

課題名	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		
課題代表者名	森口祐一（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長）		
研究期間	平成16-18年度	合計予算額	147,700千円（うち18年度 48,250千円）
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(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</p> <ul style="list-style-type: none"> 物質フローモデルの設計・構築（独立行政法人国立環境研究所） 技術変化の影響分析に関する研究：基本モデルの構築（大阪大学） 技術変化の影響分析に関する研究：物量データ及び事例研究（和歌山大学） <p>(2) 地域、産業間物質フローによる環境影響の評価手法に関する研究 （独立行政法人産業技術総合研究所）</p> <p>(3) 物質フローの国際連関と国際比較分析に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> 国際貿易の分析、土地資源の評価方法開発（名古屋大学） 中国を中心としたエネルギー・土地資源・水資源の分析（広島大学） エコロジカル・フットプリント分析：欧州・英国の政策評価等への活用事例（同志社大学） <p>(4) 隠れた物質フローの算定に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> 隠れたフローの算定マッピングと係数算定（独立行政法人物質・材料研究機構） 資源獲得時の隠れたフローに関する基礎データ収集（東京大学） 		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. 序（研究背景等）</p> <p>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、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ている。一方、日本で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」は、このWSSD実施計画に呼応するものの一つとしても位置付けられたが、同基本計画に「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、「物質フロー分析・資源生産性」に関する国際共同研究の実施をG8環境大臣会合で提案するなど、日本がこの分野で国際的なリーダーシップを発揮しつつある。</p> <p>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。</p> <p>一例をあげれば、資源の採掘に伴って発生する大量の掘削物や移動による排出物など、経済活動としての把握の枠外におかれながら地球環境に影響を与える「隠れた物質フロー」は、以前からその重要性が指摘されつつも、データが不十分であるため、指標化に関する議論の際にしばしば導入が見送られ、検討課題とされてきている。とりわけ、資源に乏しいわが国においては、この隠れた物質フローには、オーストラリアや南米の資源産出国など、諸外国での物質フローが大きく関与しており、今後の国際協調の中でのグローバルな環境負荷削減の努力とその分担の議論のために十分な把握が必要である。また、近年では、中国などの近隣諸国の経済発展による資源需要の拡大が顕著であり、わが国だけでなく東アジア地域が資源の大量消費地となりつつある。</p> <p>一方、国内でも、循環型社会形成に向けた施策展開の中では、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おり、それら基盤施設に新しい環境技術を導入して、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、持続可能な循環拠点形成を図ることが期待されており、このような技術変化を見越した環境保全性評価などの評価研究に対する需要が高まっている。</p>		

2. 研究目的

そこで本研究では、環境勘定とくに物質フロー分析（MFA）手法に関する先行研究の蓄積を発展させて、持続可能な生産・消費に係る評価手法・指標を開発するとともに、主要産業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的とする。とくに、経済のグローバル化に伴い、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な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」だけではなく「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指す。このため、以下の4つのサブテーマを実施する。

（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

先行研究において試作した多次元物量投入産出表（MDPIOT）を基礎として、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整合的に分析するための情報基盤を構築する。MDPIOTに拡張、改良を加えるとともに他のサブテーマの成果も組み入れ、静的・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。また、サブモジュールとして、資源・エネルギー循環型産業社会の将来シナリオがもたらす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。

（2） 地域・産業間物質フローによる環境影響の評価手法に関する研究

本研究では、第一に、物質フロー分析（MFA）手法に関する先行研究の蓄積を発展させて、都道府県を対象に、各産業における地域の生産・消費と地域間交流が一括で把握できる地域・産業間物質フローマトリックスを作成すること、第二に、地域・産業物質フローマトリックスの解析を基に、地域間の相互依存関係をライフサイクル思考で記述した持続可能な生産・消費の評価手法（地域LCA評価手法）の開発を行うことを目的とする。

（3） 物質フローの国際連関と国際比較分析に関する研究

地域(都市)－国－世界という3つの空間領域を想定し、各領域の境界（地域と国、国と世界）の間での物質フローを定量化するとともに、ある地域（都市）における生産・消費が財・サービスの輸出入(移出入、貿易)を通じて、国全体、さらには世界全体とどう関連しあっているかを解析する。

（4） 隠れた物質フローの算定に関する研究

物質フローの中でもっとも環境に近い部分に位置しながらも経済に組み込まれていないために定量的把握が十分に行われていない、「隠れた物質フロー」の算定手法を検討する。とくに、海外に資源を依存した基礎素材、および革新的システムの普及に伴って需要増が予測される戦略物質を対象に、その資源獲得に伴う、隠れた物質フローを算定する。

3. 研究の方法及び結果

（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

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

先行研究から取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。海外においては、OECD環境政策委員会傘下の環境情報関連の作業部会および物質管理関連の作業部会や、産業エコロジー国際学会、ConAccount、国際産業連関分析学会等の国際専門家会議への参加によって、物質フロー分析及びこれと関連する手法の最新の研究動向を継続的に調査するとともに、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。

