004 .

第5章 廃棄物輸送・セメント生産モデルによる解析

5.1 緒言

前章の拡張型産業連関分析により，産業廃棄物のセメント原料化リサイクルを進める余地が大きく，このリサイクルにより CO₂ 排出量・最終処分量ともに削減可能であるという結果が得られた．しかし，拡張型産業連関分析は，リサイクルのポテンシャル，およびリサイクルによる CO₂ 排出削減量の推計することはできるが，どのような施策がリサイクルの促進に有効であるかを検討するための知見を得ることには適していない．なぜなら拡張型産業連関分析は，リサイクル量を外生的に与えた時の CO₂ 排出削減量を計算するためのツールであって，リサイクル量が内生的に決定されるモデルとなっていないからである．リサイクル促進策を検討するためには，リサイクル量の決定メカニズムが組み込まれたモデルを用いなくてはならない．

本章では，廃棄物のセメント原料化リサイクルに関するシナリオ分析をおこない，リサイクルの促進に有効な政策について検討することを目的とする．シナリオ分析では経済的効率や異なる環境負荷の削減（複数の政策目標の存在）という視点から評価する．そのための方法として，本研究では，日本全国のセメント工場と高炉製鉄所，石炭火力発電所，および一般廃棄物焼却処理場の間の廃棄物輸送を考慮する廃棄物輸送・セメント生産モデルを構築し，構築したモデルを用いてシミュレーションをおこなう．本研究ではセメント原料に利用される廃棄物として

- (a) 高炉製鉄所から排出される高炉スラグ
- (b) 石炭火力発電所から排出される石炭飛灰
- (c) 一般廃棄物焼却場から排出される焼却主灰
- (d) 一般廃棄物焼却場から排出される焼却飛灰

の4種類を扱う．高炉スラグ・石炭飛灰は有価で取引される場合には副産物とよばれるが，需要が供給を下回った場合にはなんらかの処分が必要とされるという点では潜在的廃棄物といえるものであることから，本研究では廃棄物という呼称で統一する．

本モデルは個別のセメント工場のキャパシティ，個別の廃棄物発生源の発生量，廃棄物発生源とセメント工場の地理条件に基づく廃棄物の輸送距離・輸送方法を詳細にモデル化した点が特徴となっている．

本章の構成は以下の通りである．

5.2 で先行研究をレビューする．5.3 でモデルの概要を説明する．5.3.3 ではモデルの定式化，5.3.4 では用いたデータの詳細を説明する．5.4，5.5，5.6 でシミュレーション結果を示す．5.7 は結言として本章の結論をまとめる．

5.2 先行研究

広域化処理，輸送プロセスを含むリサイクルのモデル化，シミュレーションによる政策評価という観点でなされた先行研究についてレビューをおこなう．これまでの研究で明らかになったことと本研究によって得られることが期待される新たな知見について述べる．

廃棄物処理・リサイクルシステムを最適化モデルでモデル化しシミュレーションにより評価するという研究は例が多い。例えば Abou Najm *et al.*^{[11][12]}は、一般廃棄物処理システムを動学的最適化モデルでモデル化し、設備建設等も考慮にいたれた効用最大化型の最適化モデルを構築している。このモデルにより埋め立て処分費用の上昇によるリサイクル・焼却処理の導入可能性について検討している。

廃棄物の広域化処理・リサイクルシステムを対象に、排出源と処理・リサイクル施設の間の輸送をモデル化し、さらにそのモデルを用いて政策分析をおこなった研究がいくつかある。

Berglund^[3]はスウェーデンにおける故紙の段ボールリサイクルを輸送モデルにより評価した研究をおこなっている。Berglund は、地域ごとに一律のリサイクル率による規制をした場合と全体量で規制した場合の費用を最適化モデルにより試算した。その結果、地域によりリサイクルが効率的に可能なところとそうでないところがあるため、一律のリサイクル率を課す制度は費用効果的には非効率であり、全体量で規制する方が費用効果的なシステムであると結論付けている。

Gielen and Moriguchi^[4]は廃棄物処理と炭素税制度の関係をモデルを用いて検討している。この研究では、炭素税が導入された場合の廃棄物の処理方法・輸送量の変化を 2000～2030 年の期間でシミュレーションしている。シミュレーションより、炭素税の導入によりリサイクル量が増加し、リサイクル量の増加により CO₂ 排出量が削減されるという結果が得られている。また、それに付随して廃棄物輸送量が増加するという結果が得られている。

和田・アミン^[5]は、本研究と同じ対象であるセメント産業における副産物利用促進の研究をおこなっている。この研究は、セメント工場と高炉製鉄所、石炭火力発電所との間の輸送をモデル化し、炭素税の上昇により CO₂ 発生量の少ない混合セメントの導入可能性と CO₂ 削減効果を評価している。ただしセメントプロセスのモデル化としてクリンカ利用を考慮していないので、フライアッシュセメントの生産が急増するという非現実的な結果が出ている。輸送方法も道路輸送しか考慮していない点などの問題もある。

廃棄物処理・リサイクルシステム評価の目的は、廃棄物処理・リサイクルにより環境負荷がどれだけ削減できるかを把握することにある。近藤・中村^[6]は、廃棄物産業連関モデルを最適化型線形計画モデル(WIO-LP)に拡張し、廃棄物処理・リサイクルによる CO₂ 排出量削減と最終処分削減の可能領域(トレードオフのフロンティア曲線)を求めている。ただし WIO-LP モデルタイプのみからは、どのような施策がリサイクルを促進し、現状からフロンティア近くの状態に移行できるか、という問題に対する知見を得ることができない。

都市部で発生した一般廃棄物焼却灰の最終処分場が近い将来逼迫することが懸念されている。本研究では広域的なリサイクルによる解決策を検討するが、川畑^[7]は廃棄物の広域埋め立て処理による解決策について研究をおこなっている。この研究では、首都圏から発生する一般廃棄物焼却灰を東京湾の大規模処分場で埋め立て処理するシステムの評価をおこなっている。首都圏の各焼却処理場から埋め立て処分場までは鉄道輸送、河川を用いた航路輸送、道路輸送を検討し、コストを試算している。この研究では最適化モデルによるモデル化がなされておらず、システムのコストや環境負荷は積み上げ計算によるものである。

経済産業省^{[8][9]}により一般廃棄物焼却灰のセメント工場でのリサイクルについて調査がなされている。これらの調査ではシステムのコストや環境負荷が積み上げ計算により試算されている。しかし、セメン

ト工場の受け入れ可能性や他の廃棄物との競合については考慮していない。

セメント産業を中心とするリサイクルシステムにおいてこれまで検討されていない視点は次の通りである。

- ・ 複数の廃棄物によるリサイクルの競合により，廃棄物排出源に近いセメント工場で利用できず，長距離輸送が必要となる可能性
- ・ セメント産業による廃棄物の利用が飽和に達し，異なる廃棄物間で競合が生じた場合の指針（どの廃棄物を利用すべきか）
- ・ 廃棄物の長距離輸送による環境負荷・コストの定量評価
- ・ 経済的な効率性からのリサイクル政策の評価

本研究では，これらの視点からセメント産業を中心とする広域的廃棄物リサイクルシステムの評価をおこなう。

5.3 モデル

本研究で用いる廃棄物輸送・セメント原料化モデル（以後，本モデル）は，セメント工場と高炉製鉄所，石炭火力発電所，および一般廃棄物焼却処理場の間の高炉スラグ，石炭飛灰，および一般廃棄物焼却灰（焼却主灰，焼却飛灰）の輸送プロセスをモデル化した部分と，セメント工場での廃棄物を利用したセメント生産プロセスをモデル化した部分から構成される。前者は廃棄物の最適輸送問題として定式化され，後者はセメントの最適生産問題として定式化される。廃棄物の最適輸送問題とは，廃棄物発生源である高炉製鉄所，石炭火力発電所，一般廃棄物焼却処理場の各工場から，どのような輸送方法を用いて，どのセメント工場に，どれだけ輸送するかを全体として最適解を求める問題である。セメントの最適生産問題とは，使用原料，単位稼働コストの異なる複数のプロセスから各工場稼働されるプロセスを選択する問題である。このとき，全体のセメント需要について制約条件が与えられ，その条件をみたすように各工場のセメント生産コストの和が最小となるようにセメント工場のプロセスが決定する。

本モデルは線形計画問題として定式化される。評価関数としては，総コスト（セメント生産コスト，廃棄物輸送コスト，廃棄物のその他処分コストの和）および総CO₂排出量（セメント生産由来，廃棄物輸送由来）を取り得るようになっている。分析目的に応じこれらの評価関数の最小化という目的関数を設定して最適解が求められる。

本モデルの解として得られるものは

- （a） 個別の廃棄物発生源（製鉄所，石炭火力発電所，一般廃棄物焼却場）から発生した廃棄物のセメント工場でのリサイクル量
- （b） 個別のセメント工場での廃棄物利用量
- （c） 個別の廃棄物発生源からセメント工場までの輸送方法別輸送量

である。

5.3.1 モデル分析のロジック

モデルの中身についての記述をする前に，モデルによる解析の目的と論理構成について述べる。

モデルから得られる解が何であるかについては既に述べた。この解からリサイクル促進策を検討する

ために利用可能な以下のような情報が得られる。

- (a) 各セメント工場での廃棄物利用量と利用可能量(=各セメント工場のキャパシティと廃棄物利用量の差)
- (b) および各種廃棄物発生源から各セメント工場への輸送方法別輸送量

これらの情報から、廃棄物リサイクルをさらに進めるためには、どの地域の発生源からどの地域のセメント工場へ輸送すればよいかという知見を得ることができる。

これに加えて、モデル分析の意義は、全体として整合性の取れた最適なりサイクルの像が得られるという点にある。複数種類の廃棄物について、それぞれ数十箇所存在する個別の廃棄物発生源と廃棄物利用先である個別のセメント工場間の輸送を考慮し、全体として最適なりサイクルシステム像を描くことの意義は大きい。

ここでコスト最小化という目的関数について再度確認しておこう。

目的関数としてのコスト最小化には二通りの意味がある。ひとつはリサイクル計画立案の材料としての最適解というもので、経済的に効率のよいリサイクルシステムはどういうものかという問いに答えるためのものということができる。この意味においては、目的によってはCO₂排出量最小化という目的関数を用いることもできる。

もうひとつは、現実のリサイクルシステムの状態(各セメント工場での廃棄物の利用量、各廃棄物排出源でのセメント工場向け輸送量)がコスト最小化で決定されるというものである。このロジックによりモデルをリサイクルシステムの現状推定に用いることができる。

廃棄物のセメント原料化リサイクルの促進を検討するためには、まず現状での各セメント工場での廃棄物利用量と利用可能量を把握する必要がある。しかしこのデータを入手することは困難である(一般にこれらのデータは重要な企業情報であるため、企業側から提供していただけない)。そこで何らかの方法を用いて推定をする必要があり、本モデルを推定のためのツールとして用いるということになる。現実のリサイクルシステムの状態がコスト最小化で決定されるという前提は、企業が経済合理的な活動をするという仮定に基づく。経済合理性に基づく各経済主体が参加するリサイクルシステムのシミュレーションということであれば、個々の企業を別々に取り扱うマルチエージェント的なシミュレーションの方がより現実に忠実であろうが、再現を忠実にすることは目的でないため、全体コストの最適化という比較的単純な方式を用いた。

以上のロジックの妥当性を保証するためには、モデルが現実を再現できなければならない。しかし、モデルがもともとの基本データ(現状での各セメント工場での廃棄物利用量と利用可能量)の欠落を補うものとして必要とされたことからわかるように、現実のシステムについてのデータは存在しない。ただし、いくつかの傍証となるような実績データがあるため、このデータを用いて再現性の検証をおこなう。傍証となるデータとは、高炉スラグ・石炭飛灰の地域別発生量に対する利用内訳のデータである。

本研究では、モデルから得られるシャドウプライス(CO₂排出や最終処分の限界削減費用)に基づいてリサイクル政策について議論をおこなう。シャドウプライスは、コスト最小化により得られる情報であるが、本モデルにおける意味は「政策目標(CO₂排出や最終処分の削減量)を達成するために(最も効率的な方法を用いた場合でも)要する費用」ということができる。そしてシャドウプライスを用いて現実の政策について議論をするということは、環境負荷という外部費用を内部費用として経済システム

に取り込むことで、目的とする環境負荷の削減につなげることができる、という前提に基づいているということである（そしてこの前提は現実のシステムが費用最小化で決定されるという仮定に基づく）。

5.3.2 モデルの概要

本モデルが計算するのは、コスト最小化、あるいはCO₂最小化という目的関数において最適化された各セメント工場での廃棄物利用量と各種廃棄物発生源から各セメント工場への輸送方法別輸送量である。ここで、各セメント工場の生産能力（廃棄物受け入れのキャパシティ）、各種廃棄物発生源（具体的には高炉製鉄所、石炭火力発電所、一般廃棄物焼却炉）からの廃棄物発生量は2000年度の実績値を用いた。ただし、一般廃棄物焼却炉については、すべての施設を対象とはせず、対象とする大都市圏の都府県について数箇所を代表点として、そこからその都府県で発生する一般廃棄物焼却灰が発生するという取り扱いをしている。

本モデルの概要を図5-1に示す。

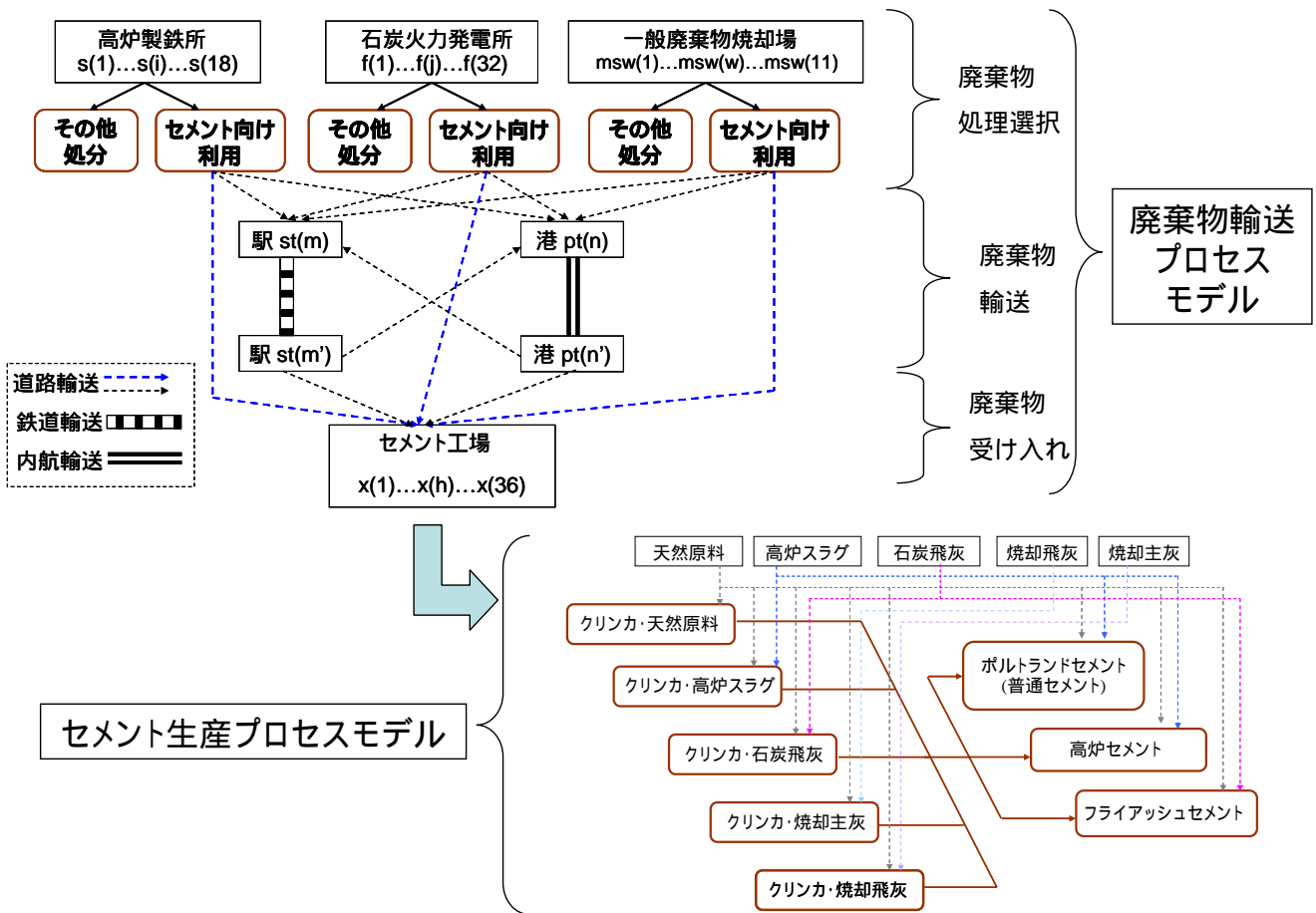


図 5-1 廃棄物輸送・セメント生産モデルの概要

5.3.3 モデルの詳細 定式

本モデルは次のように定式化される。モデル定式化の記述が煩雑となることを避けるため、文中での

記号の説明は必要なものだけに限り、定式化の最後にまとめて示す。

図 5-1 に従い、セメント生産プロセスモデル、輸送プロセスの順に示す。

(1) セメント生産プロセスモデル

セメント生産プロセスは、拡張型産業連関モデルのセメント生産プロセスを簡略化したものである。産業連関モデルと同様に、素材・中間製品の各プロセスへの投入量・製品の各プロセスからの産出量が各プロセスの稼働量と 1 次関係にあるとしている。拡張型産業連関モデルでは、天然原燃料の投入原単位を

(a) クリンカ製造工程ではすべての工程で同一

(b) セメント混合工程では、すべての工程でゼロ

としていた。このように簡潔な取り扱いをしたのは、拡張型産業連関モデルでは、プロセスによる間接的な環境負荷の相違による環境負荷の発生量の影響は小さいと判断したためである。

しかし、本モデルではこのプロセス間のコストの差異を考慮に入れるため、島^[10]によるセメントプロセスモデルを参考に、利用する廃棄物の異なるプロセス毎に天然原燃料の投入原単位を設定した。

考慮する素材・製品は、天然原燃料（産業連関モデルにおける一般財についての投入係数の和：金額単位）、高炉スラグ、石炭飛灰、焼却主灰、焼却飛灰、クリンカ、ポルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュセメントの 9 種類である。天然原燃料以外は重量単位である。プロセスは、クリンカ製造工程 9 種、セメント混合工程 3 種の 12 種類である。

セメント生産プロセスはすべてのセメント工場で同一としている。これはセメントの単位生産コスト、原料および廃棄物の使用原単位が同一であることを意味する。実際にはセメント工場によってこれらの値は異なるであろうが、本研究ではこの違いが大きな影響を及ぼさないと判断した。

セメント生産プロセスモデルの投入・産出係数行列を表 5-1 に示す。

表 5-1 セメント生産プロセスモデルの投入・産出係数行列 $a(mater, k)$

分類	単位	品目	プロセスNo					
			1	2	3	4	5	6
天然原燃料	百万円	materials	-0.00427	-0.00402	-0.00428	-0.00106	-0.00117	-0.00093
廃棄物	t	slag	0	-0.28948	0	-0.01755	-0.40000	0
廃棄物	t	flyash	0	0	-0.13970	0	0	-0.20000
セメント製品	t	clinker	1	1	1	-0.94032	-0.57857	-0.77143
セメント製品	t	portland cement	0	0	0	1	0	0
セメント製品	t	blast furnace cement	0	0	0	0	1	0
セメント製品	t	flyash cement	0	0	0	0	0	1
廃棄物	t	Msw clinkerash	0	0	0	0	0	0
廃棄物	t	Msw flyash	0	0	0	0	0	0

分類	単位	品目	プロセスNo					
			7	8	9	10	11	12
天然原燃料	百万円	materials	-0.00424	-0.00414	-0.00403	-0.00410	-0.00425	-0.00414
廃棄物	t	slag	0	0	-0.22413	-0.03918	0	0
廃棄物	t	flyash	0	0	0	0	-0.10659	-0.01790
セメント製品	t	clinker	1	1	1	1	1	1
セメント製品	t	portland cement	0	0	0	0	0	0
セメント製品	t	blast furnace cement	0	0	0	0	0	0
セメント製品	t	flyash cement	0	0	0	0	0	0
廃棄物	t	Msw clinkerash	-0.09657	0	-0.09045	0	-0.09496	0
廃棄物	t	Msw flyash	0	-0.18385	0	-0.18049	0	-0.18200

(i) セメント工場での物量バランス

セメント生産プロセスのモデルは，セメント工場 h での廃棄物使用量についての等式で表される．

セメント工場 h での廃棄物使用量 + セメント工場 h ・ 工程 k での廃棄物使用量 = 0

$$y(\text{"slag"}, h) + \sum_k a(\text{"slag"}, k)x(h, k) = 0 \quad (5.1)$$

$$y(\text{"flyash"}, h) + \sum_k a(\text{"flyash"}, k)x(h, k) = 0 \quad (5.2)$$

$$y(\text{"msw_clinkerash"}, h) + \sum_k a(\text{"msw_clinkerash"}, k)x(h, k) = 0 \quad (5.3)$$

$$y(\text{"msw_flyash"}, h) + \sum_k a(\text{"msw_flyash"}, k)x(h, k) = 0 \quad (5.4)$$

ここで， $y(\text{"Slag"}, h)$ はセメント工場 h での高炉スラグ使用量（他の廃棄物についても同様）である． $x(h, k)$ はセメント工場 h ・ 工程 k の稼動量， $a(mater, k)$ は投入・産出係数である．表 5-1 にあるように，廃棄物の投入係数は負の値である．

(ii) セメント製品の需要制約

各セメント工場の生産量の合計がセメント製品の需要を満たさなければならないという制約がかけられる．

セメント製品の生産量 セメント製品の需要量

$$\sum_h \sum_k a(\text{"clinker"}, k)x(h, k) \geq Demand(\text{"clinker"}) \quad (5.5)$$

$$\sum_h \sum_k a(\text{"portlandcement"}, k)x(h, k) \geq Demand(\text{"portlandcement"}) \quad (5.6)$$

$$\sum_h \sum_k a(\text{"slagcement"}, k)x(h, k) \geq Demand(\text{"blastfurnacecement"}) \quad (5.7)$$

$$\sum_h \sum_k a(\text{"flyashcement"}, k)x(h, k) \geq Demand(\text{"flyashcement"}) \quad (5.8)$$

(iii) 天然原燃料使用量の合計

セメント生産に使用される天然原燃料の合計は次式の関係にある。この式を追加したのは、 x_0 を求めてセメント生産コストを算出するために必要だからである。

$$x_0 + \sum_h \sum_k a(\text{"materials"}, k)x(h, k) = 0 \quad (5.9)$$

x_0 は天然原燃料使用量の合計（金額単位）である。

(iv) 工程稼働量についての制約

工場の生産量がゼロとなるなどの極端な解を避けるため、セメント工場 h での生産量について以下の制約をかける。

- ・他工場とクリンカの融通はしない
- ・工場稼働率の範囲（クリンカ生産能力に対する生産量の割合：70～100%）
- ・セメント生産量の50%以上をポルトランドセメントが占める

$$\sum_k a(\text{"clinker"}, k)x(h, k) \geq 0 \quad (5.10)$$

$$uppercapa(h) \geq \sum_{k=1}^3 a(\text{"clinker"}, k)x(h, k) \geq lowercapa(h) \quad (5.11)$$

$$x(h, 4) \geq 0.5 \times \sum_{k=4}^6 x(h, k) \quad (5.12)$$

(2) 廃棄物輸送プロセスモデル

廃棄物輸送プロセスモデルは、輸送ネットワーク上の各ノード（排出源、輸送分岐点、セメント工場）での廃棄物の物量バランスを表した数式からなる。

(v) 廃棄物受け入れ

セメント工場 h での廃棄物使用量とセメント工場 h への廃棄物輸送量の関係を規定する制約である。

セメント工場hでの使用量=セメント工場hへの輸送量

$$y(\text{waste}, h) = \sum_i tRoad(\text{waste}, i, h) + \sum_j tRoad(\text{waste}, j, h) + \sum_w tRoad(\text{waste}, w, h) + \sum_m tRoad(\text{waste}, m, h) + \sum_n tRoad(\text{waste}, n, h) \quad (5.13)$$

ここで(5.13)における $tRoad(\text{waste}, i, h)$ は、高炉製鉄所 i からセメント工場 h へ直接道路輸送で輸送された廃棄物種 waste の輸送量をさす。 waste =高炉スラグ以外の場合、 $tRoad(\text{waste}, i, h) = 0$ である。第4項の貨物駅 m からセメント工場 h への道路輸送による輸送量をさし、第5項は港湾 n からセメント工場 h への道路輸送による輸送量をさす。

(vi) 廃棄物処理選択

廃棄物排出源での廃棄物の処理内訳を規定する制約である。高炉スラグは、現状でセメント原料として利用されないものは主として土木材料（道路路盤材や骨材など）に利用され、埋め立て処分されるものはない。石炭飛灰は、セメント原料として利用されないもののうち土木材料（道路路盤材など）に利用されるものも一部あるが、主として埋め立て処分される。一般廃棄物焼却灰は、現状で主として埋立処分される。そこで本モデルでは、石炭飛灰と一般廃棄物焼却灰のその他処分量は埋め立て処分量としてカウントする。

排出源での発生量=セメント原料向け輸送量+その他処分量

$$s(i) = \sum_h tRoad(\text{"slag"}, i, h) + \sum_m tRoad(\text{"slag"}, i, m) + \sum_n tRoad(\text{"slag"}, i, n) + xB(\text{"slag"}, i) \quad (5.14)$$

$$f(p) = \sum_h tRoad(\text{"Flyash"}, p, h) + \sum_m tRoad(\text{"Flyash"}, p, m) + \sum_n tRoad(\text{"Flyash"}, p, n) + xB(\text{"Flyash"}, p) \quad (5.15)$$

$$msw_clinkerash(w) = \sum_h tRoad(\text{"msw_clinkerash"}, w, h) + \sum_m tRoad(\text{"msw_clinkerash"}, w, m) + \sum_n tRoad(\text{"msw_clinkerash"}, w, n) + xB(\text{"msw_clinkerash"}, w) \quad (5.16)$$

$$msw_flyash(w) = \sum_h tRoad(\text{"msw_flyash"}, w, h) + \sum_m tRoad(\text{"msw_flyash"}, w, m) + \sum_n tRoad(\text{"msw_flyash"}, w, n) + xB(\text{"msw_flyash"}, w) \quad (5.17)$$

ここで $xB(\text{"slag"}, i)$ は、高炉製鉄所 i で発生したスラグのうちセメント原料として利用されなかった

もの（その他処分）をさす。他の廃棄物についても同様であるが、高炉スラグ以外はその他処分＝最終処分（埋め立て）である。

石炭飛灰は石炭火力発電所のほか、セメント工場および高炉製鉄所でも発生する。よって(5.15)の p は $(p:i, j, h)$ である。

(vii) 廃棄物輸送

駅での廃棄物物量バランス

駅 m について、廃棄物のインプットは

- (a) 廃棄物発生源 i, j, w から道路輸送による持ち込み量，港湾 n から道路輸送による持ち込み量（以上 2 つが道路からの流入量）
- (b) 駅 m' からの鉄道輸送量

である。廃棄物のアウトプットは

- (c) セメント工場 h への道路輸送による輸送量，港湾 n への道路輸送による持ち込み量（以上 2 つが道路からの流出量）
- (d) 駅 m' への鉄道輸送量

である。

道路からの流入量（道路：駅）+鉄道での流入量（鉄道：駅）=道路への流出量（駅：道路）+鉄道での流出量（鉄道：駅）

$$\begin{aligned} & \sum_i tRoad(waste, i, m) + \sum_j tRoad(waste, j, m) + \sum_w tRoad(waste, w, m) \\ & + \sum_n tRoad(waste, n, m) + \sum_{m'} tRail(waste, m', m) \\ & = \sum_h tRoad(waste, m, h) + \sum_n tRoad(waste, m, n) + \sum_{m'} tRail(waste, m, m') \end{aligned} \quad (5.18)$$

港湾での廃棄物物量バランス

駅での物量バランスと同様であるが、陸海のバランスと海陸のバランスを分離して表記している。港湾 n から廃棄物を内航輸送で輸送する場合、インプットは

- (a) 廃棄物発生源 i, j, w から道路輸送による持ち込み量，
- (b) 貨物駅 m から道路輸送による持ち込み量

である。廃棄物のアウトプットは

- (c) 港湾 n から港湾 n' への内航輸送量
- (d) 港湾 n から航路接続点 np への内航輸送量

である。ここで、航路接続点とは、内航輸送ネットワークを簡略化するために導入したもので、主要航路の中継点のことである。

陸からの流入量=船への積荷量

$$\begin{aligned} & \sum_i tRoad(waste, i, n) \sum_j tRoad(waste, j, n) + \sum_w tRoad(waste, w, n) + \sum_m tRoad(waste, m, n) \\ & = \sum_{n'} tSea(waste, n, n') + \sum_{np} tSea(waste, n, np) \end{aligned} \quad (5.19)$$

廃棄物が港湾 n まで内航輸送された場合，インプットは

- (a) 港湾 n' から港湾 n への内航輸送量
- (b) 航路接続点 np から港湾 n への内航輸送量

である．廃棄物のアウトプットは

- (c) 港湾 n からセメント工場 h への道路輸送量
- (d) 港湾 n から駅 m への道路輸送量

である．

船からの揚荷量=陸への流出量

$$\sum_{n'} tSea(waste, n', n) + \sum_{np} tSea(waste, np, n) = \sum_h tRoad(waste, n, h) + \sum_m tRoad(waste, n, m) \quad (5.20)$$

航路接続点での廃棄物物量バランス

内航輸送における航路接続点 np での物量バランスは次の通りである．

流入量 = 流出量

$$\sum_n tSea(waste, n, np) + \sum_{np'} tSea(waste, np', np) = \sum_n tSea(waste, np, n) + \sum_{np'} tSea(waste, np, np') \quad (5.21)$$

(3) 目的関数を構成する変数

本モデルの目的関数は，基本的にシステムの総コストの最小化である．ただし，分析目的に応じ，目的関数に CO₂ 排出量や最終処分量の環境コストを追加する場合や，CO₂ 排出量を目的関数にとるがある．目的関数を構成する変数を以下に示す．

(viii) 集計コスト

$$totalCost = cementCost + xB \text{ cost} + roadCost + railCost + seaCost \quad (5.22)$$

ただし

セメント生産コスト

$$cementCost = \sum_h \sum_k cCement(k) \cdot x(h, k) \quad (5.23)$$

その他処分コスト

$$xBCost = \sum_{waste} \sum_{p=i, j, w} cB(waste) \cdot xB(waste, p) \quad (5.24)$$

道路輸送コスト

$$roadCost = \sum_{p=h,i,j,w,m,n} tRoad(p, p') \times [d(p, p') \times cRoad + cRoadInt] \quad (5.25)$$

鉄道輸送コスト

$$railCost = \sum_p tRail(p, p') \times [d(p, p') \times cRail + cRailInt] \quad (5.26)$$

内航輸送コスト

$$seaCost = \sum_{p=n,np} tSea(p, p') \times [d(p, p') \times cSea + cSeaInt] \quad (5.27)$$

廃棄物の輸送コスト関数は、距離についての一次式の形で表される。

(ix) CO₂ 排出量

$$totalCO2 = cementCO2 + roadCO2 + railCO2 + seaCO2 \quad (5.28)$$

ただし

$$cementCO2 = \sum_h \sum_k co2Cement(k) \cdot x(h, k) \quad (5.29)$$

$$roadCO2 = \sum_w \sum_{p=h,i,j,w,m,n} tRoad(waste, p, p') \times co2Road \quad (5.30)$$

$$railCO2 = \sum_w \sum_m tRail(waste, m, m') \times co2Rail \quad (5.31)$$

$$seaCO2 = \sum_w \sum_n tSea(waste, n, n') \times co2Sea \quad (5.32)$$

(x) 最終処分量

$$totalDisposal = \sum_j xB("flyash", j) + \sum_w xB("msw_clinkerash", w) + \sum_w xB("msw_flyash", w) \quad (5.33)$$

モデルの添字・変数・定数を以下にまとめた。

記号一覧

添字

<i>h</i>	セメント工場 (1 ~ 36)
<i>i</i>	高炉製鉄所 (1 ~ 18)
<i>j</i>	石炭火力発電所(1 ~ 32)

<i>w</i>	一般廃棄物焼却場(1 ~ 11)
<i>k</i>	セメント生産プロセス (1 ~ 12)
<i>m</i>	貨物駅 (1 ~ 72)
<i>n</i>	港湾 (1 ~ 64)
<i>np</i>	航路接続点 (1 ~ 10)
<i>p</i>	廃棄物輸送ネットワークのノード (<i>h, i, j, m, n, np, w</i>)
<i>mater</i>	セメント生産プロセス投入物 (セメント製品, 廃棄物; <i>prod, waste</i>)
<i>prod</i>	セメント製品(クリンカ, ポルトランドセメント, 高炉セメント, フライアッシュセメント; <i>clinker, portland cement, blast furnace cement, flyash cement</i>)
<i>waste</i>	廃棄物 (高炉スラグ, 石炭飛灰, 焼却主灰, 焼却飛灰; <i>slag, flyash, msw_clinkerash, msw_flyash</i>)

変数

<i>cementCO2</i>	セメント生産由来 CO ₂ [tCO ₂]
<i>cementCost</i>	セメント生産コスト [円]
<i>railCO2</i>	鉄道輸送由来 CO ₂ [tCO ₂]
<i>railCost</i>	鉄道輸送コスト [円]
<i>roadCO2</i>	道路輸送由来 CO ₂ [tCO ₂]
<i>roadCost</i>	道路輸送コスト [円]
<i>seaCO2</i>	内航輸送由来 CO ₂ [tCO ₂]
<i>seaCost</i>	内航輸送コスト [円]
<i>totalCO2</i>	総 CO ₂ 排出量 [tCO ₂]
<i>totalCost</i>	総コスト [円]
<i>totalDisposal</i>	最終処分量[t]
<i>xBCost</i>	その他処分コスト[円]
<i>tRail(waste,m,m')</i>	<i>m - m</i> 間の廃棄物鉄道輸送量 [t]
<i>tRoad(waste,p,p)</i>	<i>p - p</i> 間の廃棄物道路輸送量(<i>p:h, i, j, w, m, n</i>) [t]
<i>tSea(waste,p,p)</i>	<i>p - p</i> 間の廃棄物内航輸送量(<i>p: n, np</i>) [t]
<i>x₀</i>	天然原材料使用量[円]
<i>x(h, k)</i>	セメント工場 <i>h</i> , プロセス <i>k</i> の稼働量 [t]
<i>xB(waste,p)</i>	廃棄物発生源 <i>p</i> での廃棄物 <i>waste</i> のその他所分量[t]
<i>y(waste h)</i>	セメント工場 <i>h</i> での廃棄物 <i>waste</i> の利用量 [t]

パラメータ

<i>cB(waste)</i>	廃棄物 <i>waste</i> のその他処分コスト[円/t]
------------------	---------------------------------

$cCement(k)$	セメント生産プロセス k の生産コスト [円/t]
$cRail$	鉄道輸送コスト(係数) [円/t]
$cRailInt$	鉄道輸送コスト(切片) [円/t]
$cRoad$	道路輸送コスト(係数) [円/t]
$cRoadInt$	道路輸送コスト(係数) [円/t]
$cSea$	内航輸送コスト(係数) [円/t]
$cSeaInt$	内航輸送コスト(係数) [円/t]
$co2Cement(k)$	セメント生産プロセス k の CO ₂ 排出量[tCO ₂ /t]
$co2Rail$	鉄道輸送 CO ₂ 排出原単位 [tCO ₂ /t]
$co2Road$	道路輸送 CO ₂ 排出原単位 [tCO ₂ /t]
$co2Sea$	内航輸送 CO ₂ 排出原単位 [tCO ₂ /t]
$a(mater, k)$	セメント生産プロセス k の投入産出係数 ($mater:prod, waste$) [t/t]
$d(p, p)$	$p - p$ 間の輸送距離 ($p:h, i, j, w, m, n, np$) [km or mile]

定数

$Demand(prod)$	セメント製品需要 [t]
$f(waste, j)$	石炭火力発電所での廃棄物発生量[t]
$s(waste, i)$	高炉製鉄所での廃棄物発生量 [t]
$msw(waste, w)$	一般廃棄物焼却場での廃棄物発生量 [t]
$uppercapa(h)$	セメント工場稼働量上限[t]
$lowercapa(h)$	セメント工場稼働量下限[t]

5.3.4 モデルに用いたデータ

セメント工場，高炉製鉄所，石炭火力発電所については，各業界団体資料を元に，2000 年度に稼働している日本国内の全工場を対象とした．セメント工場についてはクリンカ生産能力データ^[11]を使用した．高炉製鉄所については，各工場の銑鉄生産量データ^[12]を用い，これに単位銑鉄生産あたりの高炉スラグ発生原単位を乗じて各工場の高炉スラグ発生量を推計した．単位銑鉄生産あたりの高炉スラグ発生原単位は日本全国の総銑鉄生産量と高炉スラグ発生量^[13]から求めた．石炭火力発電所については，各発電所の石炭使用量データ^[14]を用い，これに単位石炭使用量あたりの石炭飛灰発生原単位を乗じて各発電所の石炭飛灰発生量を推計した．単位石炭使用量あたりの石炭飛灰発生原単位は，日本全国の火力発電所の石炭使用量と発電所からの石炭飛灰発生量^[10]から求めた．石炭飛灰は一般産業でも発生する．本研究では，石炭を大量に消費するセメント産業と鉄鋼産業から発生する石炭飛灰を考慮する．これらの産業からの発生する石炭飛灰を，産業での石炭消費量^{[16][17]}を工場の生産量で按分し，石炭飛灰発生源単位を乗じることで各工場での石炭飛灰発生量を推計した．

鉄道貨物駅，港湾については，以上の工場に近接するものを考慮した．臨海の工場については，その工場の位置が港湾の位置も兼ねるものとした．このような工場については，港湾と工場間の道路輸送距離がゼロとして取り扱われる．

以上の全工場について、GIS ソフト^[18]に位置情報を入力し、工場間の道路輸送距離、航海距離を求めた。鉄道輸送距離については JR 貨物の駅間距離表の値を用いた。

一般廃棄物焼却場からの焼却灰発生量^[19]については、焼却場数が数千と膨大な数にのぼることから個々の焼却場を考慮することは困難である。そこで、三大都市圏の都道府県の焼却場について、各都道府県の最大焼却場を代表点とし、そこからその都道府県での全焼却灰が発生するという単純化を施した。考慮した都道府県は、東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県、愛知県、三重県、大阪府、京都府、兵庫県である。これらの都道府県で、全国から発生する一般廃棄物焼却灰の 55% をカバーする。

モデルに用いた各工場のデータを示す。

以後の日本地図上の描画にはフリーウェアの統計地図描画ソフト MANDARA^[20]を用いた。

表 5-2 セメント工場一覧(2000年度データ)

No	所在地	会社名	工場名	クリンカ生産能力 (1000t)	石炭飛灰発生量 (1000t)
1	北海道室蘭市	日鐵		969	5.95
2	北海道上磯町	太平洋	上磯	3,929	24.14
3	青森県東通村	三菱	青森	1,516	9.32
4	青森県八戸市	八戸		1,465	9.00
5	岩手県大船渡市	太平洋	大船渡	2,680	16.47
6	岩手県東山町	三菱	岩手	670	4.12
7	埼玉県秩父市	太平洋	秩父	800	4.92
8	埼玉県熊谷市	太平洋	熊谷	2,307	14.18
9	埼玉県横瀬町	三菱	横瀬	1,267	7.79
10	埼玉県日高市	太平洋	埼玉	1,770	10.88
11	神奈川県川崎市	第一		1,118	6.87
12	茨城県日立市	日立		892	5.48
13	栃木県葛生町	住友大阪	栃木	1,521	9.35
14	新潟県糸魚川市	明星		2,491	15.31
15	新潟県青海町	電気化学		2,694	16.55
16	福井県敦賀市	敦賀		830	5.10
17	岐阜県本巣町	住友大阪	岐阜	1,592	9.78
18	三重県藤原町	太平洋	藤原	2,524	15.51
19	滋賀県伊吹町	住友大阪	伊吹	866	5.32
20	兵庫県赤穂市	住友大阪	赤穂	3,892	23.92
21	高知県高知市	太平洋	土佐	1,479	9.09
22	高知県須崎市	住友大阪	高知	4,336	26.64
23	山口県周南市	トクヤマ		5,842	35.90
24	山口県周南市	東ソー		2,649	16.28
25	山口県宇部市	宇部	宇部	1,710	10.51
26	山口県美祢市	宇部	伊佐	4,906	30.15
27	福岡県北九州市	新日鐵高		808	4.96
28	福岡県苅田町	三菱	九州	8,355	51.34
29	福岡県苅田町	麻生	苅田	1,117	6.86
30	福岡県苅田町	宇部	苅田	3,846	23.63
31	福岡県香春町	太平洋	香春	800	4.92
32	福岡県田川市	麻生	田川	1,474	9.06
33	福岡県田川市	三井		711	4.37
34	大分県津久見市	太平洋	津久見	4,650	28.57
35	大分県佐伯市	太平洋	佐伯	2,869	17.63
36	沖縄県名護市	琉球		691	4.25

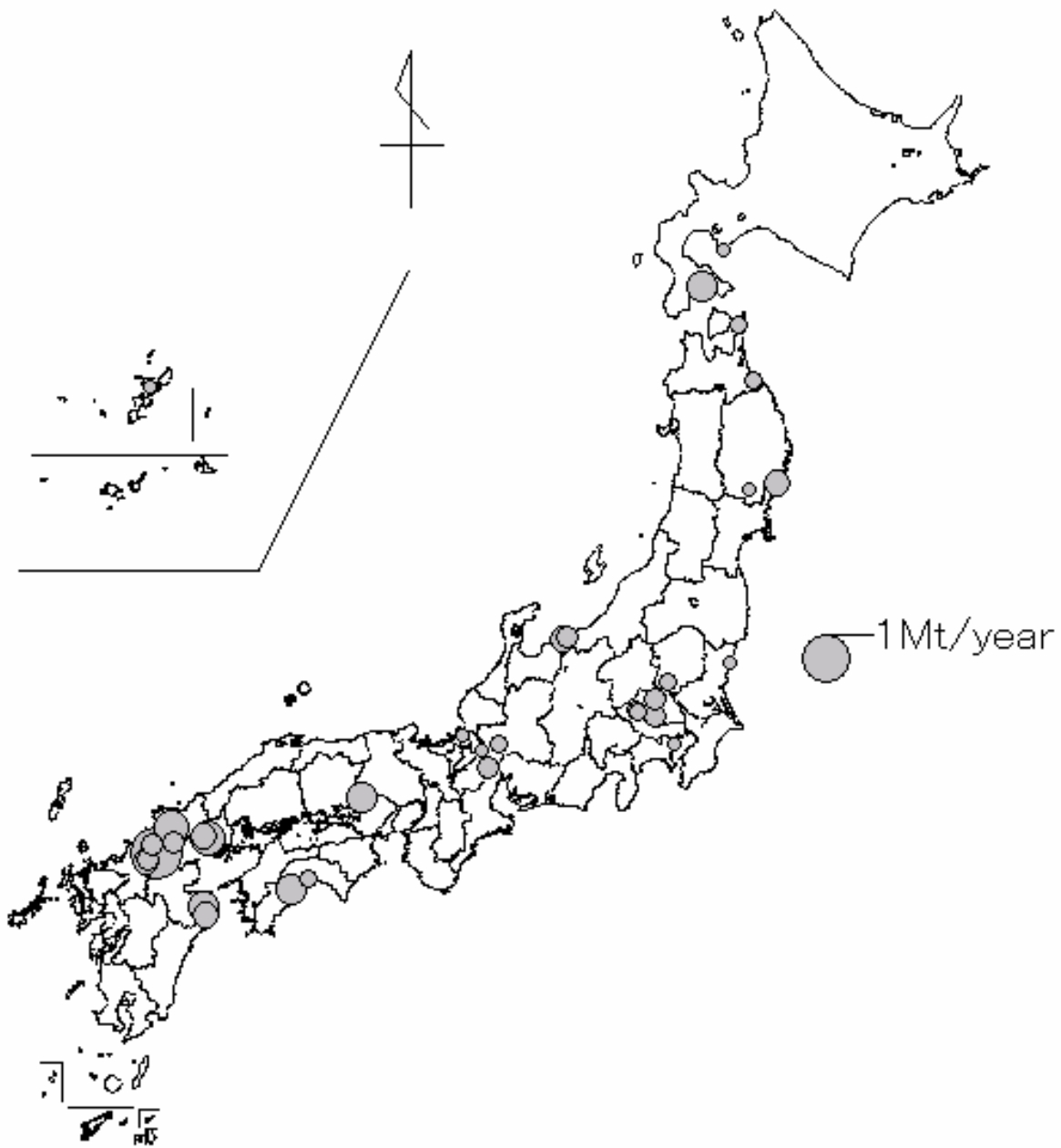


図 5-2 セメント工場の立地（2000 年度）

セメント工場の立地が最も集中しているのは山口県，福岡県の臨海部である．ついで関東内陸部に立地が集中している．

表 5-3 高炉製鉄所の一覧（2000年度）

No	所在地	会社名	工場名	高炉スラグ発生量 (1000t)	石炭飛灰発生量 (1000t)
1	北海道室蘭市	新日鐵	室蘭	814	13.36
2	千葉県千葉市	川崎製鉄	千葉	1,300	21.35
3	千葉県君津市	新日鐵	君津	2,317	38.06
4	茨城県鹿嶋市	住友金属	鹿島	2,058	33.79
5	神奈川県川崎市	NKK	京浜	1,054	17.31
6	愛知県東海市	新日鐵	名古屋	1,515	24.88
7	大阪府大阪市	中山製鋼	船町	386	6.34
8	兵庫県神戸市	神戸製鋼	神戸	361	5.92
9	兵庫県加古川市	神戸製鋼	加古川	1,843	30.27
10	兵庫県姫路市	新日鐵	広畑	319	5.23
11	和歌山県和歌山市	住友金属	和歌山	917	15.05
12	岡山県倉敷市	川崎製鉄	水島	2,599	42.67
13	広島県福山市	NKK	福山	3,103	50.95
14	広島県呉市	日新製鋼	呉	827	13.57
15	山口県徳山市	日新製鋼	周南	168	2.75
16	福岡県北九州市	新日鐵	八幡	1,057	17.36
17	福岡県北九州市	住友金属	小倉	358	5.88

