

マテリアルフロー分析からみた人間活動と環境負荷

Material Flow Analysis for Interlinking Human Activities and Environmental Burdens

森口 祐一*

Yuichi Moriguchi *

ABSTRACT : Material Flow Analysis/Accounting (MFA), which describes flows of energy and materials between the environment and human activities, and those among different sectors of human activities, is a useful tool for integrating social and natural dimension of environmental issues. This paper firstly reviews the MFA and related methodologies. MFA is classified as a material balance approach in environmental economics, a sort of environmental accounting, and has close relationship with the life cycle inventory and the input-output analysis. Then several practical results from application of the MFA are presented, including international comparison. Extended material flow of Japan, including ecological rucksacks was compiled along with harmonized framework for international collaborative study among four research institutions in Germany, Japan, the Netherlands and the United States. International comparison of indicators derived from the MFA enabled us to characterize dependency of industrialized economies on huge and inter-boarder resource flows. Finally perspective of future development of MFA is discussed, considering that MFA is one of the key elements within the IT(Industrial Transformation) project of the IHDP (International Human Dimension Program).

KEYWORDS : material flow, accounting, Input-Output analysis, ecological rucksack, industrial transformation

1. はじめに

今日の環境問題の多くが、大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会経済活動と結びついていることはいうまでもないであろう。こうした現在の先進工業国の生産と消費の形態が、持続不可能なものであることは、「アジェンダ21」の第4章「消費形態の変更」においても指摘されている。日本の環境基本計画においても、大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会経済活動や生活のあり方を問い直し、生産と消費のパターンを持続可能なものに変えていくことが必要であること、物質的な豊かさのみの追求が環境の危機を招いているとの認識が深まっていることに言及している。

こうした大量の物資に特徴づけられた今日の経済社会と環境問題との関係を分析する上では、自然環境と経済活動の間、およびさまざまな経済主体間の物資やエネルギーの流れを定量的に把握することが不可欠であり、そのための手法として本論文ではマテリアルフロー分析(MFA:Material Flow Analysis/Accounting)に注目した。MFAは、従来から環境経済学のアプローチの一つとして位置づけられてきたが、近年、環境と経済との統合分析や、持続可能な発展の指標開発のための情報基盤として再び注目されつつあるほか、廃棄物処理やリサイクルの分野でも関心がもたれている。MFAには、環境資源勘定や産業連関分析と結びついた経済学サイドからのトップダウン的アプローチのほか、産業活動の現場ニーズに基づくライフサイクルアセスメント(LCA)や、環境科学における特定物質のフローの追跡のようなボトムアップ的な手法やデータの蓄積がある。すなわち、人間活動と環境との関わりを、社会科学と自然科学の接点でとらえる手法として期待されるものである。

* 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies

本論文では、まずMFAとこれに関連する多様なアプローチとの関係について概観する。ついで、この手法の有効性を検討するため、著者らがこれまでに行ってきた資源や環境負荷の産業間フロー・国際間フローの分析事例を示すとともに、ドイツ、米国、オランダとの間で行った国際比較研究の枠組みに基づく日本のマテリアルフロー勘定の作成結果と、そこから得られる指標の国際比較についての分析事例を示す。さらに、MFAは、IHDP（地球環境問題の人間社会的側面の国際研究計画）のコアプロジェクトの一つに位置づけられている産業転換(IT:Industrial Transformation)研究における有力な手法の一つと考えられることから、IHDP研究の一部としての発展も見据えた、今後のMFA研究の方向性についての展望を試みる。

2. マテリアルフロー分析及びこれに関連する分析手法

2.1 マテリアルフロー分析の概念

マテリアルフロー分析とは、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の総称であり、マテリアルフロー勘定あるいはマテリアルバランス（物質収支）分析とほぼ同義である。著者自身、マテリアルフロー勘定(Material Flow Accounting)という用語をこれまで多用してきているが、「勘定」は経済学（会計学）に偏った用語であるため、本論文では敢えてマテリアルフロー分析と呼びMFAと略記する。ここでいうマテリアルとは、製品を作るための原材料や素材という意味ではなく、「モノ」の総称である。分析の対象とする系は、生産工程、事業所、産業部門、地域、国など、さまざまな単位が考えられる。