一方、国内においても毎年度研究集会を主催した。初年度には研究集会「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3日間にわたり東京都内で開催し延べ約300名の参加者を得た。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、企業環境会計など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。諸手法間の相互関係とスケール横断的な統合可能性を検討した結果は図1のようにまとめられる。第2年度には、初年度に開催した連続ワークショップでの関心事項を踏まえ、「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、約250名の参加者を得た。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、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

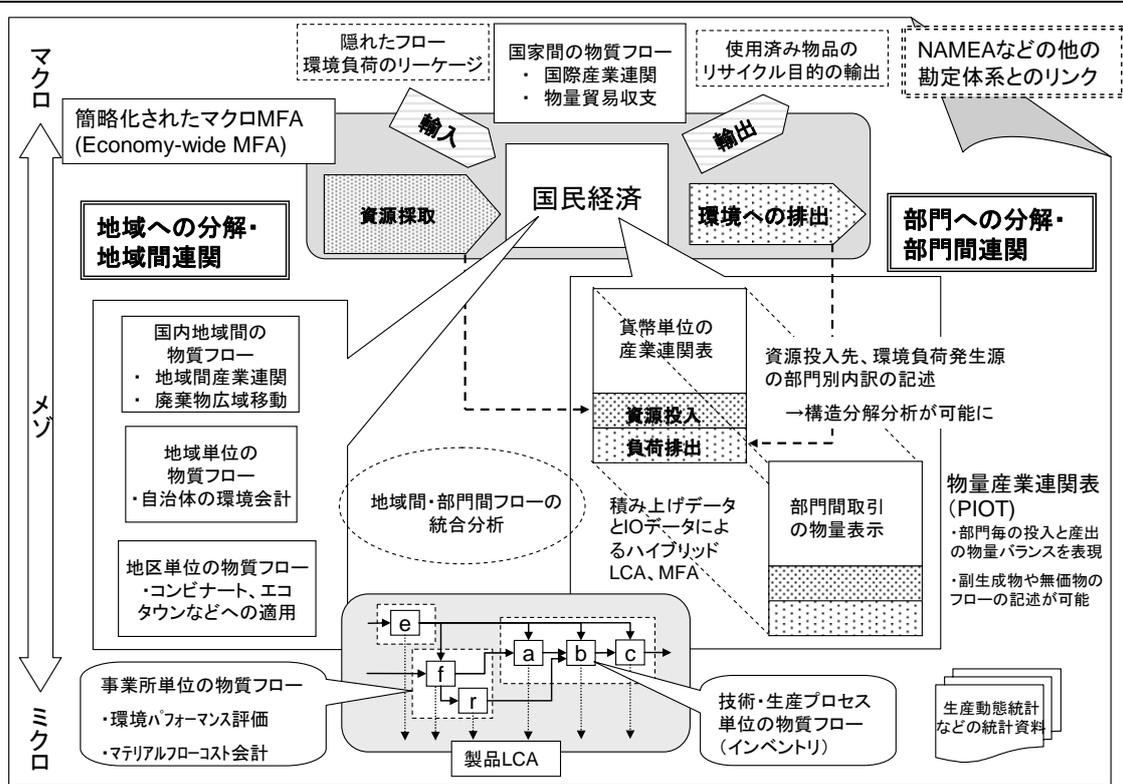


図1 さまざまなスケールでの物質フローの相互関係

題および関連研究課題に参画する日本の研究者からの講演とパネルディスカッションを行った。

2) 物質フロー分析と産業連関分析等との統合の検討、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。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ことを明らかにした。

一方、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い、ホームページからの公開を行った。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を行った。わが国の家計消費を対象にしたCO₂排出に関する指標の算定結果から、技術による排出低減効果を消費の成長が相殺していることを確認した。

また、手法面では、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、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た。内生的算定法は、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、例えばCO₂の排出量は、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たものである。この考え方に立てば、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、このような内生化を行うことは、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して位置づけられることを示した。

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

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）の設計を行った。まず、スケール横断性に加えて、ストックとフローとの関係やその時間変化をより明示的に扱えることなど、モデルが備えるべき要件を整理した。また、1)の国際的な情報収集の成果を踏まえ、産業・技術間連関と国内・国際レベルの地域間連関に重点を置いた上で、データ利用可能性と分析テーマの重大性の両面から、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。

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を比較した。日中各々の鉄鋼需要を設定し、日本の鉄鋼生産量を現状の約1億トン規模から上下させ、両国の間でのみ貿易が行われる想定とした。両国の間に明らかな技術格差がある場合、日本で多く生産したほうが、日本からのCO₂排出量は多くなるが、両国合計での排出量は小さくなる。一方、日中で同じ鉄鋼生産技術が使えたと仮定した場合には、本モデルによる計算では、中国でより多く生産したほうが、全体としてのCO₂排出が少なくなる結果となった。これは、鉄鋼生産で生じる副生ガスが電力生産に利用されるためであり、石炭火力中心の中国のほうが、低炭素の電力を生産している日本より、副生ガスで電力を生産することによるCO₂削減効果が大きくなるためである。物質フローモデルでは、副生成物の用途まで含めて物質収支を確認するため、従来の評価手法では見逃されがちなシステム全体での評価が可能となることが例示された。

