

## H-9 物質フローモデルに基づく持続可能な生産・消費の達成度評価手法に関する研究

## (1) マルチスケール物質フローモデルの構築と政策評価への適用に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

循環型社会・廃棄物研究センター

大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻

和歌山大学システム工学部環境システム学科

森口祐一・橋本征二・南齋規介

盛岡 通・山本祐吾

吉田 登

&lt;研究協力者&gt;

独立行政法人国立環境研究所循環型社会・廃棄物研究センター 村上進亮

平成 16-18 年度合計予算額	62,902千円
(うち、平成 18 年度予算額)	21,779千円)

## [要旨]

本研究は、物質フロー分析（MFA）手法に関する先行研究の蓄積を進展させ、持続可能な生産・消費に係る評価手法・指標を開発することを目的としており、とくに本サブテーマでは、ミクロレベルから国際連関レベルまでにわたる多様なスケールでの物質フローを統合的に分析するための共通的な情報基盤を構築することを目指す。この目標に向け、国立環境研究所においては、研究集会の開催や国際会議への出席を通じて内外における最新の研究動向を調査し、物質フロー分析に対するニーズを明らかにするとともに、関連諸手法との統合可能性を示した。これらをふまえ、多様な地理的スケールにおける物質フローとこれに伴う資源消費や環境負荷を記述するための枠組として、マルチスケール物質フロー勘定モデル（MSMFM）の設計を行い、鉄鋼生産に関する事例分析に適用した。また産業連関表に対応した環境負荷データの作成法として内生的算定法の意義を明らかにし、これに基づき 2000 年データを作成した。これを用いて技術革新と消費速度の比を用いた指標を提案した。

大阪大学、和歌山大学では、廃棄物産業連関表を援用した技術革新の効果分析モジュールを構築し、主要資源の生産インフラでの技術変化に着目した事例分析を実施した。リサイクル型鉄鋼生産技術の分析では、循環資源の回収セクターと連携した産業コンプレックスの形成シナリオを作成し、埋立地面積や CO<sub>2</sub> 排出量、資源生産性を定量的に評価した結果、資源生産性で約 14%の改善効果が推計された。セメント産業における廃棄物燃料による石炭代替の分析では、2010 年における誘発 CO<sub>2</sub> 排出量は 2004 年水準から 486 千 t-C 削減され、埋立量は 131 万 t 削減されることが明らかになった。下水汚泥ガス化に伴う CO<sub>2</sub> 排出量変化の分析では、追加的な都市ガス投入を考慮しても全体で 18.5~23.2 万 t-C の削減効果を得られることが推計された。以上を通じて、将来の需要変化や先導技術の普及に伴って、物質フローが産業連関構造を介してどのように変化するかを分析するとき、本分析モジュールが有効となることが検証された。

[キーワード] 物質フロー、産業連関表、物量投入産出表、廃棄物、環境負荷

## 1. はじめに

2002年のWSSD(持続可能な開発に関する世界首脳会議)で採択されたヨハネスブルグ実施計画では、「持続可能でない生産・消費形態の変更」が一つの柱とされ、2003年5月の先進8カ国(G8)環境大臣会合や同年6月のG8エヴィアンサミット等においても、「持続可能な生産・消費」が引き続き重要課題であることが確認された。一方、2003年春に閣議決定された「循環型社会形成推進基本計画(循環基本計画)」は、この実施計画に呼応するものの一つとして位置づけられたが、同基本計画に物質フロー分析に基づく「資源生産性」に関する数値目標を盛り込んだことを契機として、わが国がこの分野で国際的なリーダーシップを発揮している。

こうした政策的展開を支援するためには、持続可能な生産・消費という概念を具体化し、その実現に向けて社会・経済を誘導したり、その達成度をモニターしたりするための評価手法・指標の開発が不可欠である。本研究課題への着手と時期を同じくして、OECD(経済協力開発機構)では2004年4月に「物質フロー分析と資源生産性に関する理事会勧告」が採択され、日本のG8提案を受けた国際共同研究が進行中である。一連の活動の提案国として、こうした国際活動をリードするための研究の継続・推進が急務である。国内政策においても、循環基本計画への物質フロー指標の導入に見られるように、こうした手法が政策を展開してゆく際の具体的な情報として活用されつつある。エコタウンなど、地球環境問題に対応して展開される地域の温暖化防止や循環形成拠点の現場でも、将来的な施策を展開する道筋を構想するために、このような評価フレームの活用が求められている。これらの施策展開の中では、既存生産基盤の有効利用など地域資源に着目した施策展開が求められている。基盤となる動脈や静脈の基盤施設に新しい革新技術を導入して、環境インフラとして活用することにより環境効率を飛躍的に高め、効率的な事業化を図ることが狙いである。

## 2. 研究目的

そこで、本研究課題では、環境勘定、特に物質フロー分析(MFA)手法に関する先行研究の蓄積を進展させ、持続可能な生産・消費に係る評価手法・指標を開発すること、および、主要産業・具体的地域への適用や発展途上国を含む国際比較によりその有効性を確認することを目標とする。特に、経済のグローバル化に伴って一国の生産・消費活動が他国での生産を通じて引き起こす環境への負荷など、概念的にはその重要性が強調されながらも定量的には分析が不十分であった地域間での連関・波及を通じた間接的な問題を重視し、「見かけ」だけでなく「隠れた」問題を含む、よりの確な持続可能な生産・消費の評価手法の開発を目的としている。

本サブテーマでは、先行研究における多次元物量投入産出表(MDPIOT)等のMFA諸手法の経験をもとに、関連研究の成果を組み入れことにより、多様なスケールの物質フローを整合的に格納する情報基盤として発展させること、および、従来の記述的なツールから政策分析に利用可能なモデルへと発展させることを目標とする。また、本サブテーマは課題全体の成果を統合する役割も担うことから、他のサブテーマの成果を組み入れることのできる、汎用性の高い物質フロー分析の枠組みの構築や、一連の研究を支援する環境負荷データベースの整備を目指す。

さらに、物質フローモデルのサブモジュールとして、需要変化や技術変化と物質フロー変化及びこれを通じた環境負荷、環境影響の変化の関係を記述するための手法を開発する。とくに、資源・エネルギー循環型産業社会の将来シナリオが技術革新を介した産業連関構造の変化を通して、集約的にもたらずマクロスケールでの資源生産性などの効果を評価する手法を開発することを目指す。

### 3. 研究方法

国立環境研究所が（１）～（３）、大阪大学及び和歌山大学が（４）を分担した。なお、より詳細・具体的な研究手法は結果・考察の項で補足する。また、（４）は結果・考察の章では技術分野ごとに（４）～（６）に区分して詳述する。

#### （１）物質フロー分析に関する研究動向の調査と研究協力・交流の促進

先行研究から築いてきた本分野の調査研究のリーダーシップを維持・発展させるため、研究集会の開催や国際会議への出席を通じ、内外における研究情報の収集、交流促進を引き続き行った。

#### （２）物質フロー分析と関連手法等との統合の検討と産業連関表を用いた実証分析

物質フロー分析（MFA）、産業連関分析（IOA）、ライフサイクルアセスメント（LCA）の３つの手法をとりあげ、相互連関とこれらの連携による相乗効果の検討を行った。また、2000年産業連関表に対応した環境負荷データベースの整備に関して、同種の経験をもつ専門家との間で初年度に行った意見交換の結果を踏まえ、2000年版の環境負荷データの編集を行った。また、こうしたデータ整備において従来適用されてきた算定方法を再整理した。この産業連関表に対応した環境負荷データベースを用いて、環境面での技術革新の速度と消費形態変化の速度に着目した指標の開発に取り組んだ。

#### （３）マルチスケール物質フローモデルの詳細設計と実証データ作成、事例分析

生産プロセス、事業所、産業部門、国といったさまざまなスケールにおける物質フローとこれに伴う資源消費や環境負荷を、「隠れたフロー」を含めて記述するための枠組みとして、マルチスケール物質フローモデル（MSMFM）の基本設計を行った。モデルが備えるべき要件を整理するとともに、（１）の国際的な情報収集の成果を踏まえ、本研究で開発する物質フローモデルで重点的に扱うテーマの整理を行った。基本設計を踏まえ、先行研究で構築した多次元物量産業連関表（MDPIOT）のように、貨幣単位の産業連関表をもとに物質フローを推計する方法に加え、主要なプロセスごとの積み上げ型の個別技術データや、投入物と産出物の組成別の物質収支に基づく推計計算をもとに、物質フローデータをモデルに組み入れる方法を設計した。こうした検討に基づき、化石燃料、鉄、建設用鉱物などの主要資源について、各種物量統計を活用した実証データを収集し、基礎素材生産部門、エネルギー転換部門について、実証データのモデルへの入力を行った。さらに、これらのデータ、モデルを用いて、日中両国での鉄鋼需給に関する複数のシナリオについて物質フローと環境負荷を比較した。

#### （４）技術変化と物質フロー変化の関係分析モジュールの設計

大阪大学及び和歌山大学が相互に協力し、需要変化や技術変化と物質フロー変化及びこれを通じた環境負荷、環境影響の変化の関係を記述するための手法開発をおこなった。廃棄物産業連関表（Waste Input-Output table）<sup>1)</sup>を援用した技術革新の効果分析モジュールを設計し、循環資源４分類ごとに金属資源：スクラップ鉄、無機資源：セメント原料副産物、有機資源：有機汚泥、化石資源：廃タイヤ・廃プラを指標材として設定した上で、それぞれの先導的な高度循環技術を取り上げて事例分析を実施した。対象とする４つの指標材の再資源化への原理をもとに、そこから考えられるシナリオ構築への基本的な方向性は、図１のように整理される。これに基づいて、金属及び化石資源については、スクラップ鉄を原料として薄鋼板を生産する冷鉄源溶解法（SMP: Scrap Melting Process）を中心に、無機資源ではセメント産業における廃棄物燃料による石炭代替技術を、有機資源については内部循環流動床による下水汚泥ガス化技術に着目した。

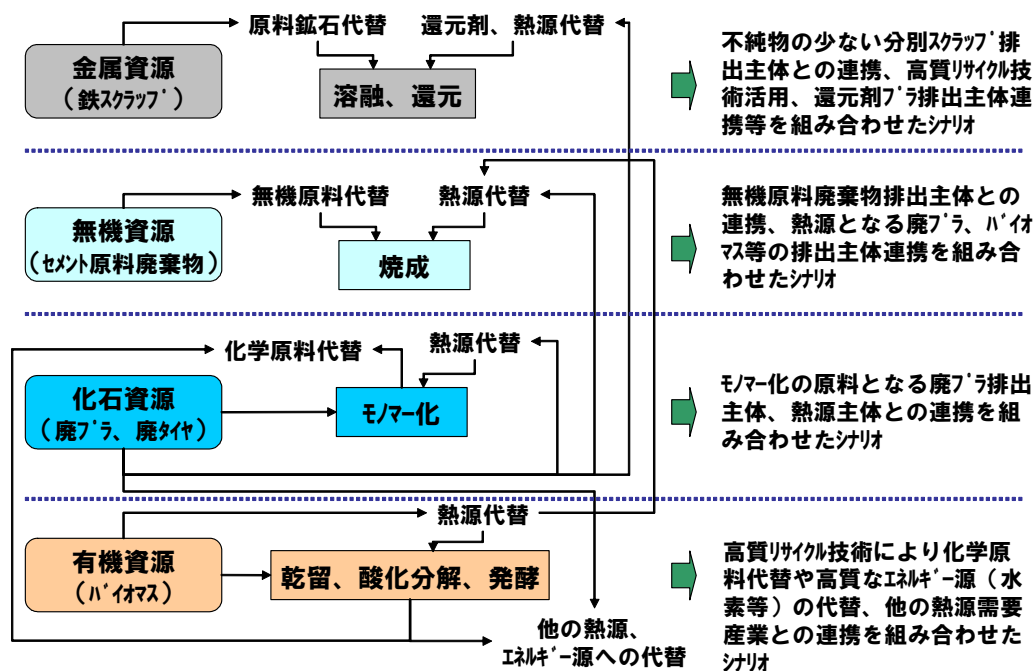


図1 指標材の生産・再資源化の原理

#### 4. 結果・考察

##### (1) 物質フロー分析に関する研究動向の調査と研究協力・交流の促進 (国立環境研究所)

先行研究から取り組んできた本分野における国内外の研究協力・交流を進めた。

海外に関して、16年度には、スイス連邦工科大学チューリッヒ校で開催された物質フロー分析分野の国際研究集会 (ConAccount2004) において、欧州を中心とする本分野の最新の研究動向を調査するとともに、全体集会の講演者の一人として、物質フロー分析(MFA)分野のさまざまな手法間の共通項について問題提起した。また、OECD 理事会勧告に基づく活動に参画し、加盟諸国における最近の取組みの進捗状況について情報収集するとともに、OECD 全体としての3年間の作業計画策定に貢献した。17年度は、産業エコロジー国際学会(ISIE)、国際産業連関分析学会(IIOA)等に出席し、本課題の成果を報告するとともに、物質フロー分析とこれを取りまく関連研究分野の研究動向を調査した。また、「物質フローと資源生産性に関する OECD 理事会勧告」に基づく活動に引き続き参画し、加盟諸国における最近の取組みの進捗状況について情報収集するとともに、前年度に策定された計画に沿って、物質フロー分析のガイダンスマニュアル策定等の作業に参画した。さらに、OECD の持続可能な物質管理 (SMM : Sustainable Material Management) プロジェクトの第1回ワークショップにおいて、SMM における物質フロー分析へのニーズについて調査した。18年度には、引き続き OECD 環境政策委員会傘下の2つの作業部会において、欧州を中心とする本分野の最新の研究動向を調査するとともに、物質フロー分析分野の国際研究集会 (ConAccount2006) において物質フロー分析・指標のわが国における政策への貢献について紹介した。さらに、欧州委員会が設立を提案中の自然資源の持続可能な利用に関する国際パネルの準備状況を調査した。

一方、国内では、初年度に、「物質フロー分析・産業連関分析・環境会計連続ワークショップ」を東京都内で開催し、米国、豪州からの海外招聘を含む約20名の講演者および3日間延べ約300名の参