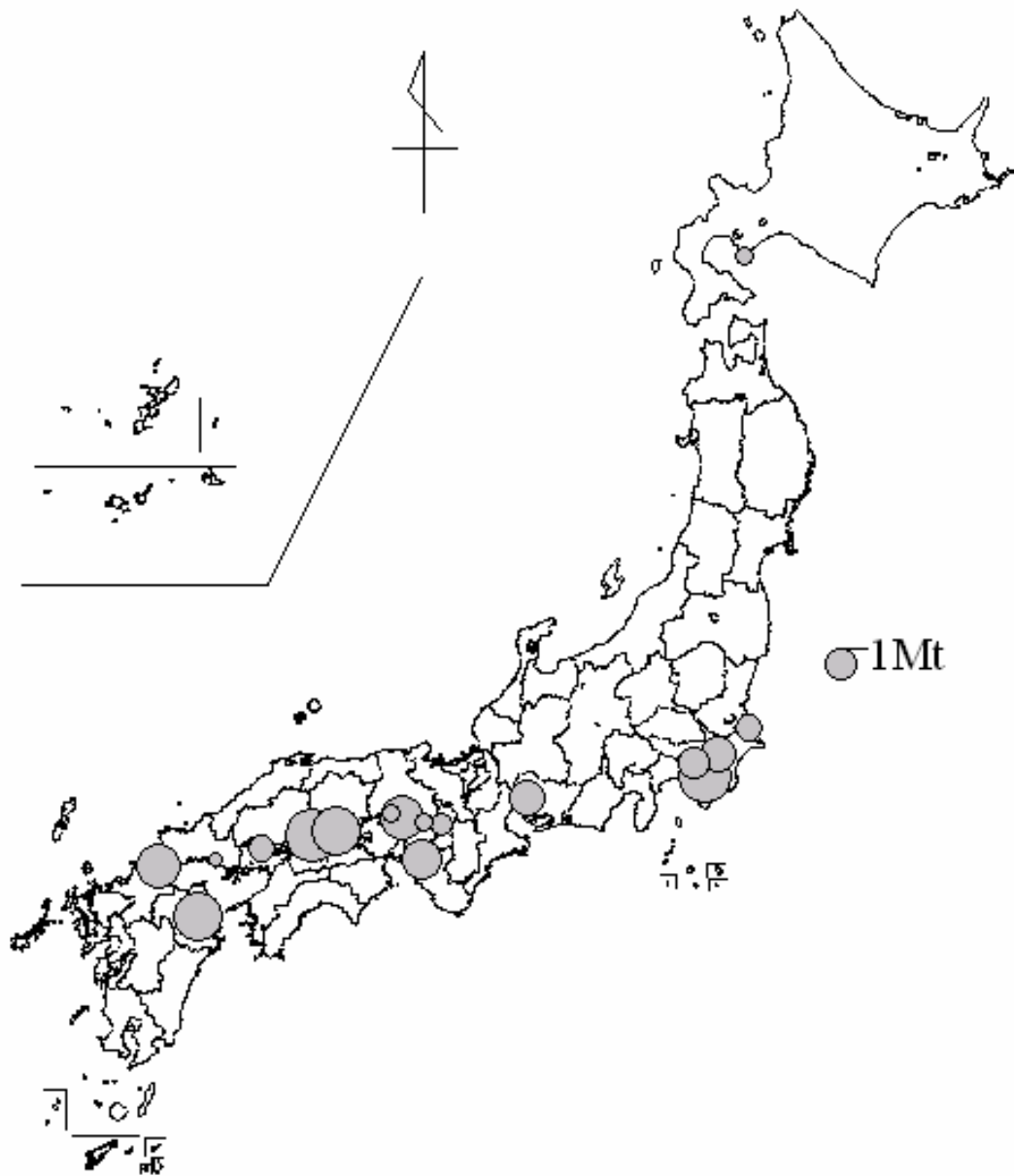


図 5-3 高炉スラグ発生量の地域分布（2000 年度）

高炉製鉄所はすべて臨海地域に立地している．京浜地域と瀬戸内地域に立地が集中している．

表 5-4 石炭火力発電所の立地（2000 年度）

No	所在地	会社名	工場名	石炭飛灰発生量 (1000t)
1	北海道奈井江町	北電		43
2	北海道砂川市	北電		64
3	北海道苫小牧市	北電		308
4	宮城県仙台市	東北電		84
5	秋田県能代市	東北電		292
6	山形県酒田市	酒田共同		158
7	福島県新地町	相馬共同		485
8	福島県原町市	東北電		471
9	福島県いわき市	常磐共同		184
10	神奈川県横浜市	電源開発	磯子	76
11	愛知県碧南市	中部電		533
12	富山県新湊市	富山共同		88
13	石川県七尾市	北陸電		264
14	福井県敦賀市	北陸電		227
15	兵庫県高砂市	電源開発	高砂	65
16	岡山県倉敷市	中国電		76
17	島根県三隅町	中国電		235
18	広島県竹原市	電源開発	竹原	286
19	広島県大崎町	中国電		36
20	山口県小野田市	中国電		245
21	山口県下関市	中国電		53
22	愛媛県西条市	四国電		121
23	愛媛県新居浜市	住友共同		52
24	徳島県阿南市	四国電・電	橘湾	572
25	福岡県大牟田市	九電	港	35
26	福岡県苅田町	九電		48
27	長崎県大村市	九電		23
28	長崎県松浦市	九電・電源	松浦	627
29	長崎県松島町	電源開発	松島	233
30	熊本県苓北町	九電		169
31	沖縄県具志川市	沖縄電		86
32	沖縄県石川市	電源開発	石川	83

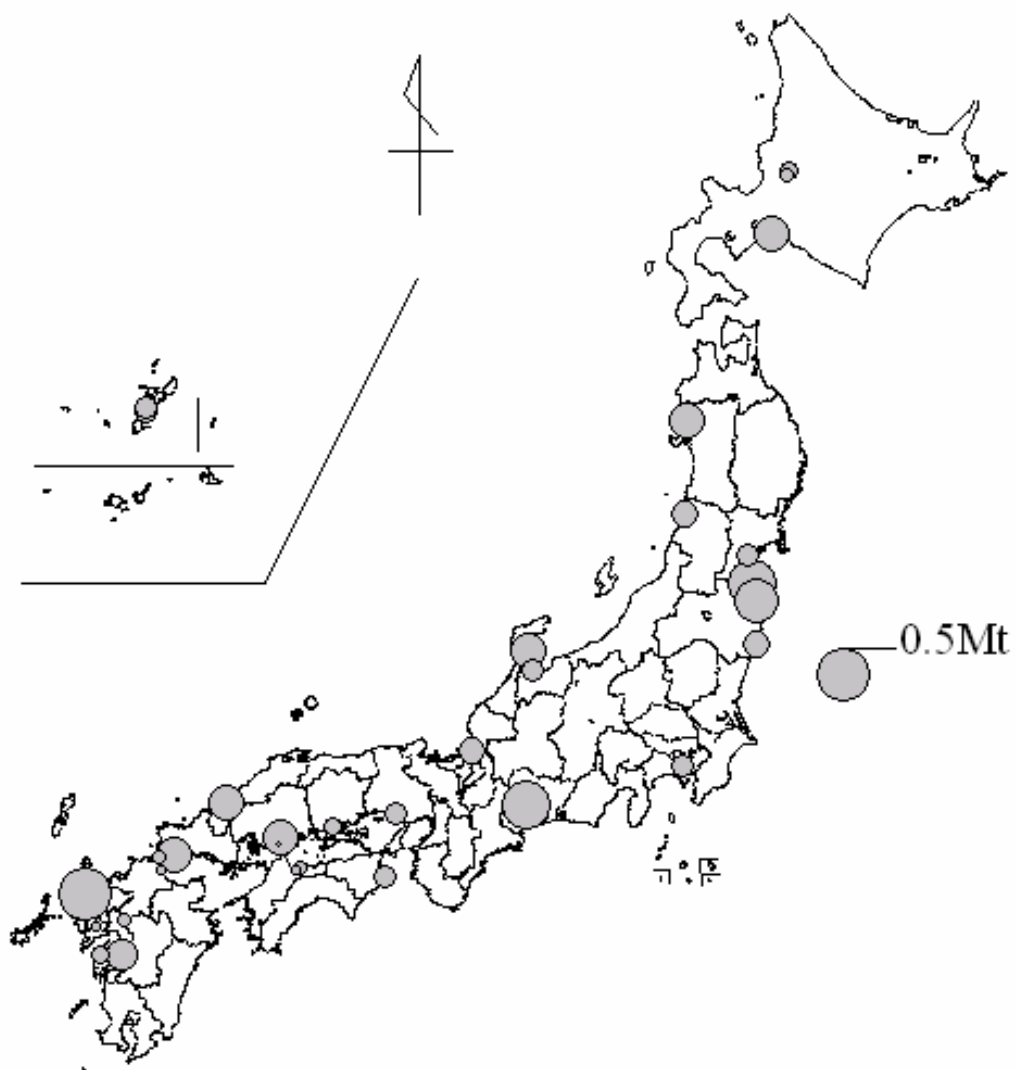


図 5-4 石炭飛灰（石炭火力発電所由来）発生量の地域分布（2000 年度）

表 5-5 一般廃棄物焼却灰発生量の一覧(2000 年度)

No	代表点所在地	行政区	代表点(行政区内最大の焼却場)	焼却灰発生量(t)	うち焼却主灰(80%)	うち焼却飛灰(20%)
1	東京都江東区	23区	新江東清掃工場	353,888	283,110	70,778
2	東京都町田市	多摩	町田市町田リサイクル文化センター	107,003	85,602	21,401
3	神奈川県横浜市	神奈川	横浜市栄工場	520,090	416,072	104,018
4	埼玉県さいたま市	埼玉	浦和クリーンセンター大崎	258,732	206,986	51,746
5	千葉県市川市	千葉	市川市クリーンセンター	236,960	189,568	47,392
6	愛知県名古屋市	愛知	名古屋市南陽工場	311,606	249,285	62,321
7	三重県四日市市	三重	四日市市北部清掃工場	73,875	59,100	14,775
8	大阪府大阪市	大阪市	大阪市環境事業局森之宮工場	377,619	302,095	75,524
9	大阪府東大阪市	大阪府	東大阪都市清掃施設組合第四	403,911	323,129	80,782
10	兵庫県尼崎市	兵庫	尼崎市クリーンセンター	283,774	227,019	56,755
11	京都府京都市	京都	京都市南部クリーンセンター	170,736	136,589	34,147

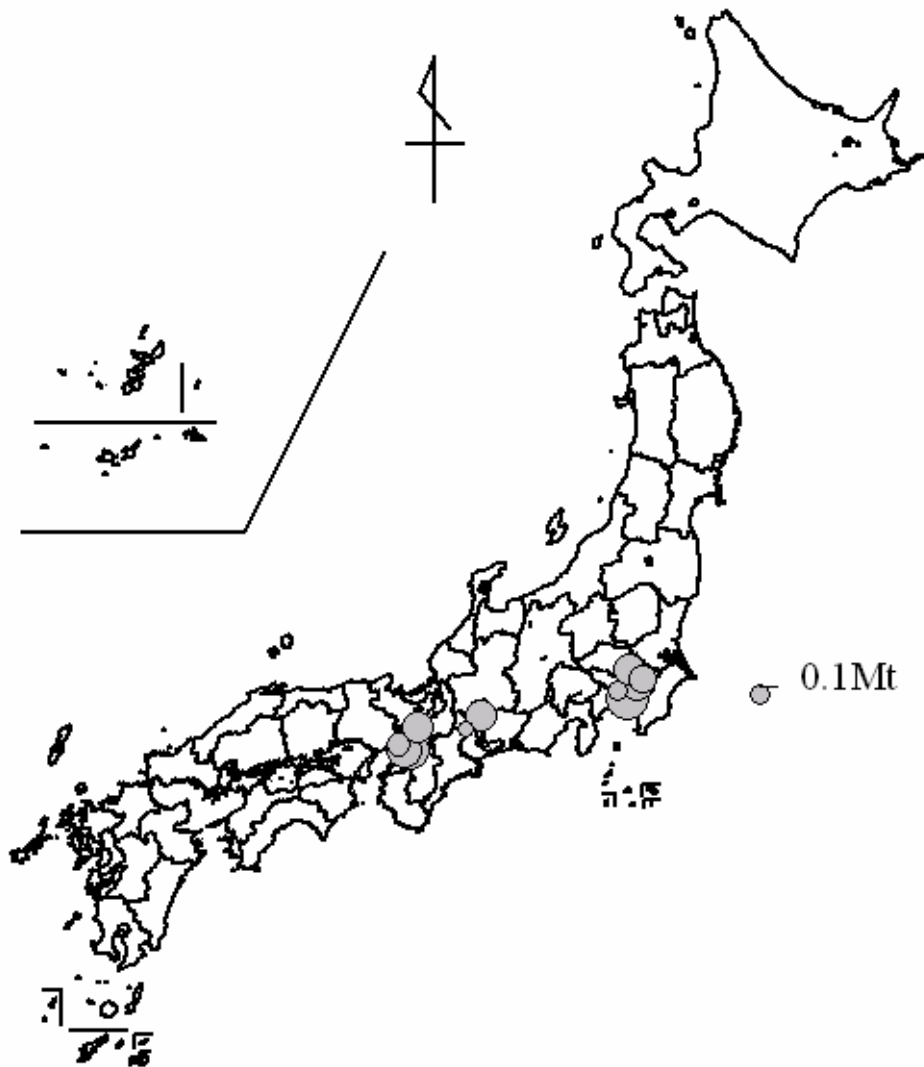


図 5-5 一般廃棄物焼却灰発生量の地域分布(2000 年度)

表 5-6 貨物駅一覧

No	駅名	No	駅名	No	駅名
1	東室蘭	25	熊谷貨物	49	百済
2	苫小牧	26	川崎貨物	50	神戸貨物
3	北旭川	27	樫ヶ谷貨物	51	姫路貨物
4	札幌貨物	28	相模貨物	52	西岡山
5	五稜郭	29	青梅	53	倉敷貨物ターミナル
6	東青森	30	南長岡	54	東水島駅
7	八戸貨物	31	新潟貨物	55	東松江
8	盛岡貨物	32	伏木	56	東福山
9	東能代	33	高岡貨物	57	大竹
10	秋田貨物	34	富山貨物	58	糸崎
11	山形	35	金沢貨物	59	広島貨物
12	酒田港	36	南福井	60	新南陽
13	古川	37	敦賀港	61	防府貨物
14	宮城野	38	名古屋貨物	62	宇部
15	郡山貨物	39	名古屋南貨物	63	下関
16	泉	40	半田埠頭	64	高松貨物
17	水戸	41	東藤原	65	新居浜
18	日立	42	多治見	66	北九州貨物
19	神栖	43	岐阜貨物	67	福岡
20	千葉貨物	44	四日市	68	鳥栖
21	京葉久保田	45	新守山	69	鍋島
22	宇都宮貨物	46	大阪貨物	70	西大分
23	新座貨物	47	梅田	71	八代
24	越谷貨物	48	安治川口	72	熊本

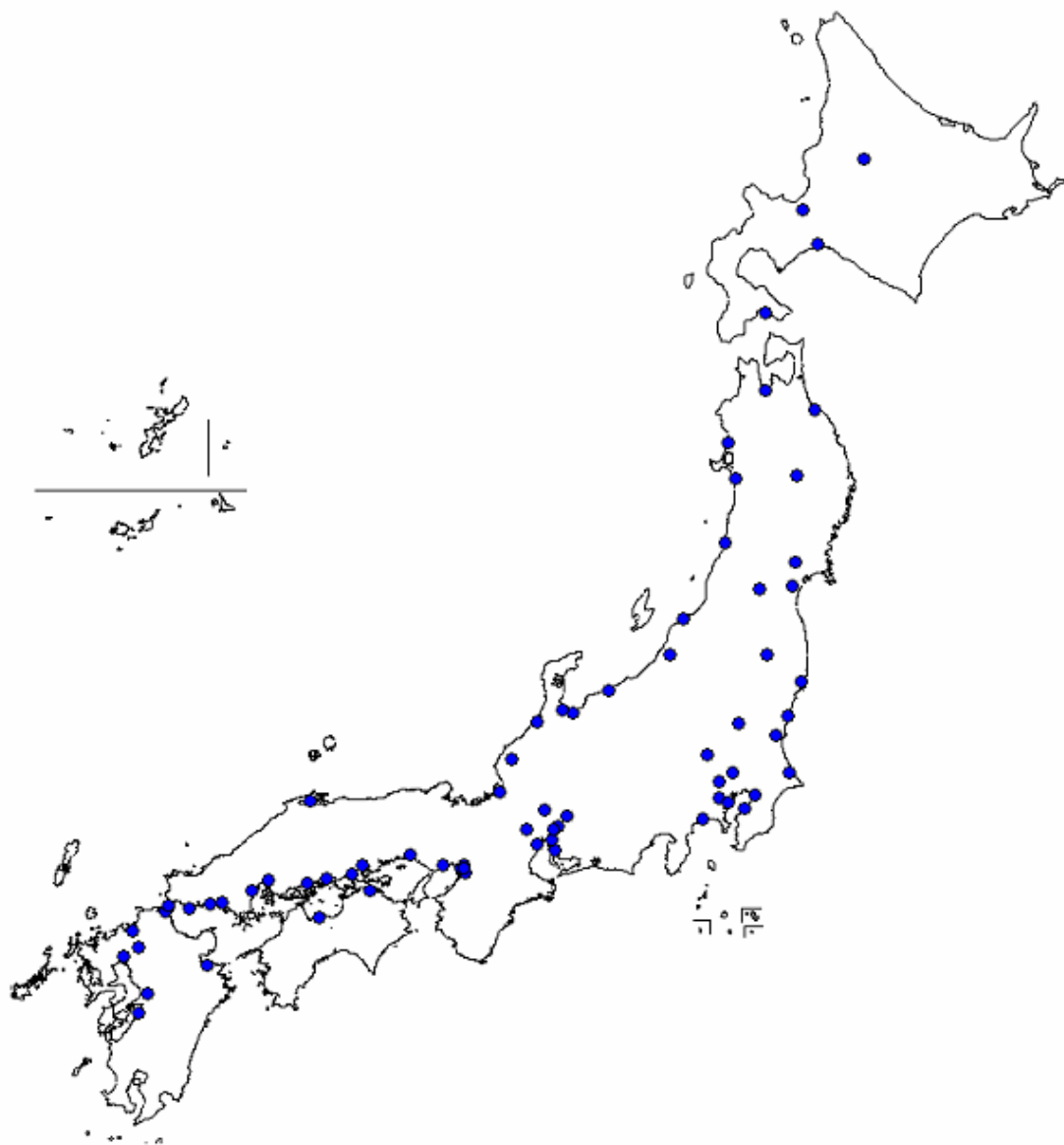


図 5-6 貨物駅の立地

表 5-7 港湾・航路接続点一覧

No	港湾名	No	港湾名	No	港湾名
1	石狩湾新港	28	名古屋	55	津久見
2	苫小牧	29	四日市	56	佐伯
3	苫小牧東	30	和歌山	57	三池
4	室蘭	31	大阪	58	大村
5	函館	32	神戸	59	松浦
6	尻屋岬	33	東播磨	60	苓北
7	青森	34	姫路	61	松島
8	八戸	35	赤穂	62	金武湾
9	大船渡	36	水島	63	石川
10	気仙沼	37	松原	64	名護
11	塩釜	38	福山		
12	能代	39	竹原		
13	酒田	40	大西		
14	相馬	41	呉		
15	原ノ町	42	徳山下松		
16	小名浜	43	宇部		
17	鹿島	44	小野田		
18	日立	45	長府		
19	千葉	46	東予		
20	木更津	47	新居浜		
21	川崎	48	須崎		
22	横浜	49	高知		
23	姫川	50	橘湾		
24	伏木	51	北九州		
25	七尾	52	小倉		
26	敦賀	53	苅田		
27	衣浦	54	大分		
No	航路接続点				
1	大間崎				
2	竜飛岬				
3	蓋井島				
4	佐田岬				
5	野島崎				
6	浦賀水道				
7	伊良湖水道				
8	潮岬				
9	友が島水道				
10	鳴門海峡				

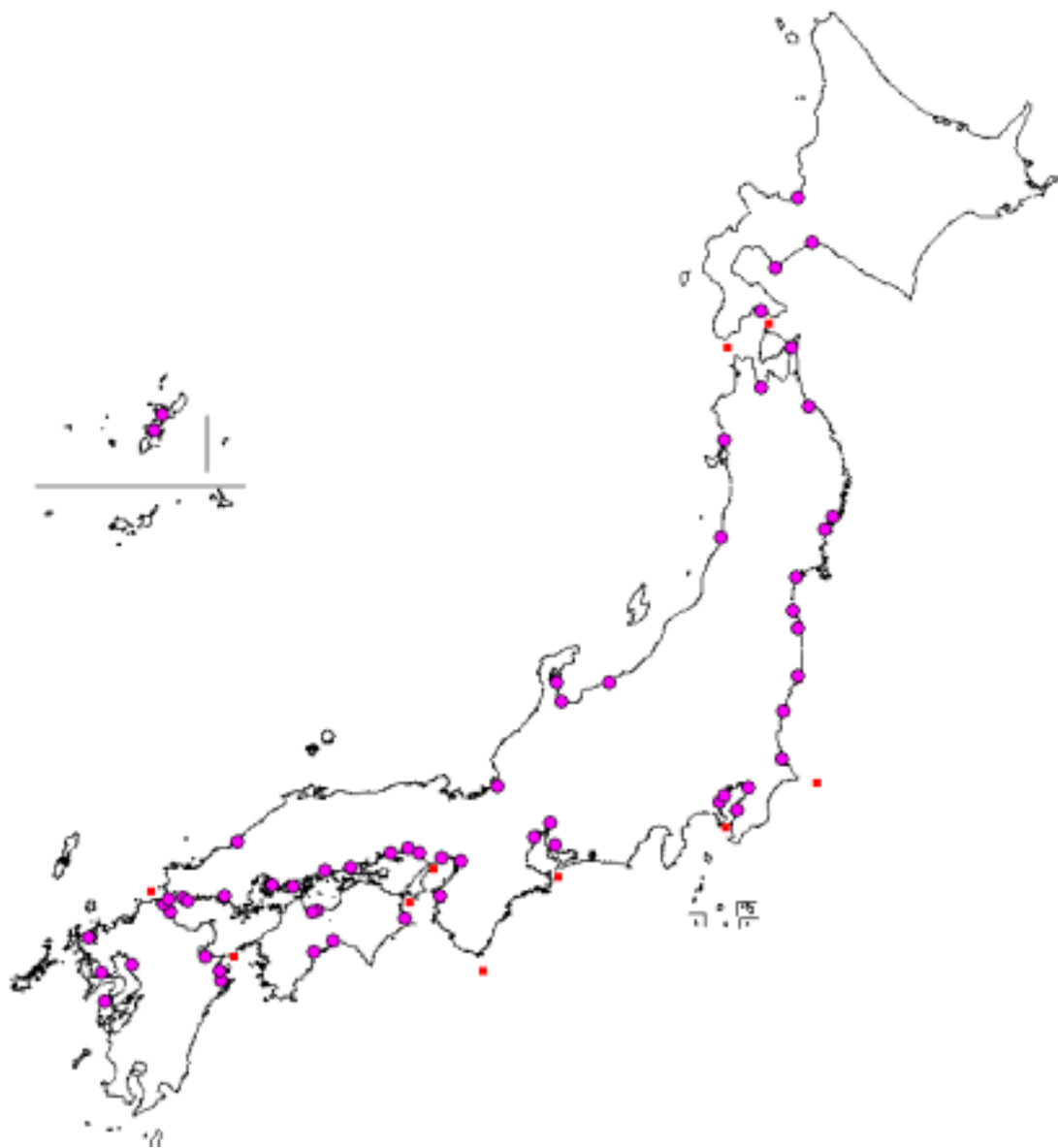


図 5-7 港湾・航路接続点の位置

5.3.5 輸送コスト関数の設定

初期の設定に用いた資料は、トラック運賃の料金表算定マニュアル、JR 貨物の運賃表、海運業界団体資料である。距離についての一次関数で表されるものと仮定し、係数と切片の値を資料に基づき設定した。

(1) 道路貨物運賃

運賃資料^[21]から、トラック種類別(2トン、4トン、8トン、10トン)の貸切距離制運賃のデータ(上限・下限という形)が得られた。トラックが大型になるほど運賃は割安となる。廃棄物はトラックの重量トンだけ積載可能(例:2トントラックなら2トンの廃棄物を運搬)と仮定し、トン当たりの輸送コストをもとめた。プロットしたものを図 5-8 に示す。

図 5-8 に示すように、トラックの種類や上限と下限によって同じ距離でも輸送コストには大きな違いが生じる。本研究での初期設定としては、ヒアリング等で得られた実勢の数値を参考にしながら、10トントラックの上限・下限の平均をとった輸送コストデータを用い、このデータから得られた距離についての回帰直線を輸送コスト関数として採用した。用いた資料中のデータとしては低めの値を採用したことになる。

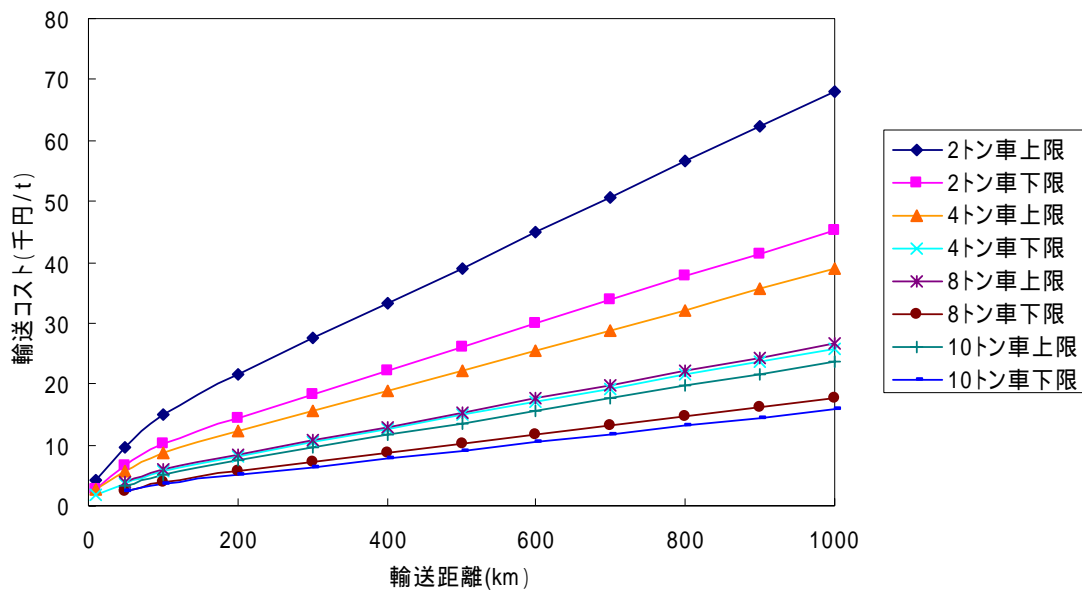


図 5-8 トラック輸送運賃

(2) 鉄道貨物運賃

JR 貨物の運賃表^[22]を用いた。この運賃表に表示されている二駅間の運賃と距離の関係をプロットしたものを図 5-8 に示す。非常によい回帰直線が得られた。この値を鉄道輸送コスト関数として採用した。なお、JR 貨物に聞き取り調査を行ったところ、実際の運賃は顧客との交渉にもよるが運賃表による正規よりも割引かれたものになるとのことである。しかし、廃棄物についてはその割引幅は比較的小さい

ということであった。

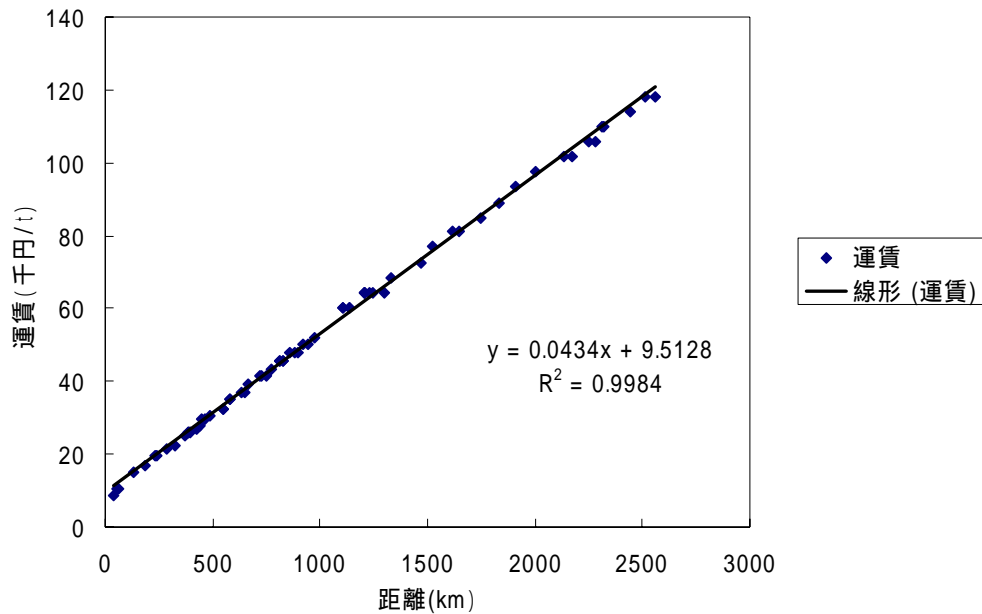


図 5-9 鉄道貨物輸送運賃

(3) 内航貨物運賃

海運の業界団体の資料^[37]を用いた。また、一般に鉄道貨物と内航貨物では、近距離では鉄道輸送のほうがコスト的にも有利であるが、長距離では内航コストは高まるという関係にあるのを想定し、鉄道貨物輸送コストとの関係となるように調整を施した。

以上で求めた3種類の輸送コスト関数を表 5-8 に、距離と重量あたり運賃の関係を図 5-10 に示す。

表 5-8 輸送コスト関数

道路輸送	cRoadInt(円/t)	cRoad(円/t km)
roadCost = cRoadInt + cRoad × d(km)	1,500	18.50
鉄道輸送	cRailInt(円/t)	cRail(円/t km)
railCost = cRailInt + cRail × d(km)	951	4.34
内航輸送	cSeaInt(円/t)	cSea(円/t mile)
seaCost = cSeaInt + cSea × d(mile)	1,300	4.26

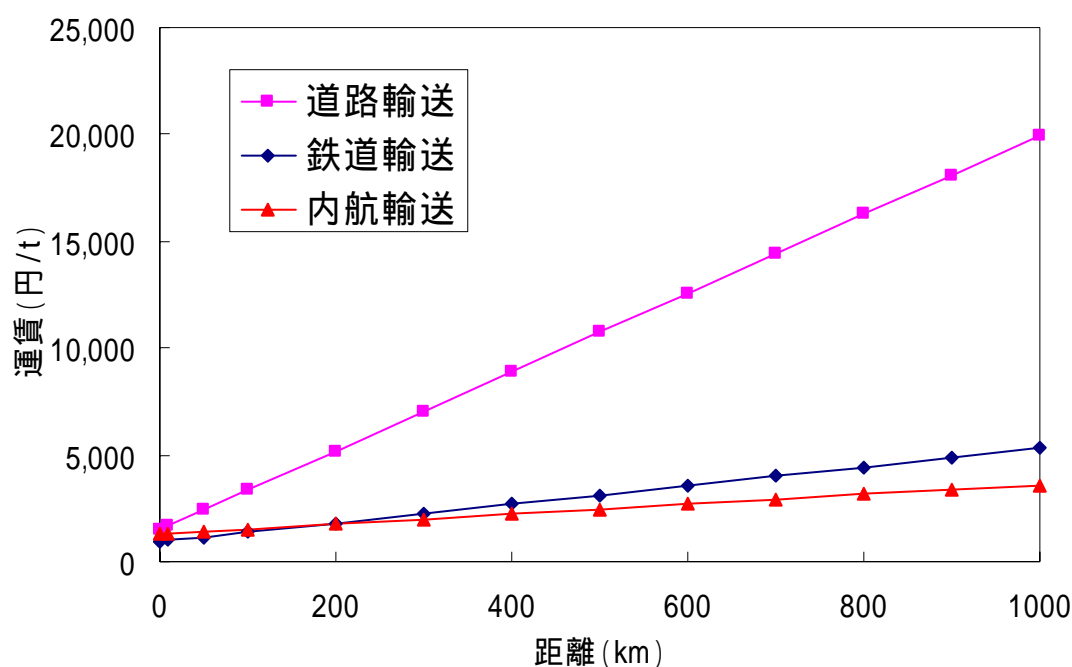


図 5-10 輸送方法別の輸送コスト関数

5.3.6 その他処分コストの設定

その他の廃棄物処理とは、高炉スラグでは路盤材原料、石炭飛灰や一般廃棄物焼却灰では埋め立て処分を想定している。これらのコストも地域により異なるものと考えられるが、本研究ではひとつの値で表されるものとして取り扱う。

本モデルでは、その他処分コストの大小により、廃棄物のセメント原料化リサイクル量は異なる仕組みになっている。その他処分コストの値の設定は後述するが、2000年度の廃棄物リサイクル量の現状値に一致するように設定する。

5.3.7 最適化計算

最適化計算には数理計画ソフト GAMS^{l24)}を用いた。おおむね 1 分以内に計算は終了した。

5.4 シミュレーション(1) 2000年度実績値の再現性

5.4.1 廃棄物のその他処分コストの推定

2000年度の廃棄物のセメント原料化リサイクル量(合計)に一致するようなその他処分コストの値を試行錯誤により求めた。廃棄物としては高炉スラグと石炭飛灰を考慮した。一般廃棄物焼却灰のセメント原料化リサイクルは、2000年度において十分小さいため考慮からはずした。なお、第3章で一般廃棄物焼却灰埋め立て処分コストの値を採用して予備的にシミュレーションをおこなった結果、一般廃棄物焼却灰(焼却主灰・焼却飛灰)のリサイクルは導入されなかった。このことから、本モデルの初期設定では一般廃棄物焼却灰処理コストにおいて、埋め立て処分コストの方がセメント原料化リサイクル

のコストより小さい関係にあることになり、このことは第3章のLCAの結果と整合的であるといえる。シミュレーションの目的関数はシステムコストの最小化とした。

$$\text{minimize} \quad \text{totalCost} = \text{cementCost} + xB \text{ cost} + \text{roadCost} + \text{railCost} + \text{seaCost} \quad (5.34)$$

2000年度の高炉スラグと石炭飛灰のその他処分コストの推定を試行錯誤的におこなった。最終的に採用した値と、それ以外に試みたケースのその他処分コスト設定値を表5-9に示す。あわせて2000年度の廃棄物のセメント原料化リサイクル量実績値と各ケースのシミュレーション結果を図5-11に示す。

表 5-9 廃棄物の利用実績値（2000年度）と試行ケース

	その他処分コスト(円/t)		セメント原料化利用量(千t)	
	高炉スラグ	石炭飛灰	高炉スラグ	石炭飛灰
2000年度実績	-	-	12162	4891.888
ケース1	1,000	2,000	14,917	4,096
ケース2	900	2,000	11,381	4,258
ケース3	1,000	3,000	12,699	5,518
ケース4	900	3,000	10,904	5,566
採用値	959	2,420	12,012	4,948

セメント原料化リサイクル量は、クリンカ原料利用と混合材利用の合計

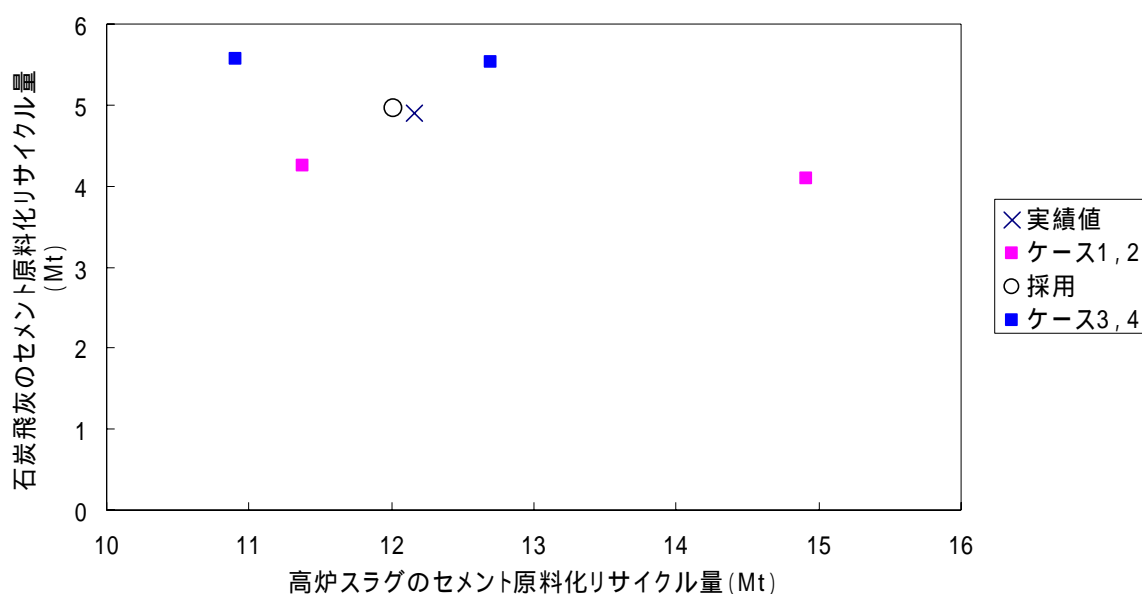


図 5-11 廃棄物のセメント原料化リサイクル量実績値と各ケースのシミュレーション結果

廃棄物のその他処分コストを推定した結果、高炉スラグ 959 円/t、石炭飛灰 2420 円/t という値が得られた。一般に、高炉スラグは土木材料としても有価物として取引されているといわれているため、その点だけで見るとこの推定結果は現状に一致していない(有価物として取引されているならその他処分

コストは負の値にならない)。しかし、リサイクルの実情として、土木材料の需要が減少すると、表面上は有価物として取引されていても排出側で輸送コストを負担するなどして実質は逆有償取引（排出者が費用を支払ってリサイクル）となっている場合も生じていると考えられる^[25]。

電力会社へ聞き取り調査をしたところ、石炭飛灰の処分費用は数千円/tということであり、推定結果は実情と矛盾しない。

5.4.2 廃棄物のセメント原料化リサイクル量の地域別内訳

地域別の廃棄物セメント原料化リサイクル量内訳のデータが存在する。このデータと 5.4.1 で設定したその他処分コストの下でのシミュレーション結果を比較することで、本モデルの妥当性を検討する。

高炉スラグの比較結果を図 5-12 に、石炭飛灰の比較結果を図 5-13 に示す。ただし高炉スラグは 2000 年度のデータを得ることができなかつたので、直近の 1999 年度のデータと比較する。1999 年度の高炉スラグのセメント原料化リサイクル量は 1204 千 t であり、2000 年度の値と大差ない。なお、入手可能な実績値の都合により、高炉スラグのリサイクル量は利用地域別内訳（各地域のセメント工場での利用量を地域ごとに集計したもの）、石炭飛灰のリサイクル量は発生地域別内訳（各地域の石炭飛灰発生源ごとにセメント原料化リサイクル量を地域ごとに集計したもの）となっている。

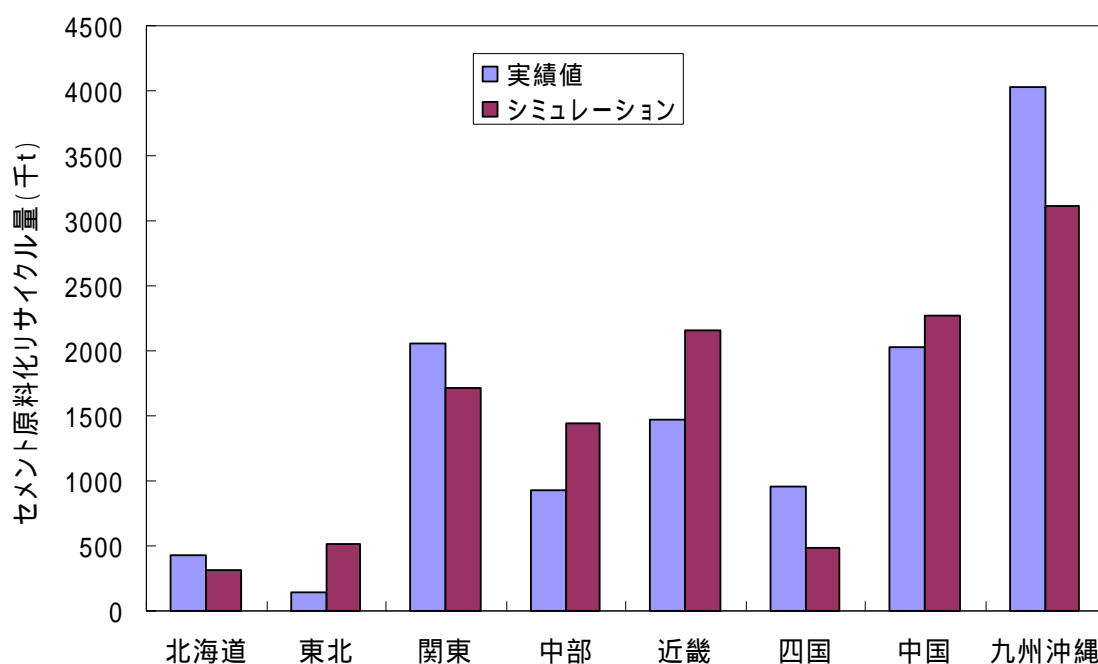


図 5-12 高炉スラグのセメント原料化リサイクル量の利用地域別内訳比較（2000 年度）

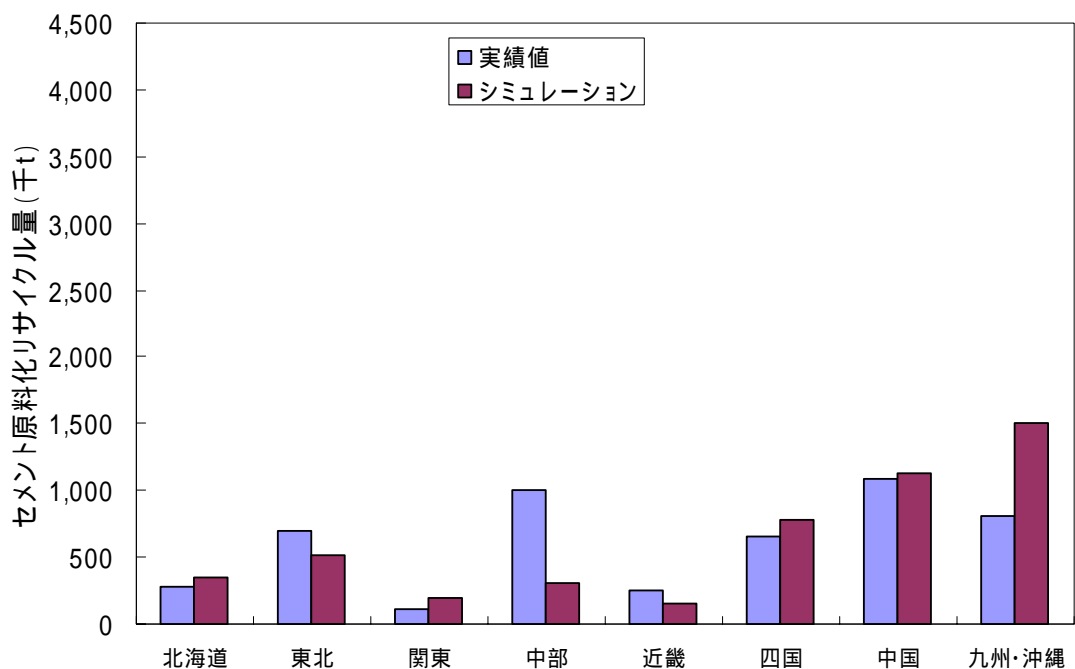


図 5-13 石炭飛灰のセメント原料化リサイクル量の地域別内訳比較 (2000 年度)

高炉スラグのセメント原料化リサイクル量の地域別内訳について、実績値とシミュレーション結果の地域ごとの大小関係が類似の傾向を示しているといえる。石炭飛灰のセメント原料化リサイクル量の地域別内訳については、中部地方と九州・沖縄地方で実績値とシミュレーション結果に相違が見られるものの、それ以外の地域ではやはり地域ごとの大小関係に類似の傾向が見て取れる。