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

需要変化や技術変化と物質フロー変化およ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行った。具体的には、技術－物質フローを連結した評価フレームについて、廃棄物産業連関表を援用して基本モデルを構築し、鉄鋼やセメントなど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CO₂排出誘発負荷量、資源生産性を定量的に評価した。その結果、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CO₂総排出量は2004年水準から301t-C削減され、埋立廃棄物量は2004年水準から131万t削減されることが定量的に明らかになった。さらに、下水汚泥ガス化に伴うCO₂直接排出量変化の分析では、生成ガスの熱バランス調整のための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(下水道部門からの誘発CO₂負荷量の6～8%)の削減効果を得られることが推計された。活動部門における物質フローの投入産出の勘定は、同時にそれらの部門に蓄積されてきた生産資本や社会資本に導入されている技術と密接不可分の形で表現されている。ある時点で計量されたMD物質フローの連関構造が、将来の需要変化や導入可能性の高い技術の普及に伴ってどのように変化するかを解釈する上で、このような技術変化を解釈するモジュールは有効である。

(2) 地域、産業間物質フローによる環境影響の評価手法に関する研究

本研究では、日本国内を対象に、地域の生産や消費、地域間交流を反映した全産業の都道府県レベルの物質フローを明らかにし、さらに、その解析によって、地域間での相互依存関係を通じた間接的な影響を重視する持続可能な生産・消費の評価手法(地域LCA評価手法)の開発を行った。

具体的には、まず、47都道府県の産業連関表、各種統計やモデルを駆使して、地域の生産・消費、地域間交流、産業構造などの地域特性を反映した地域・産業間物質フローマトリックスを作成した。その特徴として、47都道府県レベルでの地域間交流量を対象としていること、製品だけではなく電力などのサービスも対象としていること(2000年度、186産業分類)、地域と海外との交流も対象としていることが挙げられる。また、データの作成手順は次のとおりである。まず、47都道府県の産業連関表を用いて地域・産業別の生産額及び消費額と移・輸出入額を推計する。また、物流センサス及び交通量調査の調査票レベルデータを基に産業別の地域間交流特性係数を抽出する。以上の地域・産業別の生産・消費額、輸・移出入額、地域間交流特性係数をエントロピー極大化モデルに入力して、地域間交流額を推計する。最後に、物質フローマトリックスを作成し、経済産業省の公表する9地域産業連関表と比較することで、整合性を確認した。物質フローマトリックスの分析を基に、各地域の消費に起因する地域内外および海外での経済・環境影響依存量を定量化し、各地域間の特徴を明らかにした。さらに、新たに影響依存指数を提案し、産業ごとの相対的な経済と環境における他地域への依存傾向や該当産業の地域内での影響度合いを把握した。以上の分析は、地域の生産・消費活動によって生じる経済と環境における地域間の偏りの評価やその原因となる産業の特定化を容易にする。

作成した地域・産業間物質フローマトリックスを用いた地域評価への応用として、既存の地域評価では考慮できなかった間接影響における地域特性考慮を評価範囲に入れた地域LCA評価手法(Life Cycle Region-specific Assessment Method: LCRAM)を提案した。LCRAMは、間接影響地域を特定する拡張型地域間産業連関分析方法(Expanded Inter-regional Input Output Method: EIOM)と、地域の構造的な特徴(地域間交流、産業構造やエネルギー消費構造)や環境的な特徴(地理的な位置、気候および自然条件)を反映した地域データベースから構成される。個別の地域データベースに基づいて地

域間の違いとその評価結果に及ぼす影響を検討することで、地域特性を反映したデータベースの必要性を確認した。また、間接影響地域の特定化に対する9地域産業連関表の結果との比較によりEIOMの高い信頼性を提示した。したがって、多地域間産業連関分析の適用が困難であった詳細産業分類および多地域における間接影響地域の特定化とその地域特性を考慮した影響評価が可能になった。また、半導体産業の誘致のケーススタディを通して、LCRAMと既存方法との比較を行い、地域活動の評価において間接影響の地域特性を考慮することの必要性を明らかにした。また同時にLCRAMの有用性や信頼性について検証を行い、既存方法では過大または過小評価の恐れがあることに対して、LCRAMは極めて高い整合性を表し、間接影響における地域特性を反映した評価が可能であることを示した。