加者を得て、ミクロレベルからマクロレベルにわたる物質フロー分析およびこれと密接に関連する手法である産業連関分析、環境会計について、国内外における最新の調査研究動向を把握するとともに、講演者、参加者との討論を通じて研究の発展の方向性を討議した。その結果は、(2)の手法間の統合可能性の提案に活用している。こうした機会を通じて、資源産出国での「隠れたフロー」の算定に資する情報の利用可能性、最新の産業連関表に対応した環境負荷データ整備における研究協力の可能性、企業環境会計等のミクロレベルでの手法との連携可能性などが確認できた。17年度には、上記連続ワークショップの第1のテーマであった資源貿易に焦点を絞り、「わが国の国際貿易に隠れた物質フローと環境負荷に関するワークショップ」を東京都内で開催した。資源産出国の立場（カナダ、オーストラリア、ブラジル）および資源消費国の立場（英国）からの海外招聘講演と、本研究課題に参画する日本の研究者からの講演及びパネルディスカッションを行った。資源の国際貿易に伴う「隠れたフロー」について、その量的把握とともに、どのような環境影響や社会的影響と結びついているのかについて、資源産出国の専門家との共通の情報に基づき議論を深めることの重要性が改めて認識された。最終年度には、「資源・製品の大量消費に伴う物質フローと環境影響に関するワークショップ」をつくば市内で開催した。国際機関、欧州、米国、豪州、中国の研究機関からの海外招聘講演と、本研究課題および関連する研究課題に参画する日本の研究者からの講演及びパネルディスカッションを行った。本課題の先行研究での日米欧の共同研究によるものと同じ枠組みを用いた一国全体の資源フローの推計データが、中国からの招聘研究者から報告された。資源生産性指標は先進国に比べて大幅に低いが、一人あたり資源投入量では、欧州や日本の半分程度の水準となっている。

これら一連の内外における活動から、MFA が学術面、政策利用面の両面において着実に進展していることが読み取れる。とくに ConAccount、ISIE、HIOA 等の研究集会においては、MFA 自身の研究が活発に行われるとともに、本課題と同様、MFA と産業連関分析や LCA とを組み合わせた手法開発が進んでいる。また、政策利用面では、天然資源の効率的利用、廃棄物管理・リサイクル、有害物質の管理といった諸課題に横断的に応えることが MFA に期待されている。さまざまな種類の物質フロー分析研究は、基本的概念を共有しつつも、2つの異なる戦略への応用が考えられる。一つの戦略は detoxification、もう一つは dematerialization である。前者は、どのような物質がどのような影響を人間や生態系へ及ぼすかに関する科学的知見をもとに、社会経済システムと自然環境との間での物質フローの削減の優先度の高い物質を同定し、対応策を講じていくものである。一方、後者では、社会経済システムと自然環境との間での物質フローの総量を大幅に削減することが必要との立場をとる。持続可能な発展の達成のためには、これら二つの戦略の双方がバランスよく実行される必要があることが改めて再確認された。

## (2) 物質フロー分析と関連手法等との統合の検討と産業連関表を用いた実証分析(国立環境研究所)

### 1)物質フロー分析と関連する手法の相互連関と相乗効果の検討

先行研究で取り組んできた環境経済統合勘定(SEEA)をはじめ、環境と経済の統合評価手法は、国民経済レベルを対象として発展する一方、企業の環境会計や環境効率指標など、ミクロレベルでの手法開発や実践も行われている。従来、Environmental accounting の訳は、マクロでは「環境勘定」、ミクロでは「環境会計」、とされることが多く、前者の典型である SEEA と後者の典型である企業環境会計との間にはあまり接点が見られなかった。しかし、経済活動と環境と関係をとらえたさまざまな情報は、貨幣単位と物量単位の両面、マクロとミクロの両面において、Accounting という共通の枠組みのもと

で、より体系的に整備できる可能性がある。

そこで、本研究の中核をなす物質フロー会計（MFA; Material Flow Accounting)について、さまざまなレベルで整備されつつある実証データの相互関係と活用可能性について初年度に考察した。

物質フローを体系的にとらえることは、LCAと同様、一連のつながりをもった問題群を漏れなく記述できる利点がある。しかし、実証分析では、マクロな分析ではマイクロな内訳が捨象されがちであり、マイクロな分析では直接データを得られる範囲に目を向け、本来対象とすべき範囲に及ばないことが多い。これらの得失を補うためには、さまざまなスケールでの手法・実証データの位置づけと、相互連携の可能性を明らかにしておくことが必要である。こうした観点から、図2は、マクロからマイクロまでのさまざまな手法と相互関係を示したものである。図の右側は部門単位での分解・統合を、図の左側は地域単位での分解・統合を描いている。なお、図には明示していないが、物質の種類ごとの内訳の記述をどこまで細分化するかは各スケールに共通の課題である。物質フロー会計においては、適用する枠組みの共通性が高く、マイクロとメゾ、メゾとマクロのつながりを担保しやすい。国レベルのマクロMFAは、日米欧5カ国の共同研究の後、EU諸国をはじめ多くの国で作成が進み、次の課題として、構造分析が行える形式、すなわち産業連関（投入産出）表と連動したMFA作成の必要性が共通認識となっている。一方、マイクロ側では、製品のLCAにおいて積み上げ型のインベントリデータと産業連関表を組み合わせた「ハイブリッド法」の利用が拡大しつつある。こうしたことから、マクロな物質フロー会計のデータと、LCAのインベントリや個別の技術評価等のためのマイクロデータの両方を、先行研究で重点をおいた物量投入産出表（PIOT: Physical Input Output Tables）の枠組みに組み入れることが、物質フロー会計が目指すべき一つの有力な選択肢と判断した。

こうした整理に基づき、第2年度には物質フロー分析（MFA）、産業連関分析（IOA）、ライフサイクルアセスメント（LCA）の3つの手法を取りあげ、相互連関とこれらの連携による相乗効果の検討を行った。

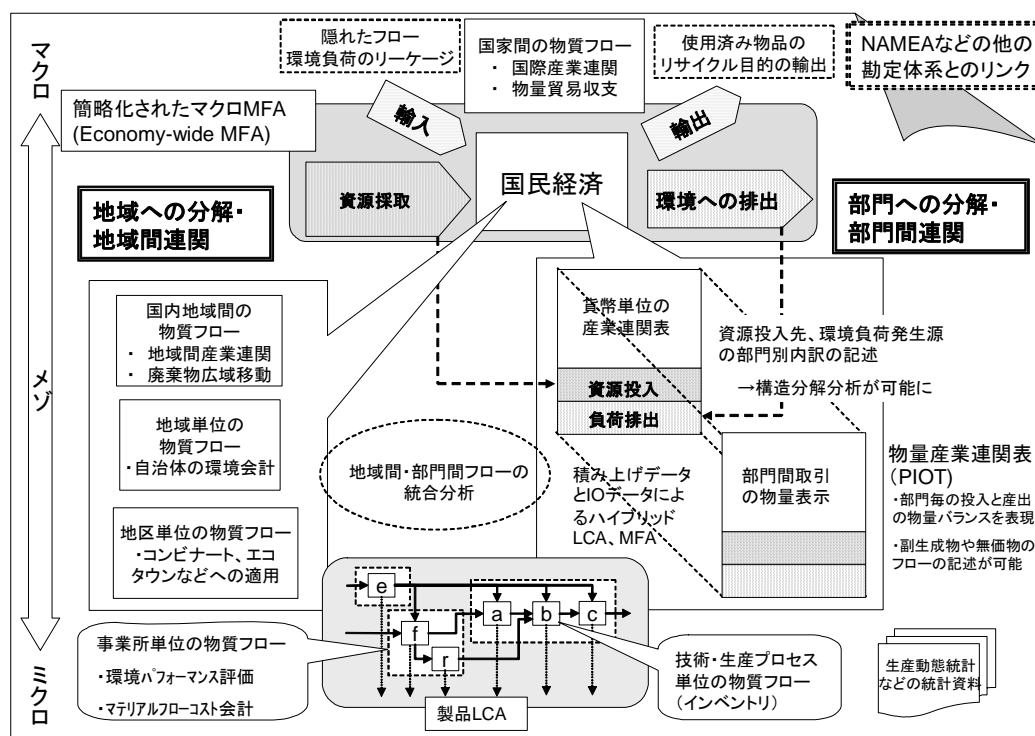


図2 さまざまなスケールでの物質フローの相互関係

これら3つの手法は、各々が全体像をシステム的にとらえることに長けているが、これらを組み合わせることでさらに効果的な分析手法へと発展させられる可能性を秘めている。これらはいずれも産業エコロジー研究の主要な構成要素であり、個々のプロセスを調和のとれたシステム全体の一部としてとらえる産業エコロジーの本質に倣い、研究を構成する手法群にもこうした概念をした。さらに、本課題が先行研究以来の基礎をおいてきた産業連関（投入産出）

分析とのアナロジーも適用し、これら3つの手法の関係を表1に示す行列形式で表現した。投入産出表において、行部門は列部門に「材料」を産出するので、この表では行部門に配置した手法が列部門に配置した手法にどのような材料を提供しうるかを示した。最右列の「最終需要」にあたる位置には、各手法の主な「需要先」を示した。最下行は付加価値部門であり、ここには列部門に配置した各手法固有の強みを記述した。

例えば、第2行を行方向に読むと、IOAはLCAに対して、ハイブリッドLCAのデータや一貫したシステム境界を提供し、MFAに対して物質フロー推計の近似値としての金銭フローデータや物量産業連関表の枠組みを提供することを、第2列を縦に読むと、LCAから得られる新技術や新製品に関するデータはIOAへの新たな知見となり、MFAの情報は環境拡張IO表や物量投入産出表の作成に利用されることを表現している。こうして各手法の利点を他の手法に反映させることで、各々の主たる需要先に応じた、より有用な分析手法が構築される可能性があることを示した。

さらに、これを実現する手段として、物量投入産出表（PIOT）の枠組みによる統合可能性について検討した。なお、ここでとくにPIOTと呼ぶ表は、MFAとIOAとを組み合わせ、質量単位で部門間の取引を記述したものであるが、本来は物量の単位は質量に特化したものではない。電力量をkWhで表したり、製品を台数で表したりしても構わない。その固有の単位あたりの単価を介して、金額表に容易に変換できる。

環境との間での物質フローの記述をPIOTに加えれば、投入された原料が過不足なく産物、副産物、環境への排出物に変換されることが記述できる。IOAでは主に「経済的価値」、LCAでは主に「環境影響の度合い」に着目して、投入産出を記述しているが、質量保存則に重きをおくMFAの観点からは、PIOTでは、質量を持つものの収支を「漏れなく」記述することに特徴を求めている。IOAの枠組みを用いて経済活動とこれを取りまく環境との間に明確なシステム境界を設定し、MFAによって物質収支を漏れなく表現し、LCAの影響評価で用いられる知見で物質ごとの影響の差別化を行ってこれらを統合することが、これら3手法の統合の方向として有望である。実証データの構築においては、政府機関からかなりの時間遅れを経て刊行される産業連関表を待つだけではなく、積み上げ型のインベントリの情報も最大限活かすことが有益である。こうしたボトムアップ型の情報と、産業連関表のようなトップダウン統計を組み合わせる用いることが、(3)で述べるマルチスケール物質フローモデルの実証データ構築の要点である。

一方、上記(1)において、detoxificationとdematerializationという2つの戦略と物質フロー分析と

表1 3つの手法の間での投入と産出の比喩的表現

産出先 投入元	LCA	IOA	MFA	最終需要
LCA		新製品や新技術に関する投入係数	詳細な物質フローデータ、影響による重み付け手法	製品サービス
IOA	ハイブリッドLCAのためのバックグラウンドデータ		物質フローの近似値としての金銭フローデータ	構造分析
MFA	包括的な物質フローデータ	環境拡張産業連関表や物量産業連関表のための物質フロー情報		国・地域部門事業所
付加価値	影響評価 ライフサイクル思考	Leontief 逆行列 経済学的基礎	質量保存側	統合的な価値



の関係について述べたが、これまで主に dematerialization の観点に主眼をおいてきた物質フロー分析の諸手法を、これを detoxification の戦略にも適した手法に拡張しておくことが望まれる。

そうした拡張を行うには、ライフサイクル影響評価手法(LCIA : Life Cycle Impact Assessment) の知見を取り入れることが早道である。LCIA では、インベントリ分析で得られたさまざまな物質フローを環境影響の種類と結びつけ、これを環境影響の大きさに換算する係数を算出し、さらに異なる種類の影響を足し合わせる試みにも着手されている。物質フロー分析において、これらの係数と組み合わせる形で物質フロー情報を把握し、LCIA の手法と組み合わせることで、これを detoxification の戦略に活かすことが可能となる。図3に、投入産出表形式の物質フロー情報と LCIA の知見を結合する方法の概念図を示す。

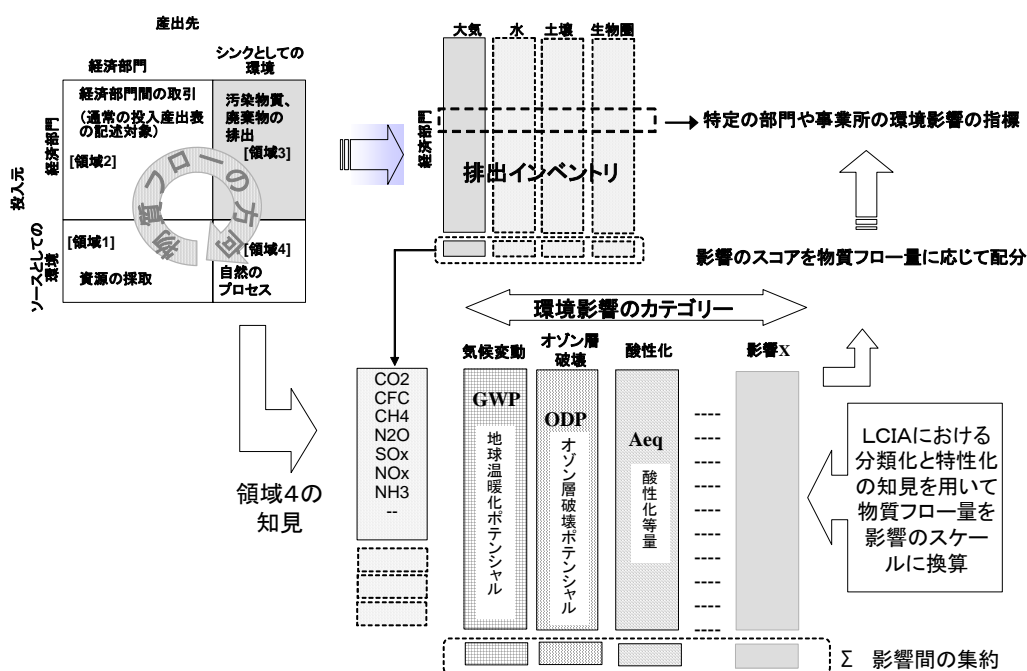


図3 物質フロー情報と影響評価手法との統合

## 2) 産業連関表に対応した環境負荷データ整備の理論的考察と実践

先行研究において、産業連関表の部門分類ごとのエネルギー消費量、CO<sub>2</sub> 排出量、大気汚染物質排出量等のデータを整備・公開してきたが、2004年に2000年産業連関表が刊行されたことから、これに対応した環境負荷データ整備を行った。産業連関表に整合した環境負荷データを整備することの重要性は、個別製品を対象としたLCAから国全体を評価するマクロ的な環境分析に至る幅広い範囲での国内外における活用事例の多さが証明している。産業連関表を用いた環境分析の信頼性は、産業連関表自身の信頼性に関わるのは当然であるが、併用する環境負荷データの精度にも大きく依存する。産業連関分析が1970年代に始まったエネルギー分析から1990年代以降LCAへと利用されるに伴い、取り扱う環境負荷の種類も増加した。エネルギー消費を起源とするCO<sub>2</sub>排出や大気汚染物質だけでなく、水質汚濁負荷物質、化学物質、水資源、廃棄物や重金属など多様な物質についての推計が国内外で行われてきた。特にLCAのインベントリ分析では、詳細な部門分類に基づく産業連関表と環境負荷デー