図 5-12、図 5-13 の実績値とシミュレーション結果を散布図上で比較したものを図 5-14 に示す。

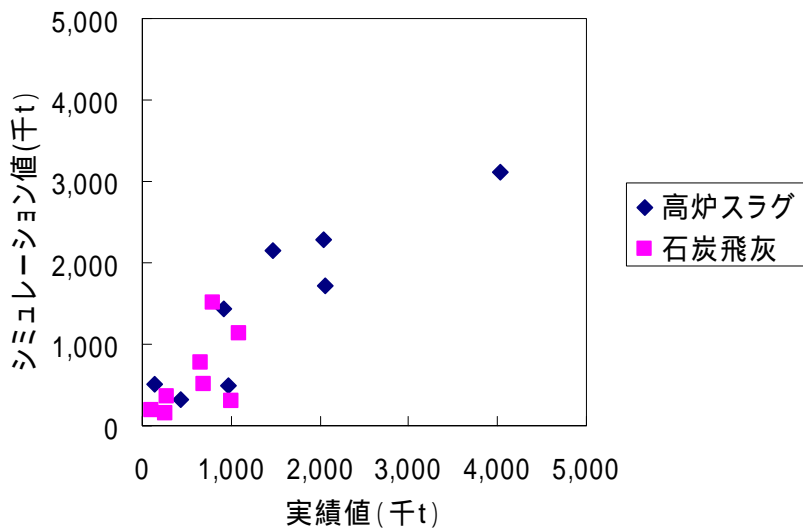


図 5-14 高炉スラグ・石炭飛灰の地域別の利用量と実績値とシミュレーション結果の比較

実績値とシミュレーション結果の相関係数は 0.89 である。相関係数の値が 1 に近く、実績値とシミュレーション結果の地域ごとの大小関係が類似の傾向を示していると判断できる。以上より、コスト最小化によりリサイクルシステムの状態が決定されるという本モデルの仮定には一定の妥当性があるものと認められる。

図 5-14 において最も右上の点は他の点に比べて 45 度線からのずれが大きい。この点は九州・沖縄地方の高炉スラグのリサイクル量を表したものである。図 5-12 の九州・沖縄の部分を見れば分かるように、確かに実績値の方がシミュレーション結果より 100 万 t 程度大きい。この九州・沖縄の高炉スラグの結果の差は石炭飛灰の差に対応したものである。図 5-13 の九州・沖縄の部分を見れば分かるように、石炭飛灰ではシミュレーション結果の方が実績値より 50 万 t 程度大きくなっている。すなわち、シミュレーションでは、九州・沖縄地方のセメント工場では実績値と比較してより多くのフライアッシュを利用し、そのかわり高炉スラグの利用量は少ないという状態になっている。これは、このモデル設定ではこのような状態が全体として最もコストが小さいということを意味している。

輸送・生産モデルで得られる結果と現状が異なっている原因としては、次の点が考えられる。

現実でもコスト最小化だけで行動が決定されるという前提が妥当であるとする、モデルと現状の違いは

- (a) モデルのパラメータ（輸送コスト、セメント生産コスト）が現実をよく反映していない（値自体が違う、あるいは一つの値を用いることがおかしい＝工場によってもコストは異なる）
- (b) モデルが全体でのコスト最小化であるのに対し、現実是个々の主体のコスト最小化により決定される

といった点があげられる。

現実にはコスト最小化だけで行動が決定されるという前提が妥当でないとする、個々のセメント工場の能力（雑多な廃棄物でも利用可能な技術を持つ、など）の違いなどがモデルが現状をうまく表現できない要因として考えられる。

5.4.3 廃棄物のマテリアルフロー結果

本モデルを用いたシミュレーションからは、廃棄物排出源とセメント工場間の廃棄物マテリアルフローの結果を得ることができる。結果を図 5-15 から図 5-20 に示す。

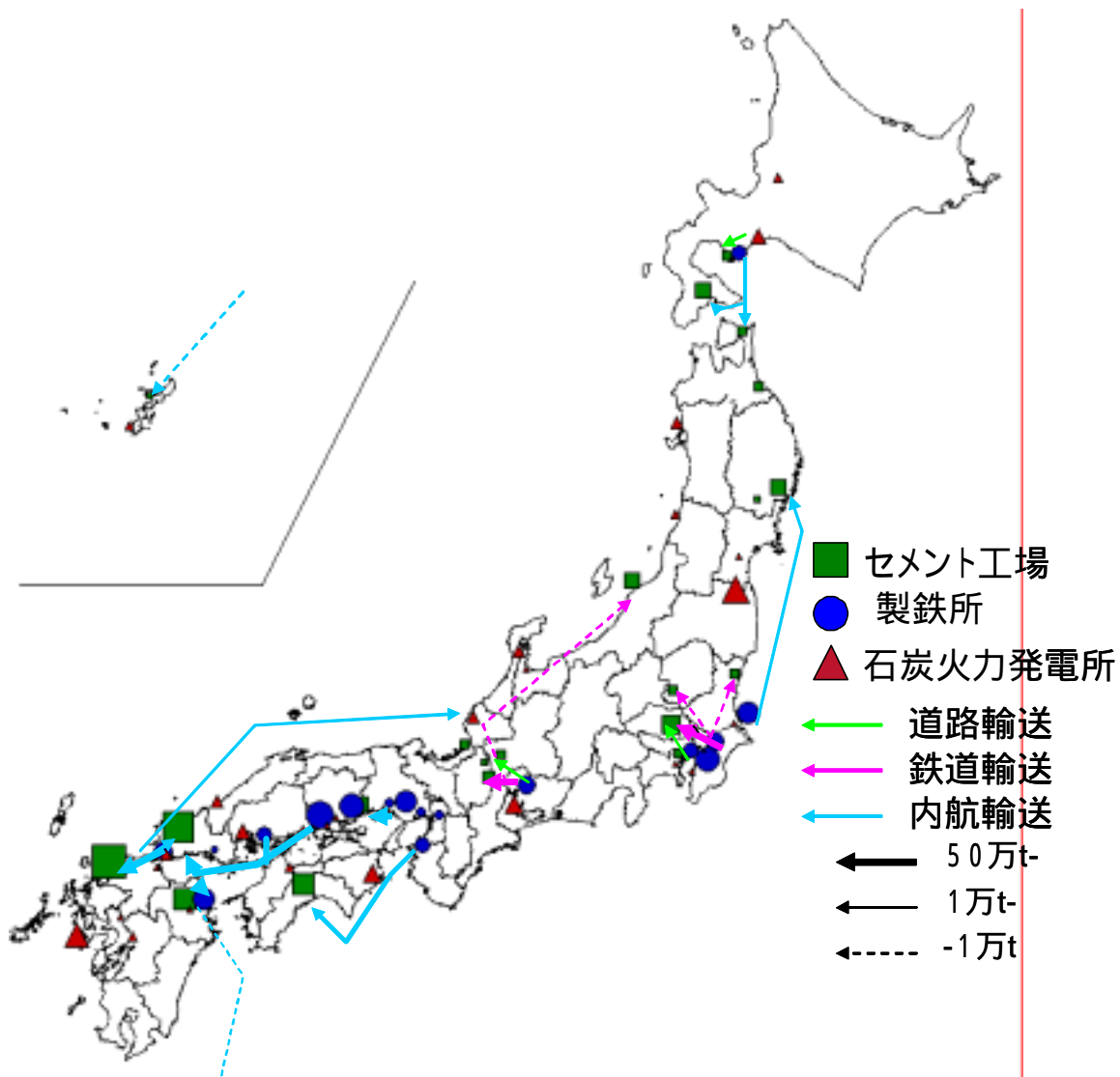


図 5-15 高炉スラグの輸送方法別マテリアルフロー

図 5-15 は高炉製鉄所とセメント工場間の高炉スラグのマテリアルフローを示している。セメント工場は緑色の四角ブロックで表されている。ブロックの大きさは生産規模に比例している。工場が集中している地域は統合して一つのブロックで表している。高炉製鉄所は青色の丸ブロックで表されている。最も輸送量が多いフローは、瀬戸内海の臨海部に立地する製鉄所からセメント工場へ内航輸送によるものである。京浜地域の製鉄所からは鉄道輸送と道路輸送により内陸部のセメント工場へ輸送されるが、瀬戸内海のフローに比べ量的に小さい。

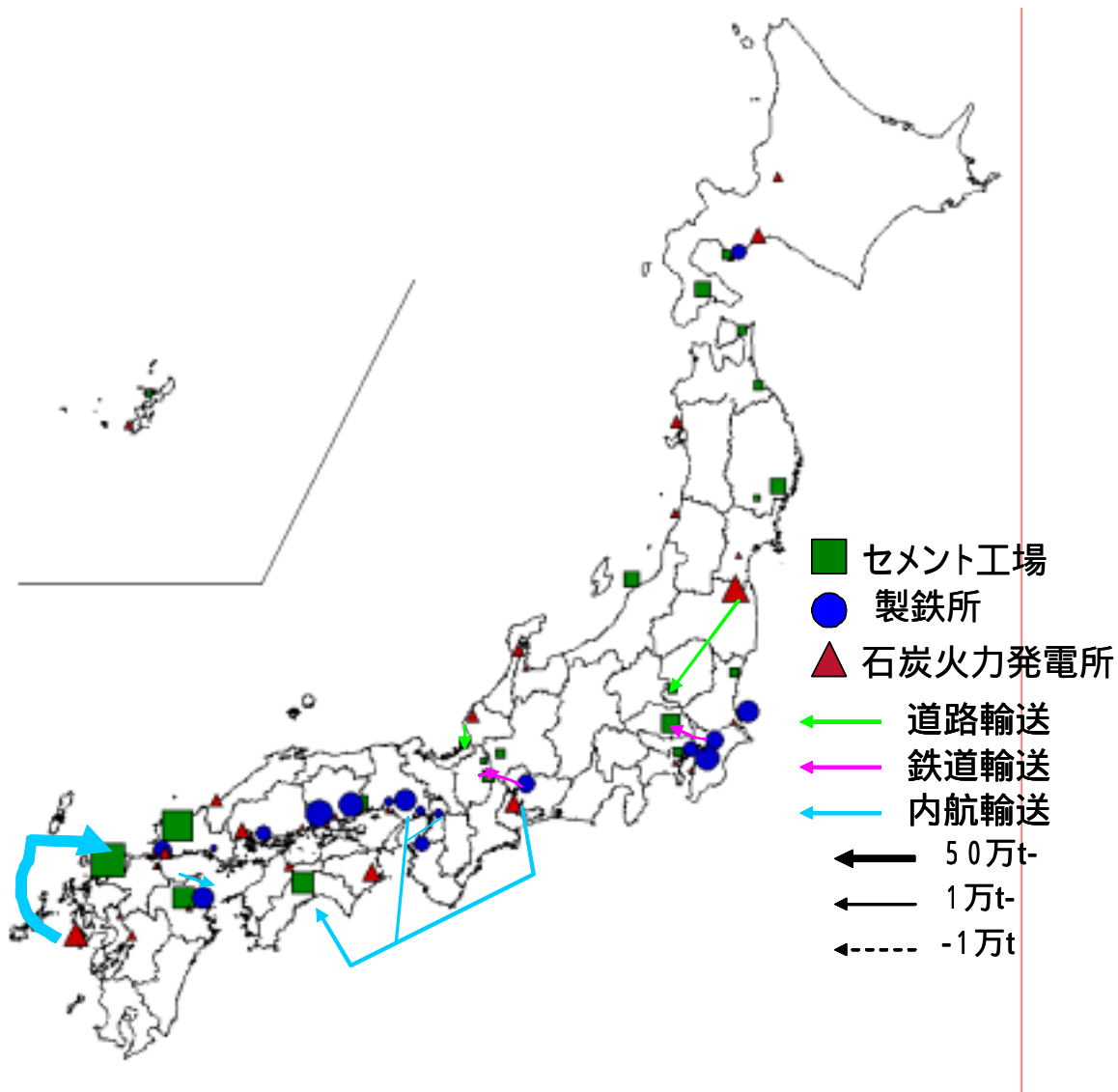


図 5-16 石炭飛灰の輸送方法別マテリアルフロー

図 5-16 は石炭火力発電所とセメント工場間の石炭飛灰のマテリアルフローを示している。石炭火力発電所は赤色の三角ブロックで表されている。ブロックの大きさは発生量に比例している。発電所が集中している地域は統合して一つのブロックで表している。

最も輸送量が多いフローは、九州西北部の発電所集中立地域から北九州地域に立地するセメント工場へ内航輸送によるものである。中京地域から高知県のセメント工場への内航輸送、福島県臨海部の発電所集中立地域から内陸部のセメント工場への道路輸送によるフローがこれに次ぐ。

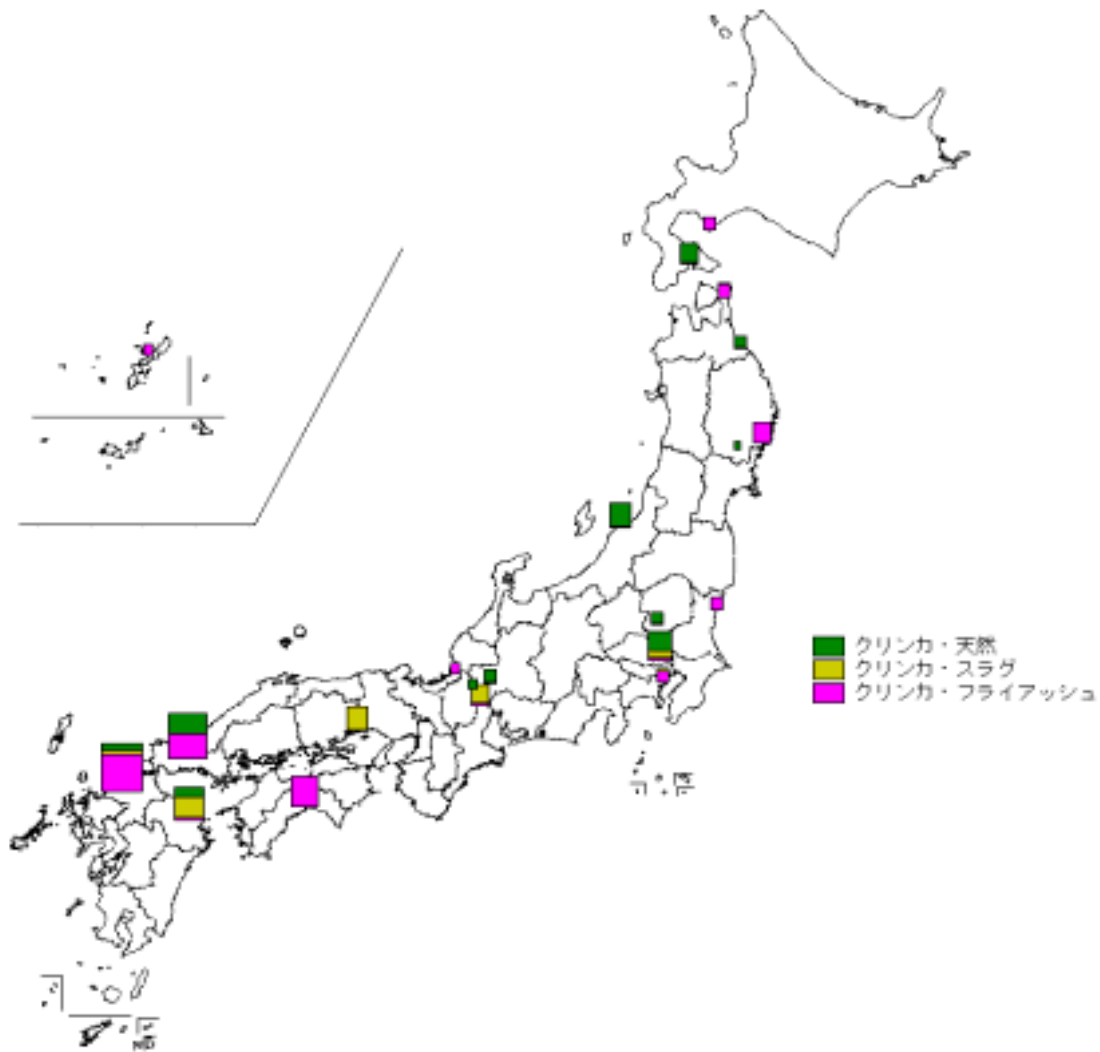


図 5-17 クリンカ種類別生産量

各セメント工場のクリンカ種類別の生産量を図 5-17 に示す。グラフの大きさは生産規模に比例している。工場が集中している地域は統合して一つのグラフで表している。

臨海地域では石炭飛灰（フライアッシュ）を利用したクリンカの占める割合が大きいセメント工場が目立つ（北九州，高知，岩手，北海道）。高炉スラグを利用したクリンカの占める割合が大きい地域としては，瀬戸内地域，三重がある。天然原料によるクリンカの占める割合が大きい地域は山口，新潟，埼玉，北海道があり，これらの地域ではセメント工場による廃棄物の利用余地が大きい。

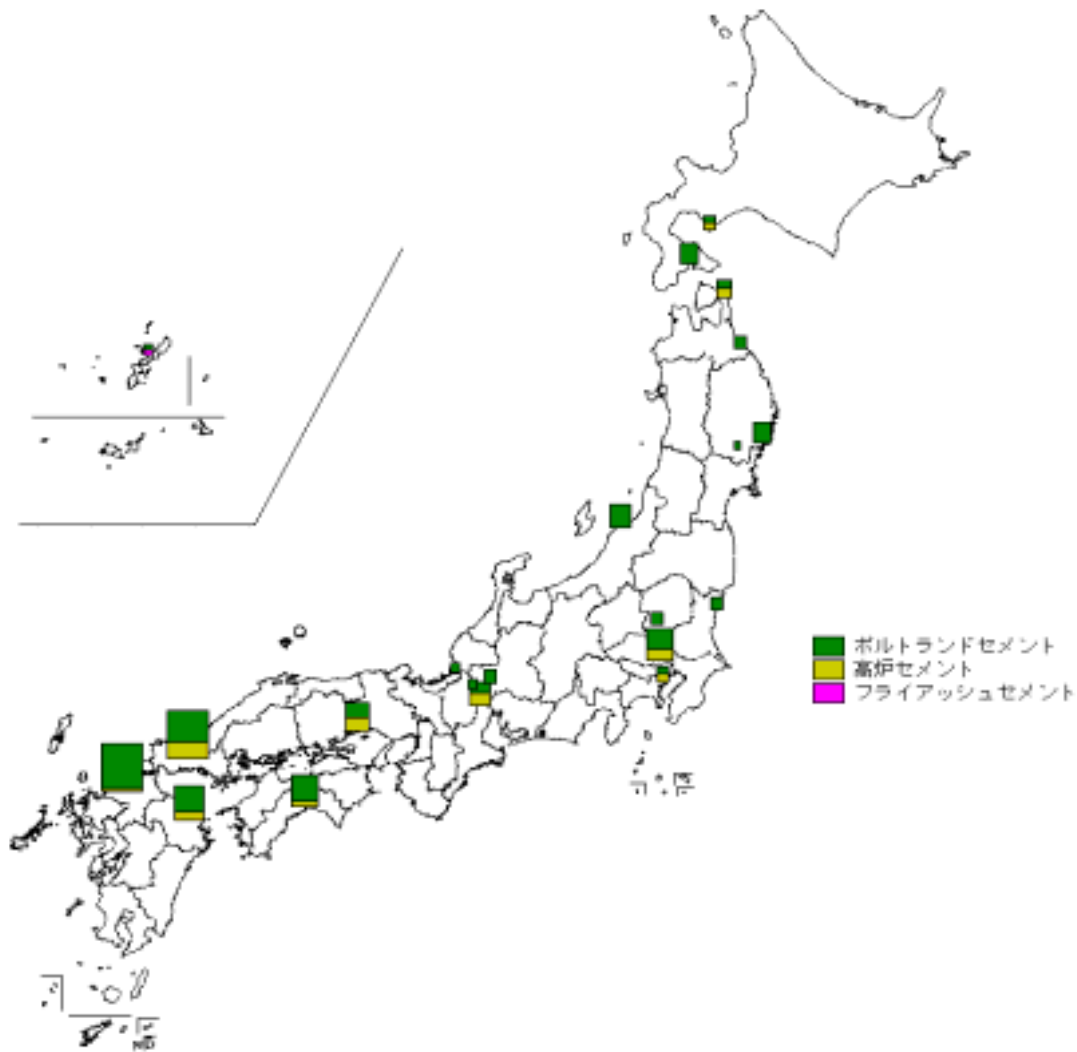


図 5-18 セメント種類別生産量

各セメント工場のセメント種類別生産量を図 5-18 に示す。図 5-15 に示した高炉スラグの輸送量が大きいセメント工場では高炉セメントの生産量も多い。

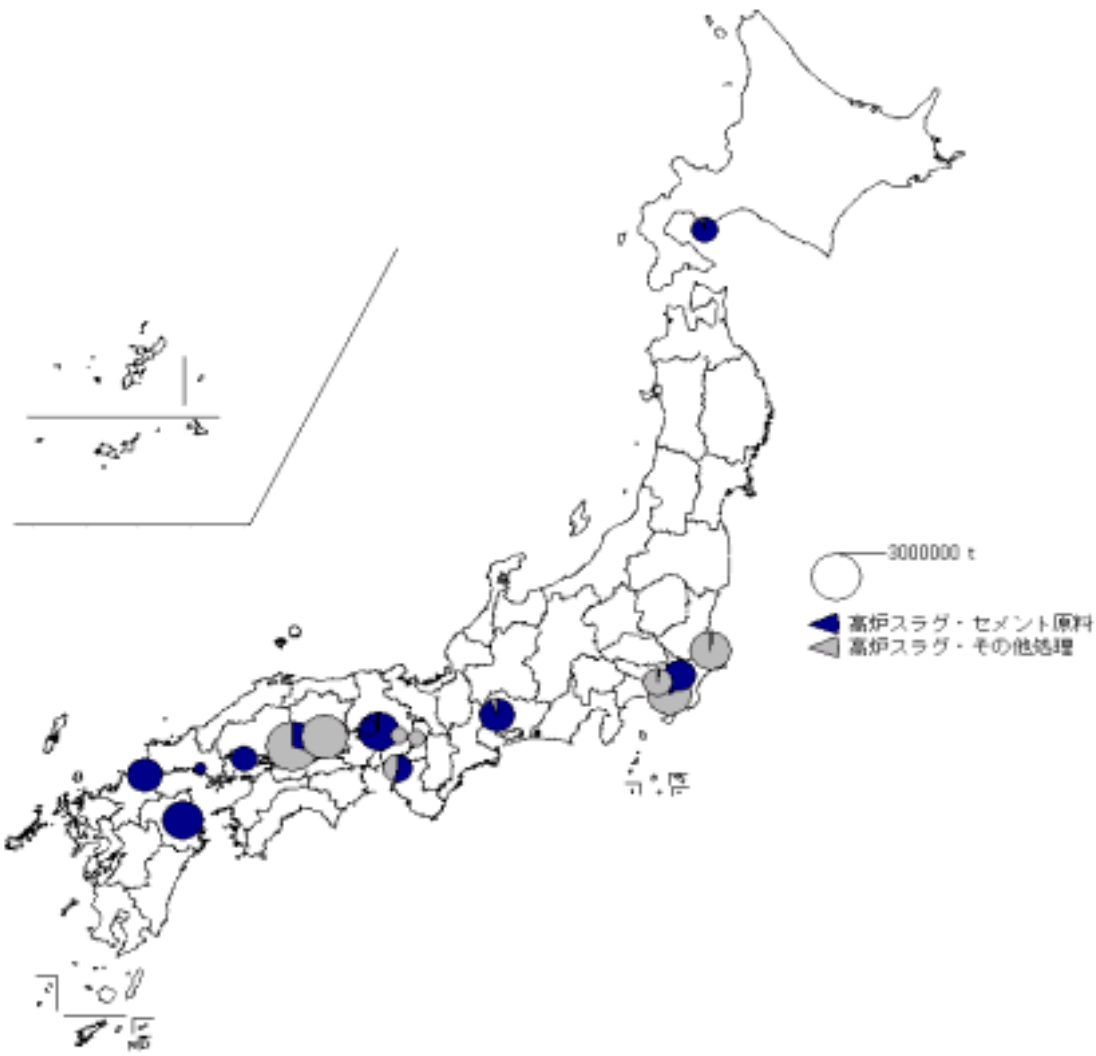


図 5-19 高炉スラグの処理内訳

各高炉製鉄所の高炉スラグ処理内訳を図 5-19 に示す。高炉スラグは全体では発生量の約 50%がセメント原料として利用されるが、地域によりセメント原料として利用される割合は異なる。瀬戸内地域でもほとんどセメント原料として利用されない高炉スラグの発生原も存在する。京浜地域ではセメント原料として利用される割合が瀬戸内地域に比べて低い。

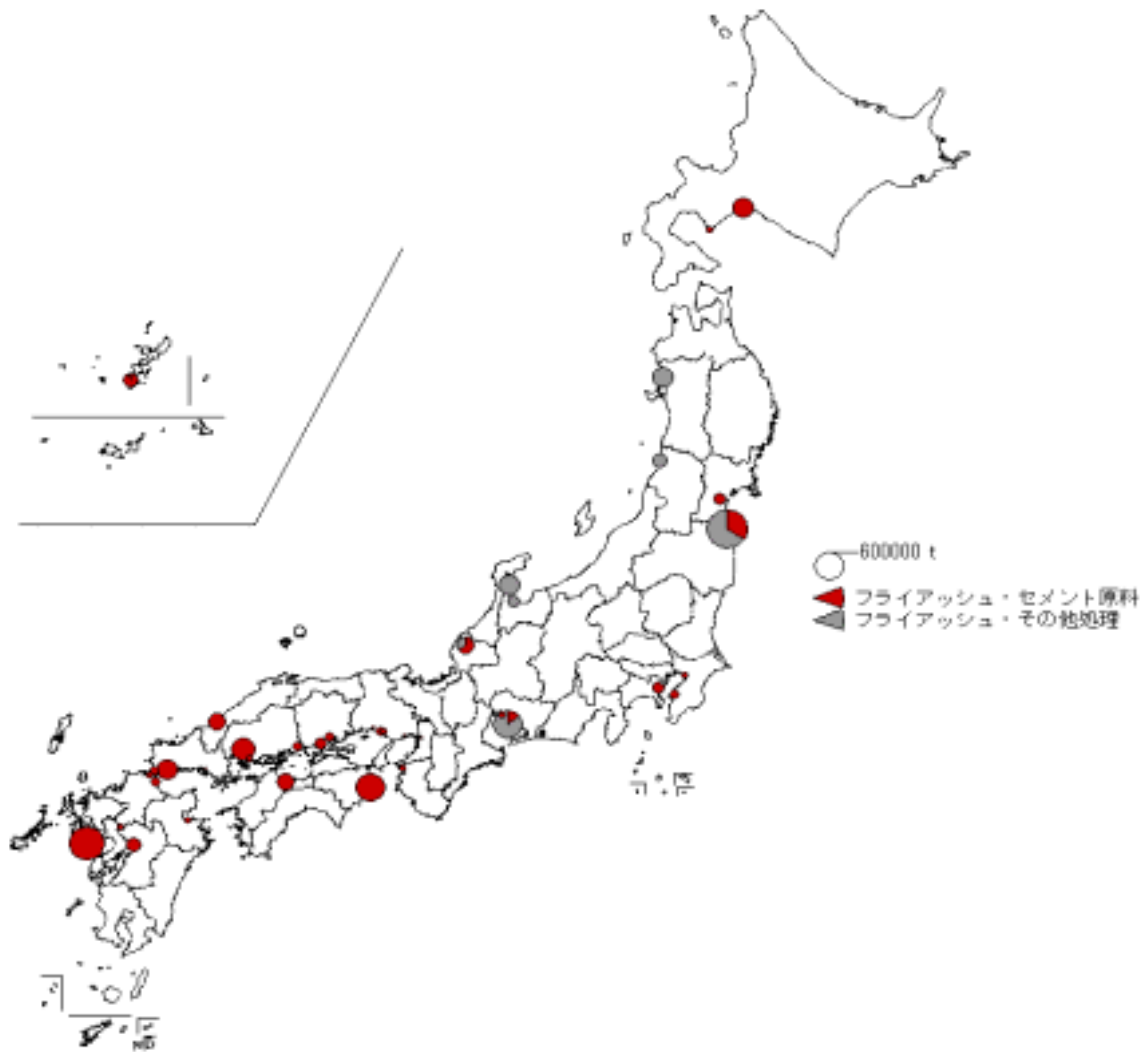


図 5-20 石炭飛灰の処理内訳

各石炭火力発電所の石炭飛灰（フライアッシュ）処理内訳を図 5-20 に示す。瀬戸内・九州北西部でほぼ全量がセメント原料として利用されているのに対し，東日本，とくに日本海側ではセメント原料としての利用率が低い。図 5-13 に示したように，2000 年実績値と本モデルの結果を比較すると，本モデルの結果は九州での利用量を高く評価し、中部での利用量を低く評価している。よってここで示した結果のうちこれらの地域の利用量は極端な状態になっているが，利用率が低い地域ではセメント工場が近くに立地していないためにそのような傾向にあることは認められる。

5.5 シミュレーション(2) コスト最小化とCO₂最小化の比較

本節では、目的関数としてコスト最小化とCO₂最小化を取った場合の結果を比較することで、廃棄物のリサイクルを促進につながるシステムとCO₂削減につながるシステムの関係を考察することを目的とする。

本節の内容は Hara *et al.*^[26]に基づく。ただし、用いたモデルの設定が若干異なるので、大筋の結論は同一であるが、結果の数値には一致しない部分もある。

5.5.1 制約条件と目的関数

このシミュレーションでは本モデルの制約条件と目的関数に若干の変更を加えた。このシミュレーションでは、廃棄物のセメント原料化リサイクル量が同一という条件の下で、目的関数の違いにより廃棄物のフロー、地域別の生産量、システムコスト、CO₂排出量にどのような違いが生じるか比較する。そこで、制約条件としてリサイクル量に関する条件を追加した。

$$\sum_h y(\text{"Slag"}, h) = \text{SumxSlag}_0 \quad (5.35)$$

$$\sum_h y(\text{"Flyash"}, h) = \text{SumxFlyash}_0 \quad (5.36)$$

ここで廃棄物のセメント原料化リサイクル量は 2000 年度実績値と同一とした。すなわち $\text{SumxSlag}_0 = 12162000$, $\text{SumxFlyash}_0 = 4890000$ である。

廃棄物のセメント原料化リサイクル量に制約条件を課したため、リサイクル量に影響を与えるその他処分コストの設定は不必要となる。よって、その他処分コストの値 $cB(\text{waste}) = 0$ とした。

目的関数は次の通りである。

目的関数 1 コスト最小化

$$\text{minimize} \quad \text{totalCost} = \text{cementCost} + \text{roadCost} + \text{railCost} + \text{seaCost} \quad (5.37)$$

目的関数 2 CO₂ 排出量最小化

$$\text{minimize} \quad \text{totalCO2} = \text{cementCO2} + \text{roadCO2} + \text{railCO2} + \text{seaCO2} \quad (5.38)$$

5.5.2 コスト最小化のシミュレーション結果

地域別・輸送方法別の廃棄物輸送量の結果を廃棄物発生側と利用側に分けて示す。高炉スラグの結果を図 5-21, 図 5-22 に、石炭飛灰の結果を図 5-23, 図 5-24 に示す。

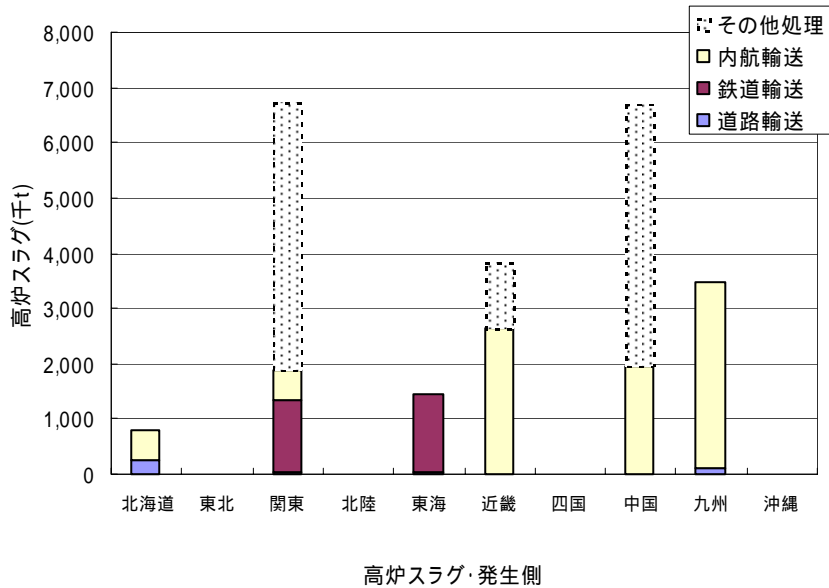


図 5-21 高炉スラグ地域別発生量の輸送・処理内訳

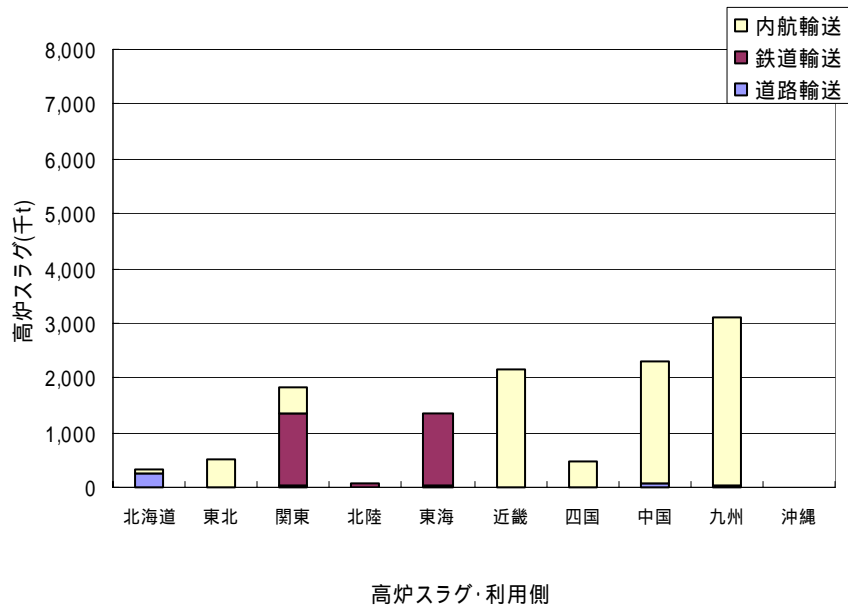


図 5-22 高炉スラグ地域別利用量の輸送内訳

図 5-21 は、発生量のうちセメント原料として利用された高炉スラグ量をさらに輸送方法別に色分けし、地域別に集計して示したものである。図 5-22 は、セメント工場で利用された高炉スラグ量を輸送方法別に色分けし、地域別に集計して示したものである。これらのグラフから以下の傾向が認められる。

- (a) 内航輸送による輸送が最も多い
- (b) 関東・中国地方で発生量に対する供給量が小さい
- (c) セメント原料利用量では近畿・中国地方が大きい
- (d) 地域間の輸送量が小さい（地域別発生量と地域別利用量はおおむね同じような値をとる）

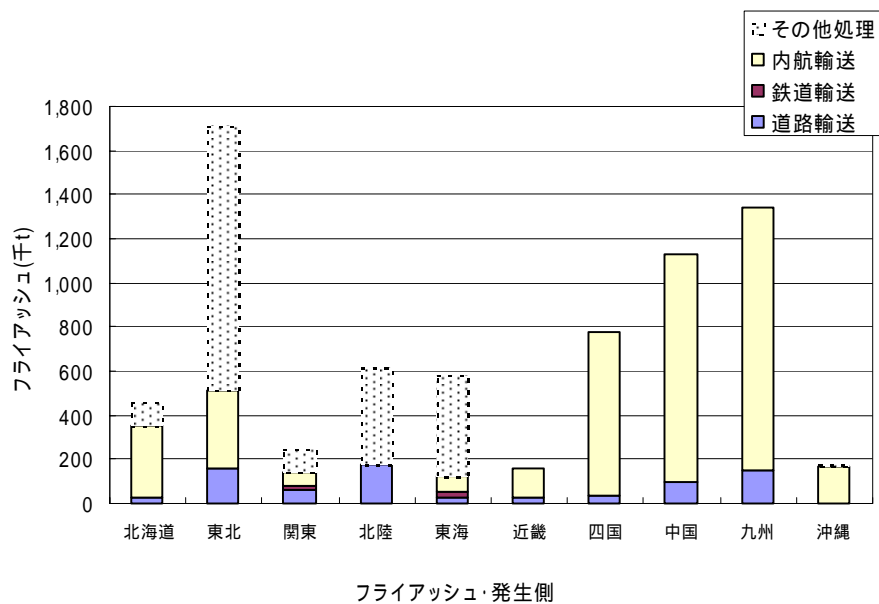


図 5-23 石炭飛灰（フライアッシュ）地域別発生量の輸送・処理内訳

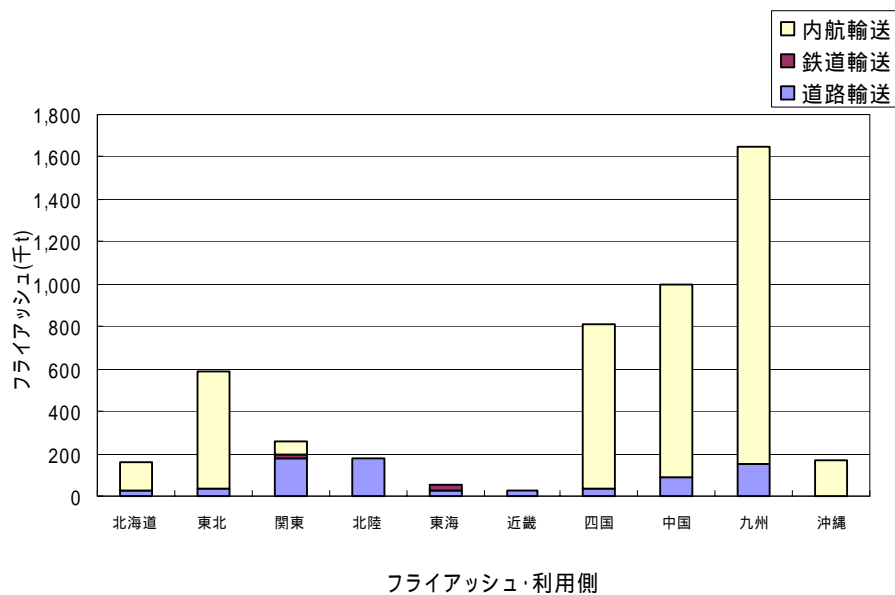


図 5-24 石炭飛灰（フライアッシュ）地域別利用量の輸送内訳

図 5-23 は、発生量のうちセメント原料として利用された石炭飛灰量をさらに輸送方法別に色分けし、地域別に集計して示したものである。図 5-24 は、セメント工場で利用された石炭飛灰量を輸送方法別に色分けし、地域別に集計して示したものである。これらのグラフから以下の傾向が認められる。

- (a) 内航輸送による輸送が最も多い
- (b) 東北・中部地方で発生量に対する供給量が小さい
- (c) 地域間の輸送量では九州への輸送量が大きい（九州では発生量に比べ利用量が増加）

5.5.3 CO₂ 排出量最小化のシミュレーション結果

地域別・輸送方法別の廃棄物輸送量の結果を廃棄物発生側と利用側に分けて示す。高炉スラグの結果を図 5-25，図 5-26 に，石炭飛灰の結果を図 5-27，図 5-28 に示す。

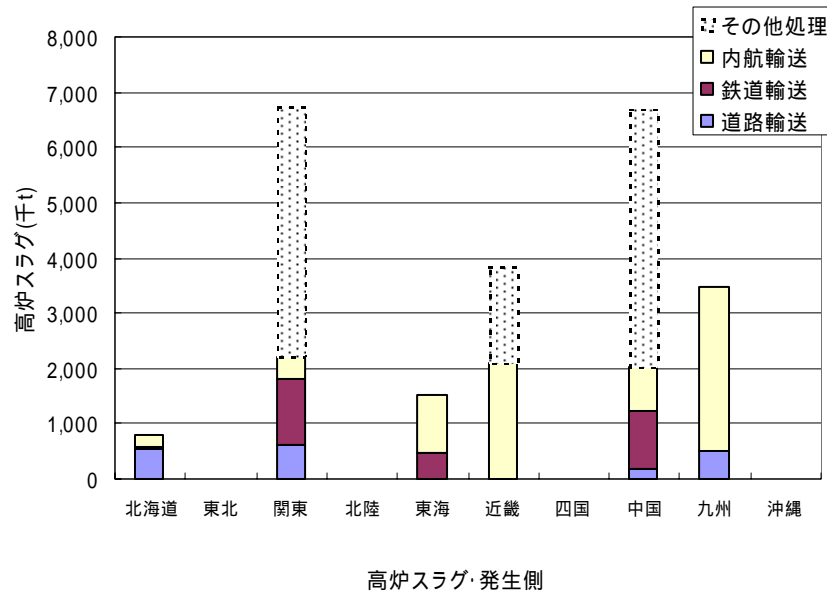


図 5-25 高炉スラグ地域別発生量の輸送・処理内訳

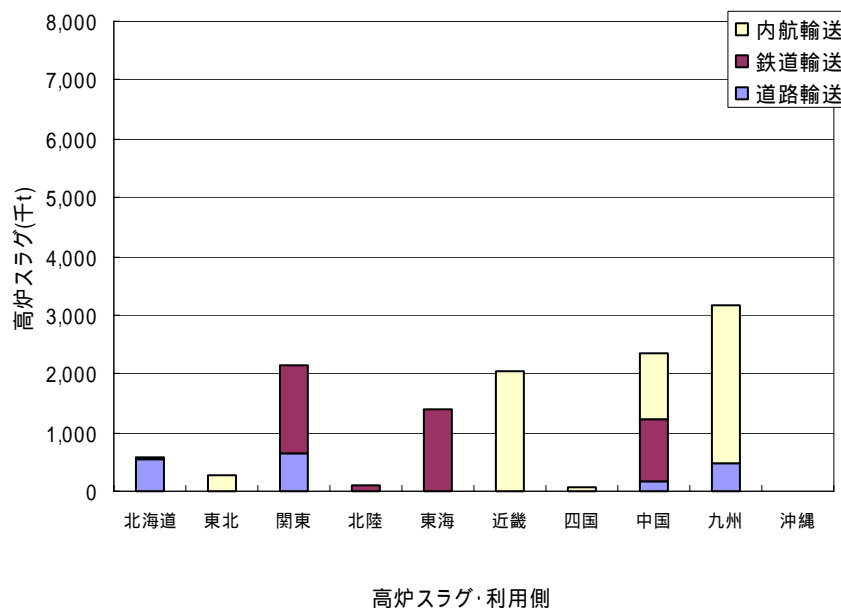


図 5-26 高炉スラグ地域別利用量の輸送内訳

図 5-25 は，発生量のうちセメント原料として利用された高炉スラグ量をさらに輸送方法別に色分けし，地域別に集計して示したものである。図 5-26 は，セメント工場で利用された高炉スラグ量を輸送方法別に色分けし，地域別に集計して示したものである。コスト最小化の結果と比較してこれらのグラフから以下の傾向が認められる。

- (a) 鉄道輸送の割合が増加する
- (b) 関東・中国地方で発生量に対する供給量は小さい(同様の結果)
- (c) 関東地方での利用量が増加する(内陸部のセメント工場への輸送が導入されたため)