(3) 物質フローの国際連関と国際比較分析に関する研究

1) 環境負荷の国際的相互依存関係

経済のグローバル化の結果、各国は国際地域間の経済的な結び付きだけでなく、環境負荷の面においても相互依存性を強めた。このため、地球規模での環境保護の責任の分担や公平性を議論する際には、環境負荷の国際的相互依存関係を明らかにしておくことが前提となる。本研究では、1985年、1990年、1995年、2000年のアジア国際産業連関表を用いて、日本、米国、中国、アジア諸国のCO₂排出と土地利用の相互依存関係を定量化し、その経年変化の特徴を考察した。この結果、1995年から2000年にかけて、中国は米国と欧州との依存関係を急激に強めた一方で、日本との関係を相対的に低下させたことを明らかにした。また、産業部門レベルでは、繊維製品や機械製品において、上記の傾向が強まったことが分かった。

2) 東京・北京間における経済と環境の相互依存関係

本研究では、地域（都市）－国－世界という3つの空間領域を接続し、国を超えた都市間の経済取引にともなう相互の環境負荷発生構造の定量化を行った。事例として、東京都と北京市を取り上げ、1990年/1992年と1995年/1997年の都市間貿易にともなう相互誘発CO₂排出量とその変化について分析した。分析から得られた主要な結論は、相互の輸出額はこの5年間で2倍前後の伸びを示している、相対的に東京から北京への輸出の増大が大きくなっている。だが、輸出1単位当りの誘発環境負荷量の違いにより、北京での環境負荷は増大しているため、東京との格差は依然深刻であることが分かった。

3) 中国における地域別EFの推計と地域相互依存関係

本論文は、アジア経済研究所から刊行されている中国地域間産業連関表（2000）を用いて、中国を8地域に分け、地域ごとの土地利用、エネルギー消費データなどを利用することによって、地域ごとのエコロジカル・フットプリントを推計するとともに、経済と環境負荷の地域間相互依存関係を明らかにした。分析の結果、沿岸部ほど他地域の資源への依存度が大きいこと、CO₂の排出量はどの地域でも森林の吸収力を大幅に上回っていることなどが明らかになった。

4) 中国における農業生産性の変化とエコロジカル・フットプリント

中国の農業部門では、限られた土地を有効に利用する手段として、農業資本投入による要素代替が行われてきた。これにより農作物の土地生産性は向上し反収は増加している。しかし、農業資本の製造過程や使用過程に付随して環境的意味で必要となる仮想的土地投入分をエコロジカル・フットプリント（EF）の考え方に基づいて評価すると、農業生産に必要な土地はどのように評価すべきであろうか。本研究では1985年と2003年の2地点を対象に、中国農作物10品目について、反収の増加によって直接節約された土地と農業資本投下に付随して必要となる間接土地面積の増加を土地収支として表現し、品目や地域ごとに分析した。その結果、中国全体では農業生産に必要な土地面積は22.5百万ha増加しており、特に米、とうもろこし、綿花で大きくEF指標が悪化していることが明らかとなった。

5) エコロジカル・フットプリント指標の応用

欧州・豪州等におけるエコロジカル・フットプリント指標の政策や環境教育への応用の現状と課題を調査し分析を加えた。カーディフでは、EF計算に基づき政策変更が行われた。西オーストラリア州では期限付きEF削減目標を策定。336の行動計画の多くが実行に移されている。スイス政府はグローバルフットプリントネットワーク（GFN）が発行するEF値を政府発行の統計年鑑に毎年掲載することとした。欧豪等でEFの応用が増加しつつある理由は、EF計算を専門とする研究者、専門家集団が育っていること、英国では簡便なEF計算ソフトが自治体向けに無料配布されていること、教育者・NGO・ジャーナリストなどによる啓蒙活動の活発化、関連出版物やウェブサイト数の増加などが指摘できる。

豪州のウラン鉱山等での現地調査を踏まえ、原子力発電の「隠れたフロー」・使用済み核燃料等の影響管理コストについて再検討し、エコロジカル・フットプリント計算への含意を検討した。原子力発電の事後継続的影響管理（PIM）のために必要となるエネルギーコストは、電力量の0.8倍（2.4万年の管理）～16倍程（100万年の管理）となることが推計された。エコロジカル・フットプリントも無視できないものとなり得る。

(4) 隠れた物質フローの算定に関する研究

物質フローの中でもっとも環境に近い部分に位置しながらも経済に組み込まれていないために定量的把握が十分に行われていない「隠れた物質フロー」は、資源の採掘などに伴って発生する大量の土壌や移動による排出物など、経済外の物質フローでありながら地球環境に影響を与え、以前からその重要性が指摘されつつも、データが不十分であるために多くの指標化に際する議論の際に導入が見送られ、検討課題とされていたものである。また、資源に乏しいわが国においては、この隠れた物質フローは中国やアジア、オーストラリア等の外国に置いてきた物質フローが大きく関与しており、今後の国際協調の中でのグローバルな環境負荷削減の努力とその分担の議論のためには基本的に把握しておくべきである。本研究では、この隠れた物質フローを算定し、他の環境指標やマテリアルフロー分析などの手法と協調して使用できるようにすることを目指した、人間の生産活動の「from Cradle to Grave」のCradle端での持続可能指標としての隠れたフローの科学的意義と、その指標としての利用方法の明確化に資した。その結果は以下の通りである。