タが求められるが、わが国の産業連関表のように約 400 もの部門毎に環境負荷量を算定することは容易ではない。一方、海外では数百種類の物質が産業連関分析に利用できるようにデータ整備が行われ、ソフトウェアとして販売されている事例もある。これまで、精度良い部門別環境負荷量の算定の必要性は認識しながらも、環境負荷の種類増加に注力し、負荷量の算定方法については十分に議論されてこなかったと言える。そこで本研究では、産業連関分析を物質フローと環境負荷の両側面を整合的に計測するためのフレームワークとして用いる場合、どのように環境負荷量を算定すべきかを検証するため、部門別単位環境負荷量の算定手法に関する理論的な整理を行った。さらに、整理した算定手法の枠組みに基づき、2000 年産業連関表に対応した部門別エネルギー消費量と CO<sub>2</sub> 排出量の推計を実施した。

#### a. 産業連関分析における単位環境負荷量の算定の原則

本研究では、任意の生産活動と環境負荷との物理的な関係を基礎として、産業連関分析における部門別単位環境負荷量の設定条件を検討した。まず、産業連関分析をより一般的に投入産出分析と捉え、生産活動を表現する各部門への入出力は経済と自然の 2 つのシステムから行われると仮定した。また、環境負荷は自然システムへの産出物の一部であり、自然システムへの産出物のうち、その時の医学や科学によってとりわけ人や生物に悪影響を与えると判断された産出物と整理した。このように考えると、環境負荷の種類は無数であり、全ての環境負荷について部門別環境負荷量の設定条件に言及することは難しい。しかし、環境負荷による人や生物への影響とは、環境負荷の原因となる物質が存在する（質量がある）ことに起因するか、または物質の持つエネルギーに起因する現象であると理解すると、環境負荷の種類を次の二つに大別することができる。一つは、環境負荷と見なす産出物の物理的数量を「質量」で計測すべき環境負荷と、産出物の「エネルギー量」で計測すべき環境負荷である。前者には、温室効果ガスや有害化学物質、大気汚染物質のような環境負荷が該当し、後者には例えば廃熱、騒音、電磁波、放射能などが当てはまる。このように、任意の環境負荷を上記の 2 種に分類することで、各部門の物の入出力を質量保存の法則またはエネルギー保存の法則で検証し、投入産出分析における各部門の単位環境負荷量が満たすべき条件を以下のように整理することができた。

投入産出分析における部門  $j$  の単位環境負荷量（質量単位）は、経済システムの各部門と部門  $j$  との投入物と産出物の正味（net）のフロー量（質量換算値）と、自然システム内の各部門と部門  $j$  との、着目する環境負荷を除く、投入物と産出物の正味の物のフロー量（質量換算値）の和に等しくなければならない。一方、エネルギー量で物理的数量を測定すべき環境負荷については、部門  $j$  の単位環境負荷量（エネルギー単位）は部門  $j$  と経済システムとの正味のエネルギーフロー量と自然システムとの投入物と産出物の正味のエネルギーフロー量（着目する環境負荷のエネルギー量を除く）の和に等しくなければならない。

上記の整理は物理法則から考えれば自明であるが、投入産出分析においても、部門の環境負荷は部門への経済と自然システムからの投入物が潜在的な発生量を支配し、計上すべき部門の環境負荷量は当該部門において投入物が経済と自然システムへの産出物としてどれほど変換されるか、すなわち部門内部の物質変換の仕組みに応じて、決定されなければならないことを意味する。以上の考察から、本研究では、投入産出分析である産業連関分析に適用する単位環境負荷量は、部門への投入物と部門内での物質変換のメカニズムに整合するよう定めなければならないと結論づけた。これを、単位環境負荷量の算定手法に関する原則と捉えたと、これまでほとんど議論されていなかった産業連関分析に

用いる環境負荷データの整備手法に関して、重要な基準を始めて提示したと言える。この単位環境負荷量算定の原則を踏まえ、従来から実際に環境負荷データの整備で適用されてきた算定手法が「外生的算定法」と「内生的算定法」の2つのアプローチに区分されることを示し、その特徴をまとめた。

#### b. 内生的算定法と外生的算定法の特徴

実践的な算定の手法一つは、実測調査や技術データに基づき把握されている環境負荷量や、既往研究等で推計された環境負荷量データを利用するアプローチである。利用するデータの発生源分類と産業連関表の部門  $j$  との対応をとり、データの環境負荷量そのものを引用して部門の単位環境負荷量を設定する。上述の算定の原則を基準に考えると、部門  $j$  内部の構造に関係なく環境負荷量が算定され、外生的に与えることから、本研究では、このアプローチを“外生的算定法”と呼ぶ。海外の環境負荷データ整備では、本アプローチが採用されているものが多く、例えば、TRI (Toxic release inventory) 等で得られる発生源別の環境負荷量を対応する産業連関表の部門に対して、部門の国内生産額の大ききで配分し、各部門の負荷量を算定する。この方法は、部門対応のみで比較的容易に環境負荷データを作成することができる点で利点があるが、算定の原則から判断すると、得られる数値の信頼性は保証されないといえる。

もう一つは、部門の何らかの投入物に着目し、部門内でその投入物から分析対象とする環境負荷が発生する過程を追って環境負荷量を推計し、ボトムアップ (内生的) に単位環境負荷量を算定する方法である。ここでは、“内生的算定法”と称する。例えば、CO<sub>2</sub> の排出量を部門に投入される化石燃料や石灰石中の炭素含有量でほぼ決定されることに着目し、それらの燃焼や熱分解過程を追って推計するものである。どちらのアプローチを採用しても、厳密な算定を行えば究極的には同じ結果を得るが、現実的にはアプローチの違いは環境負荷の推計結果に差異を与える。部門内の全ての投入物と産出物を把握することは出来ないため、部門で質量保存やエネルギー保存は検証できないが、部門の投入物を起点として環境負荷の発生メカニズム、つまり物質変換のメカニズムを理解して負荷量を算定する点で、算定の原則に沿うと考えられるため、後者の内生的算定法が推奨される。国立環境研究所のグループでは 2000 年産業連関表に対応した環境負荷データの整備も含め、内生的算定法を採用して環境負荷量を算定してきた。すなわち、産業連関表の物量表を重視しつつ推計した各部門の化石燃料や石灰石の投入量を出発点として、エネルギー消費量や CO<sub>2</sub> 排出量を決定している。また、大気汚染物質についても、部門内での大気汚染物質の発生と除去のメカニズムを反映して排出量を決定する方法として、部門別燃料種別の排出係数を用いており、エネルギー消費、CO<sub>2</sub> 排出量、大気汚染物質と種類では限りがあるものの、算定される環境負荷量の値は妥当性が高いと判断できる。

環境負荷の発生要因が、ある活動への投入物の組成等の情報をもとに「内生的」に決定できる場合があること、内生的算定法の考え方に立てば、廃棄物や環境への負荷の発生量は、原材料からある成分が分離されたり、他の物質と新たに結合したりすることで決定される。実際に作成されている産業連関表の部門の分解能は、こうした方法のみを採用する上で十分とはいえないが、本研究による算定方法の整理は、このような内生化を行うことが、モデルを用いて物質フローの変化を予測し、さらにこれを環境への負荷の予測に適用する上で有利な方法と位置づけられることを明らかにした。

#### 3)消費の成長と技術革新の速度に注目した指標の開発

本研究で整備した 2000 年産業連関表に対応した環境負荷データを用いて、持続可能な生産・消費の

達成度を、環境面での技術革新の速度と消費の成長（消費形態変化）の速度に着目して考察するための指標開発を行った。ここ数十年、技術進歩に伴い生産工程および製品自身のエネルギー効率や環境効率率は上昇してきたが、その一方で、消費も世界規模で成長を続けており、こうした効率性の向上を相殺していることが懸念される。消費の成長は経済成長そのものであり、雇用や社会福祉のような社会的側面にも大きく寄与する。しかし、環境負荷低減との両立を考えると、消費は技術進歩と調和しながら成長することが望ましい。そこで本研究では、消費と技術の速度に着目し、両者の環境的側面から見た適切性を判定する簡易指標を提案し、また、その指標を通じて、わが国の家計消費の現況についての理解を深める分析を行った。

#### a. 「消費の環境速度」指標の定義

消費の成長速度と技術進歩の速度との関係を検証するため、本研究では物理的な速度に準えて両者の速度を計測した。消費の拡大による環境負荷の増大を技術の改善で回避するためには、概念的には、消費の成長速度よりも環境面での技術進歩が速いことが必要と考えられる。すなわち、消費の成長速度を  $vC_t$ 、環境的な技術進歩の速度を  $vD_t$  とすると、後者が前者より大きければ良い。ただし、両者は正の値を示すとき、消費は成長し、技術は改善しているとする。消費の時間  $t-1(C_{t-1})$  から  $t(C_t)$  への変化量を両者の距離と捉え、 $vC_t$  を速度に準えて式(1)のよう定義した。同様に、技術レベルを示す  $D_{t-1}$  から  $D_t$  への変化量を距離として扱うことで、 $vD_t$  を式(2)で表現した。

$$vC_t = (C_t - C_{t-1}) / \{t - (t-1)\} \quad (1)$$

$$vD_t = (D_t - D_{t-1}) / \{t - (t-1)\} \quad (2)$$

ただし、 $C_t$  と  $D_t$  は消費量の増加、技術レベルの向上に伴い増加する。 $C_t$  と  $D_t$  の測定単位が違うことから、本研究では両者の比較を可能にするための技巧として、時間  $t-1$  の値を基準値 1 として、それぞれの距離を定義した。従って、式(3)と(4)によりそれぞれの速度を規定する。

$$vC_t|_{t-1} = C_t / C_{t-1} - 1 \quad (3)$$

$$vD_t|_{t-1} = D_t / D_{t-1} - 1 \quad (4)$$

これにより  $vC_t|_{t-1}$  と  $vD_t|_{t-1}$  は無次元単位[-]を持ち、-1 以上を示す。したがって、先の述べた両者の必要な関係は式(5)と書ける。不等式の扱いを容易にするため、便宜的に両辺に 1 を加えることで式(6)を得ることができる。

$$vC_t|_{t-1} < vD_t|_{t-1} \quad (5)$$

$$0 \leq vC_t|_{t-1} + 1 < vD_t|_{t-1} + 1 \quad (6)$$

本研究では式(6)の関係に着目し、消費の環境状態を示す簡易指標  $ecoV_t|_{t-1}$  を式(7)により定義し、この指標を用いて消費と技術の成長に環境的適切性を測定した。

$$ecoV_t|_{t-1} = \frac{vC_t|_{t-1} + 1}{vD_t|_{t-1} + 1} \quad (7)$$

式(6)より、 $ecoV_t|_{t-1}$  は 1 より小さければ、消費の成長は技術の改善速度との関係において、適切であると理解することができる。つまり、逆に 1 を超えている場合、消費の成長は過度に早く、次期は環境負荷を増加する傾向にあると警告する。この指標を「消費の環境速度」と呼び、消費の環境面での現況を認識するだけでなく、次期の傾向を示唆する点に特徴を持つ。この特徴は、今後加速すべき技術開発や減速すべき消費形態の同定に有効と考えられる。また、法定速度を超えて、自動車を運転するリスクに準えて、消費の環境速度が 1 を超える場合を、「消費の環境速度違反」と称した。

## b. わが国の家計消費を対象とした指標の計測

わが国の家計消費を対象に環境速度を計測し、CO<sub>2</sub>排出量に関する技術進歩との適切性を検証した。1990年( $t=0$ )の値を基準値1とし、1995年( $t=1$ )および2000年( $t=2$ )の消費と技術の成長速度を計測した。各年の消費量  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  は「平成 2-7-12 年接続産業連関表」から金額ベース(百万円)で与えた。一方、CO<sub>2</sub>排出に関する技術レベル  $D_0$ 、 $D_1$ 、 $D_2$  は式(8)に基づく、いわゆる環境効率によって評価した。

$$D_t = Y_t / P_t \quad (8)$$

ここで、 $Y_t$  は家計に供給された財・サービスの量を示し、金額ベース (百万円)で示す。 $P_t$  は  $Y_t$  の供給に起因する直接間接の CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>)であり、上述の研究で算定した結果を用いている。データ収集の制約から、輸入品に関する CO<sub>2</sub> 排出量は、国産品と同等と仮定して計算を行った。

$C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  は、それぞれ  $229$ 、 $784 \times 10^3$ 、 $265$ 、 $237 \times 10^3$ 、 $275$ 、 $996 \times 10^3$  (百万円: 2000 年実質価格基準) であり、 $vC_{1|0}$  および  $vC_{2|1}$  は  $0.15$  と  $0.041$  と算定された。また、CO<sub>2</sub> 排出に関する技術レベル  $D_0$ 、 $D_1$ 、 $D_2$  は  $0.396$ 、 $0.386$ 、および  $0.384$  (百万円/t-CO<sub>2</sub>) を示した。従って、技術の成長速度  $vD_{1|0}$  は  $-0.025$  となり、 $vD_{2|1}$  は  $-0.0047$  と計算された。これらの値から、 $ecoV_{i,t-1}$  を求めると 1995 年( $t=1$ )は  $1.18$ 、2000 年( $t=1$ )は  $1.05$  を示した。共に 1 以上の値となり、わが国の消費の成長は環境速度違反であったと判定された。1 以上の環境速度は、次期の CO<sub>2</sub> 排出量の増加を示唆するが、実際に、わが国の家計消費に起因する CO<sub>2</sub> 排出量は、843 Mt-CO<sub>2</sub> (1995 年)から 891 Mt-CO<sub>2</sub> (2000 年)と増加しており、1995 年の環境速度と矛盾しない結果となった。2000 年以降の家計消費に起因する CO<sub>2</sub> 排出量については、数値が得られなかったため、わが国全体の CO<sub>2</sub> 排出量変化で比較すると、2003 年は  $1,259$  Mt-CO<sub>2</sub> であり、同条件の 2000 年の排出量( $1,239$  Mt-CO<sub>2</sub>) より増加していることから、計算した 2000 年の環境速度の示す次期の傾向も実態と概ね整合することを確認した。