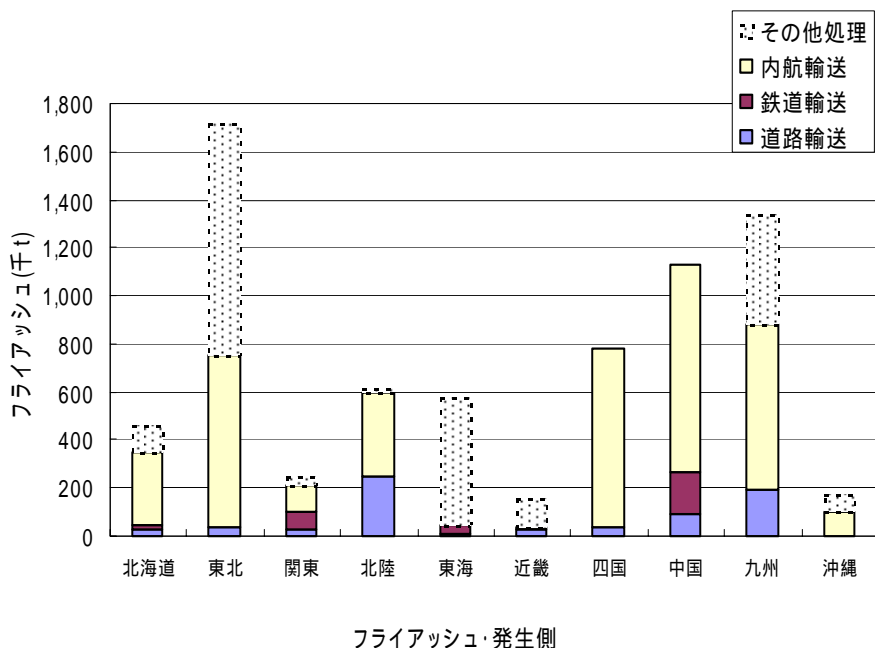


図 5-27 石炭飛灰(フライアッシュ) 地域別発生量の輸送・処理内訳

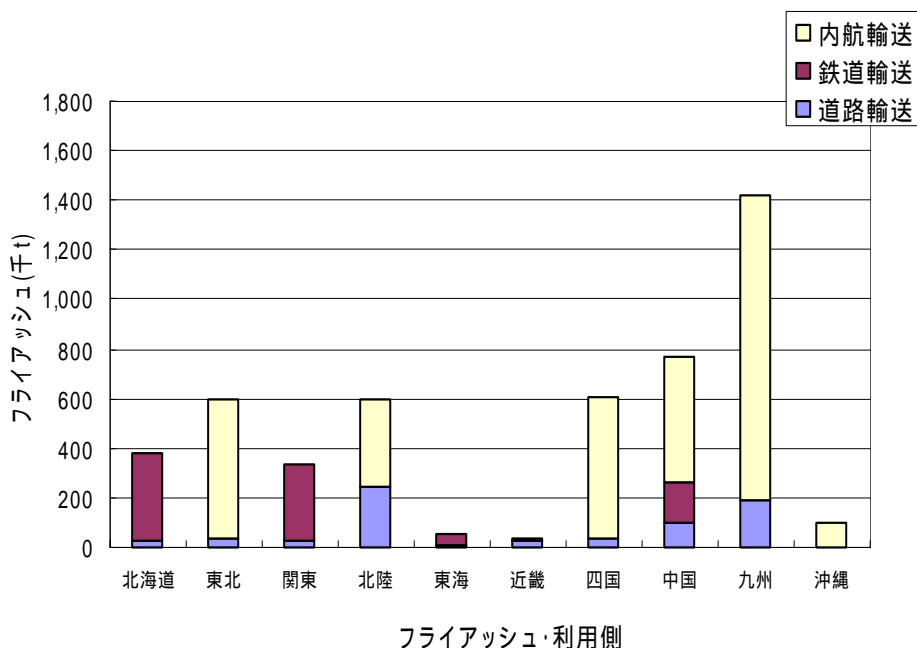


図 5-28 石炭飛灰(フライアッシュ) 地域別利用量の輸送内訳

図 5-27 は、発生量のうちセメント原料として利用された石炭飛灰量をさらに輸送方法別に色分けし、地域別に集計して示したものである。図 5-28 は、セメント工場で利用された石炭飛灰量を輸送方法別に色分けし、地域別に集計して示したものである。コスト最小化の結果と比較してこれらのグラフから

以下の傾向が認められる。

- (a) 鉄道輸送が増加する
- (b) 東北地方で発生量に対する供給量は小さい（同様の結果）
- (c) 中部地方で利用量が増加する

5.5.4 結果の考察

以上、コスト最小化とCO₂最小化のそれぞれの目的関数の下でもとめた廃棄物の地域別輸送方法別利用量の結果を比較すると、2つの結果の違いは鉄道輸送導入量の違い、具体的には内陸部のセメント工場への廃棄物輸送の変化が主たる違いとなっている。

コスト最小化とCO₂最小化のそれぞれでシステムの総コストと総CO₂排出量を比較した結果を図5-29に示す。2つの結果の差はコストで750億円、CO₂排出量で17万t-CO₂である。コストの差の程度の方がCO₂の差の程度より著しく大きいことがわかる。

これらの結果から以下の示唆が得られる。

- (a) 廃棄物輸送でCO₂削減を行う場合のコスト増加影響は無視できない
- (b) 一方、廃棄物輸送でコスト最小化した場合のCO₂増加の影響は十分小さい
- (c) 廃棄物輸送でのモーダルシフト（鉄道利用）でCO₂を削減するより、低コスト化により廃棄物輸送量を増加させセメント工場での利用量を増加させた方がCO₂削減効果は大きい

このシミュレーション結果が意味するのは、リサイクルシステム全体を考慮して、廃棄物の利用を促進させることの方が効果が大きい場合には、輸送で環境負荷が多少増加するとしても低コストの輸送手段を用い、全体のコストを低下させてリサイクルを促進させたほうがよい、ということである。リサイクルシステムの研究において、輸送プロセスの環境負荷を低減させることを目的とした研究は多いが、輸送部門の最適化がコストを上昇させることでリサイクルの進展を阻害することにより、結果として環境負荷の低減につながらないという可能性もあることから、システム全体の考慮が不可欠であるといえる。

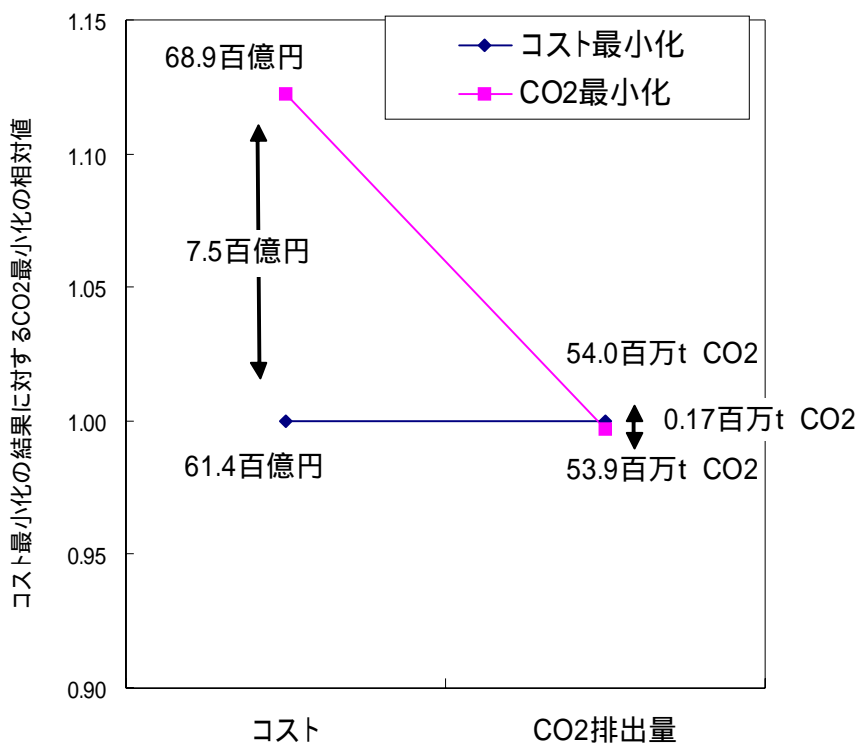


図 5-29 コスト最小化と CO₂ 最小化の結果の比較

5.6 シミュレーション (3) 環境負荷の限界削減費用の算出

本節では、廃棄物のセメント原料化リサイクルについてシナリオ分析をおこなう。セメント産業によるリサイクルを促進することで環境負荷を削減できるが、利用する廃棄物の種類によって削減される環境負荷は異なってくる。そこで本節では、利用する廃棄物についていくつかのシナリオを設定して、セメント産業で受け入れ可能な最大限の廃棄物を利用した場合をシミュレーションする。シミュレーションにより得られた結果に基づきリサイクル促進のための政策について考察する。

5.6.1 リサイクルのフロンティア曲線

廃棄物のセメント原料化リサイクルによる CO₂ 排出量とセメント原料化の削減可能範囲を求め、現状 (2000 年実績) との差からリサイクルの促進によって環境負荷の削減がどれだけ可能であるか見積もる。そこで、目的関数を CO₂ 排出量最小化とし、最終処分量に制約をかけて、CO₂ 排出量と最終処分量の間のトレードオフ関係を求める。このときのその他処分コストは初期設定値としている。

得られた結果を図 5-30 に示す。図 5-30 に示す曲線は、廃棄物のセメント原料化リサイクルによって可能な環境負荷削減量の領域の境界を示すことから、以後この曲線をフロンティア曲線とよぶ。

廃棄物発生量はセメントでの受け入れ可能な量より大きいため発生した廃棄物をすべてセメント原料として利用することが出来ないこと、廃棄物の種類により CO₂ 排出削減効果が異なること、この 2 つの原因により CO₂ 排出削減と最終処分削減の間にはトレードオフ関係が生じることは第 4 章ですでに述べた。いわばセメント産業の限られた受け入れキャパシティを複数の廃棄物が競合する状態にあると理解できる。

本モデルから第4章の拡張型産業連関分析と同様の形状のフロンティア曲線が得られる。第4章の結果と比較して現状とフロンティア曲線の距離が近い。これは現状として1995年と2000年のリサイクル量の違いによるものである。

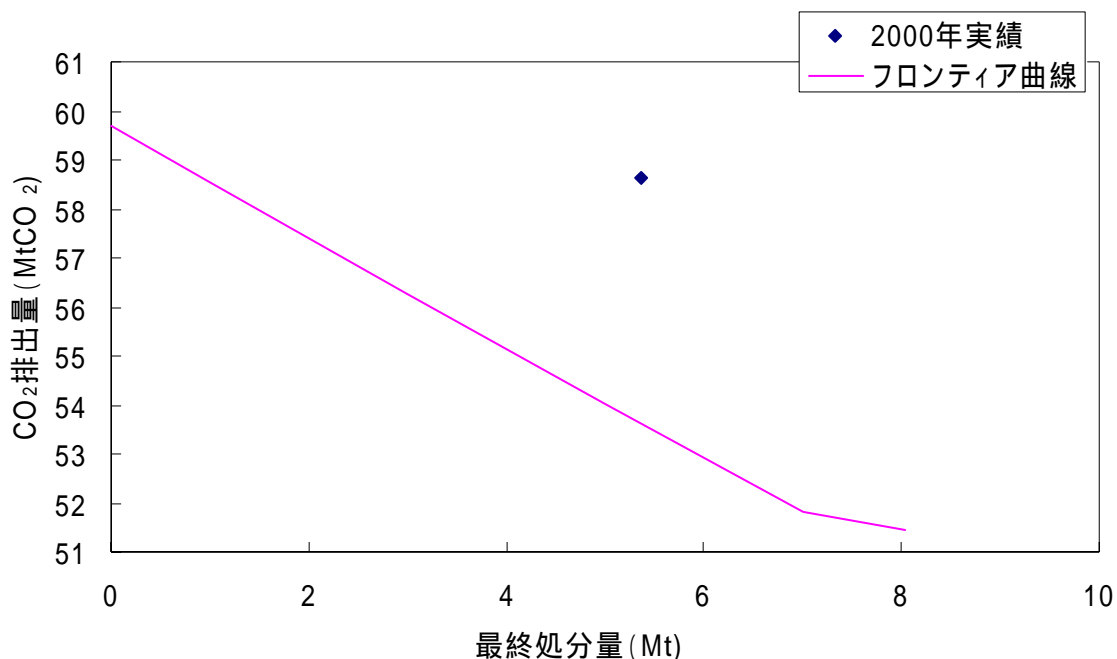


図 5-30 廃棄物セメント原料化リサイクルによる環境負荷削減のフロンティア

5.6.2 環境負荷削減のシナリオ分析

図 5-30 から、廃棄物のセメント原料化リサイクルによる環境負荷削減の政策目標として、表 5-10 に示す5つのシナリオを設定した。なおCO₂排出量やコストの2000年実績とはシミュレーション(1)により得られた値のことである。

表 5-10 設定したシナリオ

シナリオ	備考		
	廃棄物最大限利用	2000年実績維持	目的関数
シナリオ1 CO ₂ 削減志向 & コスト削減志向		最終処分量	コスト最小
シナリオ2 コスト最小		-	コスト最小
シナリオ3 最終処分削減志向 & コスト削減志向		CO ₂ 排出量	コスト最小
シナリオ4 CO ₂ 最大削減		最終処分量	CO ₂ 排出量最小
シナリオ5 最終処分最大削減		CO ₂ 排出量	最終処分量最小

各シナリオのシミュレーションは2段階でおこなう。1段階が廃棄物のセメント原料化リサイクル量（と廃棄物最終処分量）およびCO₂排出量を決定するためのもので、2段階がそれぞれのシナリオにおける状態の下での環境負荷限界削減費用を求めるためのものである。以下では1段階のシミュレーションの手順を示す。限界削減費用を求めるための2段階のシミュレーションの手順は後述する。

シミュレーション第 1 段階：

あらたな制約として全シナリオ共通で(5.39)を課す。

$$\sum_h x(h, "1") = 0 \quad (5.39)$$

(5.39)は天然原料のみからのクリンカ製造工程の稼働量をゼロとするもので、クリンカ製造工程が必ずいずれかの廃棄物を利用することを規定する制約である。この制約により、セメント産業で受け入れ可能な最大限の廃棄物を利用した場合の結果が得られる。

各シナリオについて以下の制約を課す。

(a) 最終処分量制約：シナリオ 1 , シナリオ 4

$$totalDisposal = totalDisposal_{2000} \quad (5.40)$$

ただし $totalDisposal_{2000}$ は廃棄物最終処分量合計の 2000 年実績値を指す。

(b) CO₂ 排出量制約：シナリオ 3 , シナリオ 5

$$totalCO2 = totalCO2_{2000} \quad (5.41)$$

ただし $totalCO2_{2000}$ は CO₂ 排出量の 2000 年実績値を指す。

シナリオに応じて目的関数を設定した。

(a) コスト最小化：シナリオ 1 , シナリオ 2 , シナリオ 3

$$\text{minimize } totalCost$$

(b) CO₂ 排出量最小化：シナリオ 4

$$\text{minimize } totalCO2$$

(c) 最終処分量最小化：シナリオ 5

$$\text{minimize } totalDisposal$$

で最適化計算をおこない、CO₂ 排出量、各廃棄物最終処分量および各廃棄物のセメント原料化リサイクル量を求める。

5.6.3 シミュレーション結果

(1) 環境負荷削減量

各シナリオのシミュレーションの結果を示す。それぞれのシナリオの状態を最終処分量と CO₂ 排出量であらわし、各シナリオにおける環境負荷削減とフロンティア曲線との関係で図 5-31 に示す。表 5-11 には各シナリオでの 2000 年実績からの環境負荷削減量を示す。

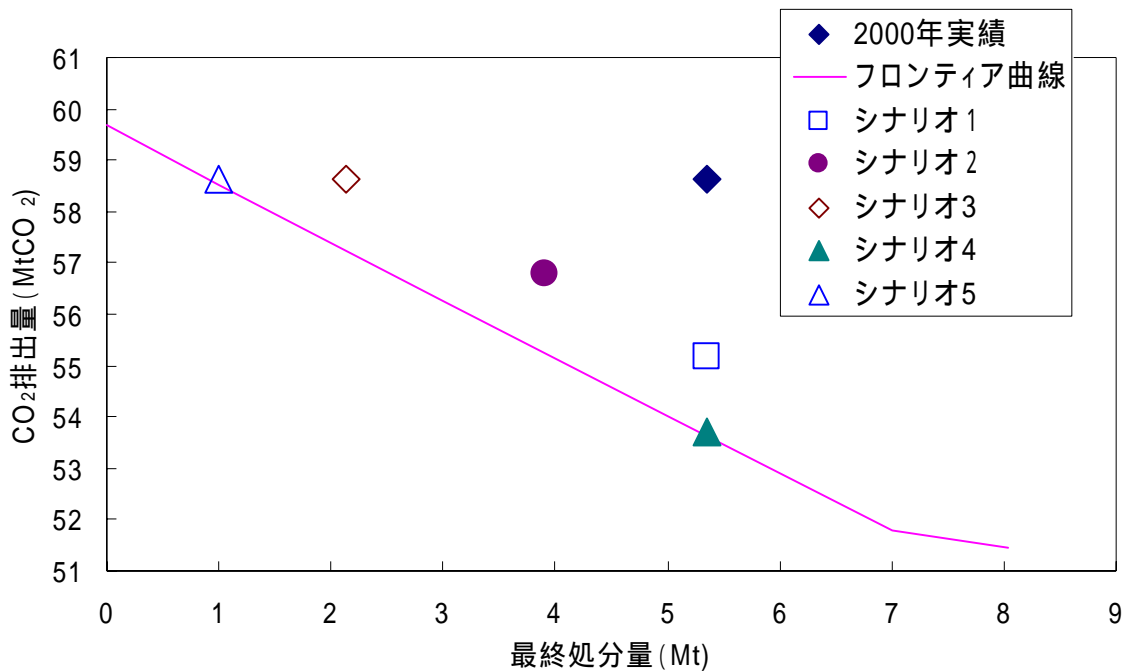


図 5-31 シミュレーション(3)の結果

表 5-11 各シナリオでの環境負荷削減量 (2000 年実績基準)

	CO ₂ 排出削減量	最終処分削減量
シナリオ1	3,454 千t-CO ₂	0 千t
シナリオ2	1,835 千t-CO ₂	1,441 千t
シナリオ3	0 千t-CO ₂	3,229 千t
シナリオ4	4,921 千t-CO ₂	0 千t
シナリオ5	0 千t-CO ₂	4,355 千t

すべてのシナリオは、(5.39)の制約によりセメント産業で受け入れ可能な最大限の廃棄物を利用した場合の結果である。しかし廃棄物の利用量の組み合わせの違いにより達成される環境負荷削減量は異なる。

シナリオ1~3では、環境負荷削減量がフロンティア曲線まで達しない。シナリオ4はCO₂排出量最小、シナリオ5は最終処分量最小という目的関数のもとで決定した状態であるのでそれぞれフロンティア曲線上の状態をとる。

次に各シナリオでの総コストを図 5-32 に示す。

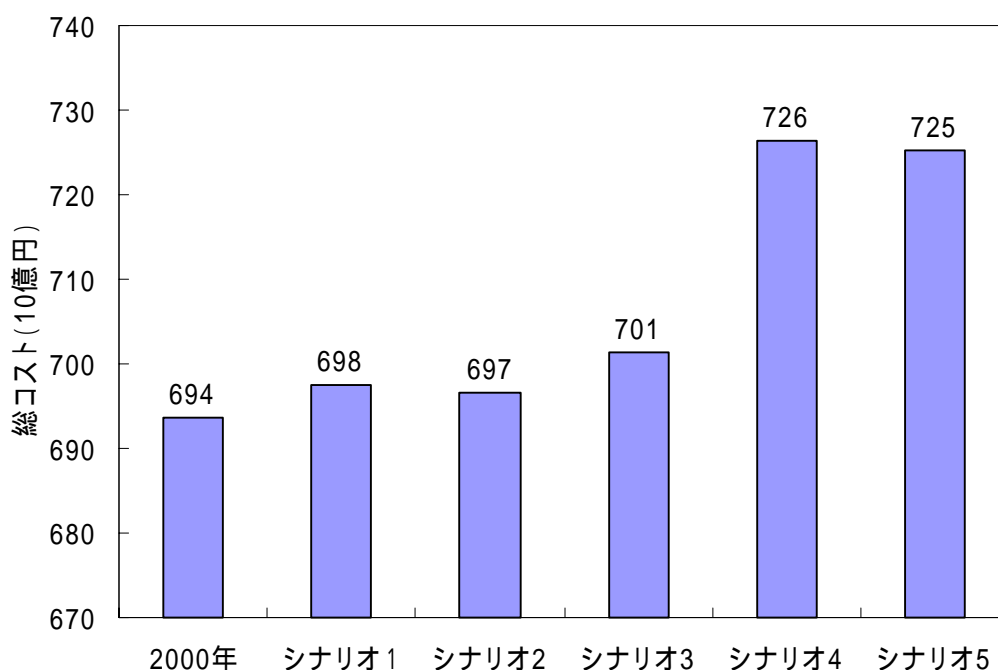


図 5-32 各シナリオの総コスト

2000年実績値（総コストはシミュレーション（1）で算出）の総コストは約 6940 億円である。5つのシナリオのうち目的関数がコスト最小化であるシナリオ 1～3 の総コストは約 6980～7010 億円，コスト増加は約 40 億～70 億円となる。

環境負荷削減の最大化を目的関数としたシナリオ 4，シナリオ 5 ではコストが大きく増加し，総コストはそれぞれ約 7260 億円，約 7250 億円となる。

図 5-31 と図 5-32 の結果をあわせて図 5-33 のような図を描くと，環境負荷削減とコストの関係がつかみやすくなるだろう。2000年実績からフロンティア曲線の方向へ移行する（＝最終処分量または CO₂ 排出量を削減していく）と総コストは上昇する。受け入れる廃棄物の組み合わせによりセメント産業で受け入れ可能な最大限の廃棄物量は異なるが，シナリオ 1～3 のような利用においては，コストの上昇の程度が小さいまま，それぞれの削減が可能である。しかし，状態はフロンティア曲線から離れており，廃棄物使用量の組み合わせの変化により，さらに環境負荷の削減が可能となる。そのような状態を表したのがシナリオ 4，シナリオ 5 である。ただしこの状態でのコスト上昇の程度は急激に大きくなる。

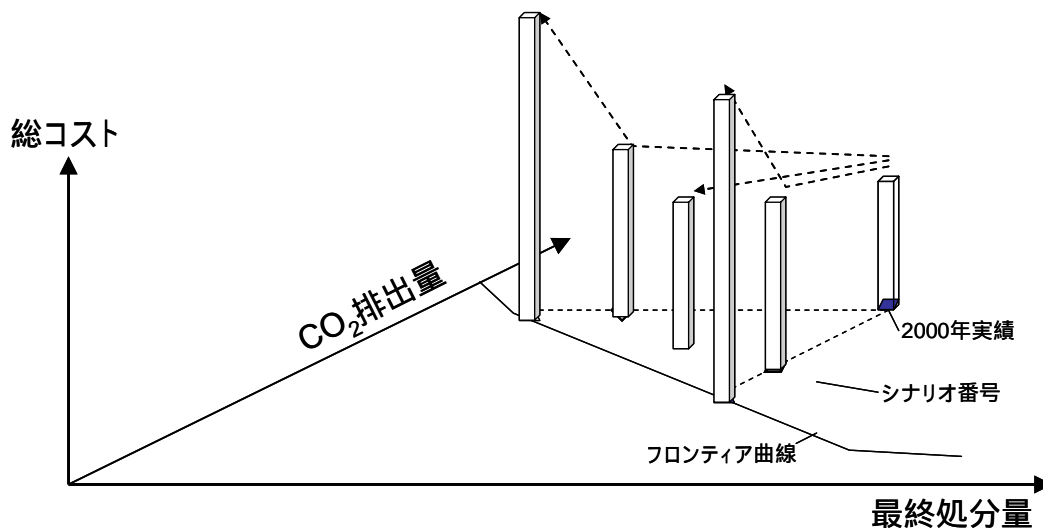


図 5-33 シミュレーション (3) の結果のイメージ

次に各シナリオでの最終処分量の内訳を図 5-34 に示す．各シナリオでの廃棄物利用内訳を図 5-35 に示す．

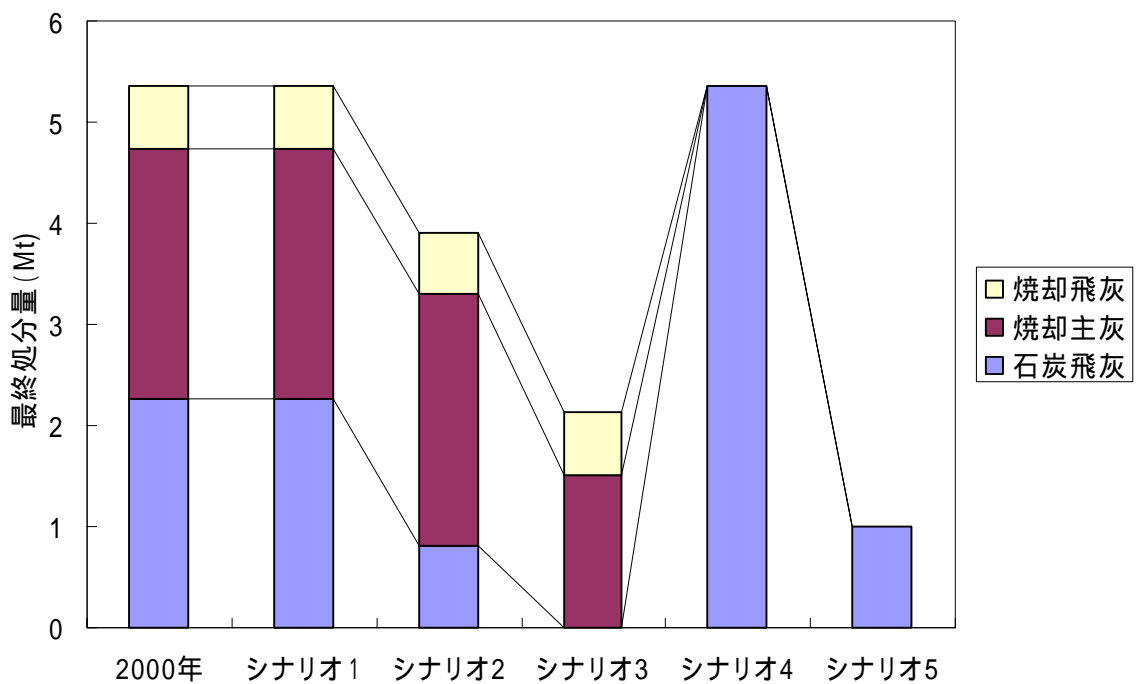


図 5-34 各シナリオの最終処分の内訳

図 5-34 でシナリオ 1 とシナリオ 2 を比較すると、石炭飛灰の最終処分量のみが減少している．これは石炭飛灰のセメント原料化リサイクル量が焼却主灰・焼却飛灰に比較して低コストなためである．シナリオ 2 からシナリオ 3 を比較すると、石炭飛灰が全量セメント原料として利用され、加えて焼却主灰

が約 50 万 t セメント原料として利用されている。焼却飛灰が利用されないのは、最もセメント原料化コストが高いためである。

シナリオ 4, シナリオ 5 では, CO₂ 排出削減効果のある焼却主灰・焼却飛灰が全量利用され, 石炭飛灰のみが最終処分される。

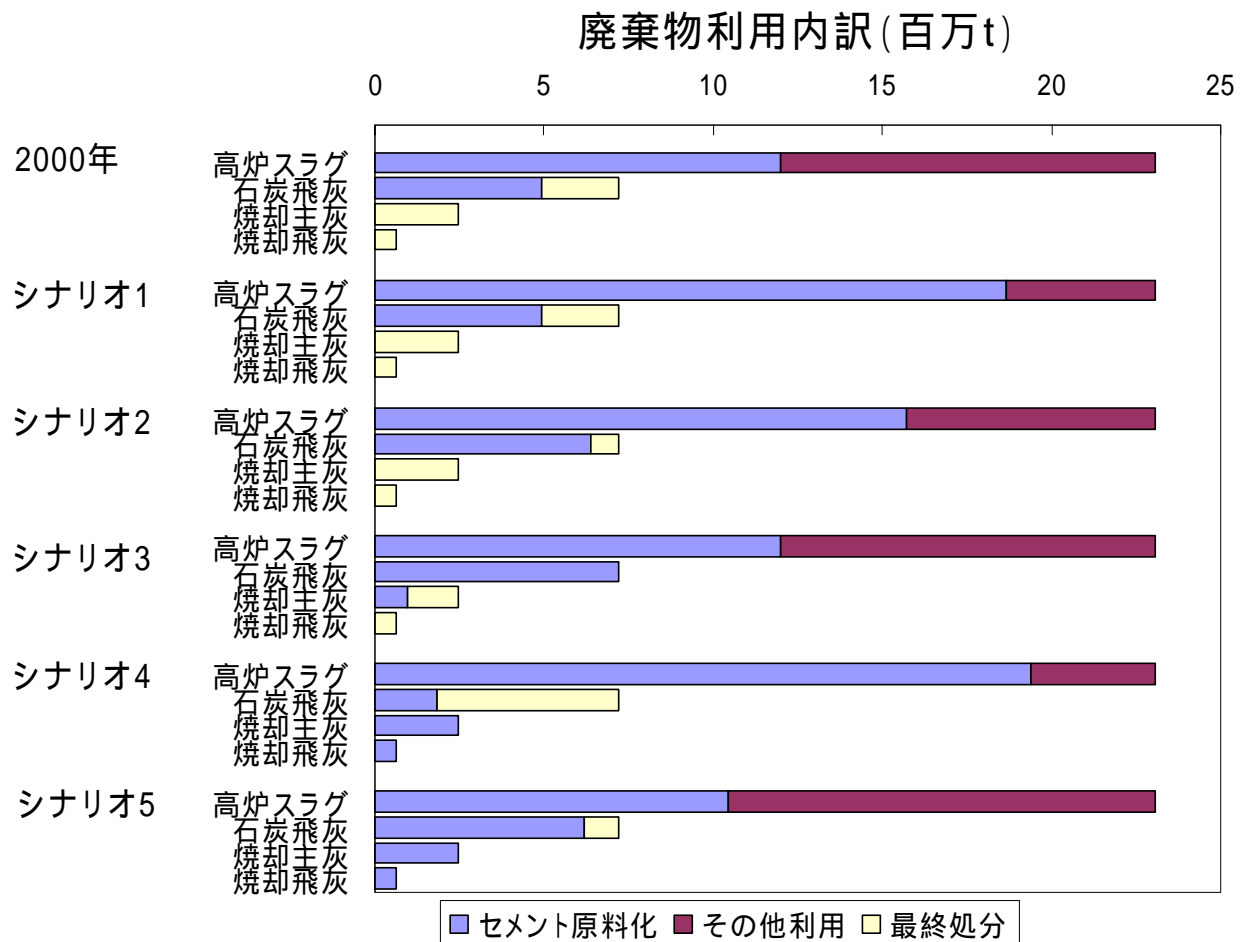


図 5-35 各シナリオでの廃棄物利用内訳

シナリオ 1 では高炉スラグのセメント原料化リサイクル量が 670 万 t 増加し, 1870 万 t に達する。コスト最小化のシナリオ 2 でも高炉スラグの利用量は 1570 万 t ある。シナリオ 2 で石炭飛灰の利用量は 640 万 t となり, シナリオ 3 では発生量 720 万 t が全量セメント原料として利用される。シナリオ 3 で焼却主灰は 50 万 t 利用されるが, 焼却飛灰は利用されない。

シナリオ 4, シナリオ 5 では焼却主灰・焼却飛灰が全量利用される。

(2) 環境負荷の限界削減費用

次に各シナリオのシミュレーションから環境負荷の限界削減費用を求めた。計算の手順を以下に示す。

シミュレーション第 2 段階：

制約(5.39)をはずす。

新たに CO₂ 排出量と最終処分量について以下の制約を課す。

$$TotalCO_2 \leq TotalCO_2_{scenario} \quad (5.42)$$

$$totalDisposal \leq totalDisposal_{scenario} \quad (5.43)$$

ただし、 $TotalCO_2_{scenario}$ は第 1 段階で得られた CO₂ 排出量の値である。 $totalDisposal_{scenario}$ は第 1 段階で得られた廃棄物最終処分量の値である。

目的関数としてコスト最小化 (minimize $totalCost$) をとる。

以上の手順でシミュレーションをおこなうことで、CO₂ 排出量および廃棄物最終処分量について、それぞれのシナリオでの削減量 (2000 年実績との差) における限界削減費用を求めることができる。

限界削減費用について簡単に説明する (図 5-36)。限界削減費用の集合である限界削減費用曲線は、「環境負荷削減策を単位あたり削減費用が小さい順にならべることで得られる、環境負荷削減量と削減費用の間の増加曲線」である。限界削減費用は、環境負荷をある点 (L) まで削減した状態からさらに 1 単位削減する場合に要する費用 (p) と定義される。

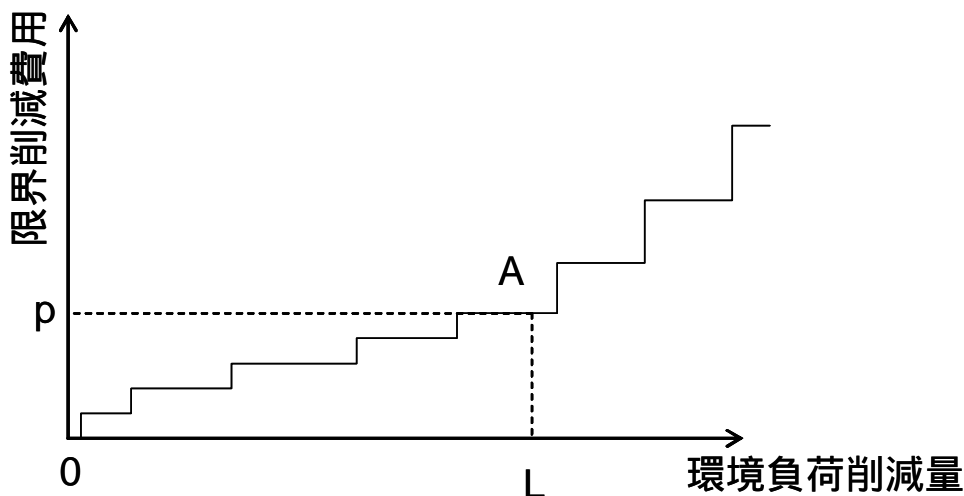


図 5-36 限界削減費用の模式図

本モデルでの限界削減費用とは、それぞれのシナリオでの状態 (セメント産業での廃棄物利用量) からさらに廃棄物利用・輸送量等を変化させることで CO₂ 排出量・廃棄物最終処分量を削減させるのに要する費用を指す。言い換えると、2000 年実績状態から各シナリオの状態まで削減するのに要する重量あたりの最大費用である。本モデルにおける環境負荷の限界削減費用の上昇は、「廃棄物の利用量が増加し近隣のセメント工場が受け入れ限界に達すると、より遠隔のセメント工場まで輸送することとなり、輸送コストが上昇する」ことによってもたらされる。

各シナリオの CO₂ 排出量・廃棄物最終処分量限界削減費用を表 5-12 に示す。

表 5-12 各シナリオにおける環境負荷の限界削減費用

	CO ₂	最終処分
シナリオ1	3,360	2,844
シナリオ2	3,020	3,452
シナリオ3	814	7,621
シナリオ4	72,941	80,672
シナリオ5	64,382	74,710

1 単位：円/t-CO₂および円/t.

2000年実績よりも高炉スラグの利用量を増加し、CO₂排出量を削減するシナリオ1・2では、CO₂の限界削減費用はおおむね3000円/t-CO₂程度である。2000年実績よりも高炉スラグの利用量が減少するシナリオ3では、CO₂の限界削減費用はおおむね814円/t-CO₂とシナリオ1・2よりも小さい。これは、高炉スラグの利用量が少ないことにより、その状態からのCO₂削減がより低コストで可能であるためである。

2000年実績よりも石炭飛灰の利用量を増加し、最終処分量を削減するシナリオ2・3では、最終処分の限界削減費用は3400～7600円/t程度である。シナリオ1の最終処分の限界削減費用がそれより小さいのは、石炭飛灰の利用量が少ないことにより、その状態からの最終処分削減がより低コストで可能であるためである。

フロンティア曲線近傍のシナリオ4・5では、CO₂の限界削減費用は6～7万円/t-CO₂程度、最終処分の限界削減費用は7～8万円/t程度である。フロンティア曲線近傍では追加的な廃棄物の利用が困難となり、そのため環境負荷の限界削減費用は非常に高くなる。

この限界削減費用は経済的インセンティブに基づくリサイクル促進政策を計画する場合に重要な情報となる。このことについては5.6.4で議論する。

(3) マテリアルフロー

次に各シナリオにおける廃棄物のフローを示していく。とくに結果を明瞭にするため、2000年実績と比較して変化の大きかったフローを図示する。シナリオ1における高炉スラグ(図5-37)、シナリオ2の高炉スラグ(図5-38)、石炭飛灰、シナリオ3における石炭飛灰と焼却主灰のフロー(図5-39)を示す。

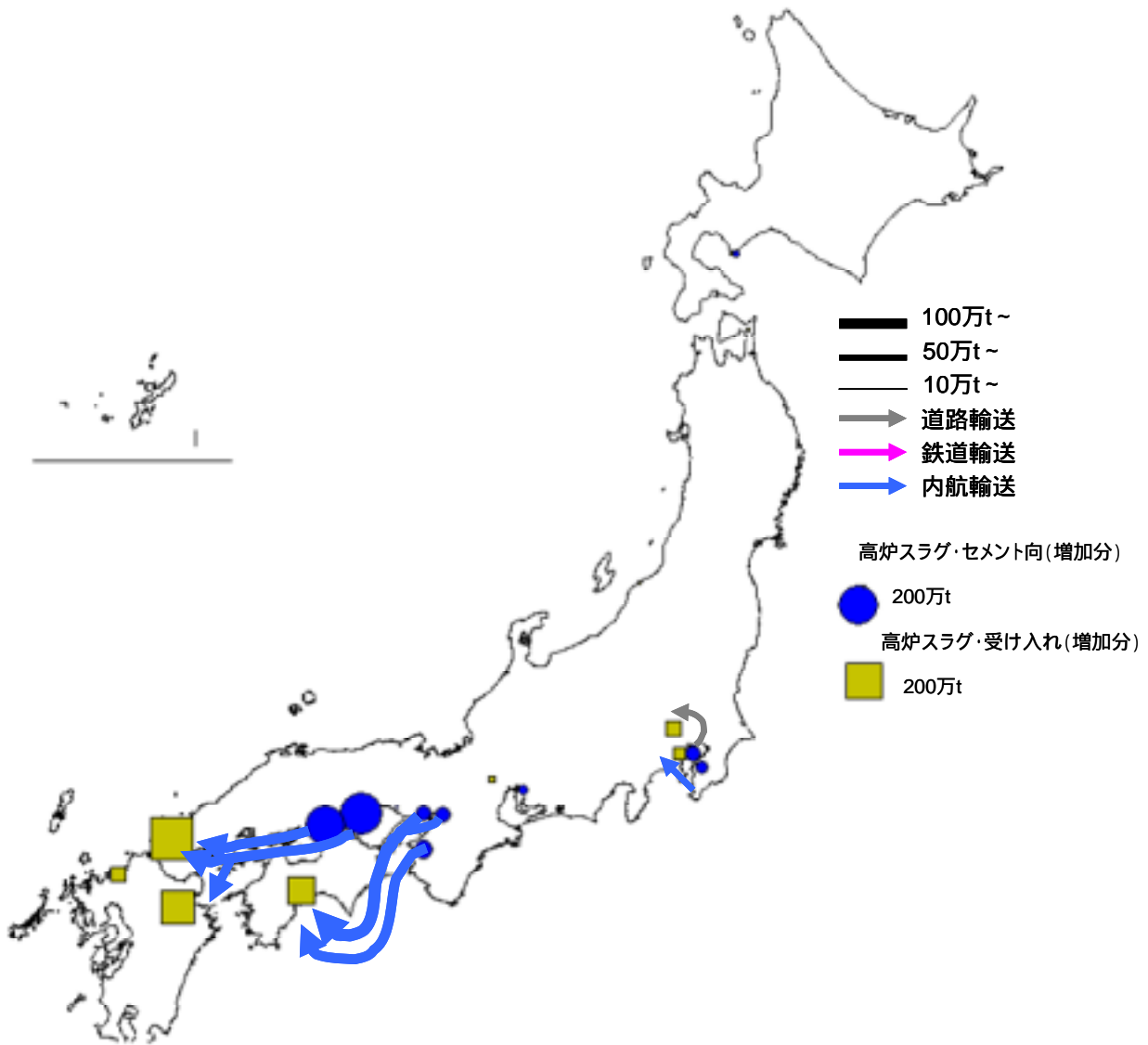


図 5-37 シナリオ 1 での高炉スラグの輸送フロー（2000 年実績から増加したフロー）

2000 年実績から増加した高炉スラグのセメント原料化リサイクル量 680 万 t のうち ,300 万 t を山口地域のセメント工場で , 150 万 t を大分地域のセメント工場で , 120 万 t を高知地域のセメント工場で受け入れる . 関東地方で発生した高炉スラグの利用増加量は 50 万 t 程度で , それらは内陸部および川崎のセメント工場で受け入れる .