- 1) 鉱物資源に関する「隠れたフロー」は TMR (エコロジカルリユクサック) として数値化することができる。
- 2) その基礎データの多くは鉱山の操業に係わる環境報告書等に整備されつつあり、他の希少な金属類も地殻存在度などから推計することができる。
- 3) バイオマスに関しては土壌を含んだ取り扱いと、土壌を含まず非素材化部分を計上する方法があるが、そのいずれが妥当か今後の検討を要する
- 4) エコロジカル・フットプリントとはむしろ相補的な関係にあり、係数などを用いてその中に組み込むことは妥当ではない。
- 5) 資源枯渇とも相関性はある程度はあるが一対一対応ではなく、TMR を基底として資源枯渇状況がある。
- 6) TMR はむしろ、価格とよい相関関係を示しており、顕在した物質フローを表してはいないが、廃土の運搬などのコストとしてある程度価格に反映されている。
- 7) 価格に反映されているとはいえ、そのコストはまだ内部コストに過ぎず、環境影響を配慮しての外部コストとしての評価の議論が必要である。
- 8) TMR はそのための基礎的数値を与える環境ストレス因子のひとつにはなるが、これまでの段階では環境インパクトとの関連付けは明確にできておらず、これからさらなる議論が必要である。
- 9) しかしインベントリー項目としては TMR は資源生産性の指標としてふさわしく、2050 までの資源要求を TMR でファクター8 に抑えることが必要である。

今後の活用を促進するために、本研究で精査されたTMRの表を末尾につけておく。

表1 元素、主要材料のTMRとその内訳

	TMR	soil	water		TMR	soil	water
3 Li	1,500	978	526	52 Te	270,000	181,611	89,079
4 Be	2,500	1,631	875	57 La	3,100	2,080	1,028
5 B	140	54	86	58 Ce	2,000	1,350	670
11 Na	50	25	25	59 Pr	8,000	5,381	2,639
12 Mg	70	28	42	60 Nd	3,000	2,018	990
13 Al	48	18	30	62 Sm	9,000	6,054	2,969
14 Si	34	12	22	63 Eu	20,000	13,453	6,599
20 Ca	90	28	62	64 Gd	10,000	6,726	3,299
21 Sc	2,000	1,330	675	65 Tb	30,000	20,179	9,898
22 Ti	36	13	23	66 Dy	9,000	6,054	2,969
23 V	1,500	992	512	67 Ho	25,000	16,816	8,248
24 Cr	26	12	14	68 Er	12,000	8,072	3,959
25 Mn	14	5	9	69 Tm	40,000	26,905	13,197
26 Fe	8	6	2	70 Yb	12,000	8,072	3,959
27 Co	600	402	199	71 Lu	45,000	30,269	14,847
28 Ni	260	173	87	72 Hf	10,000	6,733	3,315
29 Cu	360	237	123	73 Ta	6,800	4,575	2,257
30 Zn	36	21	15	74 W	190	125	66
31 Ga	14,000	9,388	4,647	75 Re	20,000	13,454	6,601
32 Ge	120,000	80,716	39,591	76 Os	540,000	364,398	178,736
33 As	29	20	10	77 Ir	400,000	268,925	131,908
34 Se	70	45	25	78 Pt	520,000	353,014	173,151
35 Br2	1,500	1,009	495	79 Au	1,100,000	743,449	373,344
37 Rb	133	88	45	80 Hg	2,000	1,345	660
38 Sr	500	331	170	82 Pb	28	16	12
39 Y	2,700	1,808	898	83 Bi	180	118	59
40 Zr	550	368	183	88 Ra	28,000,000	2.E+08	92,378,521
41 Nb	640	413	229	90 Th	9,000	6,058	2,975
42 Mo	750	494	258	92 U	22,000	14,803	7,261
44 Ru	80,000	53,808	26,396	coal	12	7	
45 Rh	2,300,000	1,547,059	758,824	oil	7		7.4
46 Pd	810,000	544,833	267,239	碎石	1.4	1.4	0
47 Ag	4,800	3,217	1,596	骨材	1.4	1.4	0
48 Cd	7	4	3	plastic	10		10
49 In	4,500	3,025	1,487	木材		8.0	
50 Sn	2,500	1,680	826	cement		3.2	
51 Sb	42	28	14	穀物		330	

4. 考察

本研究は、物質フローの包括的・体系的な把握によって生産・消費活動の物的側面を明らかにし、天然資源の消費と環境への負荷の観点から、生産・消費形態を望ましい方向に導くことを目指してきた。研究の背景で述べたとおり、物質フロー分析とその政策利用は、現在、国際的にも高い関心を集めており、本研究実施中の3カ年間には多くの国際会議、研究集会が開催された。これらの国際的活動における関心事項に照らして、ここでは各サブテーマに共通する横断的な視点から、本課題の要点について考察を記す。サブテーマごとの考察は各々の研究成果の記述に含めた。