2.2 MFAの源流 ～環境経済学における物質代謝論～

MFAの源流は、1970年前後のKneese, Ayresらのアプローチ、すなわち環境経済学において物質代謝論¹⁾として位置づけられている手法に見いだされる。このアプローチは、環境汚染問題の発生により、経済学において単にサービスを運ぶ媒体として物質を取り扱うのみではなく、自然と人間との間での物質代謝を扱うことが必要との認識から生まれたものであり、経済活動と自然環境との間での物質収支をフローチャートとして示すことから始められた。本論文で後に述べる事例も含め、MFAの成果は多くの場合、フローチャートに集約される。そのねらいは、分析対象とする系における物質代謝の構造的な特徴を概観することにある。

2.3 マクロなアプローチ ～環境資源勘定と持続可能な発展の指標開発～

一方、環境と経済と一つの枠組みで分析するための手法として、近年、環境資源勘定が注目されているが、MFAには、一国の経済活動全体ないし特定の経済部門を対象に、そこを出入りする物の総量およびその内訳を勘定(Account)として記帳するアプローチが含まれ、その意味ではMFAは物量単位の世界環境資源勘定の一種とみることができる。物量単位の世界環境資源勘定では、主に自然資源のストックやその変化に着目したアプローチ(自然資源勘定:Natural Resource Accounting)が知られるが、MFAはフローに重点をおいたものであり、環境資源勘定の分野で、「資源と汚染物質のフロー勘定」と分類されるもの²⁾である。

MFAへの取り組みが活発化している理由の一つに、これを持続可能な発展の指標づくりに活用しようとする試みがあげられる。これは、資源や環境の有限性が持続可能な発展にとっての重大な制約であるとの認識によるものである。1995年11月にドイツのWuppertalでSCOPE（環境問題に関する科学委員会）等が主催した持続可能な発展の指標に関するワークショップ³⁾において、この方向が提案されている。なお、上述の世界環境資源勘定には、環境面から補正された経済指標（いわゆるグリーンGDP）を算出するアプローチがあるが、MFAに基づく指標開発の提案は、こうした貨幣単位の評価が困難であるとして、これを代替するものとして提案されたものである。しかし、これらは共に経済と環境を統一的に分析する勘定という枠組みを採用し、そこから持続可能な発展の尺度となる、より集約的な指標を開発しようとしている点は共通している。

2.4 ミクロなアプローチ ～LCAおよび特定の物質や元素に着目したMFA～

こうした経済全体を視野に入れたいわばトップダウン型のMFAとは対象が異なるが、分析の視点に多く

の共通点のある手法として、ライフサイクルアセスメント（LCA）が挙げられる。LCAでは、製品、サービス、技術システムなどを対象に、これに関連する資源の消費量や環境負荷の発生量のインベントリー（LCI：ライフサイクルインベントリー）づくりが進んでいるが、これらはミクロなMFAとみなすことができる。欧米のLCAでは、材料や製品の個々の生産プロセスについての物質収支データが整備されつつあるほか、有害化学物質や重金属など微量の要素も評価の対象に含まれている。こうした物質については、人間活動からの排出量の把握（エミッションインベントリー）だけでなく、自然環境中での挙動の解明が重要である。広義のMFAには、運命予測モデルなど主に自然科学的手法を用いた自然界での物質フローの分析も含まれ、他と区別するために、SFA（Substance Flow Accounting）と呼ばれる場合がある。一方、有害性の疑われる化学物質の包括的な管理手法として日本でも導入が検討されているPRTTR（汚染物質排出・移動登録）制度における化学物質の環境への排出量の推定にも、マテリアルバランス的な考え方の適用が検討されている⁴⁾。すなわち、煙突や排水口から集中的に排出された「古典的」な汚染物質とは異なり、化学物質は環境中へのリリースポイントを把握することが困難である。したがって、生産量に輸入量を加えた供給量から、製品原料としての明らかな消費や輸出、処理装置による除去量などを差し引いた残りが、環境中に放出されたとみなす方法がこれにあたる。

一方、廃棄物量の増大に伴うリサイクル促進の検討は、日本での最近のMFAへの関心の一つの要因となっているが、金属などのリサイクルにおいては、特定の元素や物質の経済活動間のフローの把握が重要であり、これもMFA研究の重要な課題である。