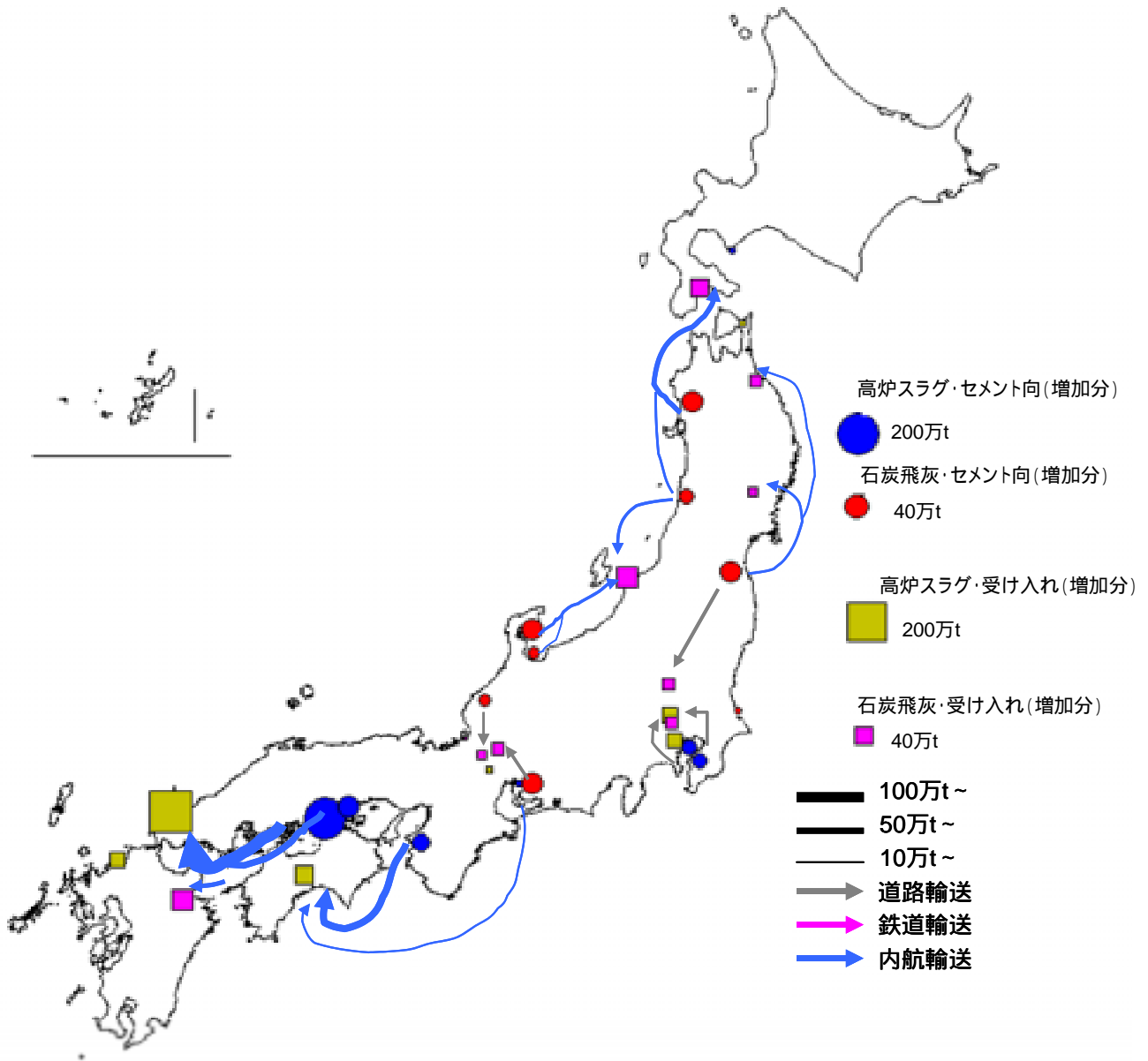


図 5-38 シナリオ 2 での高炉スラグ・石炭飛灰の輸送フロー（2000 年実績から増加したフロー）

高炉スラグの主たる増加分は、福山・水島から瀬戸内海により山口地域のセメント工場に内航輸送されるフローと、和歌山から高知地域のセメント工場に内航輸送されるフローである。

石炭飛灰の増加分としては、東北・北陸など最終処分量が大きかった地域で新潟，上磯，八戸，大船渡への内航輸送によるフローが大きい。また，道路輸送で内陸のセメント工場への輸送が増加したものとして，福島から宇都宮，敦賀から滋賀，愛知から岐阜というフローがある。



図 5-39 シナリオ 3 での石炭飛灰・焼却主灰の輸送フロー（2000 年実績から増加したフロー）

石炭飛灰の増加分のフローはシナリオ 2 と同様で、2000 年実績から輸送量がさらに増加したものである。シナリオ 2 では現れなかったフローとしては、北海道内陸の石炭火力発電所からの道路・鉄道輸送フロー、福島地域の火力発電所から川崎のセメント工場への内航輸送フロー、愛知の火力発電所から大分地域のセメント工場への内航輸送フローがあげられる。

焼却主灰のフローは、関東圏は川崎のセメント工場への内航輸送と内陸部のセメント工場への道路輸送である。関西圏では瀬戸内地域への内航輸送によるものである。中京圏からの焼却主灰の輸送は発生しない。

5.6.4 考察

CO₂ 排出量および最終処分量という環境負荷の削減手段として、廃棄物のセメント原料化リサイクルは有効であることはこれまでの分析により明らかとなった。モデル・シミュレーションにより社会システムを環境負荷の低い方向へ移行させるための政策・技術进行分析する研究においては、モデル・シミュレーションから得られた結果が現実の施策にどうつながるものであるか、具体的に示されなければならない。そこで以下ではモデルによるシミュレーション結果からどのような政策インプリケーションが得られるか考察する。

一般的に、環境負荷の削減に適切な経済的インセンティブをかけることで経済効率的に環境負荷の削減を達成できる。環境政策を分析する研究には、どのような政策が適切な経済的インセンティブを発生させるものであるか判断するための知見を提供することが求められる。求められる知見は

- (a) どの程度の大きさの経済的インセンティブが必要か
- (b) どのような形で経済的インセンティブを与えることが実効的か

に集約できるだろう。本研究ではこの 2 点から (1) CO₂ 削減プロジェクトとしての廃棄物のセメント原料化リサイクル、(2) 最終処分削減プロジェクトとしての廃棄物のセメント原料化リサイクルを促進させるための政策について議論する。最後に (3) 本研究の寄与として、考察をまとめる。

(1) CO₂ 削減プロジェクトとしての廃棄物のセメント原料化リサイクル

本モデルによる計算では、CO₂ 削減となるシナリオ (シナリオ 1・2) で CO₂ 限界削減費用は 3000 円/t-CO₂ 程度である。IPCC 第三次報告書^[27]には先進諸国の CO₂ 限界削減費用推定に関するサマリーが記述されているが、この報告書によれば日本の限界削減費用は 97 ~ 1074 US \$ /t-C (in 1990) と見積もられている。本研究によって得られた限界削減費用と IPCC 報告書の削減費用を単純に比較することはできないが、高炉スラグのセメント原料化リサイクルは費用対効果の点で効率的な CO₂ 削減方法であるという蓋然性は高いと認められる。

焼却主灰・焼却飛灰をセメント原料として利用し、限界まで CO₂ 排出量を削減するシナリオ (シナリオ 4) では CO₂ 限界削減費用は約 7 万円/t-CO₂ である。これだけの費用をかけて CO₂ 排出量を削減することは費用対効果の点で効率的とはいえない。廃棄物のセメント原料化リサイクルによる CO₂ 削減ポテンシャルとは別に、適当な削減費用において実行可能な CO₂ 削減ポテンシャルを把握することが重要である。本モデルによりそのための知見を得ることができる。

CO₂ 削減を促進させるための経済的インセンティブの与え方としては、炭素税、排出権取引、補助金の 3 つが代表的なアイデアである。このうち、炭素税や排出権取引の経済的インセンティブは、経済主体に CO₂ 削減をしないと損をする、というかたちで CO₂ 削減行動を促すものである。一方、補助金は、CO₂ 削減をすれば得をする、というかたちで CO₂ 削減行動を促すものである。

炭素税および排出権取引は産業全体を対象とする政策であるため、本研究の対象である特定産業間のリサイクルを活性化することを目的とすることは不適當であろう。CO₂ 排出削減プロジェクトとしての

高炉スラグのセメント原料化リサイクルの特徴は、鉄鋼産業とセメント産業という CO₂ を大量に排出する産業同士の協力によるものであるということである。これらの産業は炭素税や排出量キャップをかけられた上での排出権取引といった制度が導入された場合には経営的に大きな打撃を受けるため、制度導入には強く抵抗を示すことが容易に予想できる。

一方でこれらの産業は自主的な CO₂ 削減に力を入れており、費用効果的な CO₂ 削減方法は実行される可能性が大きい。廃棄物のセメント原料化リサイクルは費用効果の点で有力な手段であると位置づけられる。費用効果的な CO₂ 削減プロジェクトの実行を活性化させるためには、CO₂ 削減をすれば得をするという形でインセンティブを与える補助金が有効であろう。

補助金による環境負荷削減策に対しては、経済効率的な技術の選別は行政に果たしてできるのか（市場競争にゆだねるべきではないのか）、市場で成立しない施策を補助金で支えることは非効率ではないのか、といった批判がある。これらの批判について考えてみよう。

CO₂ 削減プロジェクトの補助制度において、経済効率性を担保する手段として削減した CO₂ を一定価格で買い取るというものがある。この方法では、ある買い取り価格以下の削減費用で達成可能な削減技術だけが導入される仕組みとなっている。以下では削減した CO₂ を CDM (Clean Development Mechanism) の用語にならって CER (Certified Emission Reduction) とよぶことにする。

CDM の活性化のために CER を政府が一定額で買い取ることを保証する制度が議論されているが、CDM に限らず国内での CO₂ 削減にも CER を認めるような制度をつくれば、国内の費用効果的 CO₂ 削減プロジェクトが実行される可能性が高まると考えられる。廃棄物のセメント原料化リサイクルの場合、本モデルの限界削減費用の結果に基づくならば(シナリオ 1 および 2)、CER 価格 3500 ~ 3800 円/t-CO₂ で最大 300 万 t-CO₂ の削減が見込まれる。なお、すでにセメント産業で高炉スラグの利用が進んでいることから、この制度の運用上の留意点として、追加的なリサイクルとそれに伴う CO₂ 削減量を算定するための基準を明確に定めることが必要であることがあげられる。

CER 買い取り制度は、いわばプロジェクトの運用面での補助である。このような補助は、非効率なプロジェクトを支える結果となってしまおうという批判がありえるだろう。この点については、経済効率性と環境負荷削減の緊急性との間のバランスのとれた判断が必要であると考えられる。また、この点において定量的な評価をおこなう研究の意義が出てくると考えられる。社会を低環境負荷の方向へ移行させるためには、長期的な制度設計は不可欠であるが、一方で短期的には正の経済的インセンティブを与えて、低環境負荷の方向へ動き始めることが重要であろう。

補助金には運用面での補助のほか、設備投資の活性化を目的として初期投資を補助対象とするものがある。しかし、高炉スラグのセメント原料化リサイクルには別段新規設備が必要でないことからこのタイプの補助は有効ではない。

廃棄物のセメント原料化リサイクルによる CO₂ 削減量の大きさの位置づけについて簡単に述べておく。2000 年度のわが国の温室効果ガス排出量は 12 億 3870 万 t-CO₂eq である^[28]。1990 年度排出量は 11 億 2210 万 t-CO₂eq であり、仮に 2000 年度の排出量を 1990 年度比で 6% 削減するためには 1 億 8393 万 t-CO₂eq の削減が必要となる。本モデルではシナリオ 1 で得られた CO₂ 削減量は約 300 万 t-CO₂ である。この量は、2000 年度のわが国の温室効果ガス排出量に対する割合では 0.24%、2000 年度時点での 90 年度比 6% 削減に必要な削減量に対する割合では 1.6% である。この数値の大きさについては評価

が分かれるところであろうが、単一の技術による削減であること、費用対効果の大きな削減策であることを考慮すると、約 300 万 t-CO₂ という削減量は十分に意味のある大きさであると判断できる。

(2) 最終処分削減プロジェクトとしての廃棄物のセメント原料化リサイクル

廃棄物を最終処分する際の費用負担者は、石炭飛灰では石炭飛灰排出産業であり、焼却主灰・焼却飛灰では地方自治体である。今後、最終処分場の逼迫により最終処分価格が上昇した場合にはセメント原料化リサイクルの方が低コストの処理となる可能性があると示唆される。セメント原料化リサイクルの方が低コストとなる場合の目安が最終処分の限界削減費用である（最終処分価格が現在の最終処分価格に限界削減費用を加えた価格を上回る場合にはセメント原料化リサイクルの方が低コストとなる）。

本モデルによる計算では、2000 年実績よりも最終処分量を削減するシナリオ（シナリオ 2・3）において最終処分の限界削減費用は 3400～7600 円/t 程度である。最終処分削減量はシナリオ 3 で 320 万 t と評価される。石炭飛灰や焼却灰というリサイクル困難な廃棄物をこれだけ利用可能な方法は他にない。費用効果の点でも最終処分の代替手段として有望である。

最終処分量を限界まで削減するシナリオ 5 では最終処分の限界削減費用は約 7 万円/t である。これだけの費用をかけて最終処分量を削減することは費用対効果の点で効率的とはいえない。廃棄物のセメント原料化リサイクルによる最終処分削減ポテンシャルとは別に、適当な削減費用において実行可能な最終処分削減ポテンシャルを把握することが重要である。本モデルによりそのための知見を得ることができる。

セメント原料化リサイクルによる最終処分削減をすべきかどうかはそれぞれの廃棄物排出者にとっての最終処分場逼迫度に依存する。しかし、長期的にはわが国が資源循環型の社会システムとなることが望ましく、短期的にも政府が最終処分半減の目標（2010 年）を掲げていることを考慮すると、廃棄物のセメント原料化リサイクルシステムの基盤を整備することは、循環型社会形成を目的とする政策として重要であると考えられる。

焼却灰リサイクルの場合はセメント工場で前処理施設が必要であるから、このような設備の初期投資への補助政策はリサイクルシステムの基盤整備にとって効果的となるだろう。第 3 章の分析より、新規工場を建設する必要があるエコセメントより既存のセメント工場でのリサイクルの方が初期投資が小さく、ライフサイクルコストでも小さいという結果が得られている。よって、既存のセメント工場での廃棄物前処理施設への初期投資補助によるリサイクル促進策は費用対効果の大きな策であると期待できる。また廃棄物のセメント原料化リサイクルの促進には必然的に廃棄物の広域輸送が伴うことを考えると、廃棄物輸送インフラの整備も重要である。

(3) 本研究の寄与

本研究のシミュレーション（3）では 5 つのシナリオというかたちで廃棄物のセメント原料化リサイクルにより達成可能な環境負荷削減量とそれに要する費用について示した。ただし、CO₂ 排出と最終処分のうちどちらの削減を優先すべきか、という問題に対しては本研究の枠組みだけでは答えを導くことはできない。この問題は、わが国が今後どちらの削減を必要とするかに依存する。本研究の寄与は、環境負荷削減という要請に対し、廃棄物のセメント原料化リサイクルによる削減についての情報を体系

的に整備した点にある。

リサイクルの促進のためには各地で発生した廃棄物をどのセメント工場へ輸送すればよいか、全体で最適となるような広域リサイクル計画の策定が不可欠である。本研究は、廃棄物排出源とセメント工場のマッチング、両者をつなぐ廃棄物輸送ルート・輸送手段についての情報を提供することで、環境負荷削減に有効で経済効率的なリサイクルの促進に寄与することが期待できる。

5.7 結言

本章では、日本全国のセメント工場と高炉製鉄所、石炭火力発電所、および一般廃棄物焼却処理場の間の廃棄物輸送を考慮する廃棄物輸送・セメント生産モデルを構築し、構築したモデルを用いてシミュレーションをおこなった。本モデルは個別のセメント工場のキャパシティ、個別の廃棄物発生源の発生量、廃棄物発生源とセメント工場の地理条件に基づく廃棄物の輸送距離・輸送方法を詳細にモデル化した点が特徴となっている。

シミュレーションから得られた主な知見をまとめる。

- (a) CO₂ 削減プロジェクトとしての高炉スラグのセメント原料化リサイクルは、費用効果の大きな削減プロジェクトである。345 万 t-CO₂ 削減時の限界削減費用は 3400 円/t-CO₂ 程度である（シナリオ 1）。国内の CO₂ 削減プロジェクトにより発生した CER を 3400 円/t-CO₂ 程度の価格で買い取る制度の導入は、高炉スラグのセメント原料化リサイクルの促進に効果的な政策となる。
- (b) セメント原料化リサイクルによる最終処分削減策は、削減ポテンシャルの大きな削減策である。限界削減費用は廃棄物の種類によって異なるが、3000～7600 円/t 程度である。廃棄物のセメント原料化リサイクルシステムの基盤を整備することは、循環型社会形成を目的とする政策として重要であり、焼却灰前処理施設の初期投資への補助や輸送インフラ整備が効果的な政策となる。
- (c) リサイクルの促進のためには各地で発生した廃棄物をどのセメント工場へ輸送すればよいか、全体で最適となるような広域リサイクル計画の策定が不可欠である。本研究は、廃棄物排出源とセメント工場のマッチング、両者をつなぐ廃棄物輸送ルート・輸送手段についての情報を提供することで、環境負荷削減に有効で経済効率的なリサイクルの促進に寄与することが期待できる。

第 5 章引用文献

- [1] Abou Najm , M. , M.El-Fadel , G.Ayoub , M.El-Taha , F.Al-Awar : An optimisation model for regional integrated solid waste management I. Model formulation , Waste Management & Research , Vol.20 , pp.37-45 , 2002 .
- [2] Abou Najm , M. , M.El-Fadel , G.Ayoub , M.El-Taha , F.Al-Awar : An optimisation model for regional integrated solid waste management II. Model application and sensitivity analyses , Waste Management & Research , Vol.20 , pp.46-54 , 2002 .
- [3] Berglund , C. : Spatial cost efficiency in waste paper handling: the case of corrugated board in Sweden , Resources Conservation & Recycling , Vol.42 , pp.367-387 , 2004 .
- [4] Gielen ,D.J. and Y.Moriguchi : Waste benefits of CO₂ policies in Japan ,Waste Management & Research , Vol.20 , pp.2-15 , 2002 .
- [5] 和田光永 , ハンマード・アミン : セメント産業における副産物の利用促進に関する研究 , 環境システム研究論文集 , Vo.28 , pp.33-38 , 2000 .
- [6] 近藤康之 , 中村慎一郎 : 廃棄物産業連関分析 (WIO) と廃棄物管理最適化 , 電気学会論文誌 C , Vol.124 , No.10 , pp.2187-2194 , 2004 .
- [7] 川畑隆常 : 首都圏域から排出される焼却灰の広域的処理システムに関する研究 , 東京大学大学院工学系研究科学学位論文 , 2001 .
- [8] 都市ごみ焼却灰の国内広域処理システム構築に関する調査報告書 , 経済産業省ホームページ http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/150711-3_jilc.html , (財)日本立地センター , 2004 .
- [9] 焼却灰をモデルとした瀬戸内海エリアにおけるリサイクルシステムの具現化と静脈物流の構築調査報告書 , 経済産業省中国産業界局 , 2002 .
- [10] 島裕和 : 高品質再生骨材によるコンクリートリサイクルシステムに関する研究 , 第 6 章コンクリート関連拡張連関表の作成 , 東京大学大学院新領域創成科学研究科学学位論文 , pp.127-128 , 2004 .
- [11] セメントハンドブック 2001 年度版 , セメント協会 , 2001 .
- [12] 平成 13 年度鉄鋼年鑑 , 鉄鋼新聞社編 , 2001 .
- [13] 鉄鋼スラグ統計年報 (鉄鋼スラグ協会ホームページ <http://www.slg.jp/index.htm> , 鉄鋼スラグ協会 , 2005 .
- [14] 平成 13 年度電力需給の概要 , 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部編 , 2001 .
- [15] 石炭灰全国実態調査 (平成 15 年度実績) , (財)石炭利用総合センター , 2005 .
- [16] 平成 13 年版石油等消費動態統計年報 , 経済産業省経済産業政策局調査統計部編 , 2001 .
- [17] 平成 13 年版エネルギー生産・需給統計年報 , 経済産業省経済産業政策局調査統計部 , 2001 .
- [18] ゼンリン電子地図帳 Z [zi:] 6 , 株式会社ゼンリン , 2003 .
- [19] 平成 12 年度一般廃棄物処理事業実態調査 , 環境省廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課 , 2004 .
- [20] 地理情報分析支援システム MANDARA 無料版 1.0 , <http://www5c.biglobe.ne.jp/~mandara/> .
- [21] すぐ役立つ実勢/トラック運賃料金マニュアル , 輸送経済新聞社 , 2000 .

- [22] コンテナ時刻表，日本貨物鉄道株式会社，2003．
- [23] 内航海運からみた素材産業の物流コスト効率化に関する調査報告書，日本内航海運組合総連合会，
<http://www.naiko-kaiun.or.jp/info/topics/report/>，2004．
- [24] Brookek ,A. *et al*: GAMS a user's guide ,Washington ,GAMS development corporation , 1998 .
- [25] 石渡正佳：産廃コネクション，WAVE 出版，p.188，2002．
- [26] Hara , T. , Y.Yoshida , R.Matsubishi , H.Shima : Environmental and Economic assessment of an inter-industrial and inter-regional waste recycling system in Japan , Proceedings of ECOS 2005 Trondheim , Norway , pp.133-140 , 2005 .
- [27] IPCC: Climate Change 2001(IPCC third assessment report) ,Working Group III: Mitigation8. Global, Regional, and National Costs and Ancillary Benefits of Mitigation , IPCC Homepage http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/pdf/8.pdf , p.537 , 2001 .
- [28] 国立環境研究所，温室効果ガス排出量データベース，
<http://www-gio.nies.go.jp/database/db-j.html>，2004．

第6章 結論

6.1 結論

本研究では、セメント産業を中心とする廃棄物のマテリアルリサイクルシステムに着目し、このリサイクルシステムの環境負荷評価（最終処分削減効果とCO₂削減効果）と経済性評価を行い、このシステムの有効性の評価をおこなった。

第2章ではセメント産業におけるリサイクルと廃棄物処理の現状について概括し、廃棄物のセメント原料化リサイクルに関する研究の現状と課題について調査した。

第3章では各種廃棄物（高炉スラグ、石炭飛灰、一般廃棄物焼却主灰・焼却飛灰、下水汚泥脱水汚泥・下水汚泥焼却灰）のセメント原料化リサイクルについてライフサイクル分析をおこない、ライフサイクルCO₂排出量およびライフサイクルコストを求めた。一般廃棄物焼却灰処理について、セメント原料化リサイクルと他の処分方法との比較をおこない、セメント原料化リサイクルの有効性を評価した。

以上の分析より得られた主な知見は以下のとおりである。

- (a) 高炉スラグのセメント原料化は、高炉セメントの混合材として利用するにせよ、クリンカ原料として利用するにせよ、CO₂削減に有効である。これは、高炉スラグがカルシウムを多く含有することから、石灰石の代替原料としての利用可能量が大きいためである。高炉スラグはもとも製鉄所で使用される石灰石に由来するため、高炉スラグ中のカルシウムと結合していたCO₂は、製鉄所で大気中に放出されたCO₂ということになる。このことから、高炉スラグをCO₂削減に有効に利用することが合理的であると考えられる。土木材料などCO₂削減にほとんど寄与しない方法で利用することは、脱CO₂反応を経たカルシウムの利用方法としては合理的でないと考えられる。
- (b) 石炭飛灰・一般廃棄物焼却灰・下水汚泥焼却灰のセメント原料化は、CO₂排出量の削減には大きく寄与しないものの、少なくともCO₂排出量の増加への影響はない。すなわち、これらの廃棄物のセメント原料化リサイクルは、CO₂排出量を増加させることなく最終処分量の削減に有効なリサイクルである。
- (c) 一般廃棄物焼却灰のセメント原料化は、コスト面で埋め立て処分に次いで安価な処分方法である。エコセメント・灰溶融など他の処理方法よりもコスト・CO₂排出量の点で有利であるため、埋め立て処分場が逼迫した場合には、有望な代替オプションとなると考えられる。

第4章では拡張型産業連関モデルを構築し、セメント産業による廃棄物リサイクルの環境負荷削減ポテンシャルを推計した。

シナリオ分析より、セメント産業による廃棄物利用量を1995年実績値から増加させることで、CO₂排出削減、最終処分削減のどちらも可能であることが見出された。しかし、廃棄物の利用量がクリンカ

製造プロセスでの廃棄物利用可能量の上限に達した場合には、ある廃棄物の利用量を増加させることは別の種類の廃棄物利用量を減少させることになるため、結果として CO₂ 排出削減と最終処分削減のどちらも満たすことはできなくなるという結果が得られた。

廃棄物の種類により CO₂ 排出削減効果が異なることにより廃棄物のセメント原料化リサイクルでは CO₂ 排出削減と最終処分削減の間にはトレードオフ関係が生じる。拡張型産業連関モデルを用いてトレードオフ関係を表すフロンティア曲線を得た。

第 4 章では産業連関モデルの環境分析への適用について、その特性、課題、先行研究のレビューをおこなった。廃棄物問題について産業連関モデルの応用分析手法を適用する試みをおこなったが、本論文の目的であるセメント原料化リサイクルに限ったものではないため、内容は付録に示している。

第 5 章では日本全国のセメント工場と高炉一貫製鉄所、石炭火力発電所、および一般廃棄物焼却処理場の間の廃棄物輸送を考慮する廃棄物輸送・セメント生産モデルを構築し、構築したモデルを用いてシミュレーションをおこなった。シミュレーション分析から得られた主な知見は以下の通りである。

- (a) 本モデルを用いて、2000 年度の各セメント工場の生産能力、各廃棄物発生源での廃棄物発生量、セメント製品需要の諸データを与え、目的関数をコスト最小化にとって各セメント工場での廃棄物利用量を求めた。シミュレーションの結果と高炉スラグ・石炭飛灰の地域別利用内訳実績値を比較したところ、実績値とシミュレーション結果の地域ごとの大小関係が類似の傾向を示した。これよりコスト最小化によりリサイクルシステムの状態が決定されるという本モデルの仮定には一定の妥当性があるものと認められた。
- (b) 廃棄物利用量を 2000 年度実績値に固定して、コスト最小化と CO₂ 排出量最小化という 2 つの目的関数のもとでシミュレーションをおこない、得られた結果を比較した。その結果、廃棄物輸送でのモーダルシフト（鉄道利用）で CO₂ を削減するより、低コスト化により廃棄物輸送量を増加させセメント工場での利用量を増加させた方が CO₂ 削減効果は大きいことがわかった。このシミュレーション結果が意味するのは、リサイクルシステム全体を考慮して、廃棄物の利用を促進させることの方が効果が大きい場合には、輸送で環境負荷が多少増加するとしても低コストの輸送手段を用い、全体のコストを低下させてリサイクルを促進させたほうがよい、ということである。リサイクルシステムの研究において、輸送プロセスの環境負荷を低減させることを目的とした研究は多いが、輸送部門の最適化がコスト上昇・リサイクル進展の障害により、結果として環境負荷の低減につながらないという可能性もあることから、システム全体の考慮が不可欠であると結論づけられた。

セメント産業が廃棄物を最大限に利用する状況を想定してシナリオ分析をおこない、廃棄物のセメント原料化リサイクルによる環境負荷削減効果、およびリサイクル促進に有効な政策について検討をおこなった。その結果、以下の結論が得られた。

- (a) CO₂ 削減プロジェクトとしての高炉スラグのセメント原料化リサイクルは、費用効果の大きな削減プロジェクトである。345 万 t-CO₂ 削減時の限界削減費用は 3400 円/t-CO₂ 程度である。国内の CO₂ 削減プロジェクトにより発生した CER を 3400 円/t-CO₂ 程度の価格で買い取る制

度の導入は、高炉スラグのセメント原料化リサイクルの促進に効果的な政策となる。

- (b) セメント原料化リサイクルによる最終処分削減策は、削減ポテンシャルの大きな削減策である。限界削減費用は廃棄物の種類によって異なるが、3000～7600円/t程度である。廃棄物のセメント原料化リサイクルシステムの基盤を整備することは、循環型社会形成を目的とする政策として重要であり、焼却灰前処理施設の初期投資への補助や輸送インフラ整備が効果的な政策となる。
- (c) リサイクルの促進のためには各地で発生した廃棄物をどのセメント工場へ輸送すればよいか、全体で最適となるような広域リサイクル計画の策定が不可欠である。本研究は、廃棄物排出源とセメント工場のマッチング、両者をつなぐ廃棄物輸送ルート・輸送手段についての情報を提供することで、環境負荷削減に有効で経済効率的なリサイクルの促進に寄与することが期待できる。

6.2 課題

本研究に残された課題として、特に廃棄物輸送・セメント生産モデルに関して二点述べておく。

第一は本モデルを用いた制度設計アプローチについてである。本モデルでは全体でのコスト最小化による状態決定という前提を採用し、その前提に基づいてリサイクルを促進するための制度設計について検討をおこなっている。しかし実際の経済では、個々の主体（時に競合関係にある）間の行動、及びその相互作用の集合として状態（本モデルでは地域別の廃棄物利用量、廃棄物輸送量など）が決定していると考えられる。その場合、本モデルで有効と評価された制度が実際には有効に機能しない可能性は否定できない。なぜなら、本モデルの評価は個々の主体のインセンティブを考慮したものではないからである。個々の主体（本モデルでは、各セメント工場、各廃棄物排出者）の行動・インセンティブを考慮するためには、エージェントベースのモデルによりゲーム理論を適用する方法が有効であると考えられる。

本モデルにより得られる全体でのコスト最小化の状態は、均衡状態というより望ましい状態（政策目標）と捉えた方がよいかもしい。この場合、本モデルでは目標とする状態を同定する、そしてその目標を達成するために有効な制度・政策を評価するためにエージェントベースのモデルを用いる、という研究の流れとなるだろう。より信頼のおける提言をおこなうためにはこのようなアプローチが望ましい。

第二は本モデルで得られた環境負荷の限界削減費用についてである。第一点に述べた事柄からも本モデルで得られた限界削減費用は慎重に評価すべきものであるといえるが、この限界削減費用自体が本モデルの設定に依存するものであることには留意しておく必要がある。モデルの設定（輸送費用関数など）に必要なデータが不足している場合には、設定の妥当性を十分に示すことが困難となる。そのような場合には、モデルの設定を変更した場合に得られる結果がどの程度変化するかを見積もる作業、すなわち感度解析が必要となる。本研究でも Appendix に感度解析の結果を示しているが、時間の制約のため量的に十分とはいえない。

しかし、モデルが複雑になると感度解析をすべきパラメータの数・その組み合わせは急増し、試行錯誤に費やす労力も増加するため、十分な感度解析をおこなうことは困難となる。感度解析はモデル分析

から得られる結果の信頼性を客観的に示すための有力な方法であるから、効率的に感度解析をおこなう方法、膨大な感度解析の結果を分かりやすく第三者に提示する方法の開発が望まれる。

謝辞

本研究をおこなうにあたり、多くの方々のご助力をいただきましたことを心よりお礼を申し上げます。松橋隆治教授には、修士課程からの6年間、温かく見守っていただき、親身なご指導を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。吉田好邦助教授からも修士課程からの6年間、様々な面でご指導・ご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

お忙しい中、博士論文の審査を快く引き受けていただきました柳沢幸雄教授，阿久津好明助教授，茂木源人助教授に深く感謝申し上げます。

(株)三菱マテリアル 島裕和氏には、氏が研究室博士課程在籍時からセメント生産プロセスに関わる詳細についてご助言をいただき、研究を進める上でご助力いただきました。研究室の先輩である工藤祐揮氏，井原智彦氏をはじめとする諸氏には折にふれ親身なご助言をいただきました。野村明良技官には研究環境を整えていただきました。呂正氏をはじめとする研究室の皆様には多くの有益なご助言・ご指摘をいただきました。開発工学/環境経済システム学分野研究室でお世話になりました皆様方に心より感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、情報・データ収集においてご協力いただいた多くの方々に心より感謝いたします。

最後になりますが、私が研究を進めていく中で支えていただきましたすべての皆様に深く感謝申し上げます。

APPENDIX

Appendix 1 拡張型産業連関表

Appendix 2 産業連関モデルの構造分解による環境負荷変化の要因分析

Appendix 3 産業連関分析における部門統合誤差

Appendix 4 廃棄物輸送・セメント生産モデルの感度解析

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
	金時・保険	不動産	運轉	通信・放送	公務	教育・研究	医療・保健 社会保険	その他の公益 社会保険	対事業所 サービス	対個人サ ービス	事務用品	分類不明	天然資源・ク リ	高炉スラグ リ	フライア ッシュ	主英・クリンカ	飛灰・クリンカ	高炉スラグと主 英・クリンカ	高炉スラグと飛 灰・クリンカ	フライアッシュと 主英・クリンカ	
0																					
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					
37																					
38																					
39																					
40																					

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
	金時・保険	不動産	運轉	通信・放送	公務	教育・研究	医療・保健 社会保険	その他の公益 社会保険	対事業所 サービス	対個人サ ービス	事務用品	分類不明	天然資源・ク リ	高炉スラグ リ	フライア ッシュ	主英・クリンカ	飛灰・クリンカ	高炉スラグと主 英・クリンカ	高炉スラグと飛 灰・クリンカ	フライアッシュと 主英・クリンカ	
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					
37																					
38																					
39																					
40																					

E: 産出係数表		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
		フライアッシュ& 飛灰-ケルシカ	ポルトランド セメント	高炉セメント シエメント	フライアッシュ セメント	砂利砕石	高炉スラグ 砂利砕石	石膏飛灰・砂 利砕石	高炉スラグ 最終処分	石膏飛灰・砂 最終処分	埋却土灰塵 最終処分	埋却土灰塵 最終処分
1	農林水産業											
2	その他産業											
3	燃料品											
4	繊維製品											
5	ハルア・紙・木製品											
6	化学製品											
7	石油・白炭素品											
8	その他産業・白色製品											
9	鉄鋼											
10	非鉄金属											
11	金属製品											
12	一般機械											
13	電気機械											
14	輸送機械											
15	精密機械											
16	その他製造工業製品											
17	建設											
18	建設・土木・機械											
19	水道・廃棄物処理											
20	商業											
21	金融・保険											
22	不動産											
23	運輸											
24	通信・放送											
25	公務											
26	教育・研究											
27	医療・保健・社会保険											
28	医療・保健・社会保険											
29	その他サービス											
30	対個人サービス											
31	業務用品											
32	分類不明											
33	砂利砕石		1	1	1	1	1	1				
34	セメント											
35	ケルシカ											
36	高炉スラグ											
37	石膏飛灰											
38	埋却土灰											
39	埋却土灰塵											

A: 投入係数表		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
		フライアッシュ& 飛灰-ケルシカ	ポルトランド セメント	高炉セメント シエメント	フライアッシュ セメント	砂利砕石	高炉スラグ 砂利砕石	石膏飛灰・砂 利砕石	高炉スラグ 最終処分	石膏飛灰・砂 最終処分	埋却土灰塵 最終処分	埋却土灰塵 最終処分
1	農林水産業	1.70E-3				3.745E-8						
2	その他産業											
3	燃料品	1.182E-5				7.546E-6						
4	繊維製品	2.387E-4				3.364E-6						
5	ハルア・紙・木製品	4.813E-6				9.009E-6						
6	化学製品	1.411E-4				9.175E-5						
7	石油・白炭素品	1.228E-5				1.155E-6						
8	その他産業・白色製品	4.082E-6				1.101E-9						
9	鉄鋼	1.740E-7				2.418E-5						
10	非鉄金属	3.198E-5				7.320E-6						
11	金属製品	2.667E-7				2.831E-7						
12	一般機械	3.479E-8				1.586E-7						
13	電気機械	1.044E-7				1.542E-8						
14	輸送機械	1.048E-4				1.739E-5						
15	精密機械	6.501E-4				3.957E-6						
16	その他製造工業製品	9.592E-4				5.415E-6						
17	建設	2.317E-5				6.483E-5						
18	建設・土木・機械	2.385E-4				9.725E-5						
19	水道・廃棄物処理	2.102E-4				1.285E-5						
20	商業	2.455E-5				5.241E-5						
21	金融・保険	4.917E-4				3.850E-6						
22	不動産	2.143E-5										
23	運輸											
24	通信・放送											
25	公務											
26	教育・研究	3.315E-4				3.855E-8						
27	医療・保健・社会保険	1.221E-5				1.702E-6						
28	医療・保健・社会保険	4.588E-4				2.079E-7						
29	その他サービス	1.989E-6				3.546E-7						
30	対個人サービス	7.979E-6				2.104E-6						
31	業務用品	6.037E-5				2.043E-5						
32	分類不明	1.843E-1										
33	砂利砕石(物理)		6.178E-3	6.178E-3	6.178E-3							
34	セメント(物理)		9.463E-1	5.788E-1	7.714E-1							
35	ケルシカ(物理)		1.870E-2	4.000E-1	2.000E-1							
36	高炉スラグ						1					
37	石膏飛灰							1				
38	埋却土灰								1			
39	埋却土灰塵	1.820E-1									1	

(2) 拡張型産業連関表

E-A																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
農林水産業	8785E-1	-1975E-3	-2192E-1	-9492E-3	-5443E-2	-2211E-3	-5156E-5	-7890E-5	-7963E-7	-3610E-5	0	0	0	0	-4539E-6	-9111E-3	-1826E-3	0	0	-3742E-5
その他鉱業	0	9398E-1	-6434E-7	-5643E-6	-1291E-3	-448E-3	-336E-1	-2061E-2	-1904E-2	-6680E-2	-849E-5	-2398E-5	-2401E-6	0	-149E-5	-1278E-5	-1588E-7	-7011E-2	-1189E-5	0
3 食料品	-6921E-2	0	8679E-1	-1204E-3	-1204E-3	-4027E-3	-6290E-6	-3342E-4	-1194E-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1480E-4
4 繊維製品	-6062E-3	-5488E-3	-1865E-3	720E-1	-6420E-3	-1094E-3	-604E-4	-3307E-3	-7138E-4	-1746E-3	-1832E-3	-1630E-3	-3122E-3	-2266E-3	-2127E-3	-6707E-3	-2873E-3	-3208E-4	-3971E-3	-3950E-3
5 ハルパ紙、木製品	-1141E-2	-2028E-3	-1929E-3	-888E-3	7298E-1	-1680E-2	-6519E-5	-2120E-2	-8360E-4	-5685E-3	-5849E-3	-2075E-3	-7029E-3	-1928E-3	-7034E-3	-5713E-2	-5189E-2	-1046E-3	-3088E-3	-8791E-3
6 石油・石炭製品	-4484E-2	-1500E-2	-9899E-2	-5999E-2	-3702E-1	-2021E-1	-5195E-3	-6299E-2	-6000E-2	-1430E-3	-820E-3	-6253E-3	-9324E-3	-8909E-3	-7567E-3	-1056E-1	-5056E-3	-588E-4	-218E-2	-140E-5
7 化学工業製品	-1615E-2	-3880E-2	-3762E-3	-4105E-3	-7452E-3	-2981E-2	969E-1	-1265E-2	-2398E-2	-4832E-2	-3932E-3	-2050E-3	-1335E-3	-1244E-3	-3249E-3	-3249E-2	-4200E-2	-2121E-2	-742E-3	-140E-5
8 その他の鉱業、土石製品	-1292E-3	-1941E-4	-6068E-3	-477E-4	-5928E-3	-5702E-3	-7756E-4	959E-1	-7772E-3	-5125E-3	-424E-3	-5329E-3	-1049E-2	-6596E-3	-1945E-2	-2845E-2	-6434E-2	-5970E-5	-2277E-3	-4028E-4
9 鉄鋼	-2940E-5	-3137E-3	0	-2947E-5	-9768E-3	-4321E-5	0	-1156E-2	5301E-1	-1489E-1	-1973E-1	-1844E-2	-149E-2	-3750E-2	-1135E-2	-1815E-2	0	-3756E-4	0	0
10 非鉄金属	0	8867E-4	-1111E-3	-142E-5	-1339E-3	-3401E-3	-1468E-5	-3990E-3	-6904E-3	6482E-1	-5499E-2	-1944E-2	-2952E-2	-2892E-2	-2220E-2	-6501E-3	-8140E-3	-5240E-4	-1105E-4	-1072E-5
11 金属機械	-1438E-3	-1023E-2	-242E-2	-2108E-3	-1394E-2	-1005E-2	-2394E-2	-1023E-2	-9704E-4	-1996E-3	-3498E-1	-3830E-2	-1751E-2	-1092E-2	-1494E-2	-7703E-3	-9353E-2	-7349E-4	-5451E-4	-2699E-3
12 一般機械	-4533E-5	-8474E-4	-2574E-7	0	-220E-3	-2719E-5	-1128E-5	-2193E-3	-5229E-4	-5082E-4	-2075E-3	8112E-1	-8753E-3	-1288E-2	-1155E-2	-1813E-3	-6468E-3	-6752E-6	-3239E-3	-6753E-6
13 電気機械	-3106E-4	-1793E-3	-1053E-5	-5484E-6	-2085E-4	-5485E-5	-2097E-6	-1688E-5	-6619E-6	-3588E-4	-4634E-3	-4616E-2	7132E-1	-4380E-2	-7665E-2	-6389E-3	-1158E-2	-1909E-5	-5840E-5	-2938E-4
14 輸送機械	-4678E-3	-2948E-5	-1879E-6	-1523E-6	-2079E-6	-779E-7	-1906E-7	-6035E-6	-1095E-6	-7836E-7	-239E-6	-1299E-6	-492E-7	5683E-1	-2099E-6	-2339E-6	-6871E-6	-143E-6	-4050E-6	-7638E-6
15 精密機械	-8731E-5	-2211E-5	-2316E-6	-1138E-5	-3000E-5	-2106E-5	-1049E-6	-289E-6	-2289E-6	-4730E-6	-3088E-5	-4508E-3	-8591E-4	-6099E-4	-8760E-1	-8137E-5	-5200E-5	0	-7092E-5	-1366E-3
16 その他の製造工業製品	-9557E-3	-1479E-2	-2535E-2	-3973E-2	-2528E-2	-2208E-2	-8847E-4	-1148E-2	-2627E-3	-1428E-2	-1180E-2	-2670E-2	-3948E-2	-4182E-2	-5262E-2	8328E-1	-2232E-2	-5485E-3	-2851E-2	-142E-2
17 建設	-3202E-3	-5409E-3	-2503E-3	-3248E-3	-6067E-3	-6677E-3	-2728E-3	-1396E-3	-8553E-3	-6285E-3	-8318E-3	-3089E-3	-3498E-3	-1938E-3	-4480E-3	-3239E-3	9974E-1	-5156E-2	-2569E-2	-5609E-3
18 電力・ガス・熱供給	-3847E-3	-5708E-2	-1214E-2	-1538E-2	-2289E-2	-3282E-2	-925E-3	-2785E-2	-3321E-2	-2914E-2	-1789E-2	-9113E-3	-1068E-2	-8781E-3	-1075E-2	-163E-2	-523E-3	9117E-1	-4748E-2	-9133E-3
19 水道・廃棄物処理	-7266E-4	-334E-2	-8020E-2	-6693E-2	-2744E-3	-8398E-2	-186E-2	-4976E-2	-3879E-2	-7229E-2	-423E-2	-5364E-2	-207E-2	-3988E-2	-7049E-2	-5693E-2	-7292E-2	-1069E-2	-1769E-2	9699E-1
20 商業	-4394E-2	-334E-2	-8020E-2	-6693E-2	-2744E-3	-8398E-2	-186E-2	-4976E-2	-3879E-2	-7229E-2	-423E-2	-5364E-2	-207E-2	-3988E-2	-7049E-2	-5693E-2	-7292E-2	-1069E-2	-1769E-2	9699E-1
21 金融・保険	-3514E-2	-4362E-2	-8174E-3	-3009E-2	-1774E-2	-1785E-2	-1700E-2	-2927E-2	-1379E-2	-1930E-2	-1851E-2	-1443E-2	-8789E-3	-9198E-3	-2337E-2	-1715E-2	-1268E-2	-3424E-2	-1230E-2	-5877E-2
22 不動産	-3020E-4	-1190E-2	-2066E-3	-6300E-3	-4059E-3	-4239E-3	-1670E-3	-7126E-3	-3399E-3	-2643E-3	-5374E-3	-4394E-3	-3180E-3	-1429E-3	-5848E-3	-5703E-3	-3134E-3	-1203E-2	-3566E-3	-3799E-2
23 運輸	-2783E-2	-3194E-2	-3274E-2	-2129E-2	-3615E-2	-2496E-2	-3579E-2	-6712E-2	-3399E-2	-3408E-2	-2550E-2	-1761E-2	-1699E-2	-1564E-2	-1498E-2	-2612E-2	-3339E-2	-1864E-2	-2214E-2	-3011E-2
24 通信・放送	-8551E-4	-9768E-3	-1983E-3	-4398E-3	-1869E-3	-420E-3	-1590E-3	-2091E-3	-9148E-4	-2706E-3	-4289E-3	-3386E-3	-2382E-3	-1294E-3	-4051E-3	-5403E-3	-5573E-3	-3308E-3	-5980E-3	-1868E-2
25 公務	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 教育・研究	-8616E-4	-7261E-3	-5654E-3	-8124E-3	-5148E-3	-7548E-2	-5039E-3	-1944E-2	-9319E-3	-2416E-2	-8794E-3	-2685E-2	-6391E-2	-3261E-2	-6250E-2	-1263E-2	-2300E-3	-1997E-2	-1468E-4	-1484E-3
27 医療・保健・社会福祉	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28 その他の公共サービス	-2088E-4	-228E-3	-7491E-4	-939E-4	-7491E-4	-1574E-3	-4899E-4	-1089E-3	-9014E-4	-3848E-4	-1229E-3	-1688E-3	-7237E-3	-2692E-4	-6595E-4	-9025E-4	-1537E-3	-1064E-3	-6276E-3	-5669E-4
29 対業歩サービス	-1862E-2	-967E-2	-3409E-2	-3615E-2	-2891E-2	-5588E-2	-1215E-2	-4622E-2	-229E-2	-263E-2	-1494E-2	-4175E-2	-4572E-2	-2588E-2	-4599E-2	-4547E-2	-8413E-2	-8364E-2	-6291E-2	-5860E-2
30 対業歩サービス	-3508E-4	-2407E-4	-2441E-4	-2785E-4	-2380E-4	-242E-4	-9864E-5	-241E-4	-2649E-4	-2163E-4	-2461E-4	-2516E-4	-2693E-4	-1825E-4	-2640E-4	-9881E-4	-4443E-4	-4035E-4	-4985E-4	-1963E-3
31 事務用品	-5824E-4	-1577E-3	-1418E-3	-2313E-3	-144E-3	-6962E-4	-1147E-4	-1682E-3	-5309E-4	-7088E-4	-220E-3	-1732E-3	-1616E-3	-6887E-4	-1385E-3	-1755E-3	-5447E-4	-1177E-3	-228E-3	-470E-3
32 分類不明	-9528E-3	-104E-2	-5878E-3	-6478E-3	-9577E-3	-1040E-2	-8221E-4	-4955E-3	-1074E-2	-6745E-3	-1098E-2	-1191E-2	-6884E-3	-2294E-3	-4926E-3	-8338E-3	-2029E-3	-5775E-3	-8039E-3	-5741E-3
33 砂利砕石	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34 セメント	0	-3268E-2	0	0	0	-9271E-4	-1439E-3	-761E+0	-1748E-3	0	-4922E-3	0	-1891E-4	-1968E-5	0	-1468E-3	-1440E-1	-2002E-4	0	0
35 リンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36 高炉スラグ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37 石灰燐灰	0	2319E-3	1861E-5	8648E-5	1668E-2	1947E-2	1769E-3	7800E-3	2519E-2	4033E-3	4832E-5	0	0	0	0	1332E-4	3440E-6	2974E-1	2469E-4	0
38 焼却灰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39 焼却灰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s1 高炉セメント生産	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s2 プライマリエメント生産	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s3 高炉スラグリンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s4 石灰燐灰リンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s5 焼却主灰リンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s6 焼却主灰リンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s7 高炉スラグ&焼却灰リンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s8 高炉スラグ&焼却灰リンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s9 石灰燐灰&焼却主灰リンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s10 石灰燐灰&焼却主灰リンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s11 高炉スラグ、砂利砕石	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s12 石灰燐灰、砂利砕石	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1.3E-4s8 3.4E-6s4 3.0E-1s4 2.5E-4s4