G8提案に基づくOECD等の国際機関の活動では、主に一国レベルでの物質フローの把握と、その国際比較に力点がおかれているが、同時に、一国と他国との関係を明らかにすることや、一国の活動の内訳をなるべく詳細に分解できることの重要性が度々指摘されてきた。本研究が、スケール横断的な物質フロー分析の枠組みの開発と実証データ作成、事例分析に取り組んできたことは、こうした指摘に応える上での確かな課題設定であったといえる。

加えて、物質フロー分析の政策利用の観点から、手法面ではいくつかの方向への発展が模索されている。第一は、物質の供給、用途を産業活動部門ごと、あるいは地域に分解して明らかにすることで、この目的では、本課題が先行研究から取り組んできた物量投入産出表が重要な役割を果たす。第二は、着目したシステム境界を出入りする物質に関連する間接的な物質フローの問題を的確に扱うこと、とくに輸入される資源や製品の上流側で生じる「隠れたフロー」に関する情報の改善である。この点に関してはサブテーマ4で網羅的に新たな成果を得ている。一方、物質フロー分析への理解が進むにつれて、論じられることが多くなった第三の方向性は、物質フローと環境影響との関係についてのより詳細な情報の必要性である。本課題は、物質フローの総量やその構成を包括的にとらえる方法に主眼をおき、毒性などの観点から特定の物質のフローに着目したものではないが、包括的な把握を行う場合でも、大量の物質フローが資源問題、環境問題にとってどのような影響をもつのかの意味付けをより明確に行うことが求められている。この点に関しては、LCA手法とMFA手法との統合の提案や、資源採掘段階の環境影響に関する情報収集を行ったが、十分に定量化されたとはいえない。資源採取に伴う環境影響に関する知見の蓄積が必要との認識が高まり、欧州委員会（EC）が、「自然資源の持続可能な利用に関する国際パネル」の設置を提案したのはこの流れに沿ったものであり、今後、本課題で得られた成果の発信も含め、こうした国際的活動に引き続き貢献していくことが重要である。また、本課題の実施期間中でも、経済急成長国、とくに中国の資源需要の高まりは著しく、本課題でもとりあげた中国の生産・消費に伴う物質フローとこれに伴う環境負荷の増大は、今後引き続き取り組むべき重要課題である。

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、国際科学情報誌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。

技術革新がもたらす物質フロー及び環境負荷の変化を分析するため、技術－物質フロー連結の分析モジュールを開発し、金属・無機・化石・有機資源を対象とする複数の技術と将来利用シナリオに対して適用した。その結果、近い将来に導入可能性の高い技術、あるいは持続可能性の観点から望ましい技術の普及に伴い、物質フローや環境影響がどのように変化するかを解釈する上で、このような技術変化の効果分析モジュールが有効となることを示すことができた。

地域・産業間物質フローマトリックスは、国内186分類の産業、サービスの産業間、また、都道府

県間と都道府県内の取引による生産から消費に至る物流の数値情報を提供する初のデータベースである。網羅的な産業間の物質フローを知ることができるだけでなく、地域内や地域間、海外との物質フローもあわせて知ることができる点が画期的である。本データベースは、都道府県産業連関表と各種既存統計を元に、モデルによる地域、産業間の物流の推計により作成された。このため、汎用性が高く、最新年度のデータ更新や過去のデータの作成が可能な手法である。さらに、地域・産業間物質フローと地域別の環境負荷係数、被害係数を用いることで、地域特性を反映して、且つ、地域間の直接影響、間接影響といった、いままで定量的に考慮することができなかつた都道府県間の環境影響の相互依存関係を定量的に示すことができる手法を開発した。このことは、より実態に近い環境影響の定量化し、それに基づいた政策の検討が可能であるという観点で科学的意義が大きい。

従来、EFの研究では財・サービスの消費量からそれらを生産するのに必要な面積を算定する際、世界平均の生産性が用いられてきた。このため、ある地域の消費がどの地域の環境にどの程度影響を与えているのかについては十分な分析はできなかった。本研究では、地域別の土地生産性と地域間産業連関表を用いて、従来の推計方法が抱えていた問題点を克服する分析方法を提案した。

1990年、1995年、2000年の3時点について東京－日本－中国－北京、東京－日本－中国－上海の統合連関表（水平連結）を構築し、さらにその時点間の接続（垂直連結）によりデータベースの構築を行った。こうして整備されたデータをもとに、経済的・環境的依存関係の分析を実施し、これまでに取り組みがなされてこなかった異なる国の都市間の環境負荷相互依存関係を分析するためのひとつの方法論としての完結性を高めた。