さらに、本研究では消費の環境速度を商品別に算出し、消費の成長との調和という視点から、どのような環境面での技術開発が優先的に必要となるかを分析した。表 2 は家計消費において環境速度違反であった上位 10 部門(商品)である。1995 年では、無線電気通信機器(除携帯電話機)(22.5)が最も速い値を示した。続いて、複写機(11.2)、有線放送(6.08)、情報サービス(3.30)、熱供給業(3.20)となった。一方、2000 年の場合、情報サービス(25.1)が最も速い。パーソナルコンピュータ(3.95)、携帯電話機 (3.36)、その他の畜産 (2.88)、保健衛生(産業)(2.77)と続き、中でも情報通信関連で環境速度が速いことが確認された。例えば、急速なインターネットの普及や携帯電話の短期モデルチェンジ、パソコンの性能向上等を背景として、関連する商品に関する消費の成長が速くなったと推察される。

表 2 家計消費における CO<sub>2</sub> 排出に関する環境速度違反の上位 10 商品  
(左側: 1995 年、右側: 2000 年)

1995年				2000年			
No.	部門番号 (i)	部門名	$ecoV_{1,i 0}$ [-]	No.	部門番号 (i)	部門名	$ecoV_{2,i 1}$ [-]
1	228	無線電気通信機器(除携帯電話機)	22.47	1	362	情報サービス	25.12
2	215	複写機	11.24	2	223	パーソナルコンピュータ	3.95
3	332	有線放送	6.08	3	227	携帯電話機	3.36
4	362	情報サービス	3.30	4	19	その他の畜産	2.88
5	294	熱供給業	3.20	5	352	保健衛生(産業)	2.77
6	223	パーソナルコンピュータ	2.97	6	135	農薬	2.63
7	107	化学肥料	2.95	7	71	有機質肥料(除別掲)	2.55
8	9	その他の食用耕種作物	2.61	8	379	興行団	2.12
9	151	その他のガラス製品	2.53	9	53	ぶどう糖・水あめ・異性化糖	1.98
10	249	トラック・バス・その他の自動車	2.25	10	328	電気通信	1.92

環境速度は簡易な指標であるが、その反面、実社会での計測が可能な指標である。消費の成長と環境的な技術レベルの向上との調和を確認し、優先的に進める技術を識別する場合に有効である。また、消費が技術の進歩が追いつけないほど成長していると判断する場合は、我々はその現実を認識し、消費形態のシフトを通じて、減速することが必要であると考えられる。

### (3) マルチスケール物質フローモデルの設計と実証データ作成、事例分析

#### 1) マルチスケール物質フローモデルの設計

上記(2)の物質フロー分析と関連手法等との統合の検討において、積み上げ型の環境負荷インベントリ情報や技術データなどのボトムアップ型の情報と、産業連関表のようなトップダウン統計を組み合わせて、物量投入産出表の枠組みに組み入れることが有望とした判断を踏まえ、多様な地理的スケールにおける物質フローとこれに伴う資源消費や環境負荷を、「隠れたフロー」を含めて記述するための枠組みとして、マルチスケール物質フローモデル(MSMFM: Multi Scale Material Flow Model)の設計を行った。

まず、産業・技術間連関および地域間連関に係るテーマを意識し、データの利用可能性とテーマの重大性の両面から、事例研究対象として情報整備を進める主題について検討した結果、本研究の狙いに照らして重要と考えられるテーマの例として、下記のもの挙げられた。

- ・ 鉄鋼など基礎素材の生産に付随する海外での環境負荷の発生とこれら素材産業の海外移転に伴う変化
- ・ 産業間連携等による地域内、国内でのクローズドループを重視したリサイクルを推進した場合と、国際的なリサイクルを推進した場合との間での環境負荷、資源消費の比較
- ・ 燃料電池などの水素エネルギー利用、バイオマス利用など、主に地球温暖化対策に関連した技術の大量普及に伴う物質フロー変化
- ・ 日本における経済発展と主要物質の蓄積量推移との関係分析、経済急成長国との国際比較

なお、本項の後半に示すとおり、これらのうち第1の項目を事例研究の主な対象とした。

一方、先行研究から取り組んできた MFA 手法の得失をもとに、本研究で開発すべき手法が備えるべき要件を考察した。経済活動への資源投入量、経済活動から環境への排出物量をとらえる Economy-Wide-MFA は、長期的な経年変化が観察できるが、内部構造(部門間の物質フロー)が把握できないという欠点がある。一方、PIOT は内部構造が詳細に観察できるが、データ整備に要する労力から経年変化が容易には観察できないという欠点がある。両方の利点を供えた勘定、すなわち内部構造を持つ経年勘定が必要である。但し、詳細な内部構造を持つ経年勘定は理想的であるが、その作成は現実的ではない。その意味では、両者の中間に位置するものとして、ある程度の部門分解がなされた経年勘定の作成が、目指す姿の一つとなりうる。

こうした検討をもとに、マルチスケール物質フロー表の枠組みを設計した。この枠組みにおいて、対象地域のスケール・区分はデータが入手できる任意の範囲(マルチスケール)で自由に設定してよいように設計した。すなわち産業連関表のようにあらかじめ部門を固定するのではなく、生産プロセス、事業所、産業部門、国といったさまざまなスケールにおける物質フローとこれに伴う資源消費や環境負荷を記述する枠組みとした。ここに、先行研究で適用した、貨幣単位の産業連関表をもとに物質フローを推計する方法に加え、主要なプロセスごとの積み上げ型の個別技術データや、投入物と産出物の組成別の物質収支に基づく推計計算をもとに、実証データを組み入れられるような設計とした。

こうした基本設計をふまえ、投入、産出される原材料や製品(以下、物品と記述)の物質組成を明示的かつ整合的に取り扱うことが可能とすることなど、モデルの詳細設計を行った。なお、基本設計においては、図4に示すように、部門間の物質フローを経年的に扱えるように、フロー計算部とストック計算部から構成されるシステムを最終的な目標として提示したが、本課題の期間内では、ストック計算システムとの連携を意識しつつも、フロー計算部の設計・開発に注力した。

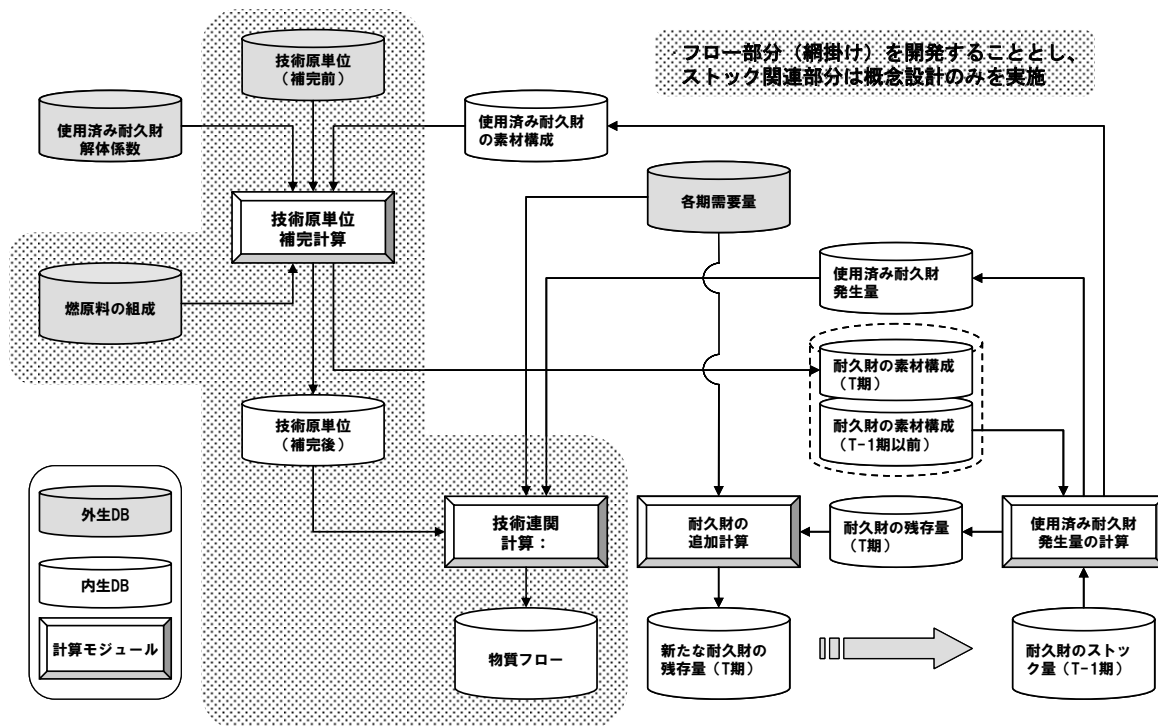


図4 物質フロー分析システムの全体構造の設計

物質フロー分析は、物品を質量などの単一の物量単位で取り扱う手法（狭義のMFA）と、特定の元素や化合物に着目する手法（SFA）に大別されるが、本研究ではこれらを組み合わせた構造を採用した。すなわち、物品を質量単位で扱い、その部門間取引を記述する物量投入産出表の構造を保持しながら、取引される物品に含まれる主要な元素の組成データ（例えば、鉄、炭素、水素、酸素、灰分などの含有率）をもたせた。さらに、物品に対してある技術プロセスを適用した場合の産出物（CO<sub>2</sub> 排出量や焼却残渣発生量など）をこの元素組成から自動的に計算する機能（環境負荷の内生的算定）をもたせるとともに、技術プロセスの投入物、産出物を記述した技術原単位データについて、元素組成ごとに物質収支を確認する機能をもたせた。こうして、技術プロセス（部門）単位で入出力の整合のとれたデータとした上で、部門間の投入、産出を記述し、産業連関分析と同様の逆行列計算によって、間接的に生じる物質フローの波及を計算できるシステムとした。これらのデータ、計算モジュールは Microsoft Excel および Microsoft Access 上で開発した。物品の組成データおよび技術プロセスの投入産出データのシステム上での表現例を図5に示す。

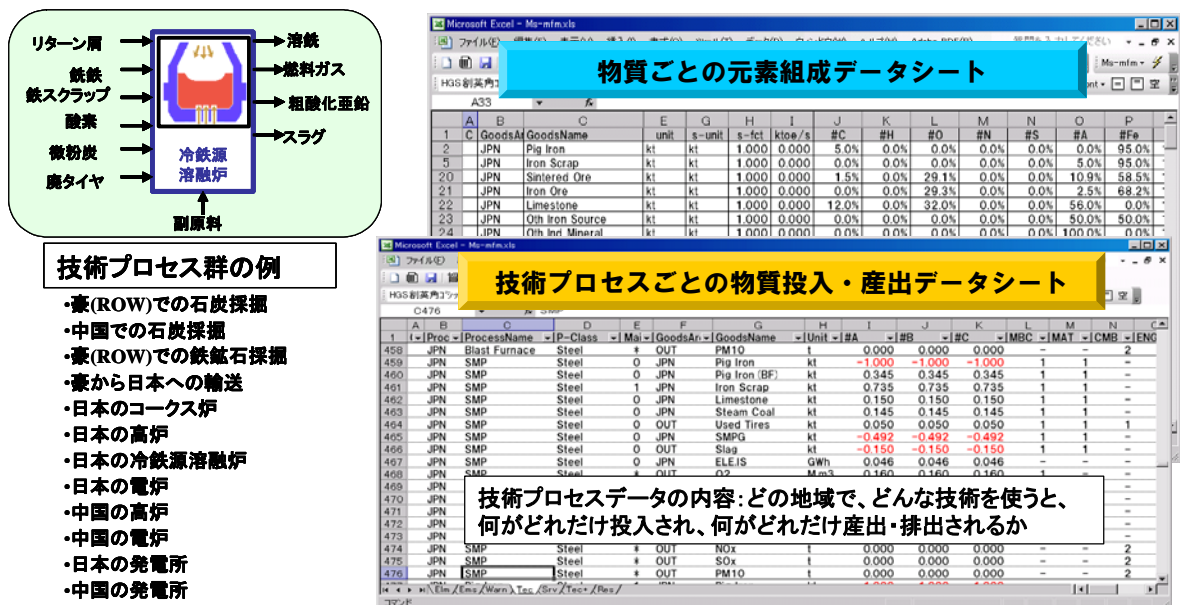


図 5 物品の組成データ、技術プロセスの投入産出データの格納例

2) 実証データ整備とモデル計算の試行

素材産業など、物質を大量に投入あるいは産出するプロセスを中心に、上記 1) で設計した分析システムに適合するデータを作成した。技術革新の効果分析サブモデルにおいて、粗鋼生産部門でのライフサイクルを扱っていることから、これと関連する各種工程を主な対象とした。データは、主要物量統計、ライフサイクルインベントリに関する各種研究論文・報告書及びホームページにより公表情報、国立環境研究所における既往の調査研究で整備した情報等から得た。対象年次は入手可能な直近一時点とした。

物質フローに影響を与える先導的なプロセスとして、事例研究で取り上げる冷鉄源溶解法 (SMP) について、分析システムに適合する技術データを作成した。データは、下記 (4) を分担した大阪大学、和歌山大学の研究者を通じて、対象技術の関連機関からのヒアリング等によって得た。

また、海外での資源の採掘から国内への輸送までの工程について、設計した分析システムに適合するモデルデータを作成した。資源の採掘工程にはいわゆる「隠れたフロー」のデータも含めた。データは、ライフサイクルインベントリに関する各種研究論文・報告書、本研究課題のサブテーマ 4 の担当機関等が収集・整備した情報等をもとに作成した。

以上で設計・試作したモデルと実証データをもとに、SMP 法が大量導入された場合の物質フローの変化を試算した。(4) で後述する内容と同様、CO<sub>2</sub> 排出量や埋立廃棄物量の変化を計算することに加え、「隠れたフロー」など、より広い範囲での物質フローの変化を追う点が特色である。SMP で用いる鉄屑の供給のシナリオの与え方によって、鉄鉱石採掘や石炭採掘に伴う隠れたフローの変化が、DMI (直接資源投入量) の変化に比べて大きく、技術導入による物質フロー変化を評価する指標として、隠れたフローを取り入れることの意義が示唆される結果を得た。

3) 実証データの拡充と日中両国における鉄鋼生産のシナリオ分析

以上の試行を踏まえ、最終年度には、環境負荷を生産地、需要地のいずれに帰属させるかを選択す

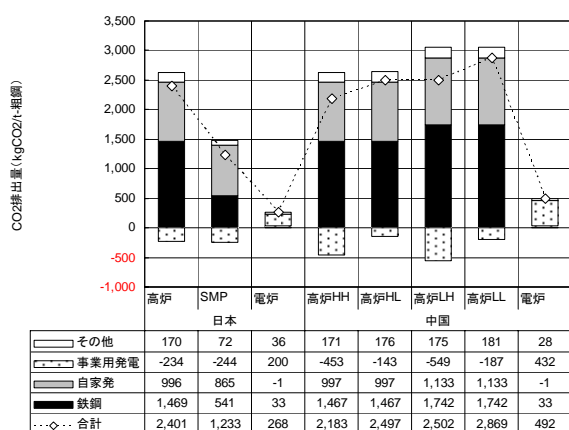


る機能などを追加したうえで、事例分析を行った。本課題全体を通じて、鉄鋼は、全てのサブテーマで何らかの形でとりあげた共通の研究対象であり、また日本と中国との間での貿易による環境負荷収支をサブテーマ（3）で詳細に取り上げている。こうしたことから、各サブテーマの成果を盛り込んだ事例分析対象として、日中両国における鉄鋼生産をとりあげた。