2.5 産業連関分析

LCAとMFAとの関わりは先に述べたが、わが国のLCA研究では、インフラストラクチャや廃棄物処理・リサイクルシステムなど、製品中心の欧米のLCAに比べて規模の大きなものを対象としていることのほか、LCAにおいて産業連関分析が活用されていることから、LCAとMFAの距離はより近いものとなっている。わが国のLCA研究では、産業連関表を利用したエネルギー消費やCO₂排出量の分析が数多く行われているが、これはエネルギー・アナリシス⁵⁾（エネルギー収支分析）の変形、あるいはレオンチェフ以来行われてきた産業連関表の環境分析への応用⁶⁾の一種とみることもでき、MFAはこれらの手法と極めて近い関係にある。また、LCA以外にも、家計消費による環境負荷分析と結び付ける試みなど、産業連関分析の環境分野への応用は近年盛んに行われている。環境面に拡張された産業連関分析（この意味では投入産出分析と呼ぶのがより適切である）は、環境経済学の物質代謝論アプローチの一つの表現形態にほかならない。この点で、ドイツではMFAの調査研究が、連邦統計局における物量単位の産業連関表の試作と並行して行われていることが注目される⁷⁾。

3. 投入産出分析の枠組みを用いたMFAの一般的表現

前節で述べたとおり、MFAおよびこれに関連する手法は、互いに分析の目的や対象とする系は大きく異なるものの、分析の枠組みにおいて高い共通性を有する。ミクロなアプローチであるLCIから、環境資源勘定、環境経済学の物質代謝論アプローチに至るまで、MFAに関連した手法を貫く共通性を表現するため、投入産出分析の表現を用いた一般的な枠組みの構築を試みた結果を図1(a)～(e)に示す。なお、特に断らない限り、ここでは投入産出表は貨幣単位ではなく、物量単位で記載することを想定している。

まず、図1(a)では、産業部門間の投入と産出を表す通常の産業連関表の投入元（行）、産出先（列）の双方に「環境」を加える。こうした理念的な拡張は既に環境経済学の物質代謝論において行われている¹⁾。環境は、大気圏、水圏、地圏、生物圏のような媒体や、地域によって細分化してよい。4つに区切られたブロックのうち、左下の第1のブロックは自然界から人間活動への投入、すなわち鉱業による鉱物資源の採取、農林水産業によるバイオマス資源の採取などを記載する。左上の第2ブロックは、産業連関表に記載されている産業間の取引である。詳述は避けるが、最終需要部門も行・列ともに拡張してこのブロック内に記載す