4.8E-5s8

4.0E-3s8

7.8E-3s8

1.8E-3s8

1.9E-2s8

1.7E-2s8

8.6E-5s8

1.7E-5s8

3.5E-1

2.54E-1

1.06E-1

2.54E-1

3.5E-1

2.54E-1

1.06E-1

2.54E-1

3.5E-1

2.54E-1

1.06E-1

2.54E-1

3.5E-1

2.54E-1

1.06E-1

2.54E-1

3.5E-1

2.54E-1

1.06E-1

2.54E-1

3.5E-1

E-A		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
		金融・保険	不動産	運輸	通信・放送	公務	教育・研究	医療・保健 社会保障	その他の公 共サービス	対事業所 サービス	対個人サー ビス	事務用品	分類不明	天然資源・リ ンカ	高炉スラグ・ク リンカ	フライアッシュ シュウリンカ	主灰・クリンカ	飛灰・クリンカ	高炉スラグ&主 灰・クリンカ	高炉スラグ&飛 灰・クリンカ
1	農林水産業	0	-1168E-6	-5536E-5	0	-764E-5	-8.028E-4	-4.798E-3	0	-1935E-6	-1933E-2	0	0	-1701E-3	-1701E-3	0	0	0	0	0
2	その他紙業	0	-1076E-6	-1.033E-4	-3.257E-6	-1.449E-6	-1.033E-4	-3.257E-6	0	-1.117E-6	-1.683E-5	0	-1.193E-4	-1701E-3	-1701E-3	-1.701E-3	-1.701E-3	-1.701E-3	-1.701E-3	-1.701E-3
3	食品	0	-2067E-4	-5.110E-4	-1.478E-2	-3.379E-4	-5.110E-4	-1.478E-2	0	0	-1.082E-1	0	-4.640E-5	0	0	0	0	0	0	0
4	繊維製品	-2.28E-3	-4.216E-5	-2.645E-3	-1.092E-3	-4.781E-3	-1.08E-3	-4.105E-3	-2.238E-2	-2.287E-3	-4.076E-3	-1.838E-2	-6.730E-3	-1.182E-5	-1.182E-5	-1.182E-5	-1.182E-5	-1.182E-5	-1.182E-5	-1.182E-5
5	（L）紙・木製品	-4.67E-3	-6.651E-4	-9.995E-3	-2.33E-3	-3.163E-3	-4.52E-3	-4.713E-3	-1.745E-2	-4.477E-3	-6.59E-3	-4.632E-1	-1.048E-2	-2.357E-4	-2.357E-4	-2.357E-4	-2.357E-4	-2.357E-4	-2.357E-4	-2.357E-4
6	化学製品	-2.83E-5	-2.139E-5	-5.455E-4	-1.30E-3	-9.887E-4	-3.345E-3	-1.580E-1	-2.177E-3	-3.442E-3	-7.26E-2	-9.879E-3	-4.813E-6	-4.813E-6	-4.813E-6	-4.813E-6	-4.813E-6	-4.813E-6	-4.813E-6	-4.813E-6
7	石油・石炭製品	-1.213E-3	-8.601E-4	-3.617E-2	-2.24E-3	-6.650E-3	-5.135E-3	-4.762E-3	-4.702E-3	-3.008E-3	-5.319E-3	0	-1.118E-2	-5.113E-5	-5.113E-5	-5.113E-5	-5.113E-5	-5.113E-5	-5.113E-5	-5.113E-5
8	その他製造工業製品	-1.888E-5	0	-8.807E-5	-6.774E-8	-3.279E-4	-1.322E-3	-1.395E-3	-1.008E-3	-8.878E-4	-2.36E-3	-3.030E-3	-6.101E-3	-1.411E-4	-1.411E-4	-1.411E-4	-1.411E-4	-1.411E-4	-1.411E-4	-1.411E-4
9	鉄鋼	0	0	-4.730E-4	0	-2.998E-4	0	-9.109E-6	-4.937E-6	-1.170E-4	-2.440E-5	-1.473E-5	-1.228E-5	-1.228E-5	-1.228E-5	-1.228E-5	-1.228E-5	-1.228E-5	-1.228E-5	-1.228E-5
10	非鉄金属	0	0	-1.641E-5	0	-1.877E-4	0	-9.719E-4	-1.245E-4	-1.523E-4	-3.176E-4	-5.075E-3	-4.082E-6	-4.082E-6	-4.082E-6	-4.082E-6	-4.082E-6	-4.082E-6	-4.082E-6	-4.082E-6
11	金属製品	-4.708E-5	-2.532E-4	-2.091E-3	-2.07E-4	-6.087E-3	-7.351E-5	-2.908E-4	-1.679E-3	-1.350E-3	-1.968E-3	-1.772E-4	-9.965E-3	-1.740E-7	-1.740E-7	-1.740E-7	-1.740E-7	-1.740E-7	-1.740E-7	-1.740E-7
12	一般機械	0	0	-1.057E-4	-1.344E-4	-3.424E-4	0	0	-2.323E-2	-2.366E-4	-4.010E-2	0	-3.198E-5	-3.198E-5	-3.198E-5	-3.198E-5	-3.198E-5	-3.198E-5	-3.198E-5	-3.198E-5
13	電気機械	-1.28E-4	-1.521E-5	-1.925E-4	-2.38E-3	-1.003E-2	-1.592E-3	-5.921E-5	-5.798E-6	-1.689E-2	-5.649E-4	-1.505E-2	-1.062E-2	-2.667E-7	-2.667E-7	-2.667E-7	-2.667E-7	-2.667E-7	-2.667E-7	-2.667E-7
14	輸送機械	-1.128E-6	-4.830E-7	-1.444E-2	-1.628E-6	-2.58E-2	-3.23E-5	-1.822E-6	-2.578E-6	-2.814E-2	-3.84E-4	-1.385E-4	0	-3.479E-8	-3.479E-8	-3.479E-8	-3.479E-8	-3.479E-8	-3.479E-8	-3.479E-8
15	精密機械	-4.39E-5	-4.331E-6	-3.049E-5	-3.428E-5	-7.759E-4	-9.625E-6	-5.235E-3	-1.910E-5	-6.138E-4	-2.820E-4	0	0	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4
16	その他の製造工業製品	-2.477E-2	-6.206E-4	-6.114E-3	-1.501E-2	-4.158E-2	-3.229E-2	-1.018E-2	-7.745E-2	-5.831E-2	-1.385E-2	-1.234E-1	-2.208E-2	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4	-1.045E-4
17	建設	-3.691E-3	-3.559E-2	-1.136E-2	-1.078E-2	-1.769E-2	-1.25E-2	-5.27E-3	-1.937E-3	-2.982E-3	-7.085E-3	0	-8.518E-6	-1.501E-4	-1.501E-4	-1.501E-4	-1.501E-4	-1.501E-4	-1.501E-4	-1.501E-4
18	電力・ガス・熱供給	-3.577E-3	-2.996E-3	-1.568E-2	-3.78E-3	-1.730E-2	-2.115E-2	-1.632E-2	-3.714E-3	-5.943E-3	-2.23E-2	-1.473E-2	-2.134E-3	-9.594E-4	-9.594E-4	-9.594E-4	-9.594E-4	-9.594E-4	-9.594E-4	-9.594E-4
19	水道・廃棄物処理	-1.78E-3	-5.302E-4	-5.302E-4	-3.78E-3	-1.730E-2	-9.689E-3	-9.23E-3	-2.657E-3	-8.66E-4	-1.836E-2	0	-1.44E-2	-2.317E-5	-2.317E-5	-2.317E-5	-2.317E-5	-2.317E-5	-2.317E-5	-2.317E-5
20	商業	-6.58E-3	-1.870E-3	-1.771E-2	-5.627E-2	-1.920E-2	-1.78E-2	-5.69E-2	-3.624E-2	-2.732E-2	-6.282E-2	-2.103E-1	-2.191E-2	-2.38E-4	-2.38E-4	-2.38E-4	-2.38E-4	-2.38E-4	-2.38E-4	-2.38E-4
21	金融・保険	9.024E-1	-5.110E-2	-5.773E-2	-1.570E-2	-4.021E-3	-5.311E-3	-1.522E-2	-1.871E-2	-5.268E-2	-2.543E-2	0	-1.64E-1	-2.102E-4	-2.102E-4	-2.102E-4	-2.102E-4	-2.102E-4	-2.102E-4	-2.102E-4
22	不動産	-1.86E-2	9.925E-1	-1.96E-2	-1.627E-2	-1.917E-3	-1.517E-2	-9.910E-3	-2.278E-2	-1.147E-2	-1.989E-2	0	-1.33E-2	-2.45E-5	-2.45E-5	-2.45E-5	-2.45E-5	-2.45E-5	-2.45E-5	-2.45E-5
23	運輸	-1.62E-2	-1.039E-3	9.048E-1	-2.330E-2	-2.232E-2	-1.044E-2	-1.288E-2	-2.080E-2	-1.073E-2	-1.978E-2	-5.34E-2	-1.437E-2	-4.917E-4	-4.917E-4	-4.917E-4	-4.917E-4	-4.917E-4	-4.917E-4	-4.917E-4
24	通信・放送	-1.85E-2	-6.782E-4	-8.472E-3	9.379E-1	-1.460E-2	-1.033E-2	-5.299E-3	-1.951E-2	-4.130E-2	-9.29E-3	0	-1.783E-3	-2.143E-5	-2.143E-5	-2.143E-5	-2.143E-5	-2.143E-5	-2.143E-5	-2.143E-5
25	公務	0	0	0	0	1.009E+0	0	0	0	0	0	0	-8.93E-2	0	0	0	0	0	0	0
26	教育・研究	-4.48E-4	-3.57E-6	-2.100E-3	-1.90E-2	-3.262E-4	1.000E+0	-1.826E-4	-6.440E-7	-1.963E-3	-2.697E-4	0	-7.430E-3	-3.315E-4	-3.315E-4	-3.315E-4	-3.315E-4	-3.315E-4	-3.315E-4	-3.315E-4
27	医療・保健 社会保障	-1.19E-5	-1.324E-6	-1.550E-5	-3.617E-5	-5.683E-6	-4.121E-6	-9.771E-1	-6.010E-6	-4.628E-6	-2.086E-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	その他の公共サービス	-2.31E-3	-2.447E-4	-1.43E-3	-9.401E-4	-8.39E-6	-1.298E-3	-1.263E-3	1.000E+0	-2.133E-3	-3.75E-3	0	-4.574E-4	-1.237E-5	-1.237E-5	-1.237E-5	-1.237E-5	-1.237E-5	-1.237E-5	-1.237E-5
29	対事業所サービス	-1.021E-1	-1.576E-2	-6.749E-2	-7.910E-2	-4.803E-2	-3.809E-2	-6.753E-2	-9.050E-1	-3.762E-2	0	0	-8.262E-2	-4.588E-4	-4.588E-4	-4.588E-4	-4.588E-4	-4.588E-4	-4.588E-4	-4.588E-4
30	対個人サービス	-5.978E-4	-6.541E-4	-8.908E-4	-3.790E-2	-1.600E-3	-1.213E-3	-1.243E-2	-4.308E-3	-5.320E-3	9.320E-1	0	0	-1.995E-6	-1.995E-6	-1.995E-6	-1.995E-6	-1.995E-6	-1.995E-6	-1.995E-6
31	事務用品	-4.45E-3	-4.741E-4	-2.317E-3	-2.674E-3	-3.340E-3	-4.810E-3	-3.044E-3	-5.668E-3	-3.039E-3	-2.59E-3	1.000E+0	-2.00E-4	-7.979E-6	-7.979E-6	-7.979E-6	-7.979E-6	-7.979E-6	-7.979E-6	-7.979E-6
32	分類不明	-4.007E-3	-7.964E-3	-5.539E-3	-6.102E-3	-1.626E-2	-1.051E-2	-2.805E-3	-9.681E-3	-6.438E-3	-4.641E-3	-1.448E-4	1.000E+0	-6.037E-5	-6.037E-5	-6.037E-5	-6.037E-5	-6.037E-5	-6.037E-5	-6.037E-5
33	砂利・砕石	0	0	0	0	-1.669E-2	0	0	0	0	0	0	-3.518E-3	-1.843E-1	-1.843E-1	-1.843E-1	-1.843E-1	-1.843E-1	-1.843E-1	-1.843E-1
34	セメント	0	-5.782E-3	0	0	-5.880E-4	-1.128E-3	0	0	0	0	0	-1.105E-1	0	0	0	0	0	0	0
35	クリンカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000E+0	1.000E+0	1.000E+0	1.000E+0	1.000E+0	1.000E+0	1.000E+0	1.000E+0
36	高炉スラグ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.890E-1	0	0	0	0	0	0	0
37	石炭飛灰	0	0	2.358E-5	0	1.84E-5	2.315E-3	6.331E-5	0	2.418E-5	3.162E-4	0	1.072E-5	0	-1.397E-1	0	0	0	0	0
38	焼却主灰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-9.657E-2	0	0	0
39	焼却飛灰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.839E-1	0	0
s1	高炉セメント生産																			
s2	フライアッシュ生産																			
s3	高炉スラグ・クリンカ																			
s4	石炭飛灰・クリンカ																			
s5	焼却主灰・クリンカ																			
s6	焼却飛灰・クリンカ																			
s7	高炉スラグ&焼却主灰・クリンカ																			
s8	高炉スラグ&焼却飛灰・クリンカ																			
s9	石炭飛灰&焼却主灰・クリンカ																			
s10	石炭飛灰&焼却飛灰・クリンカ																			
s11	高炉スラグ・砂利・砕石																			
s12	石炭飛灰・砂利・砕石																			

重積CO2排出原単位(t-CO2/百万円)またはC/I

E-A		40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	最終需要
		フライアッシュ&主灰・クリンカ	フライアッシュ&シュ&飛灰・クリンカ	ポルトランドセメント	高炉セメント	フライアッシュセメント	砂利砕石	高炉スラグ・砂利砕石	高炉スラグ・砂利砕石	高炉スラグ・最終処分	石炭飛灰・最終処分	焼却主灰・最終処分	焼却飛灰・最終処分	
1	農林水産業	0	0	0	0	0	-3745E-8	0	0	0	0	0	0	2528.703
2	その他鉱業	-1.70E-3	-1.70E-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5788.624
3	食料品	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25976.423
4	繊維製品	-1.182E-5	-1.182E-5	0	0	0	-7.546E-6	0	0	0	0	0	0	5402.643
5	ハルブ・紙・木製品	-2.337E-4	-2.337E-4	0	0	0	-3.384E-6	0	0	0	0	0	0	525.816
6	化学製品	-4.813E-6	-4.813E-6	0	0	0	-8.009E-6	0	0	0	0	0	0	3900.002
7	石油・石炭製品	-5.113E-5	-5.113E-5	0	0	0	-9.795E-5	0	0	0	0	0	0	2078.363
8	その他鉱業・土石製品	-1.411E-4	-1.411E-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	612.503
9	鉄鋼	-1.228E-5	-1.228E-5	0	0	0	-1.155E-6	0	0	0	0	0	0	816.360
10	非鉄金属	-4.082E-6	-4.082E-6	0	0	0	-1.101E-9	0	0	0	0	0	0	-959.917
11	金属製品	-1.740E-7	-1.740E-7	0	0	0	-2.416E-5	0	0	0	0	0	0	1291.288
12	一般機械	-3.198E-5	-3.198E-5	0	0	0	-7.320E-6	0	0	0	0	0	0	19747.000
13	電気機械	-2.687E-7	-2.687E-7	0	0	0	-2.831E-7	0	0	0	0	0	0	29.681.716
14	輸送機械	-3.479E-8	-3.479E-8	0	0	0	-1.586E-7	0	0	0	0	0	0	20600.202
15	精密機械	-1.045E-7	-1.045E-7	0	0	0	-1.542E-8	0	0	0	0	0	0	2722.179
16	その他の製造工業製品	-1.045E-4	-1.045E-4	0	0	0	-1.779E-5	0	0	0	0	0	0	6362.847
17	建設	-1.501E-4	-1.501E-4	0	0	0	-9.541E-6	0	0	0	0	0	0	80029.536
18	電力・ガス・熱供給	-9.594E-4	-9.594E-4	0	0	0	-2.057E-5	0	0	0	0	0	0	5690.655
19	水道・廃棄物処理	-2.317E-5	-2.317E-5	0	0	0	-5.415E-6	0	0	0	0	0	0	3425.383
20	商業	-2.385E-4	-2.385E-4	0	0	0	-6.483E-5	0	0	0	0	0	0	66210.774
21	金融・保険	-2.102E-4	-2.102E-4	0	0	0	-9.725E-5	0	0	0	0	0	0	7364.505
22	不動産	-2.455E-5	-2.455E-5	0	0	0	-1.285E-5	0	0	0	0	0	0	53543.275
23	運輸	-4.917E-4	-4.917E-4	0	0	0	-5.241E-5	0	0	0	0	0	0	17513.482
24	通信・放送	-2.143E-5	-2.143E-5	0	0	0	-3.950E-6	0	0	0	0	0	0	5280.476
25	公務	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25755.524
26	教育・研究	-3.315E-4	-3.315E-4	0	0	0	-3.855E-8	0	0	0	0	0	0	22702.942
27	医療・保健・社会保険	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35271.935
28	その他の公共サービス	-1.237E-5	-1.237E-5	0	0	0	-1.702E-6	0	0	0	0	0	0	3544.206
29	対事業販売サービス	-4.588E-4	-4.588E-4	0	0	0	-2.079E-4	0	0	0	0	0	0	12598.162
30	对个人サービス	-1.985E-6	-1.985E-6	0	0	0	-3.546E-7	0	0	0	0	0	0	51300.800
31	事務用品	-7.979E-6	-7.979E-6	0	0	0	-2.104E-6	0	0	0	0	0	0	0
32	分類不明	-6.037E-5	-6.037E-5	0	0	0	-2.043E-5	0	0	0	0	0	0	-490.061
33	砂利砕石	-1.843E-1	-1.843E-1	0	0	0	1.000E+0	1.000E+0	1.000E+0	0	0	0	0	1552.382
34	セメント	0	0	9.938E-1	9.938E-1	9.938E-1	1.000E+0	0	0	0	0	0	0	8577.393
35	クリンカ	0	0	-9.463E-1	-5.788E-1	-7.714E-1	2.592E-6	0	0	0	0	0	0	5997.000
36	高炉スラグ	0	0	-1.870E-2	-4.000E-1	0	0	-1.000E+0	-1.000E+0	0	0	0	0	0
37	石炭飛灰	-1.066E-1	-1.790E-2	0	0	0	0	0	-1.000E+0	0	0	0	0	0
38	焼却主灰	-9.498E-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4545.296
39	焼却飛灰	0	-1.820E-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1136.324
s1	高炉セメント生産				s1	1-s1	s1							0
s2	フライアッシュセメント生産				s2	s2	1-s2							0
s3	高炉スラグ・クリンカ													0
s4	石炭飛灰・クリンカ													0
s5	焼却主灰・クリンカ													0
s6	焼却飛灰・クリンカ													0
s7	高炉スラグ&焼却主灰・クリンカ	-9.498E-2	-1.820E-1											-4545.296 (s5+s7+s9)
s8	高炉スラグ&焼却飛灰・クリンカ													-1136.324 (s6+s8+s10)
s9	石炭飛灰&焼却主灰・クリンカ													-4545.296 s7
s10	石炭飛灰&焼却飛灰・クリンカ													-1136.324 s8
s11	高炉スラグ・砂利砕石							1						-4545.296 s9
s12	石炭飛灰・砂利砕石								1					-1136.324 s10

直接CO2排出原単位(t-CO2/百万円or t-C4) 2.298E-1 2.147E-1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Appendix 2 産業連関モデルの構造分解による

環境負荷変化の要因分析

1. はじめに

産業連関モデルの構造分解分析は、産業構造の時系列変化を最終需要・投入技術・貿易構造等の各要因に分解して、生産量の変化量への寄与を定量的に評価する方法である。この方法を環境分析に適用し、環境負荷の変化についての要因分析を行う。

今回は、1990年と1995年の2時点間の変化の要因について結果を示す。環境負荷として、CO₂排出量、産業廃棄物排出量、産業廃棄物最終処分量、資源消費量の4つを取り上げる。

2. 方法

(1)式で表される最も簡単な産業連関モデルを用いて構造分解分析の方法を説明する。(1)式は最終需要 \mathbf{F} が与えられたとき、これを満たすのに必要な産業部門別の生産量 \mathbf{X} を表す。

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{F} \quad (1)$$

ただし

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} : \text{生産量ベクトル}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} : \text{投入係数行列 (ただし } a_{ij} = x_{ij} / x_j \text{)}$$

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} : \text{単位行列}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} : \text{最終需要ベクトル}$$

である。 n は産業部門の数を表す。

産業部門の生産活動によって発生する環境負荷は、各部門の単位生産額あたりの環境負荷直接発生原単位 \mathbf{e} を用いて、次式で表される。

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}\hat{\mathbf{X}} \quad (2)$$

ただし

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \end{pmatrix} : \text{直接環境負荷発生量ベクトル}, \quad \mathbf{e} = (e_1 \quad \cdots \quad e_n) : \text{直接環境負荷原単位ベクトル},$$

$\hat{\mathbf{X}}$: 対角化された最終需要行列

最終需要 \mathbf{F} によって産業部門の生産活動が誘発され、それにより環境負荷が発生すると考えると、各部門の最終需要によって誘発される環境負荷発生量は次式で表される。

$$\mathbf{T} = \mathbf{e}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \hat{\mathbf{F}} \quad (3)$$

ただし

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} : \text{最終需要誘発環境負荷発生量ベクトル}, \quad \mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix} : \text{直接環境負荷原単位ベクトル},$$

$\hat{\mathbf{F}}$: 対角化された最終需要行列

2 時点 $t \sim t+1$ における環境負荷発生量の変化は次式で表される。

$$\Delta \mathbf{T} = \mathbf{e}_{t+1}(\mathbf{I} - \mathbf{A}_{t+1})^{-1} \hat{\mathbf{F}}_{t+1} - \mathbf{e}_t(\mathbf{I} - \mathbf{A}_t)^{-1} \hat{\mathbf{F}}_t \quad (4)$$

(4)式は次のように各要因の変化に分解することが出来る。

$$\Delta \mathbf{T} = \Delta \mathbf{e}(\mathbf{I} - \mathbf{A}_t)^{-1} \mathbf{F}_t + \mathbf{e}_t \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{F}_t + \mathbf{e}_t(\mathbf{I} - \mathbf{A}_t)^{-1} \Delta \mathbf{F} + \mathbf{J} \quad (5)$$

この分解式では、環境負荷発生量の変化を

- 1) 直接負荷原単位要因 \mathbf{e} ,
- 2) 逆行列要因(波及効果要因) $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$,
- 3) 最終需要要因 \mathbf{F}

に分解している \mathbf{J} は複数の変化による影響をまとめたもので交差項(あるいは交絡項)とよばれる⁶。以上のように環境負荷発生量の変化を産業構造の変化に帰着させる方法が要因分析とよばれるものである。

3. 本研究での分解式

本研究での産業連関モデルは、輸入を明示的に扱ったモデルである。このモデルでは考慮する環境負

⁶ この交差項の解釈の問題は、構造分解分析に固有の問題として知られる。

また、分解式は交差項を適宜展開することで、次式のように異なる形で得ることが出来る。

$$\Delta \mathbf{T} = \Delta \mathbf{e}(\mathbf{I} - \mathbf{A}_{t+1})^{-1} \mathbf{F}_{t+1} + \mathbf{e}_{t+1} \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{F}_{t+1} + \mathbf{e}_{t+1}(\mathbf{I} - \mathbf{A}_{t+1})^{-1} \Delta \mathbf{F} + \mathbf{J}'$$

= ...

一般に n 個の要因がある場合には $n!$ 個の分解式が可能である。このように、要因に重み付けする基準時点の違いで複数の等価な分解式が存在するという問題も構造分解分析に固有の問題である。

荷を国内で発生する環境負荷に限定し，輸入品を需要することで海外で誘発される環境負荷は考慮されない．輸入が増加する場合には負荷発生量は減少することになる．環境負荷発生量のデータが国内発生に限るものであることからこのモデルを用いた．

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \mathbf{M})\mathbf{A}\}^{-1} \{(\mathbf{I} - \mathbf{M})\mathbf{Y} + \mathbf{E}\} \quad (6)$$

ただし

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & m_n \end{pmatrix} : \text{輸入係数行列} \left(m_i = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + Y_j} : \text{国内需要に占める輸入品の割合} \right)$$

\mathbf{Y} : 国内最終需要ベクトル， \mathbf{E} : 輸出ベクトル

ここで

$$\mathbf{L} = \{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \mathbf{M})\mathbf{A}\}^{-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{F} = \{(\mathbf{I} - \mathbf{M})\mathbf{Y} + \mathbf{E}\} \quad (8)$$

とおくと，環境負荷変化の分解式は次式で表される．

$$\Delta\mathbf{T} = \Delta\mathbf{e}\mathbf{L}_t\mathbf{F}_t + \mathbf{e}_t\Delta\mathbf{L}\mathbf{F}_t + \mathbf{e}_t\mathbf{L}_t\Delta\mathbf{F} + \mathbf{J} \quad (9)$$

構造分解では，第一段階として直接係数要因，逆行列係数要因，最終需要要因にわけて，この3つの要因の大きさを求める．第二段階として影響が大きかった要因についてさらに分解をおこなう．

本研究では環境負荷として，CO₂排出量，産業廃棄物排出量，産業廃棄物最終処分量，資源消費量の4つを対象とする．

4. 結果

4.1 CO₂排出量

各部門からの直接CO₂排出量は，国立環境研によるデータを用いた．連関表は32部門分類のものを用いた．まず，1990年，95年の各部門からの直接CO₂排出量と最終需要誘発CO₂排出量を示す．

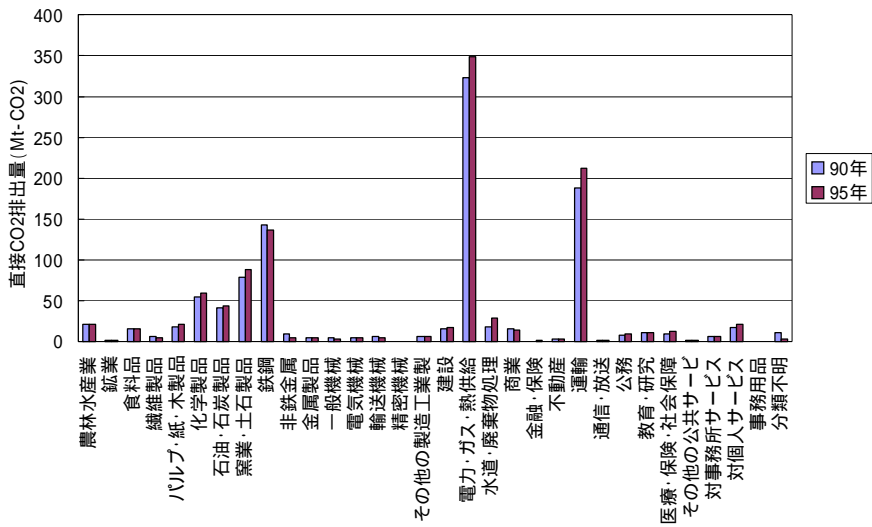


図 40 産業部門別の直接 CO₂ 排出量

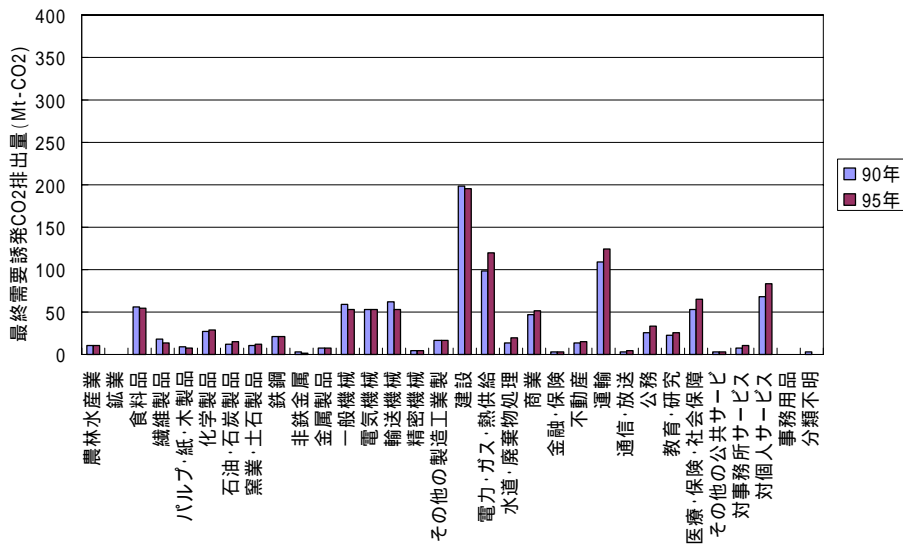


図 41 最終需要部門別の最終需要誘発 CO₂ 排出量

表 13 に CO₂ 排出量の各要因の寄与をまとめた。部門ごとに各要因の大きさを表したグラフを図 42 に示す。

表 13 CO₂排出量の各要因の寄与 (1990~95)

	(t-CO ₂)	対90年比
1990年排出量	1,036,922,431	
1995年排出量	1,107,167,510	
変化量	70,245,079	6.77%
変化量 (t-CO ₂) 対90年比		
e 直接原単位要因	24,073,689	2.32%
L 逆行列要因	-2,143,537	-0.21%
F 最終需要要因	51,918,810	5.01%
交差項	-3,603,882	-0.35%

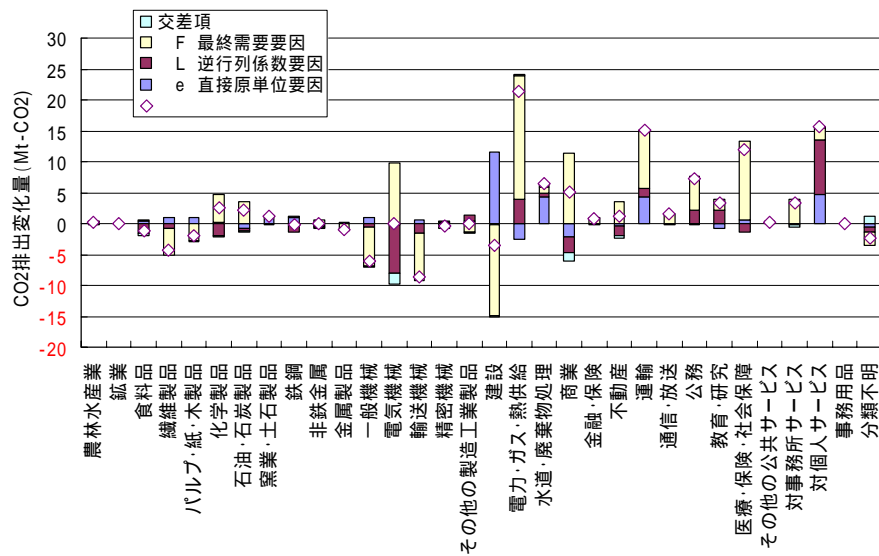


図 42 各産業部門の CO₂排出量変化要因

4.2 産業廃棄物発生量

本節では産業廃棄物の発生構造の分析に産業連関分析法を適用する試みについて報告する。平成2年度-平成7年度32部門接続産業連関表(2期の連関表を比較できるように部門の調整, 価額の補正などを施したものを)を用いて産業廃棄物の発生構造の変化について分析した結果を示す。

図43に産業部門別の最終需要誘発による産業廃棄物発生量(平成2年度と7年度の値)を示す。最終需要誘発による産業廃棄物発生量は(10)式で求められる発生量である。

$$\begin{aligned}
 W_{ij} &= \varepsilon_{ij} \cdot f_j \\
 &= \mathbf{e}_i^T [(\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \mathbf{M})\mathbf{A})^{-1}]_j \cdot \{(1 - m_j)Y_j + E_j\}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

ただし

W_{ij} : 産業 j 部門における産業廃棄物 i の最終需要誘発発生量

ε_{ij} : 産業 j 部門における産業廃棄物 i の最終需要誘発発生原単位

f_j : 輸入控除型最終需要 ($=\{(1 - m_j)Y_j + E_j\}$) m_j : 輸入係数, Y_j : 国内最終需要, E_j : 輸出

er:産業廃棄物 i の直接発生原単位ベクトル

$[(I - (I - M)A)^{-1}]_j$: 産業 j 部門についての逆行列係数列ベクトル (= 部門 j の最終需要 1 単位あたりの各部門への生産誘発量)

の各部門への生産誘発量)

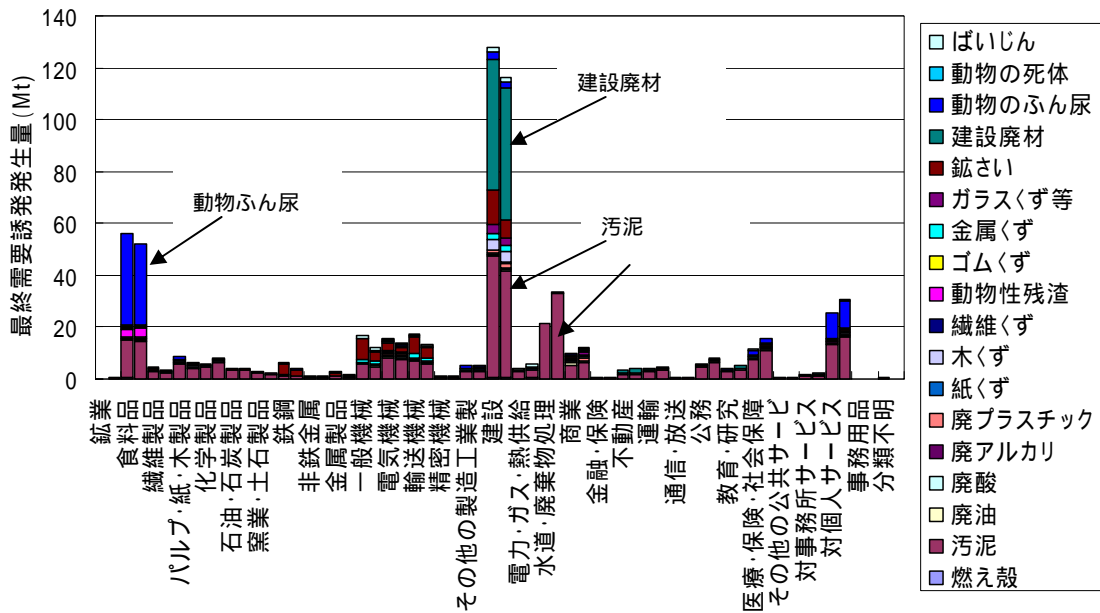


図 43 平成 2 年度および平成 7 年度の最終需要誘発産業廃棄物発生量

図 2 に最終需要誘発産業廃棄物発生量の変化量を示す。

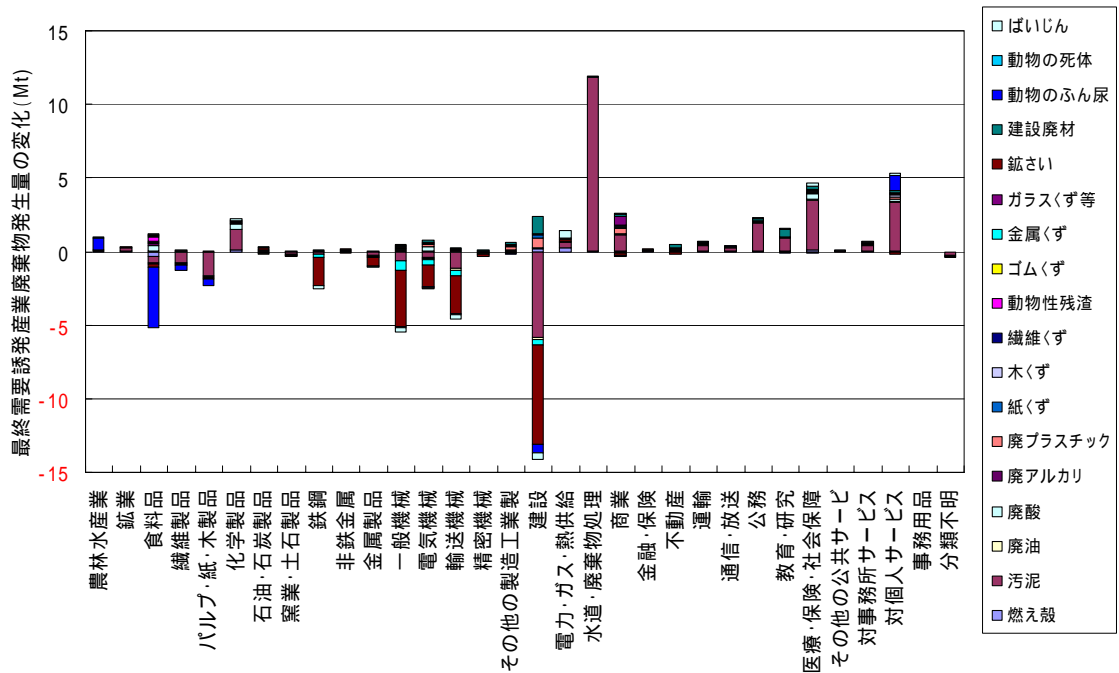


図 44 最終需要誘発産業廃棄物発生量の変化量

(1) 産業廃棄物発生量変化の要因

t 年度における産業 j 部門における産業廃棄物 i の発生量 $W_{ij}(t)$ とおく.

(10)式より

$$\begin{aligned} \Delta W_{ij} &= W_{ij}(95) - W_{ij}(90) \\ &= \varepsilon_{ij}(95) \cdot f_i(95) - \varepsilon_{ij}(90) \cdot f_i(90) \\ &= \Delta \varepsilon_{ij} \cdot f_i(90) + \varepsilon_{ij}(90) \cdot \Delta f_i + \Delta \varepsilon_{ij} \cdot \Delta f_i \end{aligned} \tag{11}$$

が導かれる。(11)式より、産業廃棄物発生量の変化 W を、原単位の変化 ε に起因するものと最終需要の変化 f に起因するものとに分解できる。

32産業部門×18種廃棄物について計576個の W_{ij} を求め、(11)式のように変化の要因を求めた。 W_{ij} の値が大きかった種類について表14、表15に結果を示す。

表14 W_{ij} 上位10種の産業部門別廃棄物変化量(単位:t)

増加トップ10

		W	$\varepsilon \cdot f(90)$	$(90) \times f$	要因
汚泥	水道・廃棄物処理	11,844,005	9,941,026	1,902,979	原単位
汚泥	医療・保険・社会保障	3,380,544	1,460,314	1,920,231	両方
汚泥	対個人サービス	3,312,323	2,918,753	393,570	原単位
汚泥	公務	1,888,017	858,691	1,029,327	両方
汚泥	化学製品	1,391,493	579,497	811,996	両方
建設廃材	建設	1,180,842	4,863,862	-3,683,020	相殺
汚泥	商業	1,119,779	-134,935	1,254,715	需要
動物のふん尿	対個人サービス	989,299	713,955	275,345	原単位
汚泥	教育・研究	899,629	647,939	251,690	原単位
動物のふん尿	農林水産業	869,234	259,311	609,924	需要

合計 26,875,166
増加量の63%を占める

表15 W_{ij} 下位10種の産業部門別廃棄物変化量(単位:t)

減少トップ10

		W	$\varepsilon \cdot f(90)$	$(90) \times f$	分類
鉍さい	建設	-6,723,682	-5,952,773	-770,909	原単位
汚泥	建設	-5,867,340	-2,498,818	-3,368,522	両方
動物のふん尿	食料品	-4,102,098	-4,232,631	130,532	原単位
鉍さい	一般機械	-3,807,062	-3,195,938	-611,123	原単位
鉍さい	輸送機械	-2,552,948	-1,891,888	-661,060	原単位
鉍さい	鉄鋼	-1,928,720	-1,951,706	22,986	原単位
汚泥	パルプ・紙・木製品	-1,572,003	58,997	-1,630,999	需要
鉍さい	電気機械	-1,495,211	-1,764,627	269,416	原単位
汚泥	輸送機械	-1,108,754	-313,206	-795,548	需要
汚泥	繊維製品	-714,990	36,942	-751,932	需要

合計 -29,872,809
減少量の71%を占める

(2) 産業廃棄物発生原単位の変化の要因

産業廃棄物発生原単位の変化量 j についても同様に

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta e_i^T \cdot b_i(90) + e_i^T(90) \cdot \Delta b_i + \Delta e_i^T \cdot \Delta b_i \quad (12)$$

のように直接発生源単位ベクトルの変化 e に起因するものと生産誘発ベクトルの変化 b に起因するものとに分解できる。ただし $b_i = [I - (I - M)A]^{-1} j$ である。

表 14、表 15 に示した廃棄物のうち、いくつか取り上げて原単位変化の要因を示す。

(a) 建設部門への最終需要によって発生する汚泥の場合（単位：t/百万円）

$e \cdot b(90)$	$e(90) \cdot b$	$e \cdot b$		(90)
0.0398	-0.0626	-0.0072	-0.0300	0.54532

直接発生源単位は増加しているが、生産誘発効果の減少が上回った。
主として**鉱業**への誘発効果が減少したことによる。

鉱業への誘発効果とは、建設需要が波及して鉱業の生産を増加させることである。誘発効果の減少は、鉱業から建設部門への投入係数が減少したことによる。

(b) 水道・廃棄物部門への最終需要によって発生する汚泥の場合（単位：t/百万円）

$e \cdot b(90)$	$e(90) \cdot b$	$e \cdot b$		(90)
2.5726011	0.30998175	0.1216033	3.0042	6.65195

直接発生源単位の増加による。
水道・廃棄物部門(自部門)での直接発生源単位の増加による。

(c) 一般機械部門への最終需要によって発生する鉱さいの場合（単位：t/百万円）

$e \cdot b(90)$	$e(90) \cdot b$	$e \cdot b$		(90)
-0.1454736	-0.0033091	-0.0011453	-0.1499	0.3395

直接発生源単位の減少による。
主として**鉄鋼部門**の直接排出原単位の減少による。

鉄鋼部門の直接排出原単位減少が一般機械に影響するのは、一般機械への鉄鋼部門からの投入係数が他部門に比べ大きいためである。

(d) 建設部門への最終需要によって発生する建設廃材の場合（単位：t/百万円）

$e \cdot b(90)$	$e(90) \cdot b$	$e \cdot b$		(90)
0.06176812	-0.0005422	-0.0004501	0.0608	0.57982

直接発生源単位の増加による。
建設部門(自部門)での直接発生源単位の増加による。

表 14 の中段にある建設部門への最終需要による建設廃材発生量が示すように、原単位が増加したにもかかわらず建設部門への最終需要の減少によって、トータルでは建設廃材発生量の増加は小さくなっている。

(3) 最終需要の項目別変化

最終需要の項目別変化量を表 16 に示す。

表 16 項目別最終需要の変化 (単位:百万円)

	[(1-m)Y]							E	f
	家計外消費支出 (列)	民間消費支出	一般政府消費支出	固定資本 (公的)	固定資本 (民間)	在庫純増	国内最終 需要計	輸出	合計
1 農林水産業	-10,836	-211,652	0	0	-10,747	365,131	131,897	-14,959	116,938
2 鉱業	0	-36	0	0	722	15,681	16,366	1,013	17,379
3 食料品	-224,600	419,606	2,544	0	0	-25,691	171,858	-57,757	114,101
4 繊維製品	-60,766	-1,787,295	0	-394	-66,320	-34,181	-1,948,955	-178,333	-2,127,288
5 パルプ・紙・木製品	-51,904	-34,216	0	-27,997	-595,864	-69,101	-779,082	-87,774	-866,856
6 化学製品	4,593	271,355	0	0	0	-3,075	272,872	567,458	840,330
7 石油・石炭製品	-1,011	639,998	0	0	0	-103,588	535,399	109,648	645,047
8 窯業・土石製品	-15,507	29,240	0	0	0	-57,941	-44,209	25,019	-19,190
9 鉄鋼	0	3,786	0	-2,974	5,486	-31,551	-25,253	39,969	14,716
10 非鉄金属	19	20,279	0	0	11,103	-20,556	10,845	162,382	173,227
11 金属製品	-6,174	55,680	0	94	-87,960	-132,490	-170,850	-103,245	-274,095
12 一般機械	-3,320	4,377	0	136,933	-2,450,538	-317,245	-2,629,794	319,603	-2,310,191
13 電気機械	-4,591	1,577,153	0	-161,005	679,136	44,391	2,135,084	2,833,015	4,968,099
14 輸送機械	0	577,821	0	31,362	-1,307,666	-237,946	-936,429	-2,116,106	-3,052,535
15 精密機械	-14,693	21,732	0	-35,351	-228,741	-44,220	-301,272	-213,453	-514,725
16 その他の製造工業製品	-55,588	-206,300	-9,975	12,481	-66,525	-136,898	-462,805	-265,303	-728,108
17 建設	0	0	0	5,736,510	-12,088,565	0	-6,352,055	0	-6,352,055
18 電力・ガス・熱供給	374	956,992	0	0	0	0	957,366	2,711	960,077
19 水道・廃棄物処理	77	52,387	181,109	0	0	0	233,573	-194	233,379
20 商業	281,020	10,913,508	1,209	126,295	351,922	45,814	11,719,768	1,136,875	12,856,643
21 金融・保険	35	2,034,626	0	0	0	0	2,034,661	133,654	2,168,315
22 不動産	0	11,137,474	0	0	0	0	11,137,474	522	11,137,996
23 運輸	282,622	1,252,120	-2,402	-5,596	-68,384	117,895	1,576,254	-118,171	1,458,083
24 通信・放送	38,898	2,151,458	0	0	0	0	2,190,357	11,594	2,201,951
25 公務	0	273,204	4,246,160	0	0	0	4,519,364	0	4,519,364
26 教育・研究	0	868,880	847,092	0	0	0	1,715,972	10,612	1,726,584
27 医療・保険・社会保障	73,403	3,318,392	3,428,588	0	0	0	6,820,383	-167	6,820,216
28 その他の公共サービス	0	325,188	0	0	0	0	325,188	6,854	332,042
29 対事務所サービス	-1,102	300,660	0	1,056,038	2,983,628	0	4,339,224	293,117	4,632,341
30 対個人サービス	496,636	877,024	0	0	0	0	1,373,660	-1,260	1,372,400
31 事務用品	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32 分類不明	0	4,541	0	0	0	0	4,541	-607,970	-603,429
合計	727,586	35,847,984	8,694,325	6,866,396	-12,939,314	-625,573	38,571,404	1,889,354	40,460,758

製造産業部門ではおおむね最終需要が減少している。民間投資の減少による機械類，建設部門の需要減少が大きい。サービス部門では民間消費の増加により最終需要が増加している。

(4) 各要因の寄与度

以上，産業廃棄物発生量の変化には直接発生原単位，投入係数，最終需要の 3 つの変化要因がある。そこで，3 つの変化要因の寄与度を求めた。廃棄物種類別，産業別の結果を表 17，表 18 に示す。

表 17 産業部門別の発生量変化に対する各要因の寄与

	e	b	f	合計
農林水産業	553,619	-202,363	633,980	985,235
鉱業	58,750	-440	252,449	310,759
食料品	1,292,933	-5,489,079	235,262	-3,960,885
繊維製品	435,080	-465,009	-1,184,938	-1,214,866
パルプ・紙・木製品	294,733	-119,303	-2,442,431	-2,267,000
化学製品	1,854,170	-600,194	992,611	2,246,587
石油・石炭製品	441,947	-1,453,907	1,149,897	137,937
窯業・土石製品	-18,788	-234,780	-52,389	-305,957
鉄鋼	-2,141,155	-371,487	68,810	-2,443,832
非鉄金属	-65,845	-171,458	282,247	44,943
金属製品	-601,845	-38,808	-385,840	-1,026,494
一般機械	-2,651,537	-623,018	-1,740,590	-5,015,145
電気機械	-1,255,105	-3,321,447	2,824,669	-1,751,883
輸送機械	-1,390,094	-794,662	-2,179,985	-4,364,741
精密機械	16,243	-52,633	-208,216	-244,606
その他の製造工業製品	867,479	-51,265	-401,220	414,994
建設	4,314,461	-6,605,208	-9,395,695	-11,686,442
電力・ガス・熱供給	952,583	-404,521	869,571	1,417,633
水道・廃棄物処理	9,100,884	1,271,266	1,569,125	11,941,275
商業	1,629,562	-1,701,868	2,364,232	2,291,926
金融・保険	96,673	-145,302	229,239	180,611
不動産	263,461	-918,582	979,473	324,352
運輸	728,181	-386,661	338,448	679,967
通信・放送	113,434	13,625	268,341	395,399
公務	1,420,248	-416,419	1,254,747	2,258,576
教育・研究	1,275,010	-103,699	318,530	1,489,841
医療・保険・社会保障	2,819,440	-1,047,495	2,717,568	4,489,513
その他の公共サービス	44,137	-86,427	76,225	33,935
対事務所サービス	55,434	-288,595	843,794	610,633
対個人サービス	3,289,766	1,165,359	700,892	5,156,016
事務用品	0	0	0	0
分類不明	1,660	-20,554	-372,362	-391,255
合計	23,795,520	-23,664,936	606,443	737,028