マテリアルフロー分析において、「隠れたフロー」といわれていた部分が、地球環境圏から人間圏に取り入れられた物質の量であり、それをTMRにより定量的に表すことができることを明確にし、ほとんどの金属資源、主要な非金属鉱物について算定するとともに、バイオマスへの適用の考え方を示した。TMRは、エコロジカル・フットプリントや資源枯渇とは異なる独自の環境ストレス因子であることが確かめられ、今後資源指標として、マテリアルフロー分析のみならずLCA的アプローチやエコデザイン設計指標として有効であることを示した。そのための、製品レベル、国レベルでのTMR構成、および将来予測などの手法を具体的適用を通じて提示することができた。また、マテリアルフローを統一的フォーマットで記す事により、リサイクルの形態の相違など個々のフローの相対的特長をあきらかにするとともに、マテリアルフローの欠落なども顕著に示すことができ、マテリアルフロー解析のために収集すべきデータの関係を明確化できた。

（2）地球環境政策への貢献

序の研究背景で述べたとおり、本課題は、G8環境大臣会合での日本政府からの提案や、これを契機とする「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り、こうした課題の実施による研究の実施、成果の蓄積自身が地球環境政策からの要請によるものである。とくにサブテーマ1の担当機関である国立環境研究所は、OECDにおける国際的活動を牽引してきている。サブテーマ1の成果のうち、技術革新の効果分析モジュールについては、今後、エコタウン事業推進関連の検討の場などで、地域レベルでの施策評価や事業展開の検討に活用するなど、成果の普及と情報提供に努める。

サブテーマ2の成果により、直接影響、間接影響といった、今まで定量的に示すことができなかった都道府県間の環境影響の相互依存関係を定量的に示すことが可能になった。この相互環境影響プロセスを解析することによって、より現実的かつ効率的な環境負荷の排出削減シナリオを作成することが可能である。また、ある地域の政策、例えば、環境影響の改善が他地域の環境影響の増大につながるようないわゆるリバウンド効果を含めた日本全体の環境影響を定量的に議論することが可能である。このように、本研究で作成・開発したデータベースや評価手法は、より現実的かつ効率的な地球環境政策の策定に貢献することが期待できる。

サブテーマ3では、例示的ではあるが、既存の資料から地域の視点から地球環境問題にアプローチするための情報基盤や科学的分析方法を確立したことにより、同様の分析に基づく政策立案に資する情報整備の重要性を示すことができたと考える。したがって、将来的には各国の重要な地域とそれを結ぶ地域間の経済取引に関する情報整備に向けて、成果の広報・普及に努める。エコロジカル・フットプリントの海外での応用動向の分析結果などについて、環境白書、環境省・国土交通省の各種検討会に対して最新の知見を提供した。

サブテーマ4では、隠れたフロー量の算定に大きな進展がみられた。隠れたフローの資源生産性指標への反映は、循環基本計画の物質フロー指標に関する目標において今後の検討課題とされてきた点であるが、本研究により、資源生産性のための基礎指標としての「天然資源の利用」に関する定量的指標を提供できた。資源の観点からのリサイクル指標としての応用も可能である。一方、こうした指標はエコロジカル・フットプリントなどとは併用して用いるべきであり、これらをさらに

一つの環境指標として統合することは好ましくないことを示した。TMRを環境ストレス因子として組み込むことで、従来のLCA等で希薄であった資源インパクトを表現し、ミクロレベルでも持続可能な製品やシステムの設計に資源概念を持ち込むことができる。資源生産性の向上目標をすくなくともファクター8とすべきことを示したことは、今後の政策目標の設定に有用と考えられる。

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。

6. 研究者略歴

課題代表者：森口祐一

1959年生まれ、京都大学工学部卒業、博士（工学）、独立行政法人国立環境研究所
社会環境システム研究領域資源管理研究室長（16年度本課題着手時）等を経て
現在、同研究所循環型社会・廃棄物研究センター長

主要参画研究者

(1) : 森口祐一（同上）

盛岡 通

1946年生まれ、京都大学工学部卒業、工学博士
現在、大阪大学大学院工学研究科教授

吉田 登

1964年生まれ、大阪大学工学部卒業、博士（工学）
現在、和歌山大学システム工学部助教授

(2) : 稲葉敦

1952年生まれ、東京大学工学部卒業、工学博士、
現在、東京大学人工物工学研究センター教授
独立行政法人産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター長（兼任）