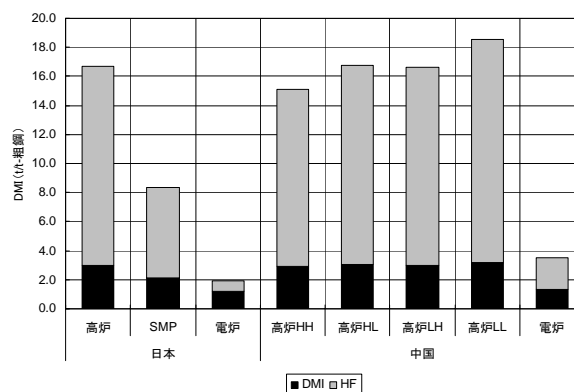
文献情報等から入力した技術プロセスごとの物質投入産出データをもとに、日本及び中国の粗鋼生産1トンあたりの環境負荷量を計算した。環境負荷はCO<sub>2</sub>排出量、隠れたフロー量（HF）、直接物質投入量（DMI）、物質関与総量（TMR=DMI+HF）の4項目を対象とした。なお、この分析にはMSMFMのレオンチェフ逆行列による解法を使用している。対象とする製鉄技術は、日本について高炉、SMP、電炉の3種類、中国について高炉、電炉の2種類とした。中国の製鉄技術については、情報不足から代表的なプロセスデータを一意に設定することが難しいが、技術の効率の違いが物質フローや環境負荷に及ぼす影響について分析する観点から、コークス炉、高炉、炉ガスを利用した自家発電（以下、炉ガス発電）の3種類の技術プロセスについて、以下のようなケースを設定した。

表3 中国における高炉関連プロセスの効率設定

コークス炉と高炉への石炭投入原単位	炉ガス発電の効率	ケース名（略記）
日本と同じ	日本と同じ	高炉 High-High（高炉 HH）
	日本の半分	高炉 High-Low（高炉 HL）
日本の1.1倍	日本と同じ	高炉 Low-High（高炉 LH）
	日本の半分	高炉 Low-Low（高炉 LL）



(a)CO<sub>2</sub>排出量



(b)TMR（物質関与総量）

図6 各技術による粗鋼生産1トンあたりの環境負荷

これらの設定下での粗鋼生産1トンあたりの環境負荷指標の計算結果を図6に示す。なお、ここでは炉ガス発電で得た電力分だけ、系統電力での発電量を減らす設定とした。中国では系統電力が石炭中心であるのに対し、日本ではCO<sub>2</sub>排出量や物質関与総量のより少ない一次エネルギーが使われている。その結果、高炉関連プロセスの技術水準が日中両国で同じ場合、副生ガス利用分も含めた全体で

の CO<sub>2</sub> 排出量は、むしろ中国のほうが小さい結果となる。

こうした技術水準の差異の含意について考察するため、シナリオ分析を実施した。日中両国の近未来の一人あたり粗鋼消費量を想定し、その需要を満たすように、これら両国の生産量を変化させた。日本については、生産量1億トンを中位とし、その0.5倍、1.5倍のケースを設定した。これは大胆な幅の設定であるが、中国の需要を5億トンと設定しており、増減させた幅はそれに対しては1割でしかない。2国間に技術格差がある場合、すなわち上記の高炉 LL のようなケースの場合、日本での製鉄量を増やしたほうが、日本で発生する環境負荷は増えるが、両国合計での負荷量は減る方向に働く。現在のように排出された場所で国の排出量を計算する方法ではなく、需要国が排出したとみなす計算とした上で、その量の削減する政策をとれば、1国だけでなく全体としての排出量を減らすインセンティブが働くと考えられる。一方、2国間に高炉製鉄に関して技術格差がない場合は、上述の炉ガス発電の効果のため、中国の生産を増やすほうが両国合計での CO<sub>2</sub> 排出量は低下する。なお、炉ガス発電で電力が供給された場合に、どのような種類の電力が代替されるかの設定次第で結果は異なり、また炉ガス発電の技術レベル（効率）にも結果は依存する。いずれにしても、副産物の使途が結果に大きく影響する本事例では、投入・産出物のバランスを統合的に扱える物質フローモデルの利点が発揮されている。

一方、CO<sub>2</sub> 排出量や、鉄鉱石、石炭の採掘時の隠れたフローを削減するためには、電炉や SMP など鉄屑からの製鉄・製鋼技術が効果的であろうことが、図6から期待される。実際には、図6のような表現では見逃されがちであるが、鉄屑の供給量が負荷低減のポテンシャルの制約となる。中国では、過去からの鉄鋼のストック量がまだ少なく、寿命を終えて回収される老廃屑の量は、現在の粗鋼生産需要より1桁少ない。日本では相対的には鉄屑の発生量が多いが、日本国内に蓄積させた鉄の総量は、現在の中国の粗鋼需要の3年分程度にすぎない。本研究では、鉄屑から高級鋼を生産しうる点で SMP に着目したが、中国での非高級鋼の需要が大きいために、鉄屑はその需要を満たすだけでも足りない。このため、こうした需要下では、SMP を大量に普及することによる環境負荷低減効果は確認できなかった。将来、中国でも老廃屑が大量に発生し、需要における高級鋼の割合が増えた場合には、SMP のような技術の優位性が見込まれる。

#### （4）高度な鉄リサイクル技術を核とした連携シナリオの環境保全効果の評価

##### 1) 対象技術の特徴及び技術の適用に伴う物質フロー変化

エコタウン事業の展開の中では、既存の生産インフラを有効に利活用するなど、地域資源に着目した施策展開が求められている<sup>2)</sup>。基盤となる動脈や静脈の施設に新しい革新技術を導入して、環境インフラとして活用することにより環境効率を飛躍的に高め、効率的な事業化を図ることが狙いとされる。例えばひょうごエコタウンでは、鉄鋼生産の革新技術によって循環資源を新規資源代替として利用する、動脈と静脈の一体的な資源循環型の鉄鋼生産への転換が図られている。

本分析では、生産インフラでの先導的な高度リサイクル技術の導入と、使用済み製品から有用資源を回収する転換技術・施設を有効に連携させる地域産業コンプレックスの形成シナリオが、生産技術革新を介した産業連関構造の変化を通じて集約的にもたらすマクロスケールでの資源生産性などの環境保全性を評価した。ここでは、金属資源の代表である鉄に着目し、スクラップ鉄を原料として薄鋼板を生産する革新的な鉄鋼生産技術である冷鉄源溶解法を取り上げ、既存の生産インフラの活動に伴う財・サービスの取引を表す産業連関表を物質フロー側に拡張した廃棄物産業連関表を用いて、物質

フロー変化と環境負荷削減効果を分析した。

冷鉄源溶解法は、既存の転炉を活用し、廃棄物からの投入原料として市中鉄スクラップや廃タイヤを利用して高品質の薄鋼板を製造する製鉄法<sup>3)</sup>である。これにより産出される溶銑を用いて生産される粗鋼は、リサイクル過程でありながら高級鋼板の製造に利用される。つまり、通常の電炉法によるスクラップのダウン型リサイクルではなく、スクラップを新規資源代替として利用し、高品位の鉄鋼製品の製造を可能とする点が特徴である。

## 2) 分析方法

技術変化と物質フロー変化、及びこれを通じた環境負荷や環境影響の変化の関係を記述するための手法として、本研究ではWI-O表を援用した技術－物質フロー連結の評価フレームを構築した。WI-O表は中村ら<sup>4)</sup>によって開発された勘定モデルであり、社会経済活動の貨幣フローを記述した産業連関表を拡張し、廃棄物の発生や処理・再資源化部門を付加したものである。廃棄物産業連関分析モデルにおいて、投入係数表を用いた生産と廃棄物処理の需給均等式は、式(9)で表される。

$$\begin{pmatrix} A_0 & A_z \\ G_0 & G_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_f \\ S'W_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix} \quad (9)$$

但し、 $A_0$ ：動脈部門の投入係数行列、 $A_z$ ：動脈部門から廃棄物部門への投入係数行列、 $G_0$ ：動脈部門からの廃棄物発生係数行列、 $G_z$ ：廃棄物処理部門からの廃棄物発生係数行列、 $X$ ：動脈部門の生産額ベクトル、 $Z$ ：廃棄物処理量ベクトル、 $X_f$ ：最終需要ベクトル、 $S$ ：廃棄物を廃棄物処理に対応させる配分行列（上付添字'は転置を表す）、 $W_f$ ：最終需要部門からの廃棄物発生係数行列

この式(9)を  $X$  と  $Z$  について解くことにより、式(10)を得る。

$$\begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I - A_0 & -A_z \\ -S'G_0 & I - S'G_z \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_f \\ S'W_f \end{pmatrix} \quad (10)$$

これにより、所与の財・サービスの最終需要  $X_f$  及び最終需要からの廃棄物処理量  $S'W_f$  が誘発する生産額及び廃棄物量が計算でき、これに生産額、廃棄物量あたりの内包二酸化炭素、内包埋立量誘発係数を乗じて、誘発二酸化炭素排出量、誘発埋立量を求めることができる。

以上は3つの事例分析に共通した廃棄物産業連関分析の手法であるが、本分析では動脈の鉄鋼産業における生産技術の変化を扱うため、次の手順で廃棄物産業連関表の銑鉄部門の拡張をおこなった。まず、既存の生産技術と先導技術別に投入係数を算定した。次いで、従来の銑鉄生産部門の1割が冷鉄源溶解炉に置き換わると仮定して、各技術による銑鉄生産量を掛け合わせた。最後に、一つの列部門（銑鉄部門）として統合し、WI-O表上に表現した。

## 3) データの詳細

冷鉄源溶解炉に加えて、廃タイヤガス化事業や廃自動車の高度分別事業など、使用済み製品から先導技術への投入資源を回収する転換技術の施設を有効に連携させることで、高度循環のシステムを形成することを想定し、以下の地域産業コンプレックスの形成シナリオを作成した。

### a.シナリオ1：電炉によるカスケード型の鉄リサイクル（比較対象ケース）

スクラップ鉄は電炉でリサイクルされ、棒鋼や型鋼に転換される。粗鋼生産は、現状の高炉－転炉

一貫プロセスと電炉による。廃家電は破碎部門にて処理されるが、高度分別技術は適用されず、冷鉄源溶解炉との循環資源のやり取りもない。廃タイヤは破碎ダストとして埋立処分される。

#### b.シナリオ2：先導技術（冷鉄源溶解炉）の導入シナリオ

現在、国内銑鉄生産量の約 1.5%を占める先導技術が、国内のエコタウンに隣接立地する複数の製鉄所に普及し、そこでの先導技術による銑鉄生産が国内総生産量の 10%を占めるようになると想定する。ここでは、鉄鉱石の代わりとなる鉄スクラップに加え、廃タイヤが石炭代替材として投入され、発生するガスは製鋼プロセスの燃料として利用される（図7）。なお、WI-O表では、鉄スクラップを冷鉄源溶解炉部門に優先的に配分させることで生じる電炉部門での鉄スクラップ投入量の減少に対して、銑鉄が補完的に投入されて生産額が一定に保たれる構造としている。

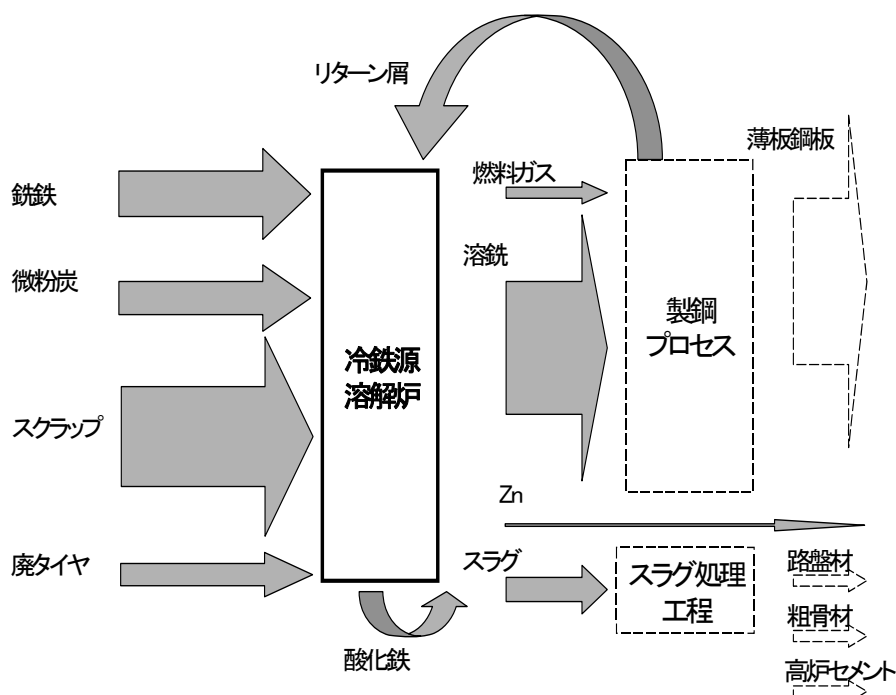


図7 先導技術による高質リサイクル

#### c.シナリオ3：廃自動車リサイクル連携シナリオ

さらに廃自動車リサイクルと連携し、廃自動車の解体で生じるAプレス（廃車ガラをプレスしたもの）を冷鉄源溶解炉に投入する。また、Aプレスの選別により生じる自動車シュレッダーダストも、石炭と同等なレベルにまで質を高められ、再利用される（図8）。本シナリオでは、動脈の鉄鋼産業が自ら生産した材が強く結びつく使用済み自動車の還流を担うという、動脈と静脈が一体化した循環型生産拠点への転換が図られる。なお、従来のWI-O表の「破碎-自動車」部門では、廃自動車は全量が破碎され、その過程で約 20%（重量比）の有用部品が回収、約 40%が金属回収され<sup>5)</sup>、残りの破碎ダストは埋立処分される設定となっている。