直接排出原単位による寄与では、素材、機械類でのみ減少に寄与するという結果となり、その他の部門はすべて直接排出原単位の変化は増加傾向にあるという結果が得られた。機械類の減少も鉄鋼部門の影響が大きいと考えられる。

投入係数の変化による寄与では、ほぼすべての部門で減少に寄与するという結果が得られた。この結果の最も素直な解釈は、内生部門への投入量そのものが減少している（すなわち産業の効率化が進展している）ということだが、産業連関表の数値上の都合でこのような結果が見かけ上得られている可能性もある。

最終需要の変化による寄与では、素材・加工部門で減少、サービス部門では増加に寄与するという結果が得られた。

合計値を見ると、直接排出原単位の増加の効果を投入係数変化による減少が打ち消し、最終需要の増加による影響が最終的廃棄物発生量の増加量として現れているという結果が得られた。

表 18 産業廃棄物種類別の発生量変化に対する各要因の寄与

	e	b	f	合計
燃え殻	624,377	-57,587	21,822	588,612
汚泥	23,755,378	-13,668,446	4,010,749	14,097,680
廃油	-478,446	20,051	208,152	-250,242
廃酸	1,728,783	-28,445	65,963	1,766,301
廃アルカリ	379,580	-24,076	117,423	472,927
廃プラスチック	2,062,872	-64,166	83,943	2,082,649
紙くず	794,498	-53,955	-37,096	703,447
木くず	1,052,983	-121,498	-343,679	587,805
繊維くず	8,252	-5,502	-17,808	-15,058
動物性残渣	365,085	2,965	49,877	417,926
ゴムくず	-3,410	-3,900	934	-6,376
金属くず	-1,860,230	4,272	-87,659	-1,943,617
ガラスくず等	862,451	16,656	-33,190	845,916
鉱さい	-13,819,824	-3,084,778	-1,359,911	-18,264,513
建設廃材	6,777,992	27,439	-3,141,973	3,663,458
動物のふん尿	1,242,751	-6,466,746	1,011,300	-4,212,695
動物の死体	118,182	-1,924	376	116,634
ばいじん	184,248	-155,294	57,219	86,173
合計	23,795,520	-23,664,936	606,443	737,028

廃棄物の変化では鉱さいの減少，汚泥の増加が目立つ．産業廃棄物に関して用いたデータは発生量ベースであり，再利用，減量化，最終処分についての情報は含まれない．再利用率や最終処分率などのデータが得られれば，最終処分量への影響等を調べることも可能となる．

表 19 に産業廃棄物排出量の各要因の寄与をまとめた．

表 19 産業廃棄物排出量の各要因の寄与（1990-95）

	(t)	対90年比
1990年排出量	393,517,475	
1995年排出量	393,811,947	
変化量	294,472	0.07%
	変化量(t)	対90年比
e 直接原単位要因	19,218,820	4.88%
L 逆行列要因	-20,846,169	-5.30%
F 最終需要要因	2,019,560	0.51%
交差項	-97,743	-0.02%
T 合計	294,468	0.07%

部門ごとに各要因の大きさを表したグラフを図 6 に示す．

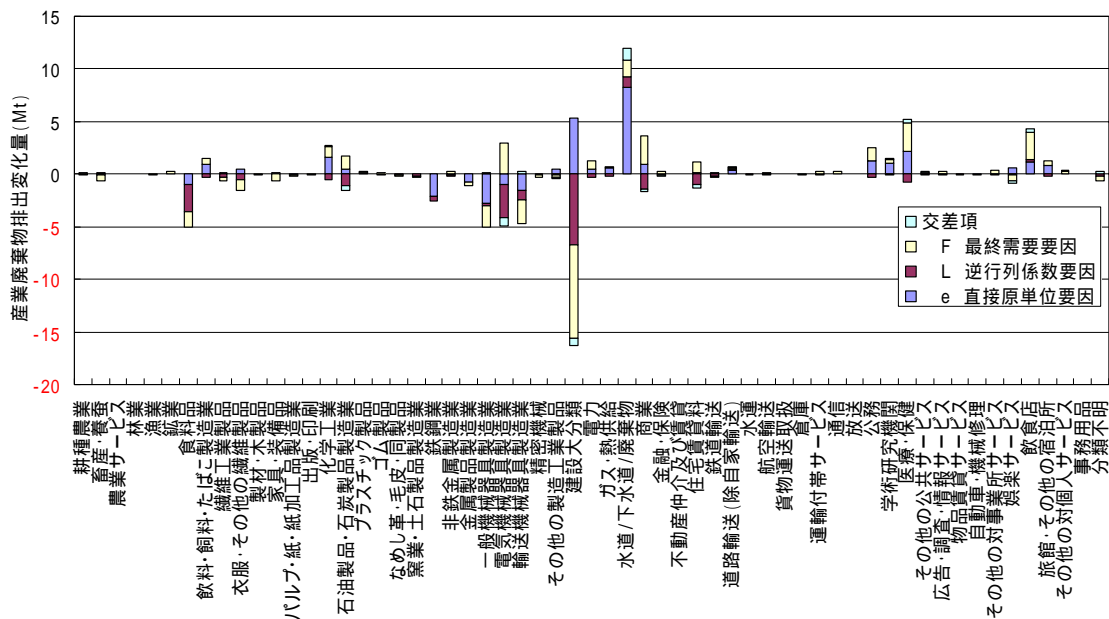


図 45 各産業部門の産業廃棄物排出量変化要因

建設部門による影響が大きい。CO₂ 排出量と異なり、最終需要変化の影響が小さい。原単位変化は増加、逆行列係数変化は減少に寄与する。

4.3 産業廃棄物最終処分量

各産業部門の最終処分原単位は、次式のように産業廃棄物排出原単位に廃棄物ごとの最終処分量をかけることで求めた（各部門から排出される同一廃棄物の最終処分量は等しいと仮定している）。

$$e = RW \tag{13}$$

ただし

e：最終処分原単位ベクトル（t/百万円），**R**：最終処分量ベクトル（1×18）

W：産業廃棄物直接排出原単位ベクトル（18×59）

直接・誘発の最終処分量データは割愛する。最終処分量変化における各要因の寄与の大きさを表 20 にまとめた。

表 20 産業廃棄物最終処分量の各要因の寄与（1990～95）

	(t)	対90年比
1990年排出量	88,686,955	
1995年排出量	73,319,805	
変化量	-15,367,151	-17.33%
	変化量(t)	対90年比
e 直接原単位要因	-12,045,973	-13.58%
L 逆行列要因	-3,475,242	-3.92%
F 最終需要要因	-929,474	-1.05%
交差項	1,083,539	1.22%

部門ごとに各要因の大きさを表したグラフを図 46 に示す。

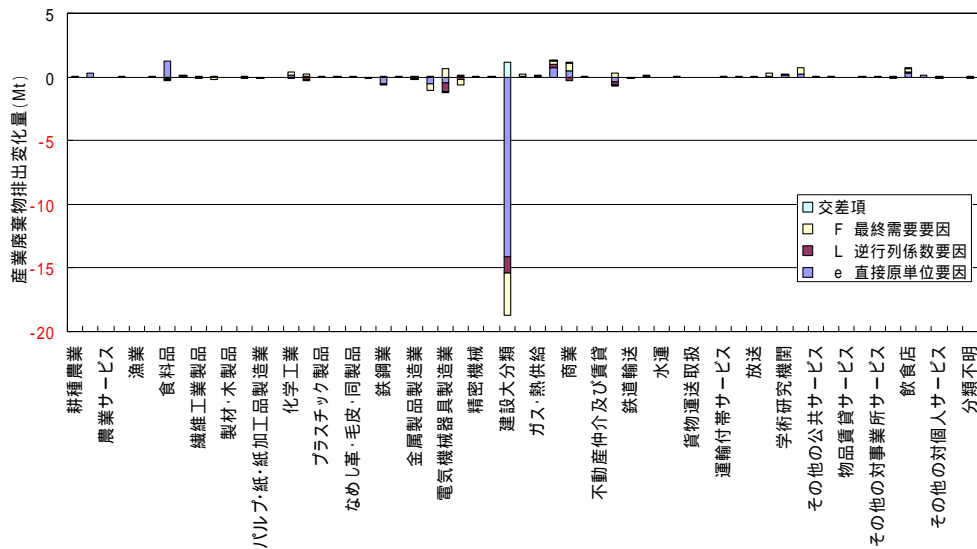


図 46 各産業部門の産業廃棄物最終処分量変化要因

建設廃材の最終処分率の大幅向上により、最終処分量減少のほとんどの要因がこれにより説明される。

4.4 資源消費量

産業連関表・物量表を元に、重量ベースの資源消費量で大きな割合を占める砕石・石灰石・砂利・鉄鉱石・石炭・原油の6種の品目の消費量データを用いた。この6品目で日本の資源投入量のマテリアルフローの約75%を占める。

表 21 資源消費量の各要因の寄与（1990～95）

	(t)	対90年比
1990年排出量	1,866,673,707	
1995年排出量	1,546,291,190	
変化量	-320,382,517	-17.16%
	変化量(t)	対90年比
e 直接原単位要因	-295,630,601	-15.87%
L 逆行列係数要因	8,155,337	0.52%
F 最終需要要因	-37,899,843	-1.90%
交差項	4,992,589	0.09%

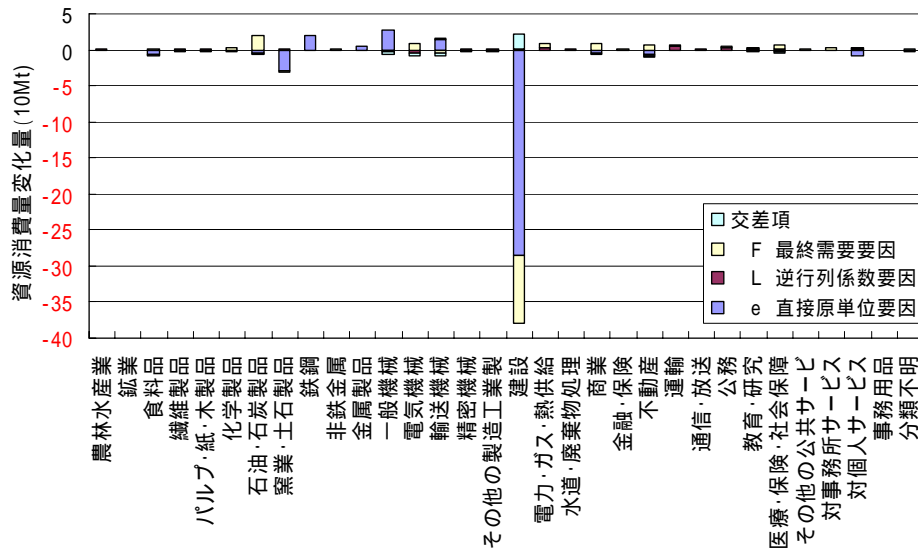


図 47 各産業部門の資源消費量変化要因

4.5 CO₂ 排出変化量における最終需要要因の分解

最終需要要因による寄与が大きかった CO₂ 排出変化量について、(14)に示すように、さらに最終需要構造を消費，投資，輸出，その他，輸入による代替の 5 つの要因に分解して要因分析を行った。

$$\begin{aligned}
 \Delta F &= \{(\mathbf{I} - \mathbf{M}_{t+1})\mathbf{Y}_{t+1} + \mathbf{E}_{t+1}\} - \{(\mathbf{I} - \mathbf{M}_t)\mathbf{Y}_t + \mathbf{E}_t\} \\
 &= \{(\mathbf{I} - \mathbf{M}_{t+1})(\mathbf{Y}_{t+1}^c + \mathbf{Y}_{t+1}^e + \mathbf{Y}_{t+1}^o) + \mathbf{E}_{t+1}\} - \{(\mathbf{I} - \mathbf{M}_t)(\mathbf{Y}_t^c + \mathbf{Y}_t^e + \mathbf{Y}_t^o) + \mathbf{E}_t\} \quad (14) \\
 &= \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{M})\mathbf{Y}_t + (\mathbf{I} - \mathbf{M}_t)\Delta\mathbf{Y}^c + (\mathbf{I} - \mathbf{M}_t)\Delta\mathbf{Y}^e + (\mathbf{I} - \mathbf{M}_t)\Delta\mathbf{Y}^o + \Delta\mathbf{E} + \mathbf{J}
 \end{aligned}$$

また、最終需要については、(15)に示すように、各部門の構成比が一定のまま総需要水準が変化した場合のレベル変化の効果と、総需要水準が一定のまま各部門の構成比が変化した場合のパターン変化の効果とに分解できる。

$$\Delta F = (\mathbf{F}_{t+1} - \mathbf{F}_t) \frac{\sum_i f_{i,t}}{\sum_i f_{i,t+1}} + (\mathbf{F}_{t+1} \frac{\sum_i f_{i,t}}{\sum_i f_{i,t+1}} - \mathbf{F}_t) \quad (15)$$

(15)の最終需要について、レベル変化効果とパターン変化効果を消費，投資，輸出，その他の 4 つの要因それぞれについて求めた。最終需要要因の分解結果を表 22 に示す。

表 22 CO₂ 排出量変化の最終需要要因の分解結果

	変化量 (t-CO ₂) 対90年比	
輸入係数 M	-6,354,182	-0.61%
消費 (yc)	78,353,637	7.56%
投資 (ys)	-20,280,066	-1.96%
その他 (yo)	-2,526,671	-0.24%
輸出 (E)	2,751,393	0.27%
交差項	-25,302	0.00%
合計 (F)	51,918,810	5.01%

		変化量 (t-CO ₂) 対90年比	
レベル効果	消費 (yc)	58,914,758	5.68%
	投資 (ys)	-20,508,164	-1.98%
	その他 (yo)	-2,643,028	-0.25%
	輸出 (E)	6,019,938	0.58%
パターン効果	消費 (yc)	15,323,099	1.48%
	投資 (ys)	-1,939,131	-0.19%
	その他 (yo)	19,881	0.00%
	輸出 (E)	-3,268,545	-0.32%
合計 (F)	51,918,810	5.01%	

4.6 産業廃棄物排出の投入係数要因，輸入係数要因

逆行列係数要因の寄与が大きかった産業廃棄物排出について，逆行列係数要因を次式に示すように投入係数要因と輸入係数要因とに分解した⁷。

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_{t+1} - L_t \\ &= L_t \Delta(I - M) A_t L_{t+1} + L_t (I - M_t) \Delta A L_{t+1} + L_t \Delta(I - M) \Delta A L_{t+1} \end{aligned} \quad (16)$$

逆行列係数要因の分解結果を表 23 に示す。

表 23 産業廃棄物排出量の逆行列係数要因の分解結果

	変化量 (t) 対90年比	
M 輸入係数要因	-14,128,145	-3.59%
A 投入係数要因	-7,467,254	-1.90%
交差項	749,230	0.19%
合計 (L)	-20,846,169	-5.30%

5. 結果の妥当性の検討

5.1 異なる分解式での結果

交差項 J は複数の要因の変化の寄与であり，数値に対する解釈が明確でない．そこで交差項 J をそれぞれの要因に配分し，環境負荷の変化を各要因のいずれかに帰属させるという方法がとられる．ただし

⁷ $L = \{I - (I - M)A\}^{-1} = (I - B)^{-1}$ とおくと $\Delta L = L_{t+1} - L_t = L_t \Delta B L_{t+1}$ が成り立つ。

その場合，(4)で示される環境負荷変化量の分解式は，複数の展開が可能となる．要因数が n 個の場合， $n!$ 通りの展開が可能となり，各要因について基準時点の重み付けが異なる 2^{n-1} 個の要因が得られる．そこで異なる展開でどの程度結果に影響するか，CO₂排出量のデータで評価した．結果を表 24 に示す．

表 24 異なる分解式の結果への影響

		総変化量	Tに占める割合
e 直接原単位要因	eL_tF_t		34.3%
	$eL_{t+1}F_{t+1}$		29.7%
	eL_tF_{t+1}		31.6%
	$eL_{t+1}F_t$		32.7%
L 逆行列係数要因	$e_t LF_t$		-3.1%
	$e_{t+1} LF_{t+1}$		-5.5%
	$e_t LF_{t+1}$		-3.7%
	$e_{t+1} LF_t$		-4.6%
F 最終需要要因	$e_tL_t F$		73.9%
	$e_{t+1}L_{t+1} F$		70.3%
	$e_tL_{t+1} F$		73.3%
	$e_{t+1}L_t F$		71.2%

CO₂排出量の場合，最終需要要因の寄与が最も大きく，直接原単位要因の寄与はその半分程度，逆行列係数要因は減少への寄与は小さい，という解釈はどの分解式においても妥当となると判断できる．ただし，考慮する要因を多くとって一つ一つの要因の寄与が相対的に小さくなった場合，重み付けの違いによって結果が大きく異なる可能性はあると考えられる．

5.2 部門統合誤差の影響⁸

産業連関分析においては異なる部門数の産業連関表から得られた最終需要誘発の環境負荷量の結果は異なる．そこで異なる部門数の連関表から得られた要因分析の結果がどの程度異なるかを評価する．産業廃棄物排出量の変化要因分析について，59部門分類連関表を32部門に統合したものと32部門分類連関表から得られた結果とを比較した．結果を図 48 に示す．

⁸ 部門統合誤差については Appendix 3 を参照

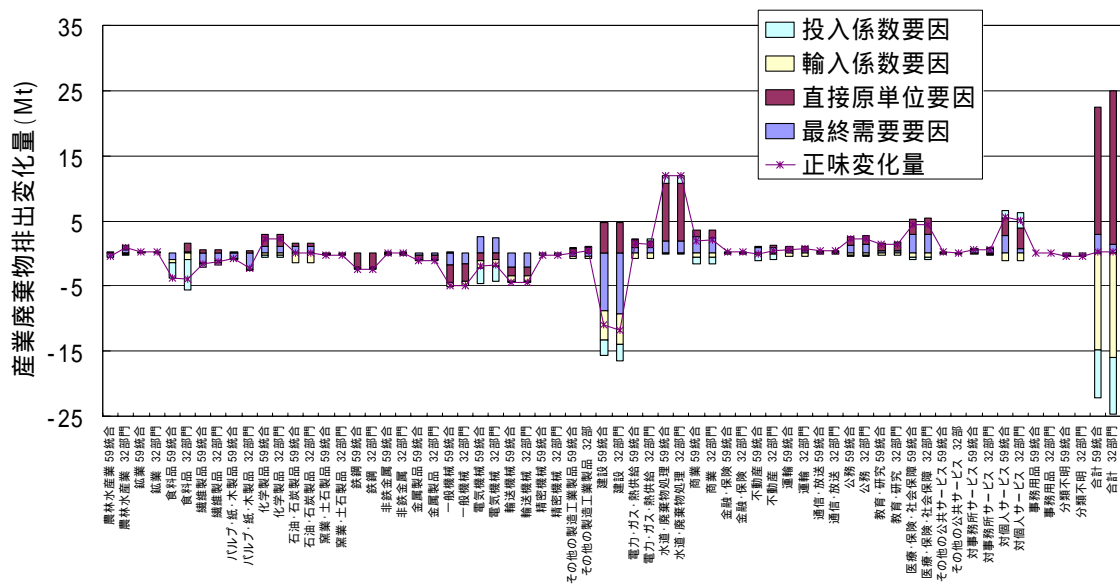


図 48 59 部門連関表と 32 部門連関表の要因分析結果の比較

2 つの要因分析の結果には大きな違いは見られない。1 時点での最終需要誘発排出量では大きな違いが見られていたが、要因分析には部門統合誤差の影響が小さいと判断できる。

Appendix 3 産業連関分析における部門統合誤差

1. はじめに

ライフサイクルアセスメント(LCA)は、製品・サービスの環境負荷を定量的に評価する手法であり、環境負荷の低減に有効な技術・対策を検討するための手段として広く用いられている。インベントリ分析はLCAを構成する大きな要素のひとつであり、調査対象について投入・産出(あるいは排出)される物質のフローを定量化するための方法である。

インベントリ分析では積み上げ法と産業連関分析法という二つ手法が用いられる。積み上げ法は一つのプロセスについて物質の投入・産出(あるいは排出)データを追跡し、これを積み上げることで対象とする製品・サービスを供給するシステム全体の負荷を算出する方法である。一方、産業連関分析法は、わが国の全産業間の相互取引を網羅的に記述した産業連関表を用いることで、積み上げ法では捕捉しきれない間接的な波及効果を算出できるという利点がある。しかし、産業連関表の産業部門分類が500部門程度で各産業部門のデータが平均化されたものであることから、特定のシステムの環境負荷を算定する場合に大きな誤差が生じる可能性が考えられる。実際のインベントリ分析では、データの収集状況に応じて積み上げ法と産業連関分析法の双方を利用している例が多い。最も一般的な方法が、積み上げ法で得たシステムに直接関連するプロセスの物質フローデータ(フォアグラウンドデータ)に、産業連関分析法で得られる環境負荷原単位(バックグラウンドデータ)を掛け合わせることで環境負荷を算定するというものである。産業連関分析法で得られる環境負荷原単位とは、ある部門で発生する直接的な環境負荷とそれに伴う波及効果による間接的な環境負荷をすべて含んだ原単位である。

産業連関表から得られる環境負荷原単位は、内包型環境負荷原単位、直接・間接環境負荷原単位、最終需要誘発環境負荷原単位などとよばれる。本稿では内包型環境負荷原単位とよぶことにする。本稿では、内包型環境負荷原単位について、特に産業連関表の部門統合に伴って影響される性質についてのべる。環境負荷としてはCO₂排出を扱う。

2. 内包型CO₂排出原単位

2.1 基本モデル

(1)は最終需要と総生産量の間接関係を表す式である。産業連関モデルにおける基本的な関係式である。(1)を変形することで(2)が得られる。(2)は、投入係数が不変とした場合に、任意の最終需要が与えられたときに直接間接の波及効果によって決定される生産量(均衡産出量)を決定する式である。

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{F} \quad (2)$$

次に、産業連関モデルと同様の形式でCO₂排出量バランスを表した式から内包型CO₂排出原単位を導出する。

ある1つの部門jについて、CO₂排出量のバランスを表したものが(3)である。

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot x_{ij} + e_j \cdot x_j = \varepsilon_j \cdot x_j \quad (3)$$

ただし

x_j : 製品 j の総生産量 = プロセス j の稼働量

x_{ij} : プロセス j に投入される製品 i の量 (ただし $x_{ij} = a_{ij} \cdot x_j$)

i : 製品 i の内包型 CO₂ 排出原単位

e_j : プロセス j から直接排出される CO₂ 排出原単位 (直接 CO₂ 排出原単位)

(3)の各項は

投入資材が負うの間接的 CO₂ 排出量 (投入資材の生産で発生する CO₂ 排出量)

+ プロセスでの直接 CO₂ 排出量 = 製品の直接・間接 CO₂ 排出量

を表している。これが(3)はプロセス j での CO₂ 排出量のバランスを表しているということの意味である。

(3)は全てのプロセスについて成り立つので、これを行列であらわすと(4)、(5)が得られる。

$$\varepsilon^T \mathbf{A} + \mathbf{e}^T = \varepsilon^T \quad (4)$$

$$\varepsilon^T = \mathbf{e}^T (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (5)$$

ただし

$$\varepsilon^T = (\varepsilon_1 \cdots \varepsilon_n)$$

$$\mathbf{e}^T = (e_1 \cdots e_n)$$

(右上の T は転置(行と列の入れ替え)を表す記号)

である。

(5)より、直接 CO₂ 排出原単位から内包型 CO₂ 排出原単位を求めることができる。

(2)と(5)でともに $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ という項が出てきているが、この行列はレオティエフ逆行列とよばれ、直接の最終需要あるいは CO₂ 排出原単位から間接的波及効果によって増加した総生産量あるいは内包型 CO₂ 排出原単位を導く乗数の役割を果たしている行列である。そのため(2)、(5)から得られる \mathbf{x} と \mathbf{F} 、と \mathbf{e} の間には次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} x_i &\geq f_i \\ \varepsilon_i &\geq e_i \end{aligned}$$

産業部門全体からの CO₂ 排出量 TotalE'は(6)で表される。

$$\text{TotalE}' = \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{X} = \varepsilon^T \cdot \mathbf{F} \quad (6)$$

一国の CO₂ 排出量 TotalE は、これに最終需要部門での直接排出量を加えて(7)で表される。

$$\begin{aligned} \text{TotalE} &= \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{X} + \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{F} \\ &= (\varepsilon^T + \mathbf{d}^T) \cdot \mathbf{F} \end{aligned} \quad (7)$$

ただし

\mathbf{d} : CO₂ 排出係数ベクトル

である。 $\mathbf{d}^T \mathbf{F}$ は化石燃料の消費等によって最終需要部門で直接発生する CO₂ 排出量を表している。

2.2 輸入を考慮したモデル

以上の基本モデルでは輸出入を明示的に考慮していないが、実際の連関表を用いると輸入が多い部門では最終需要が負の値をとる場合があり、部門別の CO₂ 排出量等を分析する場合の障害となる。そこで実際には輸入量を考慮したモデルを用いる。

産業連関モデルの基本式は(8)のようになる。

$$\mathbf{X} + \mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{Y} + \mathbf{E} \quad (8)$$

ただし

\mathbf{M} : 輸入ベクトル, \mathbf{Y} : 国内最終需要ベクトル, \mathbf{E} : 輸出ベクトル

である。

ここで輸入係数行列 \mathbf{C} を次のように定義する。輸入係数とは、輸入量 \mathbf{M} が中間投入需要 $\mathbf{A}\mathbf{X}$ および国内最終需要 \mathbf{Y} に比例すると仮定した場合の各部門の比例係数を対角成分に持つ行列である。

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & m_n \end{pmatrix} : \text{輸入係数行列} \left(m_i = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + Y_j} : \text{国内需要に占める輸入品の割合} \right)$$

\mathbf{C} と \mathbf{M} の間には次の関係が成り立つ。

$$\mathbf{M} = \mathbf{C}(\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{Y}) \quad (9)$$

これを(8)に代入し整理することで(10)が得られる。(10)は基本モデルでの(2)に相当し、輸入を明示的に考慮した場合の最終需要と総生産の関係を表す式となる。

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \mathbf{C})\mathbf{A}\}^{-1} \{(\mathbf{I} - \mathbf{C})\mathbf{Y} + \mathbf{E}\} \quad (10)$$

内包型 CO₂ 排出原単位 は(11)で表される。

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \mathbf{e}^T \{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \mathbf{C})\mathbf{A}\}^{-1} \quad (11)$$

一国の CO₂ 排出量 TotalE は(12)で表される。

$$\begin{aligned} \text{TotalE} &= \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{X} + \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{Y} \\ &= \boldsymbol{\varepsilon}^T \{(\mathbf{I} - \mathbf{C})\mathbf{Y} + \mathbf{E}\} + \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{Y} \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 1995 年度の各部門での最終需要誘発 CO₂ 排出量

1995 年度の CO₂ 排出量を以上の方法で各部門別に求めた。各部門の直接 CO₂ 排出量と最終需要誘発

CO₂ 排出量の結果を図 1 に示す。ただし、産業部門 i の最終需要誘発 CO₂ 排出量 $TotalE_i$ は

$$TotalE_i = \varepsilon_i \{ (1 - m_i) Y_i + E_i \} \quad (13)$$

国内最終需要部門で直接排出される CO₂ 排出量 $TotalE_Y$ は

$$TotalE_Y = \sum_{i=1}^n d_i Y_i \quad (14)$$

から求められた数値である^[1]。最終需要誘発 CO₂ 排出量 $TotalE_i$ とは、内包型 CO₂ 排出原単位に国内最終需要^[2]をかけたものであり、基本モデルにおける ε_i に相当する。

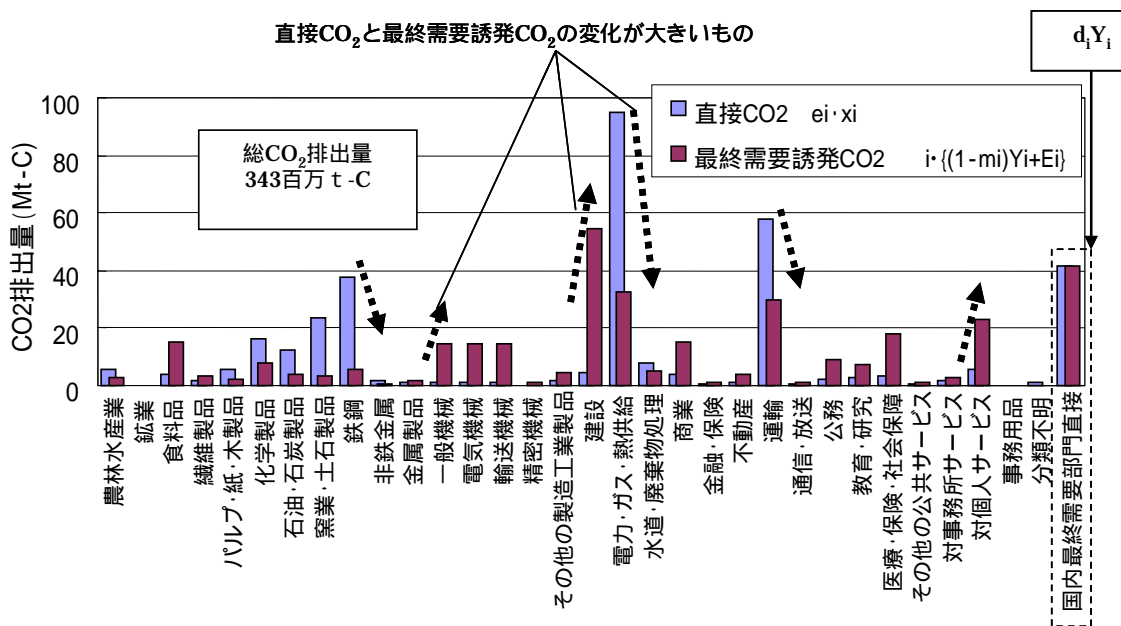


図 49 1995 年度の直接 CO₂ 排出量と最終需要誘発 CO₂ 排出量

2.4 最終需要誘発 CO₂ 排出量

図 49 を見ると、部門ごとに直接 CO₂ 排出量と最終需要誘発 CO₂ 排出量の大小関係は異なる。直接 CO₂ 排出量の方が大きい部門は、化学製品、石油・石炭製品、窯業・土石製品、鉄鋼、電力・ガス・熱供給、運輸などとなっている。直接 CO₂ 排出量に比べ最終需要誘発 CO₂ 排出量が非常に大きくなっている部門としては、各種機械および建設が目立つ。

このような違いが起きる理由は、最終需要誘発 CO₂ 排出量がどのようなものか考えることで以下のように説明できる。

の定義は(15)のとおりである。

$$\varepsilon_j \cdot x_j = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot x_{ij} + e_j x_j \quad (15)$$

(15)は、第j部門の生産によって発生するとみなされる環境負荷(左辺)が第j部門に投入される製品に由来する負荷と第j部門で直接発生する負荷の和に等しい、ということを表している。

また ε_i を i 部門の生産の需給均衡式(総生産 = 中間投入需要 + 最終需要)の両辺にかけると(16)が得られる。

$$\varepsilon_i \cdot x_i = \sum_{j=1}^n \varepsilon_i \cdot x_{ij} + \varepsilon_i \cdot f_i \quad (16)$$

以上の2式から最終需要によって誘発される産業部門i部門の環境負荷について、次の式が得られる。

$$\varepsilon_i \cdot f_i = \sum_{k=1}^n \varepsilon_k \cdot x_{ki} + e_i \cdot x_i - \varepsilon_i \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (17)$$

この式から、最終需要によって誘発される産業部門i部門の環境負荷は、第i部門の生産によって発生する環境負荷(右辺第1項と第2項)から、他の部門に投入される分を控除したもの(右辺第3項)に等しいということがわかる。

3. 部門数の異なる連関表から得られる最終需要誘発 CO₂ 排出量の結果の相違

部門数m個の連関表とn個の連関表について考える。ただし $m < n$ とする。m連関表の第k部門はn連関表では第 k_1 - k_l 部門に対応するものとする。

3.1 内包型 CO₂ 排出原単位と最終需要誘発 CO₂ 排出総量

それぞれの連関表からは、m個もしくはn個の内包型 CO₂ 排出原単位が得られる。

$$(\varepsilon_1^{(m)} \dots \varepsilon_i^{(m)} \dots \varepsilon_m^{(m)}) = (e_1^{(m)} \dots e_i^{(m)} \dots e_m^{(m)}) \begin{pmatrix} 1 - a_{11}^{(m)} & \dots & -a_{1m}^{(m)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{m1}^{(m)} & \dots & 1 - a_{mm}^{(m)} \end{pmatrix}^{-1} \quad (18)$$

$$(\varepsilon_1^{(n)} \dots \varepsilon_i^{(n)} \dots \varepsilon_n^{(n)}) = (e_1^{(n)} \dots e_i^{(n)} \dots e_n^{(n)}) \begin{pmatrix} 1 - a_{11}^{(n)} & \dots & -a_{1n}^{(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n1}^{(n)} & \dots & 1 - a_{nn}^{(n)} \end{pmatrix}^{-1} \quad (19)$$

第k部門および第 k_1 - k_l 部門についての内包環境負荷原単位に着目する。

第k部門の製品の環境負荷原単位について、m連関表からは ε_k という値が1つだけ得られているのに対し、n連関表からは ε_{k_1} - ε_{k_l} という1個の値が得られる。これは、n連関表では1個の値が存在するk部門の環境負荷原単位が、部門数が少ないm連関表では平均化された ε_k という1個の値しか得られないということである。

m連関表の ε_k およびk部門の最終需要誘発 CO₂ 排出量とそれより部門数の多いn連関表の ε_{k_1} - ε_{k_l}

と k1-kl 部門 (=すなわち k 部門) の最終需要誘発 CO₂ 排出量の間関係は(20)で表される .

$$\varepsilon_k^{(m)} \cdot f_k^{(m)} \neq \sum_{i=1}^l \varepsilon_{ki}^{(n)} \cdot f_{ki}^{(n)} \quad (20)$$

この式が意味するのは ,最終需要によって誘発される環境負荷のある部門での総和 ($\varepsilon_k^{(m)} \cdot f_k^{(m)}$) は ,用いる連関表によって値が異なるということである .

そこで実際の連関表ではどれくらい値が異なっているのか ,95 年連関表を用いて ,32 部門 ,93 部門 , 186 部門 , 399 部門の 4 種類の連関表から得られる原単位を比較することを試みた .

3.2 比較方法

内包型 CO₂ 排出原単位は国立環境研究所^[1]から公表されている値を用いる .

各部門ごとの最終需要は , 95 年度産業連関表 (基本分類・行数 519 部門) ^[2]から適宜部門ごとに集計して求める .

この 2 種類のデータから

$$\begin{aligned} &\varepsilon_i^{(399)} \cdot f_i^{(399)} (i=1 \sim 399) \\ &\varepsilon_i^{(186)} \cdot f_i^{(186)} (i=1 \sim 186) \\ &\varepsilon_i^{(93)} \cdot f_i^{(93)} (i=1 \sim 93) \\ &\varepsilon_i^{(32)} \cdot f_i^{(32)} (i=1 \sim 32) \end{aligned} \quad (21)$$

という連関表ごとに ,各部門の最終需要誘発 CO₂ 排出総量が得られる .

次に , 399 部門の CO₂ 排出総量データを 186 部門・93 部門・32 部門に集計する .これと各連関表から直接得られた CO₂ 排出総量データを比較する .このように ,ある部門数の連関表から得られた結果と ,それより大きな連関表から得られた結果を集約したものとを比較できる組み合わせは ,今回の場合 6 通りある (399 の他 , 186vs93 , 186vs32 , 93vs32) .

それぞれの 2 つの連関表の組み合わせについて ,各部門の最終需要誘発 CO₂ 排出総量の比 r を求めた .

$$r_k^{(n/m)} = \frac{\sum_{i=1}^l \varepsilon_{ki}^{(n)} \cdot f_{ki}^{(n)}}{\varepsilon_k^{(m)} \cdot f_k^{(m)}} \quad (22)$$

この r は ,例えば以下の図 50 に示すような値である .

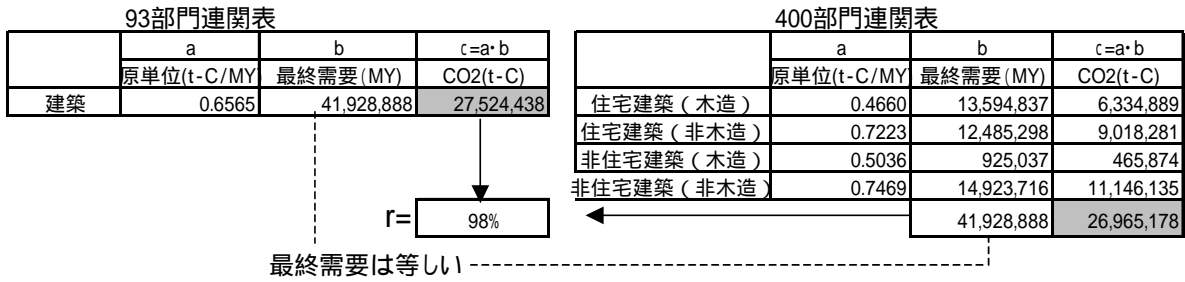


図 50 建築部門の最終需要誘発 CO₂ 排出量の比

3.3 比較結果

図 3 は 399 部門の直接間接 CO₂ 排出総量を 186 部門に統合した値と 186 部門連関表から求めた値の比を示したものである。比率の大きさを順序付けしてある。同様に 93 部門, 32 部門で比較した結果を図 4, 図 5 に示す。

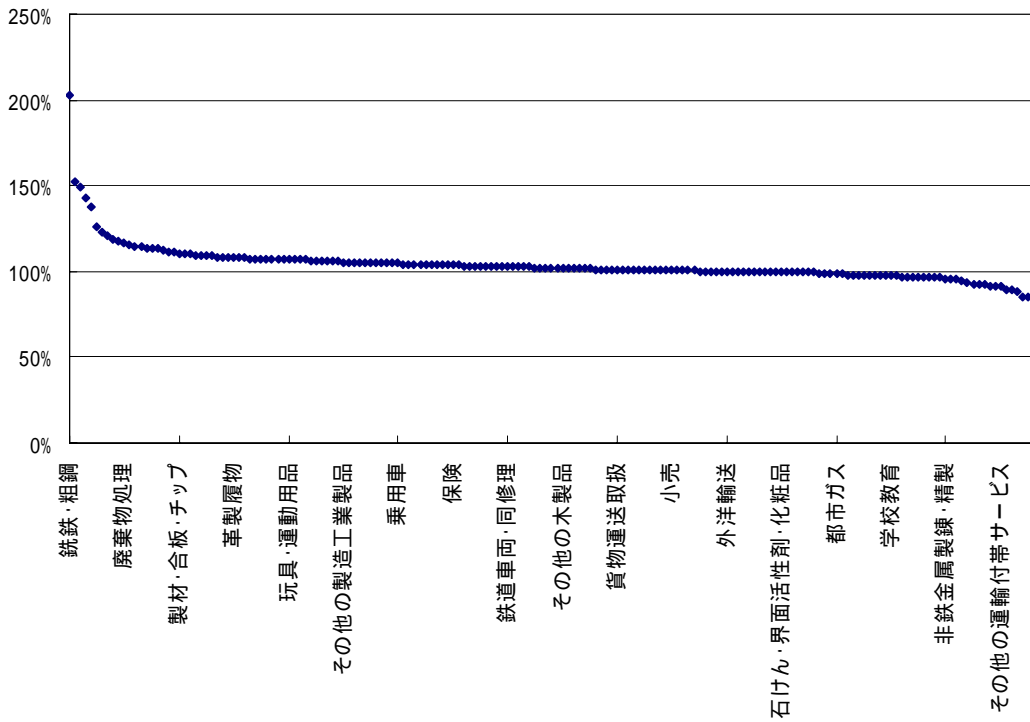


図 51 400 部門, 186 部門の最終需要誘発 CO₂ 排出量比

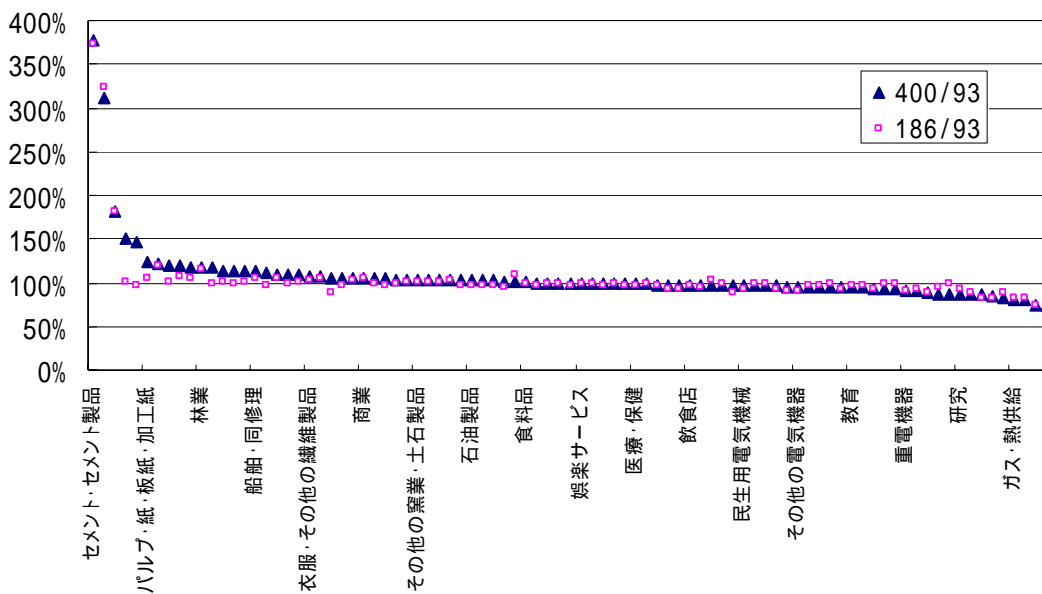


図 95 400 部門，186 部門，93 部門の最終需要誘発 CO₂ 排出量比

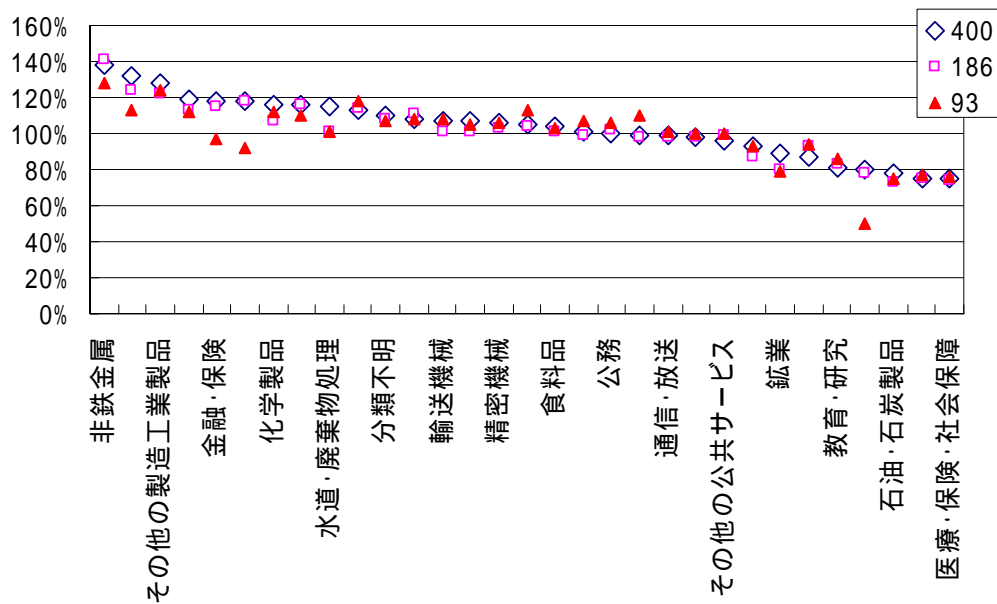


図 96 400 部門，186 部門，93 部門，32 部門の最終需要誘発 CO₂ 排出量比

図 51~図 14 で示した結果のうち， $r=1$ からのずれが大きかったいくつかの部門を表 25 に示す。

表 25 rの値が1から大きくずれた部門とrの値

部門名	400/186	部門名	400/93	186/93	部門名	400/32	186/32	93/32
銑鉄・粗鋼	203%	セメント・セメント製品	378%	373%	非鉄金属	138%	141%	128%
石炭製品	152%	非鉄金属製錬・精製	311%	324%	鉄鋼	132%	124%	113%
石炭	149%	水運	182%	182%	その他の製造工業製品	128%	122%	124%
パルプ	142%	石炭	150%	101%	電力・ガス・熱供給	87%	93%	94%
ソーダ工業専	137%	石炭製品	147%	96%	教育・研究	81%	83%	86%
穀類	85%	パルプ・紙・板紙・加工紙	124%	104%	窯業・土石製品	80%	78%	50%
いも・豆類	85%	製材・木製品	84%	83%	石油・石炭製品	78%	73%	75%
化学肥料	75%	運輸付帯サービス	83%	88%	不動産	75%	75%	77%
		ガス・熱供給	81%	82%	医療・保険・社会保障	75%	74%	76%
		非鉄金属加工製品	81%	82%				
		広告・調査・情報サービス	74%	74%				
		化学肥料	74%	98%				