(3) : 井村秀文

1947年生まれ、東京大学工学部物理工学科卒、工学博士
現在、名古屋大学大学院環境学研究科教授

金子慎治

1969年生まれ、九州大学大学院工学研究科卒、博士（工学）
現在、広島大学大学院国際協力研究科助教授

和田喜彦

1960年生まれ、ブリティッシュ・コロンビア大学コミュニティー地域計画学研究科卒、PhD
現在、同志社大学経済学部助教授

(4) : 原田幸明

1951年生まれ、東京大学大学院工学系金属工学専門課程博士課程終了 工学博士
現在、独立行政法人物質・材料研究機構 材料ラボ・ラボ長

月橋文孝

1955年生まれ、東京大学大学院工学系研究科修了、
現在、東京大学大学院新領域創成科学研究科教授

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。査読のあるものに限る。投稿中は除く。）

(1)論文（査読あり）

- 1) 南齋規介・森口祐一：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、日本LCA学会誌、2(1)、22-41(2006)
- 2) Keisuke Nansai et al.: Simple Indicator to Identify the Environmental Soundness of Growth of Consumption and Technology. *Environmental Science and Technology*, 31(4): 1465-1472 (2007).
- 3) 酒井康夫・山本祐吾・吉田登・盛岡通・森口祐一・内藤弘：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、環境システム研究論文集、Vol.34、pp.285-291、(2006)
- 4) 矢野貴之・吉田登・曾田真也・金子泰純・山本祐吾：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、環境システム研究論文集、Vol.35、印刷中 (2007)
- 5) Yuichi Moriguchi: Material flow indicators to measure progress toward a sound material-cycle society, *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 9(2), in press, (2007)
- 6) 李一石、伊坪徳宏、稲葉敦、松本幹治：地域LCA手法の開発に向けてのアプローチ～地域特性を考慮した間接効果の検討、環境情報科学論文集、vol.19、pp.479-484 (2005)
- 7) 李一石、伊坪徳宏、稲葉敦、松本幹治：環境影響の地域性を考慮した地域LCA手法の開発、日本LCA学会誌、vol.2,No.1、pp.42-47 (2006)
- 8) Ilseuk Yi, Norihiro Itsubo, Atsushi Inaba and Kanji Matsumoto: Development of the Interregional I/O Based LCA Method Considering Region-Specifics of Indirect Effects in Regional Evaluation, *Int. J. LCA*, (2007), in press
- 9) 市橋勝・金子慎治・吉延広枝：国際地域間取引の経済誘発効果と環境負荷：東京－北京の事例、環境システム研究論文集、33、305-315 (2005)
- 10) 吉延広枝、金子慎治、市橋勝：産業関連分析による都市の二酸化炭素排出構造の分析と地方温暖化対策への含意：サービス都市と工業都市の比較、環境システム研究論文集、Vol. 33、389-397 (2005)
- 11) Zhou, X., Shirakawa, H. and Imura, H.: Who is responsible for what: regional ecological footprint calculation for China with special emphasis on interregional dependency, *Proc. 3rd World Congress of Environmental and Resource Economists*:(2006)
- 12) Zhou, X., Shirakawa, H. and Imura, H.: Study on China's regional ecological footprint and identification of brown sectors and brown paths 環境システム研究論文集、34、497-506 (2006)
- 13) 金子慎治、市橋勝、吉延広枝：国際地域連関分析による2時点間の環境誘発効果の計測-東京-北京の事例-環境システム研究論文集、34:293-303 (2006)
- 14) 豊田知世、金子慎治、周新、井村秀文：中国農業の土地生産性変化とエコロジカル・フットプリント、環境システム研究論文集、34、487-496 (2006)
- 15) 吉川拓未、田畑智博、白川博章、井村秀文：「日中間の国際資源循環構造の把握と合理化に関する研究～E-wasteを対象として～」、環境科学誌、印刷中(2007)
- 16) 中島謙一、原田幸明、井島清、長坂徹也：関与物質総量(TMR)の算定－エネルギー資源および工業材料のTMR－.日本LCA学会誌、2(2): 152-158(2006)
- 17) Katsutoshi YAMADA, Kohmei HALADA, Kiyoshi IJIMA : "Web-site Survey of Recent Ecomaterials Developments in Japan, *MATERIALS TRANSACTIONS*, vol.46, No. 12(2005)

(2)査読付論文に準ずる成果発表

- 1) 森口祐一：人間活動と環境をめぐる物質フローのシステムの把握、環境科学会誌、18(4)、411-418(2005)
- 2) 森口祐一：環境勘定の用途と勘定体系に求められる要件、季刊国民経済計算、第131号、18-23(2005)
- 3) 森口祐一：LCA,IOA,MFAの相互連関と相乗効果、日本LCA学会誌、2(1)、3-7(2006)
- 4) 森口祐一：物質フローのシステムの把握と循環型社会、エネルギー・資源、27(4)、11-15(2006)
- 5) 和田喜彦、岸基史：解説：世界のエコロジカル・フットプリントの活用事例－欧州・英国・ウェールズの事例を中心に－（ニッキー・チェンバース、クレイグ・シモンズ、マティース・ワケナゲル著、五頭美和訳）エコロジカル・フットプリントの活用：地球1コ分の暮らしへ、合同出版、224-235
- 6) Y. Wada, and M. Kishi. (2006). Environmental and Social Impacts of Uranium Mining: A Case Study of Ranger and Jabiluka Minesites in Kakadu National Park, Australia. *Doshisha University Research Center of Social Common Capital Discussion Paper No. 14*. June 2006.
- 7) 和田喜彦：エコロジカル・フットプリント指標の応用動向と今後の課題：事後継続的影響管理（PIM）コストの算入について、日本LCA学会誌、3(1)、3 - 10 (2007)
- 8) 中野桂、和田喜彦：エコロジカル・フットプリント指標分析の方法論的進歩と最近の論点、滋賀大学環境総合研究センター研究年報、4, 1, 11-22 (2007)