#### d.シナリオ4：廃自動車・家電連携シナリオ

廃自動車連携に加え、隣接する家電リサイクル拠点において高度分別・回収される廃プラスチック

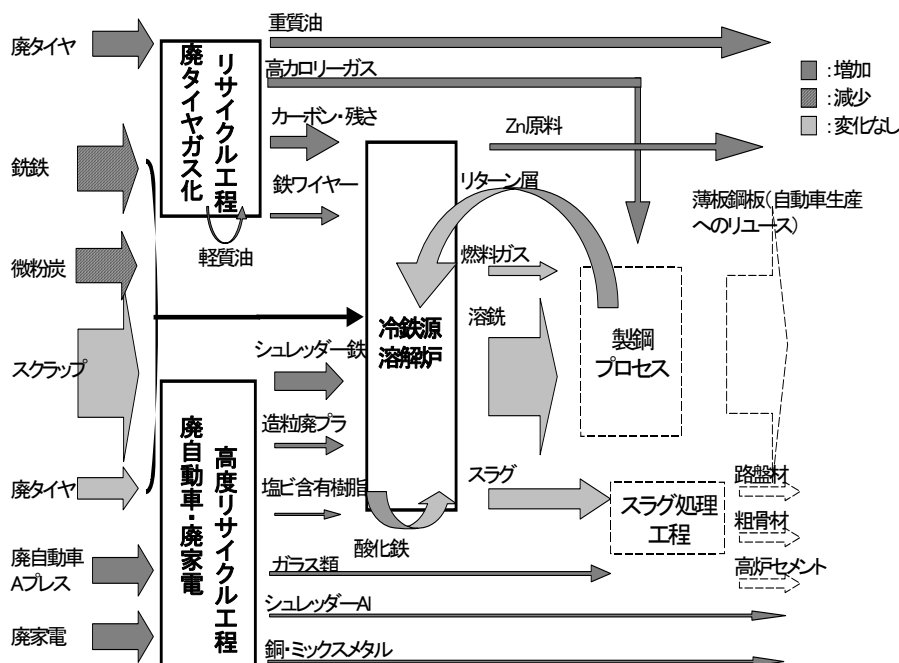


図8 先導技術を核とした産業連携

4.6万トンが、冷鉄源溶解炉での還元剤の微粉炭代替として投入される。

e.シナリオ5：廃自動車・廃家電リサイクル、及び廃タイヤガス化連携シナリオ

さらに廃タイヤガス化事業と結びつくことで、廃タイヤに含まれる良質なスチールコードが還元状態で回収・再利用され、冷鉄源溶解炉で高質リサイクルされるとともに、高カロリーガスや熱分解油、カーボン残渣も回収され、製鋼プロセスで有効利用される。すなわち、鉄の高質なりサイクルとともに、化石燃料由来の廃プラや廃タイヤ（ゴム）もケミカル・リサイクルに回され、燃焼や熱回収より上位の工業原料に再生利用することを狙ったシナリオである。

各シナリオの冷鉄源溶解炉における銑鉄生産1tあたりの資源・エネルギーの物質収支を表4に示す。先行研究<sup>6)</sup>において明らかにされた資源・エネルギーの物質収支について、追加調査を実施し、補正したものである。ここで得られたもののうち、動脈部門間で取引されるものは、物量表から得られる生産数量あたりの生産金額を用いて、銑鉄生産金額あたりの投入あるいは産出金額（貨幣）を算定する。静脈部門から投入されるもの、および静脈部門へ産出されるものについては、銑鉄生産金額あたりの投入あるいは産出量（物量）に換算して、廃棄物粗投入および粗排出係数とする。なお、冷鉄源

表4 冷鉄源溶解炉における銑鉄生産1tあたりの資源・エネルギーの物質収支

投入/産出物		シナリオ(2)	シナリオ(3)	シナリオ(4)	シナリオ(5)
動脈部門からの投入	銑鉄(t)	0.345	0.309	0.309	0.303
	微粉炭(t)	0.150	0.139	0.129	0.114
	電力(百万kWh)	4.58E-05	4.58E-05	4.58E-05	4.58E-05
静脈部門からの投入	スクラップ(t)	0.633	0.668	0.668	0.675
	廃タイヤ(t)	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
	リターン屑(t)	0.103	0.103	0.103	0.103
動脈部門への産出	溶鉄(t)	1.00	1.00	1.00	1.00
	燃料ガス(t)	0.492	0.492	0.492	0.492
	亜鉛原料(t)	3.50E-03	3.50E-03	3.50E-03	3.50E-03
静脈部門への産出	スラグ(t)	0.150	0.150	0.150	0.150
	レンガ(t)	3.33E-05	3.33E-05	3.33E-05	3.33E-05

溶解炉から排出されるスラグの成分調整のために冷鉄源溶解炉に投入される副原料（CaO や MgO 他）など、表 4 に示す投入産出物以外の投入係数は、従来の銑鉄部門と同じであると仮定した。

#### 4) 分析結果

##### a. 誘発埋立地面積

各シナリオの誘発埋立地面積について、比較対象シナリオからの変化量を図 9 に示す。鉄スクラップ利用量一定の下で追加的な銑鉄生産活動が生じるため、銑鉄部門におけるリサイクル型生産技術の導入によって埋立処分量はマクロ全体で約 497 万平米（2.65%）増加する結果となった。しかし、廃自動車リサイクルや廃タイヤガス化などと連携し、産業コンプレックスを発展させていくことによって ASR 等の埋立が回避され、埋立処分量を削減することができる。

ただし、分析に際して国内全体で利用可能なスクラップ量は一定とし、電炉など既存部門と先導技術部門に配分される形としたため、これまで低質な異なる用途に再利用するカスケード型のダウン・リサイクルされていた循環資源が、動脈側の生産部門において高度な水平リサイクルされることの効果は、ここでは必ずしも現れていない。また、電炉減産によって余剰になるスクラップ鉄や、建設物の更新期を迎えることで発生する市中スクラップ鉄などの回収量の増加が将来的に見込まれることを考えると、冷鉄源溶解炉と電炉部門の間でのスクラップ鉄の取り合いが回避されることも十分想定されうる。

##### b. 誘発 CO<sub>2</sub> 排出量

誘発 CO<sub>2</sub> 排出は、鉄鋼生産の先導技術の導入によって約 125 万 t-C（国内 CO<sub>2</sub> 総排出量の 0.41%）増加するが、これは還元剤として投入される石炭や廃タイヤ量の増加に起因すると考えられる。しかし、廃自動車・家電リサイクルや廃タイヤガス化と連携し、そこで回収される循環資源を天然資源代替の原料として活用することで、誘発量が削減されることがわかる。（図 10）

##### c. 資源生産性の改善効果

本分析では、埋立地面積削減の直接的な効果からすると、先導技術による鉄スクラップの水平リサイクルは電炉部門でのカスケード・リサイクルに対してさほど優位性を示さない。鉄鋼生産インフラの先導技術は、鉄スクラップを天然資源代替の製鉄原料として利用し、高品位の鉄鋼製品の製造を可能とする点に特徴があるため、むしろ天然資源投入の断面での効果が期待される。

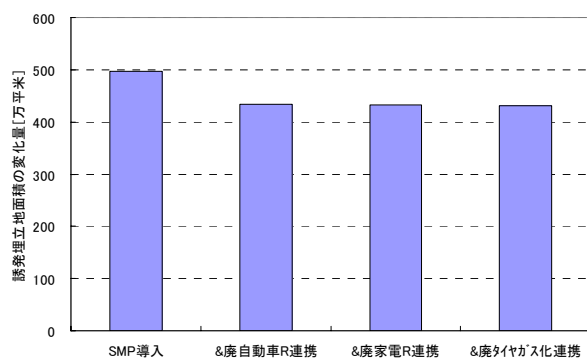


図 9 誘発埋立地面積の変化

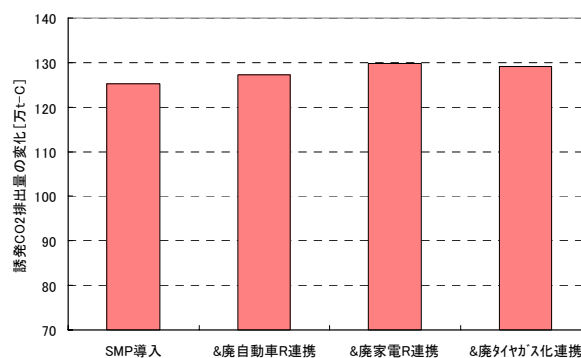


図 10 誘発 CO<sub>2</sub> 排出量の変化

そこで、鉄鋼関連部門における天然資源投入量（鉄鉱石や化石資源などを金額ベースで把握）を分母にとり、生産額／鉄鉱石等天然資源投入金額で表される鉄鋼関連部門の資源生産性をシナリオごとに算定した（図 11）。天然資源投入量は先導技術の導入によって約 9.2%、さらに産業連携を強化して廃タイヤガス化連携までを含めると約 12.5%の削減効果がもたらされ、その結果として、資源生産性はトータルで約 14.3%向上する結果となった。すなわち、電炉部門への追加的な銑鉄投入に比して、冷熱源溶解炉での鉄スクラップ利用による銑鉄代替の効果が大きく、結果として天然資源投入量が削減され、資源生産性が向上することが定量的に明らかになった。

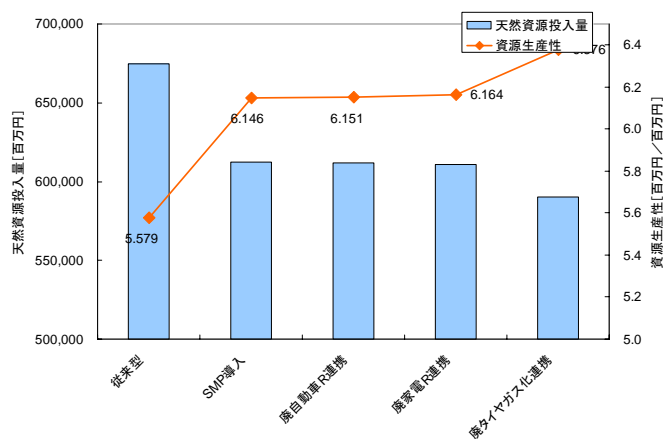


図 11 シナリオごとの資源生産性

#### （5）セメント産業部門での廃棄物燃料による石炭代替が及ぼす CO<sub>2</sub> 排出への影響の分析

##### 1) 対象技術の特徴及び技術の適用に伴う物質フロー変化

セメントは、世界で鉄生産量の 2 倍に相当する 10 数億トンが生産されている建設材料である。通常は主原料である石灰石に粘土、珪砂、酸化鉄原料を加え、キルンで高温焼成後、粉砕、仕上げ工程を経てセメントとして生産される。発電所からの石炭灰や製鉄由来の高炉スラグ、下水汚泥、焼却灰などは、セメント主原料と組成が似ているため、以前からセメント原料として再資源化されてきた。これら原料代替に加え、近年では廃タイヤ、廃油、廃プラスチックなどの可燃性廃棄物が石炭燃料の代替として活用されるようになり、資源リサイクルを担う産業として重要な役割を果たしている。また、エネルギー多消費型のセメント産業では、地球温暖化防止などの社会的背景をもとに、積極的な省エネルギー対策、化石燃料消費の削減に業界として取り組んでいる。

本分析では、バイオマス系及び他の可燃性廃棄物受入れの全国的な展開が、他の産業との連関を通じて国全体に及ぼす影響を分析することを目的とする。そこで、建設投資動向から将来のセメントへの需要を推定し、技術的に可能とされるバイオマス系廃棄物による石炭代替のレベルを把握した。その上で、廃棄物産業連関分析を用いて、将来の最終需要に対してセメント産業部門で廃棄物を燃料として活用し、石炭代替を進めることが CO<sub>2</sub> 排出量及び内包埋立廃棄物量に及ぼす影響を分析した。

##### 2) 分析方法及びデータの詳細

###### a. セメント需要の将来動向

セメント需要は、大きく分けて国内の建設投資に伴う需要と、セメントの海外輸出に伴う需要とがある。過去の建設投資動向は、国土交通省がまとめる各年の「建設投資見通し」を、将来 2010 年度の建設投資動向は、建設経済研究所の「建設市場の中長期予測」<sup>7)</sup>を用いる。ベースとなる 2001～2010 年の GDP 成長率は中位推計ケースの年率 1.5%、政府の建設投資は今後の社会資本整備の状況を考慮して伸び率 0%での推移とする。一方、セメントの海外輸出については、成長曲線として一般的に知



られるロジスティック曲線を過去の輸出実績にあてはめて、2010年値を推計した。分析の結果、 $a=1.11$ 、 $b=3,695$ 、 $c=153.7$ 、相関係数 0.919 を得た。

$$Y = b / (1 + c * \exp(-aX)) \tag{11}$$

(但し、Y：セメント輸出量、X：年数、a、b、c：定数)

以上より、建設投資、輸出需要及びセメント生産量の将来推計値（2010年）を図12に示す。建設投資は1995年には80兆円であったものが2004年現在では52兆円まで減少し、2010年には約50兆円まで減少すると予測される。これに伴い、2010年のセメント国内需要は2004年比で3.7%減少して54,664千トン、アジア向けなどの輸出需要は、ロジスティック回帰により2004年比で7.9%増加して11,192トンと推計され、2010年での国内生産量合計は65,856千トンと予測された。

### b.可燃性廃棄物によるセメント燃料の代替

セメント産業における各活動量の1995年からの変化を図13に示す。セメントの国内販売量が減少する一方で、廃棄物原料の投入割合は1995年比で1.5倍に大きく拡大していることがわかる。また、2010年における可燃性廃棄物の構成割合を図14に示す。経年的な構成割合の変化から、一定の増減傾向がみられる廃タイヤ、再生油、廃プラ、木くずについてはロジスティック回帰により推計し、肉骨粉及び廃油は、近年の構成割合がほぼ同じレベルで推移していることから、2004年度におけるセメント生産量に対する投入比率が2010年でも維持されるものとして推計した。さらに、表5に示す各バイオマス系廃棄物の低位発熱量<sup>8)</sup>から投入廃棄物重量を得て、廃棄物産業連関表に重量ベースで計上する。

バイオマス系廃棄物の受入れ可能性については、熱量換算15%を上限として、現状の4.3%から5、10、15%と段階的に代替率を設定する。また、投入される廃棄物が多様になると、当然ながらセメン