セメント・セメント製品（窯業・土石製品）のずれが大きいのは、93部門での原単位（5.6 t-C/MY）と399, 186部門の原単位（セメント 30t-C/MY, 生コン 6.5t-C/MY）とのずれが大きいためである。また93部門は32部門とさらに集約した部門の結果と比較しても小さい値となっている（49%）。

そこでセメント関連部門についてさらに詳しく部門ごとの数値を比較した。結果を表26に示す。

表 26 セメント関連部門の最終需要誘発CO₂排出量の比較

186部門と93部門の比較								内包型原単位		最終需要誘発CO ₂	
186部門	内生部門計	国内最終需要計	輸出	最終需要計	(控除)輸入計	最終需要部門計	国内生産額				
	AX	Y	E	Y+E	M	F=Y+E-M	X		f		i
セメント	664,387	1,159	39,085	40,244	-3,731	36,513	700,900	29.6	1,191,500		
生コンクリート	2,071,707		737	737		737	2,072,444	6.3	4,674		
セメント製品	2,008,490	17,684	1,122	18,806	-6,155	12,651	2,021,141	2.8	52,816		
								計	1,248,990		
93部門	セメント・セメント製品	4,744,584	18,843	40,944	59,787	-9,886	49,901	4,794,485	5.5	330,600	

セメントは、最終需要にまわる量が多い。セメント：大、F大なため、186部門ではセメント関連3部門の最終需要誘発CO₂のほとんどを占める。

93部門では内包型原単位が小さい値となっている。これは、直接CO₂排出原単位eが、内生部門への投入が多い生コンやセメント製品の生産額で割られているため。

93部門と32部門の比較								内包型原単位		最終需要誘発CO ₂	
93部門	内生部門計	国内最終需要計	輸出	最終需要計	(控除)輸入計	最終需要部門計	国内生産額				
	AX	Y	E	Y+E	M	F=Y+E-M	X		f		i
ガラス・ガラス製品	1,599,838	55,584	191,822	247,406	-101,759	145,647	1,745,485	1.4	352,282		
セメント・セメント製品	4,744,584	18,843	40,944	59,787	-9,886	49,901	4,794,485	5.5	330,600		
陶磁器	787,199	156,039	121,821	277,860	-51,185	226,675	1,013,874	1.0	276,754		
その他の窯業・土石製品	1,915,457	234,092	147,244	381,336	-154,543	226,793	2,142,250	1.5	558,675		
									1,518,311		
32部門	窯業・土石製品	9,047,078	464,558	501,831	966,389	-317,373	649,016	9,696,094	3.3	3,117,840	

定性的には、FとXの比の違いが効いている。ひとつの部門に中間投入型製品と最終需要型製品があって、それらの直接原単位が大きく異なる場合にずれが生じる。

表 26 が示すように

- (a) 1つの部門の中で中間投入にまわる量と最終需要にまわる量が異なる
- (b) 直接CO₂排出係数が異なる

この2つの原因によって部門間での最終需要CO₂排出量が大きく異なることがわかった。

3.4 図解

部門iについての最終需要によって誘発されるCO₂排出量 $\varepsilon_i \cdot f_i$ は、横軸に最終需要 f, 縦軸に内包

型 CO₂ 排出原単位 をとることで、図 6-1 のように描くことができる。部門 i をさらに細分化することで、より詳細な部門についての最終需要誘発 CO₂ 排出量がそれぞれ得られる（図 6-2）。しかし、このような分析で得られた部門 i に属する各細分類部門の CO₂ 排出量の和は、粗分類で得られていた部門 i の CO₂ 排出量に一致するとは限らないことがわかっている。各部門については、用いる産業連関表の部門数によって最終需要誘発 CO₂ 排出量は異なるが、部門全体の総和は一定値で保たれる（図 6-3）。すなわち、用いる産業連関表によって、総 CO₂ 排出量の各部門への配分が変わってくるということである。

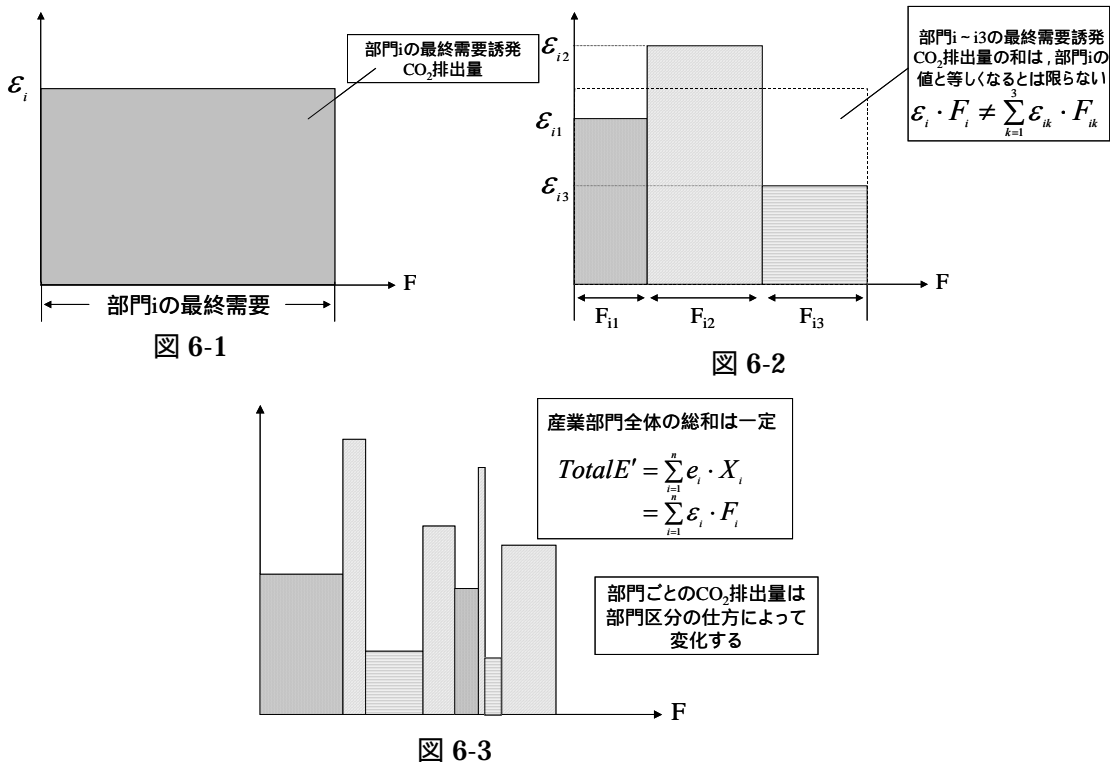


図 54 部門分類の違いによる最終需要誘発 CO₂ 排出量の変化

3.5 内包型 CO₂ 排出原単位の含意

内包型 CO₂ 排出原単位がどういう意味を持つものであるか考える。

産業部門を 1 部門とした場合、内包型 CO₂ 排出原単位は次のようにして得られる。

$$\epsilon = \frac{e \cdot x}{f} \quad (23)$$

これは産業部門からの直接 CO₂ 排出量を GDP で割った値である。
2 部門モデルでは以下のように表される。

$$\varepsilon_1 = \frac{e_1 \cdot x_1 + \frac{x_{21}}{f_2 + x_{21}} e_2 \cdot x_2}{f_1 + \frac{x_{12}}{f_2 + x_{21}} f_2} \quad (24)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\frac{x_{12}}{f_1 + x_{12}} e_1 \cdot x_1 + e_2 \cdot x_2}{\frac{x_{21}}{f_1 + x_{12}} f_1 + f_2} \quad (25)$$

この段階ですでに $\frac{1}{f_i + x_{ij}} = \frac{1}{x_i - x_{ii}}$ という項が出てくる。この項は 1 部門モデルで見たような乗数の一種と解釈できる。

基本的に、環境負荷原単位の分子にはその部門に起因して発生する環境負荷が、分母にはその部門からの製品のうち最終需要にまわる生産額がくる。

例えば 1 の分子の項については

$$\frac{x_{21}}{f_2 + x_{21}} e_2 \cdot x_2 = \frac{x_{21}}{x_2 - x_{22}} e_2 \cdot x_2 = \frac{x_2}{x_2 - x_{22}} e_2 \cdot x_{21} = \frac{e_2}{1 - a_{22}} x_{21} \quad (26)$$

と式変形できる。これは、第 2 部門を単独で見たときの第 2 部門の環境負荷原単位と第 2 部門から第 1 部門への中間投入量の積である。よって、これが第 2 部門の製品を使用することに起因する環境負荷に対応する。

1 の分母の項については、第 1 部門で生産された製品のうち、最終需要にまわった分をあらわしている。とくに

$$\frac{x_{12}}{f_2 + x_{21}} f_2 = \frac{f_2}{f_2 + x_{21}} x_{12} \quad (27)$$

の部分は、第 2 部門からの正味の生産（自部門中間投入を控除したもの）のうち最終需要にまわる比率に第 1 部門から第 2 部門への中間投入量をかけて、結果として第 2 部門への中間投入のうち最終需要にまわる量となっている。

4. 産業連関分析における部門統合誤差

4.1 生産額の誤差

部門数の異なる産業連関表において、最終需要によって誘発される生産額が異なるという問題は aggregation bias（部門統合誤差）として古くから知られている^{[3][4]}。

統合前と統合後の産業連関モデルの関係は、統合行列 S を用いて次のように表される。

$$\begin{aligned} X &= AX + F \\ X^* &= A^* X^* + F^* \end{aligned} \tag{28}$$

ただし X : 部門数 n の生産額ベクトル, X^* : 部門数 m の生産額ベクトル ($n > m$)

$$X^* = SX \tag{29}$$

ただし

$$S = \begin{pmatrix} 1 \cdots 1 & & & 0 \\ & 1 \cdots 1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & 1 \cdots 1 \end{pmatrix} \text{ なる } m \times n \text{ 行列}$$

任意の最終需要 F に対応する誘発生産額 X は

$$\begin{aligned} X &= (I - A)^{-1} F \\ X^* &= (I^* - A^*)^{-1} F^* \end{aligned} \tag{30}$$

で表される。この 2 つの誘発生産額の差を T とおくと

$$\begin{aligned} T &= X^* - SX \\ &= (I - A^*)^{-1} F^* - S(I - A)^{-1} F \\ &= (I - A^*)^{-1} SF - S(I - A)^{-1} F \\ &= [(I - A^*)^{-1} S - S(I - A)^{-1}] F \end{aligned} \tag{31}$$

さらに [] の中を $(I - A)^{-1} = (I + A + A^2 + \dots)$ で展開すると

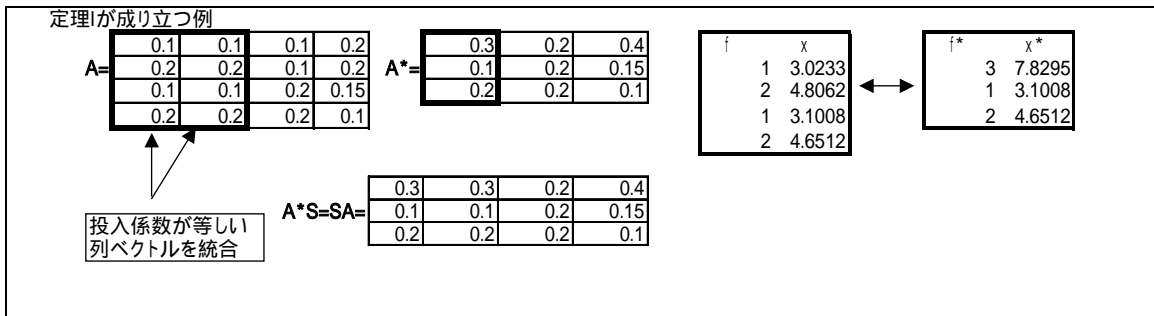
$$\begin{aligned} T &= [(I + A^* + A^{*2} + \dots)S - S(I + A + A^2 + \dots)]F \\ &= [(A^*S - SA) + (A^{*2}S - SA^2) + \dots]F \end{aligned} \tag{32}$$

T は総部門統合誤差と呼ばれる。 T について 2 つの定理が得られる。

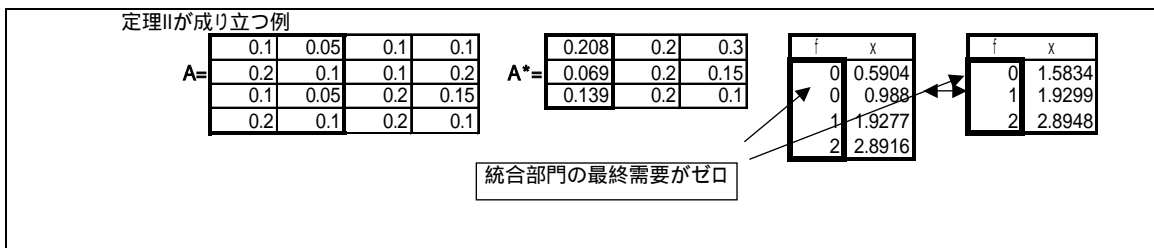
定理 I - 任意の最終需要について $T = 0$ が成り立つ条件は $A^*S = SA$

定理 II - 統合された産業連関表において、統合されていない部門についてのみ最終需要が非ゼロで、統合された部門の最終需要にはゼロが与えられるとき、 T の 1 次の項についてはゼロが成り立つ (2 次以降の項は非ゼロ)。よってこの場合誤差は非常に小さなものとなる。

簡単な数値例をもとに定理 I, II を説明する。



定理 I が成り立つのは投入係数が等しい列ベクトルを統合する場合である。これは、同じプロセスから 2 つの製品が産出されていることが表現されているモデル (A) を 1 つの製品にまとめたモデル (A*) にすることに対応する。



定理 II は重要で、注目する部門以外を統合する場合、統合部門の最終需要に値を与えない限りにおいて、得られる結果のずれは小さいものとなることを意味している。

4.2 価格・内包型環境負荷の誤差

すでに示したように、もとの産業連関表を部門統合することで、得られる投入係数行列および逆行列の成分は変化する。このことは誘発生産額のみならず内包型環境負荷、さらには均衡価格モデルにおける価格分析においてもあてはまる。しかし、このような観点で部門統合誤差について論じた研究は見当たらない。

以下に内包型環境負荷の誤差を表す式を導出する。

統合前と統合後の内包型環境負荷原単位の関係は次のように表される。(5)より

$$\varepsilon^T = e^T (I - A)^{-1} \quad (33)$$

$$\varepsilon^{*T} = e^{*T} (I - A^*)^{-1} \quad (34)$$

ここで、行列 W , Z を以下のように定義する。

$$W = \hat{X} S^T \hat{X}^{*-1} \quad (35)$$

$$Z = \hat{F} S^T \hat{F}^{*-1} \quad (36)$$

ただし \hat{X}, \hat{F} は対角成分に x_i, f_i が並ぶ対角行列である。 W, Z は統合前の各部門の生産および最終需要について、統合後の部門に占める割合を表す行列である。

W, Z について次の関係が得られる .

$$SW = SZ = I \quad (37)$$

$$A^* = SAW \quad (38)$$

$$e^{*T} = e^T W \quad (39)$$

環境負荷原単位の誤差 T は次のように表される .

$$\begin{aligned} T &= \varepsilon^{*T} - \varepsilon^T Z \\ &= e^{*T} (I - A^*)^{-1} - e^T (I - A)^{-1} Z \\ &= e^T [W(I - A^*)^{-1} - (I - A)^{-1} Z] \end{aligned} \quad (40)$$

さらに[]の中を $(I - A)^{-1} = (I + A + A^2 + \dots)$ で展開すると

$$\begin{aligned} T &= e^T [W(I + A^* + A^{*2} + \dots) - (I + A + A^2 + \dots)Z] \\ &= e^T [(W - Z) + (WA^* - AZ) + \dots] \end{aligned} \quad (41)$$

(41)の[]内を整理することで以下の定理 I を得る .

定理 I - 任意の直接負荷原単位について $T = 0$ が成り立つ条件は $W=Z$ かつ $WS=I$

均衡価格モデルから得られる均衡価格の誤差についてもおなじ条件が成り立つ . (42)の均衡価格モデルからわかるように , 直接負荷原単位ベクトル e を付加価値率ベクトル v とすることで , 内包型環境負荷ベクトルの代わりに均衡価格ベクトル p が得られる , すなわち式の形が同形であることから明らかである .

$$p^T = v^T (I - A)^{-1} \quad (42)$$

内包型環境負荷・均衡価格の誤差に関する定理 I が具体的にどのような意味を持つものであるかはさらに考察することが必要である .

5. まとめ

以上 , 産業連関分析における部門統合誤差が内包型 CO_2 排出原単位および最終需要誘発 CO_2 排出量に及ぼす影響を調べた . 産業連関分析法をインベントリ分析に用いる場合に注意すべき事柄について考察した内容を以下に記す .

(1) 産業連関表を利用した分析での誤差

産業連関表を利用した分析 (均衡価格分析 , 拡張産業連関分析 , 多地域間産業連関分析) では , デー

タの制約等から産業連関表をカスタマイズして分析に利用するのが一般的であるが、そのように連関表のサイズを変更することが得られる結果に大きく影響する可能性がある。どのような部門分類の連関表を利用するかは分析目的によるが、採用したモデルがある偏りを持った結果を出す可能性に留意する必要があると考えられる。一つの対応としては、もとの連関表から得られる結果と比較をすることで偏りの傾向を把握することが考えられる。

(2) 内包型環境負荷原単位の誤差

利用可能な最大の産業連関表は 500 部門分類程度のものであるが、この連関表自体さらに詳細な部門分類（さらにはひとつひとつのプロセス、ひとつひとつの財）を統合して得られたものである。すなわち利用可能なおもとの連関表自体に部門統合誤差が存在しているということである。

(3) インベントリ分析での利用の仕方

内包型環境負荷原単位の誤差があるといっても、インベントリ分析をすべて積み上げ法で行うことにもすべての関連するプロセスを追跡できないという問題がある。積み上げ法におけるプロセス抜け落ちの問題（truncation error^[5]）の大きさは製品によって異なるが、間接的波及効果が大きい製品のインベントリ分析において、内包型環境負荷原単位を利用することで間接効果を評価できることの価値は大きい。

ひとつの対応策として、内包型環境負荷原単位を利用する前に、対象とするプロセスの直接負荷原単位 e がわかっていれば、 e と e' の比較をするということは望ましいと考えられる。 $e' > e$ を満たしているかどうかは e'/e が適切かどうかの指標になる。また、産業連関表での e と e' の比（ e'/e : 乗数のようなもの）を間接効果の情報として利用することもできると考えられる。

[引用文献]

- [1] 南斎規介，森口祐一，東野達：産業連関表による環境負荷原単位データブック，国立環境研究所地球環境研究センター，2002。
- [2] 総務庁：平成 7 年産業連関表，1999。
- [3] Miller, R.E. , Blair, P.D. : Input-Output Analysis -Foundations and Extensions- , Prentice-Hall , New Jersey , 1985 .
- [4] Morimoto, Y. : On Aggregation Problems in Input Output Analysis , Review of Economic Studies , pp.119-126 , Vol.37 , No.109 , 1970 .
- [5] Lenzen, M. : Errors in conventional and input output based life cycle inventories , Journal of Industrial Ecology , pp.127-148 , 4(4) , 2000 .

Appendix 4 廃棄物輸送・セメント生産モデルの感度解析

1. はじめに

本論文の第5章で用いた廃棄物輸送・セメント生産モデルについて感度解析をおこなう。2節では5.5シミュレーション(2)で得た地域別の廃棄物のリサイクル量について、輸送コスト関数を変化させた場合の結果への影響の程度を調べる。3節では5.6シミュレーション(3)から得られる限界削減費用について感度解析をおこなう。シナリオ1、シナリオ3の限界削減費用を取り上げる。輸送コストおよび廃棄物のその他処分コストの設定を変化させた場合の限界削減費用の値に及ぼす影響を調べる。4節ではその他処分コストをさらに大きく変化させた場合の限界削減費用に及ぼす影響を調べる。

2. 地域別の廃棄物のリサイクル量

輸送コストの設定

初期設定(ケース0): 表27に示す。

表27 輸送コスト関数(初期設定)

道路輸送	cRoadInt(円/t)	cRoad(円/t km)
roadCost =cRoadInt+cRoad × d(km)	1,500	18.50
鉄道輸送	cRailInt(円/t)	cRail(円/t km)
railCost =cRailInt+cRail × d(km)	951	4.34
内航輸送	cSeaInt(円/t)	cSea(円/t mile)
seaCost =cSeaInt+cSea × d(mile)	1,300	4.26

輸送コストについて3つのケースを設定し、以下に示すように切片と比例定数の値を新たに設定する。

ケース1: 道路輸送コストのみケース0の2倍(cRoadInt=3000, cRoad=37.0)

ケース2: 鉄道輸送コストのみケース0の2倍(cRailInt=1902, cRail=8.68)

ケース3: 内航輸送コストのみケース0の2倍(cSeaInt=2600, cSea=8.52)

シミュレーションの設定は5.5シミュレーション(2)の設定と同一とする。すなわち、高炉スラグおよび石炭飛灰のセメント原料化リサイクル量合計値について以下の制約を課す。

$$\sum_h y(\text{"Slag"}, h) = \text{SumxSlag}_0 \quad (1)$$

$$\sum_h y(\text{"Flyash"}, h) = \text{SumxFlyash}_0 \quad (2)$$

ここで $SumxSlag_0 = 12162000$, $SumxFlyash_0 = 4890000$ である .

廃棄物のセメント原料化リサイクル量に制約条件を課したため , リサイクル量に影響を与える廃棄物処分コスト(その他処分コスト)の設定は不必要となる . よって , 廃棄物処分コストの値 $cB(waste) = 0$ とする . 目的関数はコスト最小化とする .

$$\text{minimize} \quad totalCost = cementCost + roadCost + railCost + seaCost \quad (3)$$

以上の条件のもとで , ケース 0~3 についてシミュレーションをおこない、地域別のセメント原料化リサイクル量を比較する .

結果

結果を図 55 , 図 56 に示す .

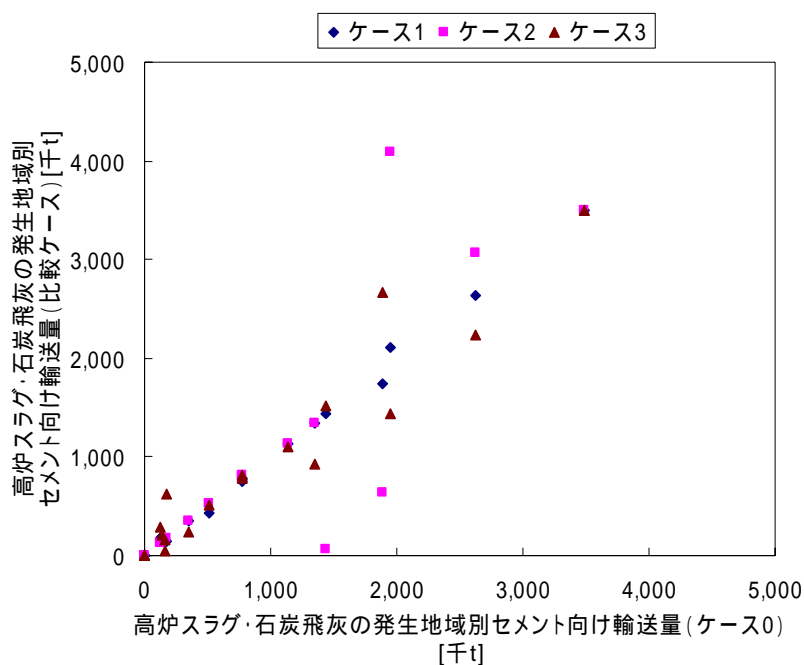


図 55 高炉スラグ・石炭飛灰の発生地域別セメント原料化リサイクル量の輸送コストについての感度解析 (基準ケースと輸送コストを変化させた 3 つのケースとの比較)

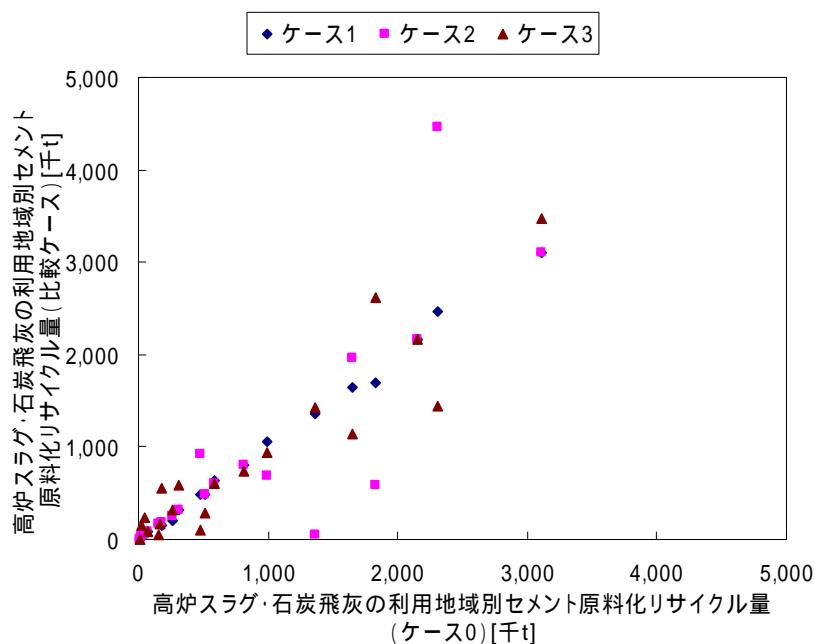


図 56 高炉スラグ・石炭飛灰の利用地域別セメント原料化リサイクル量の輸送コストについての感度解析（基準ケースと輸送コストを変化させた3つのケースとの比較）

どのケースにおいても半分以上の点は45度線にのっている。つまりケース0と同様の値をとっているということである。各ケースにおいて数箇所の点が大きくばらついている。これらの点に対応する地域で輸送コストの変化によりリサイクル量が大きく変化したということである。輸送コストの変化に対しては多くの地域が影響を受けるのではなく、限界的なコストの変化の影響を受ける数箇所の地域が大きく影響を受ける。

なお、論文中には示していないが、個々のセメント工場について同様の感度解析をおこないプロットを取ると、地域別の結果よりもばらつきが大きい。しかし概ね地域内で相殺するばらつきであるため、図55、図56のように多くの地域はケース0と同様の値をとる。

3. 限界削減費用1（輸送コスト）

輸送コストの設定

初期設定（ケース0）：表27を参照せよ。

- 輸送コストについて4つのケースを設定し、以下に示すように切片と比例定数の値を新たに設定する。
- ケース1：100kmでの輸送コストが1.5倍程度に増加し、1000kmでの輸送コストが同等となる。
- ケース2：300kmでの輸送コストが1.5倍程度に増加し、1000kmでの輸送コストが同等となる。
- ケース3：1000kmでの輸送コストが1.5倍程度に増加する。300kmでの輸送コストが同等となる。
- ケース3：1000kmでの輸送コストが0.75倍程度に減少する。300kmでの輸送コストが同等となる。

以上のケースで設定した輸送コストを輸送方法別に図 57 に示す。

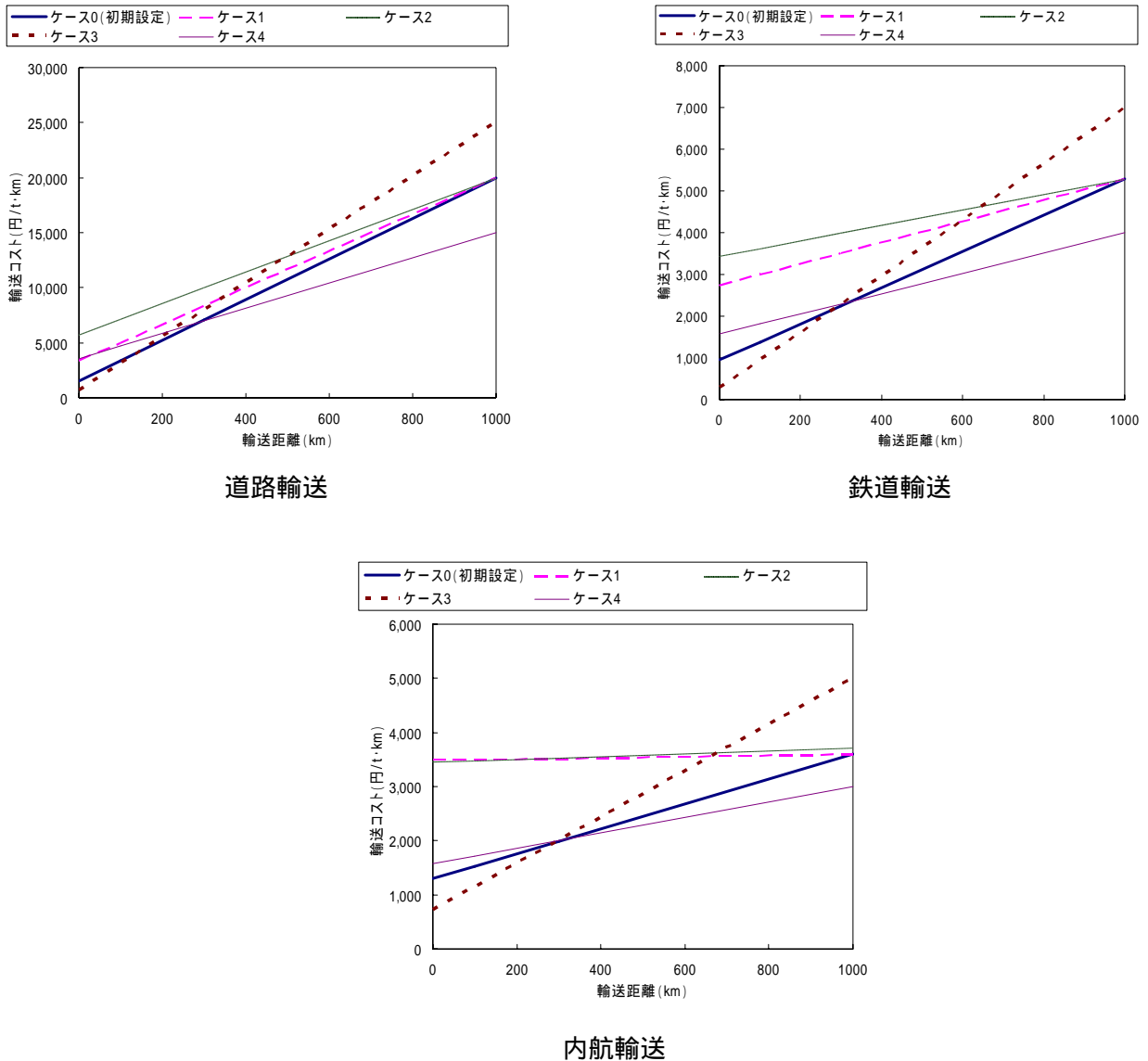


図 57 輸送コストの設定

廃棄物処分コスト

初期設定 (ケース 0):

高炉スラグのその他処分コスト	959 円/t
フライアッシュのその他処分コスト	2420 円/t

ケース 1:

高炉スラグのその他処分コスト	2000 円/t
フライアッシュのその他処分コスト	4000 円/t

限界削減費用の計算

上記のようにコストの設定を初期設定から変更し，5.6シミュレーション(3)で決定したシナリオ1(CO₂削減志向シナリオ)，シナリオ3(最終処分削減シナリオ)のCO₂排出量，最終処分量を制約に加える．

$$TotalCO_2 \leq TotalCO_2_{scenario} \quad (4)$$

$$totalDisposal \leq totalDisposal_{scenario} \quad (5)$$

ただし， $TotalCO_2_{scenario}$ ， $totalDisposal_{scenario}$ は初期設定のもとでのシミュレーションにより得られたCO₂排出量の値，廃棄物最終処分量の値である．

コストの設定を変更したそれぞれのケースについて限界削減費用を求めた．新たに設定したケースはケース(a, b)のように表記し，aがその他処分コストのケース(0または1)，bが輸送コストの設定(0~4)を表す．初期設定(ケース(0, 0))とケース(0, 1)~ケース(1, 4)の結果を比較する．

シナリオ1の結果を図58に示す．シナリオ3の結果を図59に示す．

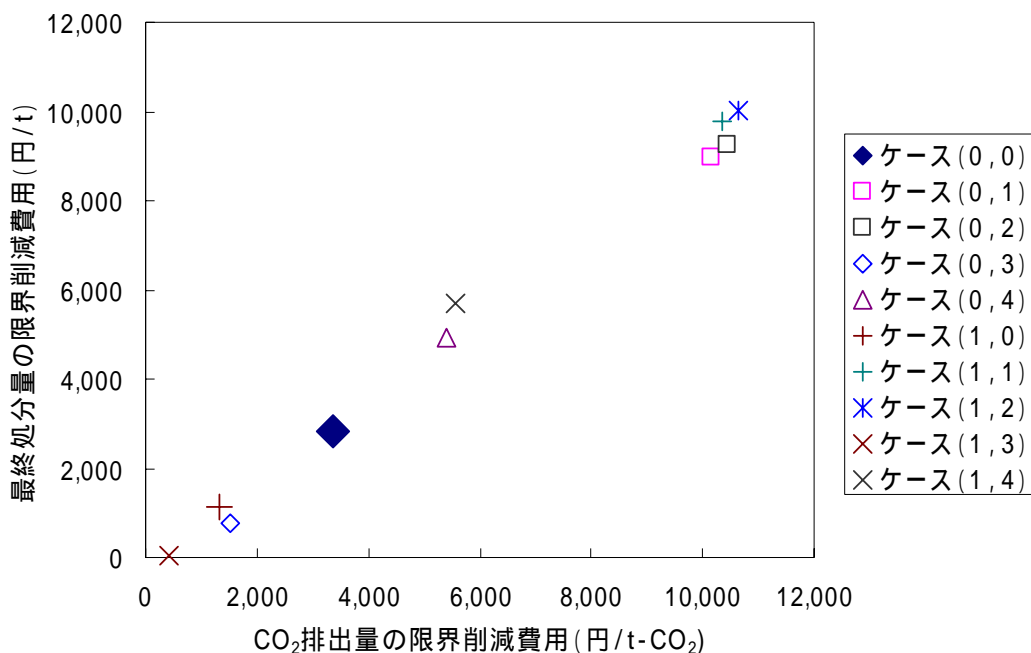


図 58 シナリオ1の限界削減費用の感度解析結果

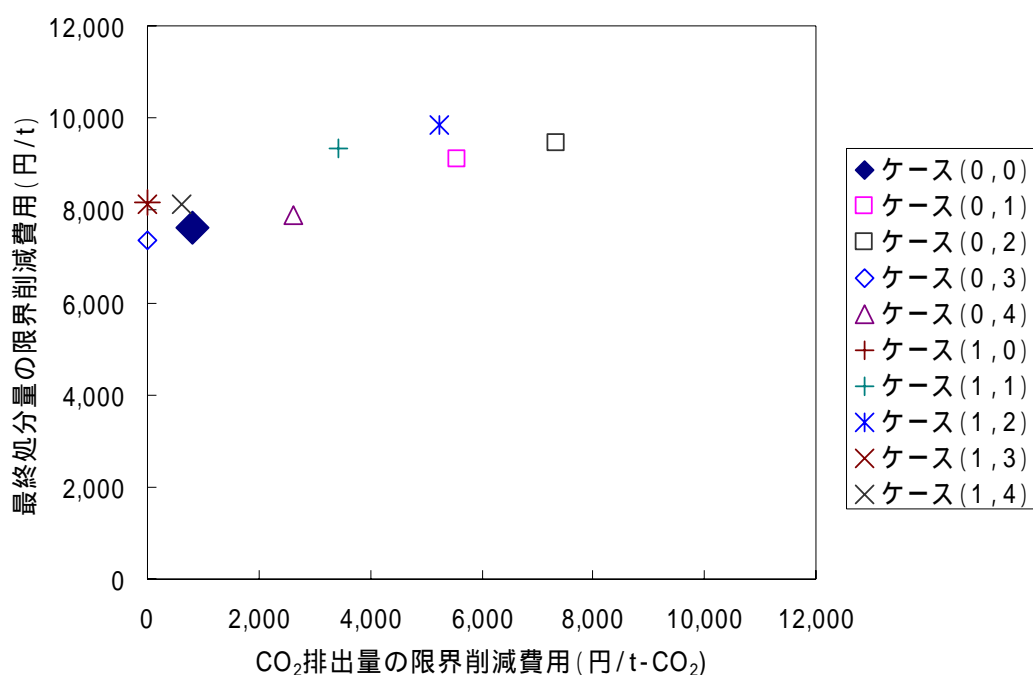


図 59 シナリオ 3 の限界削減費用の感度解析結果

シナリオ 1, シナリオ 3 とともに, 輸送コストのケース 1, 2 ((*, 1) (*, 2)) ではケース 0 よりも限界削減費用が増加している(ケース 0 の点よりも右上に位置している)。これは, 100km, 300km 程度の輸送距離での輸送コストの増加が限界削減費用の増加に影響するということを示している。

シナリオ 3 の最終処分量の限界削減費用はケースの違いによる値のばらつきが小さい。これは, この限界削減費用が主灰のセメント原料化リサイクルにより増加する費用を表し, その費用のうち大きな割合を占めるのが主灰の前処理等の費用で輸送コストの占める割合が小さいためである。それ以外の限界削減費用(シナリオ 1 の CO₂・最終処分限界削減費用, シナリオ 3 の CO₂ 限界削減費用)はケースの違いによる値のばらつきが大きい。

輸送コストとその他処分コストは独立の関係にない(高炉スラグとフライアッシュのリサイクル量 2000 年実績を表現するために輸送コストに対応するその他処分コストが存在する)。そのため, 輸送コストを変更した場合には, それに対応する 2000 年度実績値を再現するような廃棄物処分コストを決定する必要がある。このような作業は, 例えば 2000 年度現状からのリサイクル促進を評価するような場合に必要となる。

4. 限界削減費用 2 (その他処分コスト)

その他処分コストの設定

初期設定(ケース 0): 表 28 に示す

表 28 廃棄物の処分コスト(初期設定)

	処分コスト(円/t)
高炉スラグ	959
石炭飛灰	2,420
焼却主灰	16,443
焼却飛灰	36,386

それぞれの廃棄物処分コストが 0.5 倍となるケースとして、以下に示す 7 つのケースを設定する。

表 29 廃棄物の処分コストの設定 (1: 初期設定値, 0.5: 初期設定の 0.5 倍)

	高炉スラグ	石炭飛灰	焼却主灰・ 焼却飛灰
ケース0	1	1	1
ケース1	0.5	1	1
ケース2	1	0.5	1
ケース3	1	1	0.5
ケース4	0.5	0.5	1
ケース5	1	0.5	0.5
ケース6	0.5	1	0.5
ケース7	0.5	0.5	0.5

限界削減費用の計算

本論文の第 5 章 5.6 シミュレーション (3) で決定したシナリオ 1 (CO₂ 削減志向シナリオ), シナリオ 3 (最終処分削減シナリオ), シナリオ 4 (CO₂ 最大削減シナリオ) の CO₂ 排出量, 最終処分量を制約に加える。

$$TotalCO_2 \leq TotalCO_2_{scenario} \quad (6)$$

$$totalDisposal \leq totalDisposal_{scenario} \quad (7)$$

ただし, $TotalCO_2_{scenario}$, $totalDisposal_{scenario}$ は初期設定のもとでのシミュレーションにより得られた CO₂ 排出量の値, 廃棄物最終処分量の値である。

廃棄物処分コストの設定を変更したそれぞれのケースについて限界削減費用を求めた。初期設定 (ケース 0) とケース 1~7 の結果を比較する。

シナリオ 1 の結果を図 60 に, シナリオ 3 の結果を図 61 に, シナリオ 4 の結果を図 62 に示す。

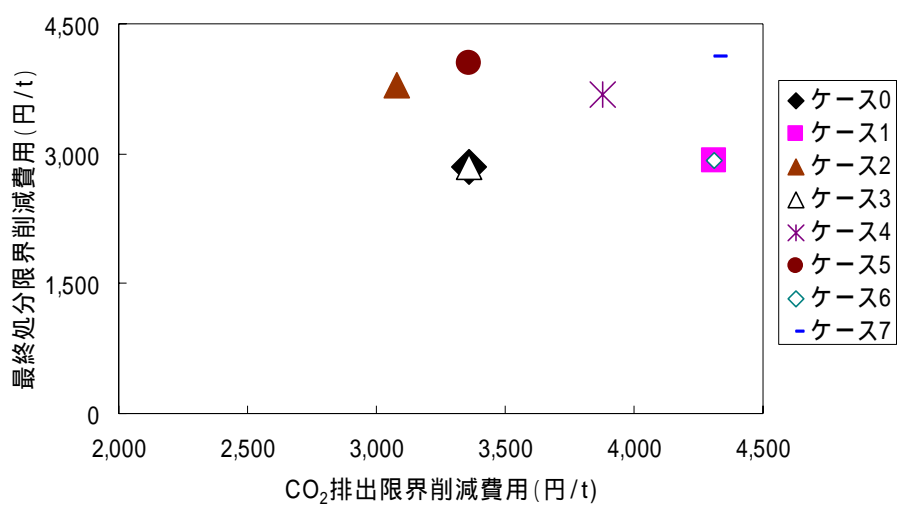


図 60 シナリオ 1 の結果

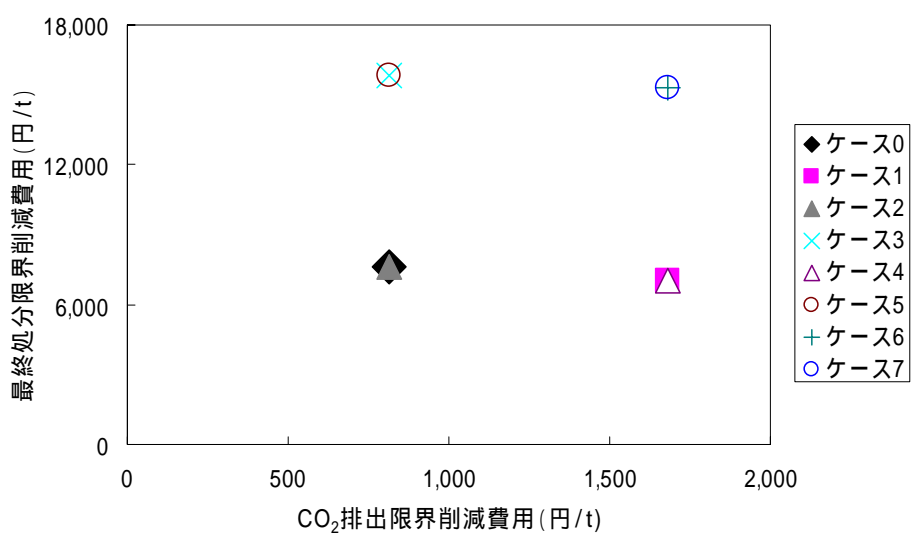


図 61 シナリオ 3 の結果

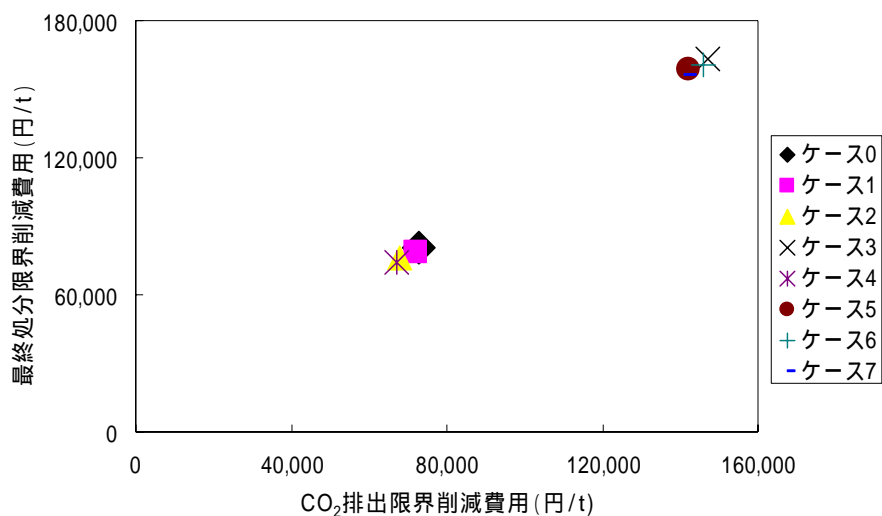


図 62 シナリオ 4 の結果

3つのシナリオについての感度解析の結果に共通しているのは、廃棄物処分コストが小さくなると限界削減費用が増加するということである。これは本モデルの解決定のメカニズムを理解すれば自明のことである。感度解析ではその変化の関係がどうであるかが焦点となるが、その点についてはシナリオによって結果が異なる。

環境負荷削減を最大限までおこなうシナリオ 4 の結果は単純で分かりやすい。焼却主灰・焼却飛灰の処分コストが小さくなれば限界削減費用は大きくなるという関係を示している。焼却主灰・焼却飛灰の利用が CO₂ 排出量削減、最終処分量削減のどちらにもつながるため、両者の限界削減費用がともに変化している。

シナリオ 1、シナリオ 3 では、高炉スラグの処分コストが小さくなれば CO₂ の限界削減費用が増加、石炭飛灰の処分コストが小さくなれば最終処分の限界削減費用が増加するという関係になっている。