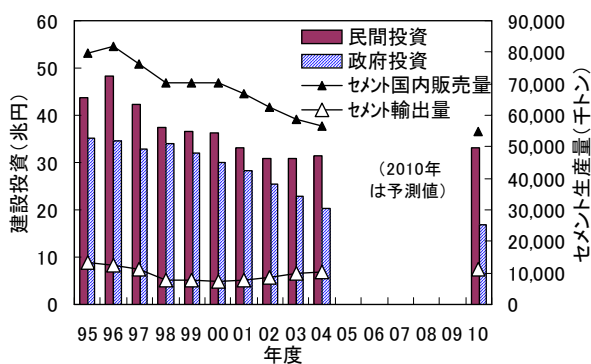


図12 建設投資に伴うセメント国内生産と輸出量

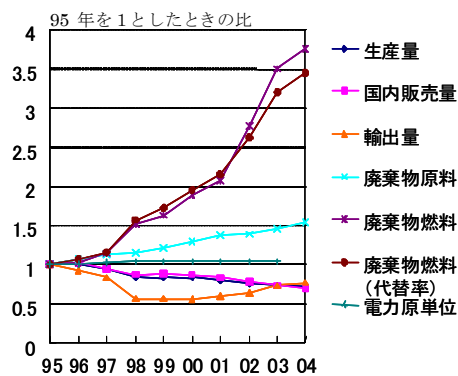


図13 セメント産業における各活動量の経年変化

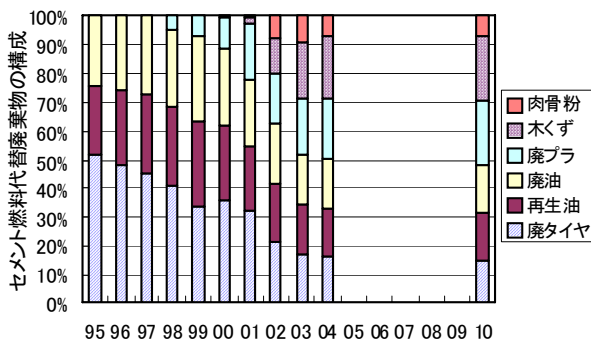


図14 セメント燃料代替廃棄物の構成変化

表5 各バイオマス系廃棄物の低位発熱量

可燃性廃棄物種類	廃棄物連関表の対応部門	低位発熱量 (kcal/kg)
木くず	木くず	3,437
肉骨粉	動植物性残渣	4,057

ト生産過程の前後で原料投入前での破碎、分別等に起因する電力消費の増大が起こる。1995年でのセメント1tあたり電力消費原単位は95.1kWh/tであったのが1999年には99.6kWh/tに上昇している。本分析では、この上昇分をそのまま可燃性廃棄物の燃料代替量に比例させており、燃料代替を最大15%に拡大した場合にはさらに6.0kWh/tの電力消費拡大となる。

以上を基礎データとして、廃棄物産業連関分析を実施した。分析方法については、前節2)で示した通りである。本分析では、バイオマス系廃棄物によるセメント燃料の石炭代替の拡大に伴い、石炭に相当する「その他鉱業」部門からセメント部門への投入量を削減する一方で、セメント部門への廃棄物粗投入行に投入される各廃棄物量を計上し、かつバイオマス系廃棄物を含む各可燃性廃棄物の最終処分量を削減して、廃棄物の物質収支を整合させる。なお、ベースとなる2010年の廃棄物排出係数は現状と同じと仮定している。

また、廃プラなどの投入廃棄物の前処理等で電力投入が増加していることを考慮して、セメント協会のデータ<sup>9)</sup>より1995年及び2003年の廃棄物あたり電力消費(kWh/t)と、その際の石炭換算%の値から石炭換算%が1%上昇する際の電力消費の限界値を0.398kWh/t/%と設定する。その上で、石炭換算での可燃性廃棄物投入%値が上昇するに従い、電力投入がそれに比例して増大すると仮定し、この増加分を廃棄物産業連関表の「電気業」部門から「セメント」部門への投入係数の増加分として計上する。

### 3) 分析結果

#### a. バイオマス系廃棄物の誘発CO<sub>2</sub>負荷量への影響

バイオマス系廃棄物による石炭代替の割合を1995年現状レベル(木くず、肉骨粉の利用率0、ケース1)から2010年において2004年までの導入割合の傾向を延長させたレベルの(同利用率熱量換算4.3%、ケース2)、さらに5%~15%(ケース3~5)まで5%づつ段階的に増加させたときの誘発CO<sub>2</sub>排出量の変化を図15に示す。セメントは主にコンクリート構造物などに投入される中間製品なので、建設、土木等の最終需要を通して間接的に誘発される。原単位については、廃棄物燃料による石炭代替により、前処理等による電力消費増加はあるものの、それを含めても木くずや肉骨粉などのバイオマス系廃棄物による化石燃料代替などの効果によりセメント生産額あたりの直接CO<sub>2</sub>排出原単位は、ケース1:28.3t-C/百万円⇒2:28.2⇒3:28.1⇒4:27.9⇒5:27.7と削減される。さらにCO<sub>2</sub>総排出量で見ると、2010年水準(ケース2)から更に熱量換算15%までバイオマス利用が拡大することにより486千t-C削減されるものと推計された。これは埋立廃棄物量の削減にも寄与し、2010年水準(ケース2)からケース5でさらに41万トン削減されると推計される。

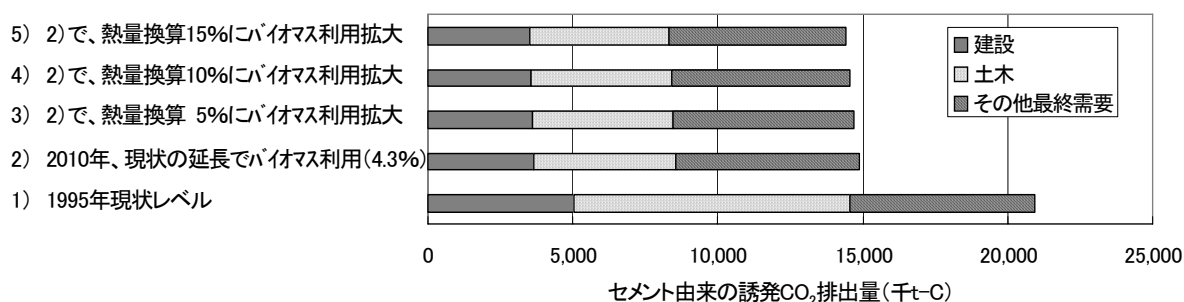


図15 バイオマス系廃棄物による燃料代替に伴う誘発CO<sub>2</sub>排出量の変化

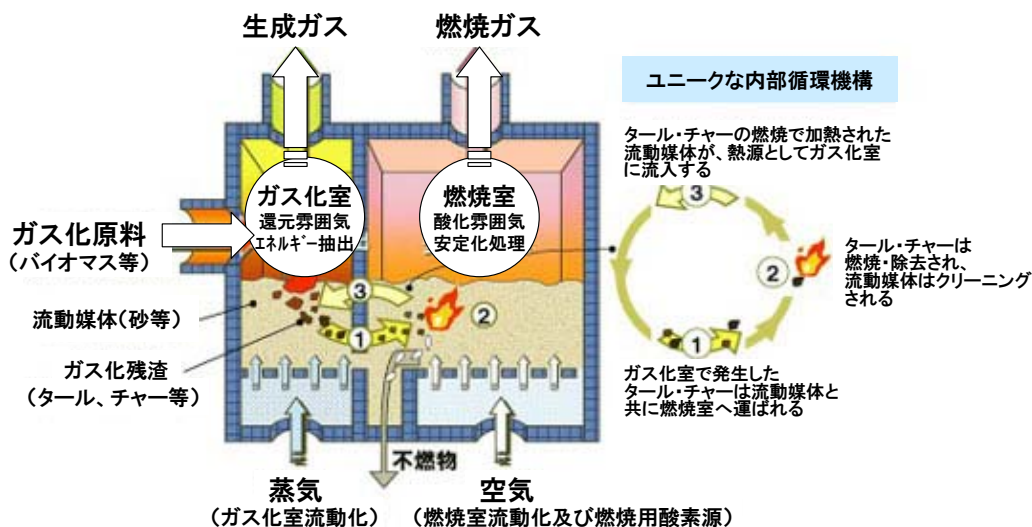


図 16 内部循環流動床ガス化技術のしくみ

#### b. 誘発負荷量に関する考察

誘発炭酸ガス排出量削減量 486 千 t-C のうち 415 千 t-C は直接排出量の削減効果であり、71 千 t-C は誘発量で、化石燃料の生産・流通の回避や、廃棄物の埋立削減に伴う廃棄物輸送回避など間接的な削減効果を示す。415 千 t-C の直接排出削減量は、セメント産業のエネルギー起源炭酸ガス排出量 5,749 千 t-C の約 7% を占めるものであり、毎年数十億円規模で行われているエネルギー代替廃棄物関連の設備投資の意義づけを示す値と考えられる。さらに、自産業だけでなく他産業を含む間接的な炭酸ガス削減への波及効果が高いこと、また炭酸ガス排出削減だけでなく最終処分量の削減にも寄与することが示すものである。

#### (6) 下水汚泥ガス化に伴う下水道部門からの CO<sub>2</sub> 誘発量の変化

##### 1) 対象技術の特徴及び技術の適用に伴う物質フロー変化

現在、下水道事業分野では大量のエネルギーが消費され、そのほとんどが電力により賄われており、その量は国内電力消費量の約 0.7% を占める規模に相当すると言われている。下水道は都市の基盤的な環境インフラであることから、地球温暖化防止を考える上で、下水道事業におけるエネルギー有効利用、CO<sub>2</sub> 削減を考えることは重要な意味をもつ。また、近年、エネルギー資源としての下水汚泥に着目し、メタン発酵、ガス化、等のさまざまな先導技術によるバイオマス利活用の技術開発や実証への取り組みが進められている。そこで、本研究では、このような背景のもと、バイオマス資源としての下水汚泥のガス化技術を取り上げ、技術装置のもつ規模効果を考慮し、廃棄物産業連関分析を用いてエネルギー転換に伴う物質フロー変化及び二酸化炭素誘発量変化を分析する。

本分析では、熱エネルギーのカスケード利用による下水汚泥からの高効率エネルギー回収を行う先導技術の代表として、内部循環流動床ガス化技術 (ICFG: Internally Circulating Fluidized-Bed Gasifier、図 16 参照)<sup>10)</sup> を取り上げ、下水汚泥を内部循環流動床ガス化炉 (ICFG) によりガス化し、ガスエンジン発電、コージェネレーション利用する技術システムの適用による物質フロー変化及び環境負荷変化について分析する。

ICFG 最大の特徴は、仕切壁により炉内をガス化室と燃焼室とに分離している点である。同一の室内でガス化と燃焼を行う従来の部分燃焼型ガス化炉では、生成ガスが燃焼ガスと混ざり希釈されるのに対し、ICFG では生成ガスを分離して高濃度のまま抽出できる。この他、ICFG 燃焼室より排出されるガスには未燃分が含まれないので、後段に複雑な排ガス処理設備が不要なこと、燃焼用の酸素源としてコストのかかる純酸素ではなく、空気が使用可能などのメリットも得られる。加えて、ICFG では単純に燃焼させる量が減ることや、無酸素状態のガス化室では高い温室効果を持つ亜酸化窒素の発生量を抑制できることなど、地球温暖化抑制に対しても優れた特性を有する。

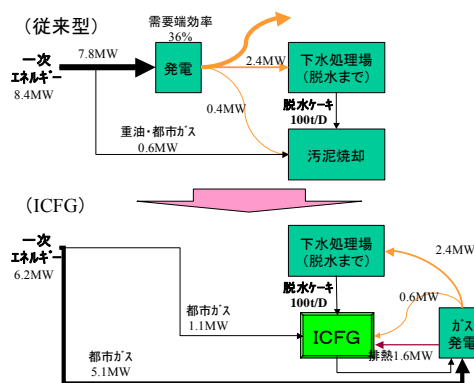


図17 下水汚泥焼却・ガス化のフロー変化

## 2) 分析方法及びデータの詳細

廃棄物産業連関分析については、(1)で示した通りである。まず、ガス化炉の実証プラント運転データより、従来型汚泥焼却と汚泥ガス化との物質・エネルギーフローを比較した(図17参照)。次に、下水道統計<sup>11)</sup>をもとに、既存下水汚泥焼却炉において20年の更新周期を仮定した場合の規模別の更新スケジュールを求め、ケース1：総処理能力200t/D以上の汚泥焼却炉を代替、ケース2：総処理能力100t/D以上の汚泥焼却炉を代替、ケース3：総処理能力50t/D以上の汚泥焼却炉を代替、の3ケースでのガス炉に代替可能な規模を汚泥処理能力ベースで推計した。ケース毎に、下水汚泥投入量、都市ガス投入量、電力回収量、汚泥焼却用の重油代替量、機器の維持補修需要を求め、これらを廃棄物産業連関表の下水道部門における石油製品部門(No.20)、電気業部門(No.62)、ガス業部門(No.63)からの投入係数変化として計上し、あわせて、都市ガスの追加投入及び汚泥償却用の重油削減を考慮した下水汚泥部門での二酸化炭素直接排出係数変化を推計、計上した。

## 3) 分析結果

### a. 下水汚泥ガス化に伴う下水道部門のCO<sub>2</sub>直接排出量変化

ガス化炉からの生成ガス発電システムの運転に必要な追加的な都市ガス投入に伴い、電力投入が削減される一方で、直接CO<sub>2</sub>排出量は現状より増加する(図18参照)。一方、ケース1の200t/D規模からさらに100t、50t規模へと適用対象を拡大すると冷ガス効率(生成ガス収率)及び熱ロスの削減効率は低下するため、CO<sub>2</sub>直接排出量はさらに増加する。

### b. 下水汚泥ガス化に伴うCO<sub>2</sub>誘発負荷量の変化

都市ガスの追加投入により下水道部門の直接CO<sub>2</sub>排出係数は増加するものの、助燃用の燃料や電力等を削減させることができるため、直接・間接排出を併せた誘発負荷量で評価すると、全体で18.5～23.2万トン-C(下水道部門からの誘発CO<sub>2</sub>負荷量の6～8%)を削減することができる(図19参照)。下水道業部門以外に、化学、電力部門等での間接負荷削減の効果も大きい。

都市ガスの追加投入により下水道部門の直接CO<sub>2</sub>排出係数は増加するものの、助燃用の燃料や電力等を削減させることができるため、直接・間接排出を併せた誘発負荷量で評価すると、全体で18.5～

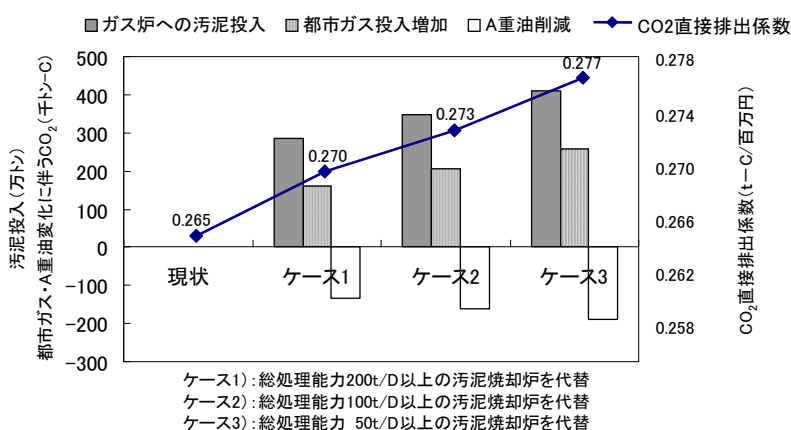


図 18 下水汚泥ガス化に伴う下水道部門の CO<sub>2</sub> 直接排出量変化

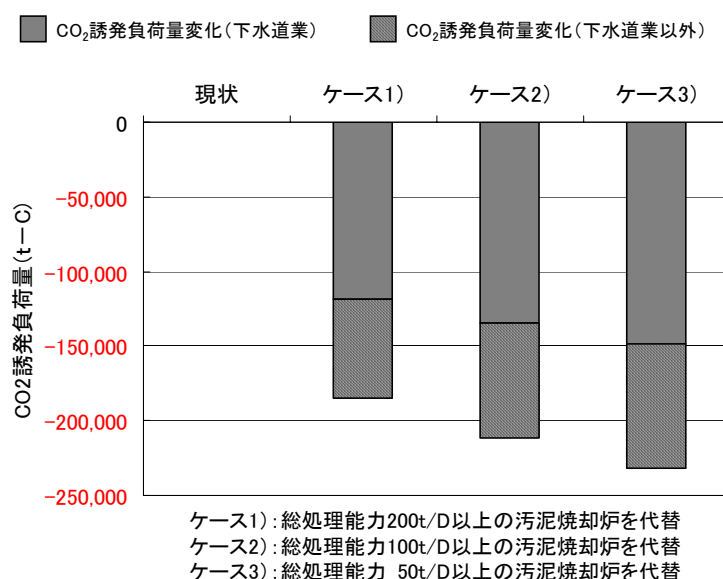


図 19 下水汚泥ガス化に伴う CO<sub>2</sub> 誘発負荷量の変化

23.2 万トン-C(下水道部門からの誘発 CO<sub>2</sub> 負荷量の 6~8%)を削減することができる事が分かる(図 20 参照)。下水道業部門以外に、化学、電力部門等での間接負荷削減の効果も大きい。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究では、手法面では物質フロー分析 (MFA)を中心に据えつつ、MFA と密接に関わりをもつ産業連関分析(IOA)、ライフサイクルアセスメント(LCA)を組み合わせる適用することが有用であることを示した。こうしたシステム分析手法の組み合わせの有用性、重要性は、産業エコロジー、産業連関分析等の研究分野で国際的にも認知されつつあり、本課題の参加者はそうした方向性に大きな影響を与えてきている。また、単に概念的な提案にとどまらず、個別技術、地域、国、国際間など、さまざまなスケールにおける物質フローの包括的な情報基盤の構築や、これを用いた分析により、手法の有効性を実証してきたことの科学的意義が大きい。以下、個別の手法についての具体的な意義を示す。

世界有数の精度・部門分解能の産業連関表が利用可能な日本の強みを生かし、これを用いた環境負



荷原単位データベースを従来から整備してきたが、本課題の実施中に3時点の時系列分析を可能とし、その応用例として、消費の成長と技術革新との速度比に注目した指標を提案した。国際論文誌に掲載されたその成果は、国際一般科学情報誌（NewScientist）でも紹介されている。また、環境負荷原単位の算定手法の一つとして用いた内生的算定手法は、物質フロー分析が依拠する質量保存則と、産業連関表を用いた環境負荷分析をより明示的に結びつけるものであり、さらにマルチスケール物質フローモデルを設計することによって動的分析への応用可能性を示した。

技術革新の効果分析モジュールの基本設計に対して、技術変化が物質フロー変化を介して環境にもたらす影響を記述する分析モジュールを構築し、主要4資源のうちの金属資源及び無機資源の指標材と、その代表的な高質リサイクル技術を対象として、高質リサイクルへの技術変化がもたらす物質フロー変化について、廃棄物産業連関表を援用した評価フレームを用いて分析した。その結果、将来の需要の変化や導入可能性の高い先端技術の普及に伴って、物質フローが産業連関構造を介してどのように変化するかを分析するとき、需要変化や技術変化を解釈するモジュールが有効となることが検証された。

## （2）地球環境政策への貢献

- 1) 7.にも示すとおり、「物質フロー分析と資源生産性に関する OECD 理事会勧告」に呼応した取組みである。既に OECD におけるワークショップ等に成果は随時インプットしているが、2007年9月に環境省・OECD 共催による物質フロー分析・資源生産性に関するセミナーが東京で開催される予定であり、そうした機会をとらえて成果を発信する。
- 2) 本研究で開発した手法は、経済成長に伴う資源需要増加の著しいアジア地域、とくに循環経済を標榜する中国に適用することが有効である。既に JICA による短期専門家派遣や、本課題による先方の研究者招聘等により、物質フロー分析分野での日中協力を進めてきている。
- 3) 現在、欧州委員会（EC）の提案により UNEP が事務局となって「自然資源の持続可能な利用に関する国際パネル」の設立準備が進んでおり、これら一連の成果の有力な発信先として見込まれる。本課題や先行研究における国際活動の実績等から、研究代表者はパネルの設立会合メンバーに内定している。
- 4) 循環型社会形成推進基本計画第3章第1節「物質フロー指標に関する目標」の末尾で、隠れたフロー量の把握など、今後の検討課題が注記されており、本研究はこれに応えるものである。
- 5) 技術革新の効果分析モジュールについて、エコタウン推進の委員会（兵庫県エコタウン推進会議）で、SMP に関する事例紹介を行った実績がある。

## 6. 引用文献

- 1) 廃棄物産業連関表1995年版（WIO95\_031），[入手先] 早稲田大学政治経済学術院・中村慎一郎研究室ホームページ<[http://www.f.waseda.jp/nakashin/wio\\_j.htm](http://www.f.waseda.jp/nakashin/wio_j.htm)>（2005年1月12日参照）
- 2) 兵庫県：ひょうご循環社会ビジョン、pp.27、2001
- 3) 新日本製鐵株式会社、Nippon Steel Monthly、Vol.136、pp.3-6、2004年
- 4) Nakamura, S. and Kondo, Y.: Input-Output Analysis of Waste Management, *Journal of Industrial Ecology*, Vol.6, No.1, pp.39-63, 2002.
- 5) 中村慎一郎：廃棄物産業連関表－全国表の推定について－、早稲田大学現代政治経済研究所、

Working Paper 9903、pp.14-15、1999

- 6) Morioka, T., Tsunemi, K., Yamamoto, Y., Yabar, H. and Yoshida, N.: Eco-efficiency of Advanced Loop-Closing Systems for Vehicles and Household Appliances in Hyogo Eco-town, *Journal of Industrial Ecology*, Vol.9, No.4, pp.205-221, MIT Press, 2002
- 7) 建設経済研究所：建設市場の中長期予測－2010 年及び2020 年の見通し－、pp.1-3、2001
- 8) 環境省：地球温暖化対策の推進に関する法律施行令排出係数一覧表、2002
- 9) セメント協会：セメント産業における地球温暖化対策の取り組み、産業構造審議会・総合資源エネルギー調査会、2005
- 10) Kei MATSUOKA: "Fluidized-bed Gasification Technology for Waste-to-Energy", Proc. 9th China-Japan Symposium on Fluidization, Beijing, pp.255-258, 2006
- 11) 日本下水道協会：下水道統計H12年度版、2002

## 7. 国際共同研究等の状況

(1) 物質フロー・資源生産性国際共同研究 (OECD)に参画。平成 16 年 6 月にヘルシンキで開催されたワークショップ (参加者約 60 名)、同年 12 月にパリで開催された OECD 作業部会定例会合、平成 17 年 5 月にベルリンで開催されたワークショップ、11 月にソウルで開催されたワークショップ、および 11～12 月にカンクン (メキシコ) で開催された OECD 作業部会定例会合、平成 18 年 5 月にローマで開催されたワークショップ、同年 10 月にウィーンで開催された OECD 作業部会定例会合において、本課題の研究代表者が議長 (6 回)、報告者 (3 回) を務めるなど、物質フロー分析・資源生産性に関する OECD 理事会勧告のフォローアップのための一連の活動に主導的役割を果たした。

(2) JICA の短期専門家派遣制度の支援を得て、中国環境保護総局環境経済政策研究中心の周国梅研究室長ら、清華大学環境科学工程の張天柱教授ら、同大学 3E 研究院の劉濱準教授らとの間で開催された物質フロー分析に関するセミナーにおいて、日中両国における最新の研究成果の交換を行った。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 南齋規介・森口祐一:日本 LCA 学会誌、2(1)、22-41(2006)  
「産業連関分析に用いる部門別環境負荷量算定のための実践的アプローチ」
- 2) 酒井康夫・山本祐吾・吉田登・盛岡通・森口祐一・内藤弘：、環境システム研究論文集、Vol.34、pp.285-291(2006)  
「鉄鋼生産技術の革新による高質リサイクルの廃棄物産業連関分析」
- 3) Keisuke Nansai, Shigemi Kagawa, Sangwon Suh, Rokuta Inaba and Yuichi Moriguchi: Environ. Sci. Technol., 41. 4, 1465-1472 (2007)  
“Simple Indicator to Identify the Environmental Soundness of Growth of Consumption and Technology: “Eco-velocity of Consumption”
- 4) 矢野貴之・吉田登・曾田真也・金子泰純・山本祐吾:環境システム研究論文集、Vol.35、印刷中 (2007)  
「都市由来のバイオマス廃棄物のエネルギー変換における技術や事業収支要因の不確実性が環境負荷や事業性に及ぼす影響の分析」



- 5) Yuichi Moriguchi: *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 9(2), in press, (2007) DOI 10.1007/s10163-007-0182-0  
 “Material flow indicators to measure progress toward a sound material-cycle society”

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 森口祐一：環境科学会誌、18(4)、411-418(2005)  
 「人間活動と環境をめぐる物質フローのシステムの把握」
- 2) 森口祐一：季刊国民経済計算、第131号、18-23(2005)  
 「環境勘定の用途と勘定体系に求められる要件」
- 3) 森口祐一：、日本LCA学会誌、2(1)、3-7(2006)  
 「LCA,IOA,MFAの相互連関と相乗効果」
- 4) 森口祐一：エネルギー・資源、27(4)、11-15(2006)  
 「物質フローのシステムの把握と循環型社会」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Keisuke Nansai, *Suh S. (Ed). Handbook on Input-Output Economics for Industrial Ecology*, Chapter 8, Springer, Dordrecht, the Netherlands, in press. (with internal review by experts.)  
 “Environmental Input-Output Database Building in Japan”

(2) 口頭発表（学会）

- 1) Y. Moriguchi,: ConAccount Meeting 2004, Zurich, Swiss, (2004)  
 “What is the common denominator in the MFA community? - Similarities and dissimilarities among MFAs and their better positioning among other IE tools-“
- 2) 森口祐一,南齋規介,橋本征二,松井重和:環境経済・政策学会 2004 年大会、広島、pp.362-363,(2004)  
 「物質フロー会計におけるマクロとミクロの統合可能性」
- 3) Y. Moriguchi: 3rd ISIE Conference, Stockholm, 312 (2005)  
 “Symbiosis among analytical tools of industrial ecology -the case of MFA, IOA and LCA-“
- 4) Y. Moriguchi, K. Nansai, S. Hashimoto, S. Murakami, S. Matsui, S. Takagi: 15th Int. Input-Output Conference, Beijing, (2005)  
 “Multi-Dimensional Physical I-O Tables (MDPIOT) for Japan: Framework, empirical data and applications”
- 5) 森口祐一：環境経済・政策学会 2005 年大会、東京、397-398(2005)  
 「資源・環境指標の算定基盤としての物質フロー分析の課題」
- 6) N. Yoshida, Y. Yamamoto and T. Morioka:, International Symposium on EcoTopia Science 2005, Japan, (2005)  
 “Evaluation of Eco-Industrial Development Based on Advanced Loop-Closing Technology and Infrastructure”
- 7) 南齋規介, 森口祐一, 加河茂美, 第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 270-271, 茨城 (2005)  
 「2000年産業連関表を用いた環境負荷原単位の推計とその特徴」
- 8) K. Nansai., Y. Moriguchi, SETAC Europe 16th Annual Meeting, pp.121, Apr., Den Hague, The Netherland. (2006)  
 “Two Practical Approaches to Estimate Sectoral Environmental Burden Applied for LCA based on an Input-Output Analysis”

- 9) Y. Moriguchi, K. Nansai, S. Hashimoto, S. Murakami, S. Matsui, S. Takagi, 2006 Intermediate Input-Output Meetings on Sustainability, Trade & Productivity, pp.16, July, Sendai, Japan (2006).  
”Material flow of solid wastes and other residues described in physical input-output tables”
- 10) K. Nansai, S. Kagawa, Y. Moriguchi, 2006 Intermediate Input-Output Meetings on Sustainability, Trade & Productivity, pp.46, July, Sendai, Japan.(2006)  
“Proposing a new environmental indicator for consumption growth and technological changes: “eco-velocity””
- 11) K. Nansai, 2006 ConAccount Meeting, pp27-28, Sep. Vienna, Austria. (2006)  
“Which is faster, consumption growth or technological dematerialization ?”
- 12) K. Nansai, M. Fujii, S. Murakami, S. Hashimoto and Y. Moriguchi, The Seventh International Conference on EcoBalance, pp457-460, Nov., Ibaraki, Japan (2006)  
“A Simple Indicator to Identify the Environmental Soundness of Growth of Consumption and Technology”
- 13) N. Yoshida, T. Morioka, Y. Yamamoto, Y. Moriguchi, H. Naito, International Society for Industrial Ecology Conference 2007, June, Toronto, Canada. (2007)  
“Waste Input-Output Analysis of Advanced Loop-closing Systems by Combining Established Manufacturing Infrastructure and Innovative Environmental Technologies”

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 「物質フロー分析、産業連関分析、環境会計連続ワークショップ」を平成 17 年 2 月 8 日~10 日に東京都内で開催（国立環境研究所主催）。延べ 21 件の講演、コメンテータを含む講演者数延べ 32 名。参加者（講演者、聴講者の合計）延べ約 300 名。米国及び豪州から各 1 名の海外専門家を招聘。
- 2) 「わが国の国際貿易に隠れた物質フローと環境負荷に関するワークショップ」を平成 18 年 2 月 27 日に東京都内で開催（国立環境研究所主催）。参加者約 250 名。カナダ、ブラジル、オーストラリア及び英国から各 1 名の海外専門家を招聘。
- 3) 「資源・製品の大量消費に伴う物質フローと環境影響に関するワークショップ」を平成 18 年 11 月 26 日につくば市内で開催した。参加者約 150 名。国際機関、欧州、米国、豪州、中国の研究機関から海外専門家を招聘。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1)国立環境研究所の研究情報誌「環境儀」第 14 号「マテリアルフロー分析 モノの流れから循環型社会・経済を考える」の刊行について（環境省記者クラブ、筑波研究学園都市記者会同時発表、平成 16 年 11 月 5 日）
- 2)日本経済新聞社（平成 19 年 5 月 14 日（月）朝刊（科学欄））

(6) その他

なし