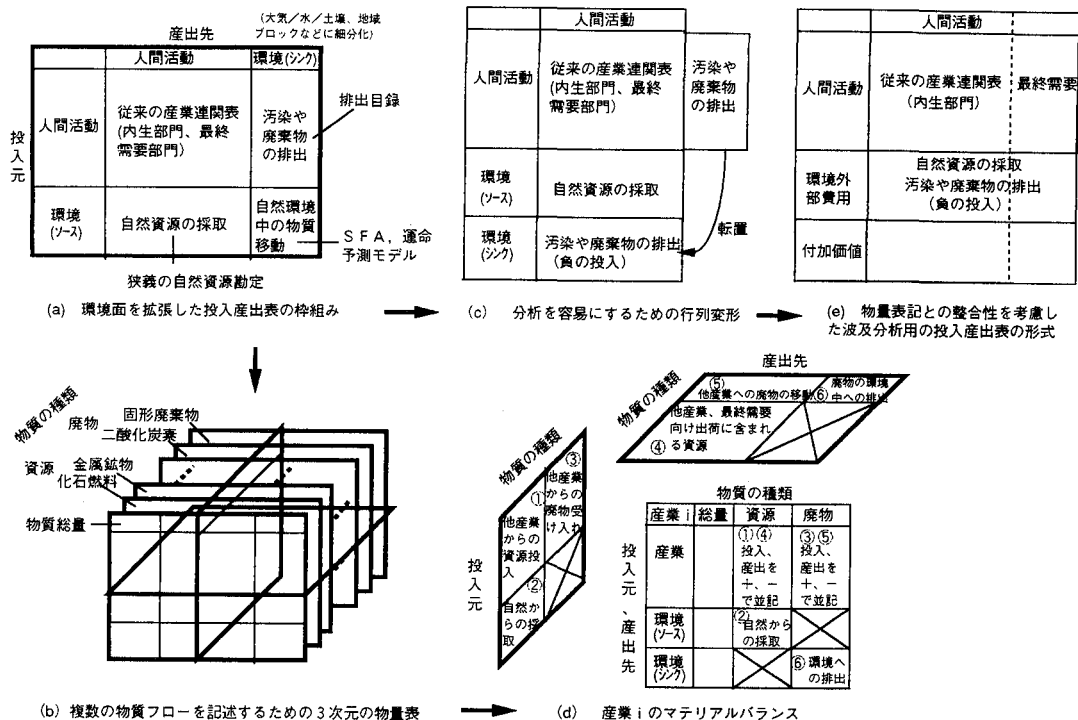


図1 マテリアルフロー分析用に拡張した投入産出分析の枠組み

る。これによって、家計消費からの廃棄物発生や、資本ストックからの再生資源回収などの記載を可能とする。右上の第3ブロックは人間活動から自然界への産出、すなわち汚染物質や廃棄物の排出を記載する。右下の第4ブロックには環境中の物質移動、すなわち媒体間の移動や地域間の移動を記載するもので、先述のSFAはこのブロックに関係する。このブロックは環境に関する自然科学全般に関わるものであり、その複雑なメカニズムはこうした投入産出の単純な枠組みのみでは記載しきれない。しかし、バイオマス資源をめぐる炭素循環のように、この第4のブロックへの記載が再び第1ブロックへと循環していく様子を記載する目的には有用であろう。環境と人間活動の間の物質循環は、この投入産出の枠組みの中で時計回りに表現される。なお、ここでは一国を想定した表現としているが、産業、環境ともに多国間に拡張して表現すれば、輸入自然資源に伴う環境負荷の分析において威力を発揮すると思われる。

一般の産業連関表では、各セルには金額が埋められるので、行・列2次元の表現で足りるが、物質のフローを記述するには、物質の種類ごとに表が必要であり、これを図1(b)のように、奥行き方向に複数の表をもつことで表現する。燃焼による化石燃料から二酸化炭素への変化のように、物質の変化を表すには、奥行き方向に投入(変化前の物質)と産出(変化後の物質)を符号を変えて記載する。1枚目の表は、全ての物質についての合計値(総量)の記載にあてて。こうした3次元形式の投入産出表は、小型のコンピュータで複数のスプレッドシートが扱えるソフトウェアが普及した現在では、容易に理解されよう。なお、特定の産業に着目して、その産業に関わる行・列について奥行き方向の2次元断面を抽出してブロックを並べかえれば、図1(d)のように、その産業部門についてのマテリアルバランスが表現できる。逆に、LCIで収集されたミクロなマテリアルバランスのデータは、これと逆の操作で(b)の投入産出表の形式に戻すことができる。

こうして拡張された投入産出表は、マテリアルフローの記述だけでなく、これまでの産業連関分析の環境

への応用と同様に、さまざまな分析に活用可能であると考えられる。図1(c)のように、廃物の排出を負の投入と考え、行列を転置して資源投入と併記しておけば、需要が変化した際に、産業間の波及を経て、資源投入や廃物発生量がどのように変化するかが分析できる。なお、図1(e)のように、資源投入と廃物の排出(負の投入)を、支払われていない負の付加価値(環境外部費用)と考えれば、貨幣価値評価の環境資源勘定とも並存させることができる。

こうした表現はまだ枠組みの設計段階であり、数学的に厳密な表現法の検討や、個々のセルを埋めるのは今後の作業に委ねられているが、次節以降で紹介するMFAの作成事例は、既にこの枠組みのいくつかの異なる断面について、実際に数値を埋めたことにほかならない。

4. マテリアルフロー分析の事例

4.1 産業間のフロー分析

産業連関表の付帯表の一つである物量表は、産業間の物質フローを表している点ではMFAの基礎データの一つであるが、単一の物質についてフローの記述にとどまっている。産業間のフローを体系的にまとめたデータセットの例として、総合エネルギー需給バランス表(エネバラ表)⁹⁾がある。エネバラ表は、化石燃料等のエネルギー資源の供給から転換、消費までを扱ったものであり、物量ではなく熱量単位での集計を中心としている点で厳密にはMFAとは区別すべきであるが、収支をもれなく把握していることなど、産業間フローに関するMFAの手本となるものである。エネバラ表は、既に環境分析の基礎データとして活用されており、エネバラ表に基づく二酸化炭素排出目録の作成手法⁹⁾は、現在でも日本政府から気候変動枠組条約事務局に提出する温室効果ガス排出目録の作成に用いられている。

エネルギーバランス表とほぼ同じ形式による自然資源の産業間のフローの記述は、OECD環境の状況グループにおいて、ノルウェーの主導により行われた木材資源についての“sector/commodity balance table”の事例研究¹⁰⁾において行われている。表1は、この事例研究の形式にあわせた日本の木材資源勘定の試作結果である。この分析では、丸太ないし製材などの加工製品として輸入された木材資源や、国内で伐採された木材が、製材産業、紙パルプ産業などを経て、建築、印刷、包装などの最終用途に至るまでの流れが把握されており、木材資源の供給・需要量の大要が把握できる。しかし、この表現では、供給断面でしか生産地(国産、輸入)を分離していないため、故紙リサイクルによってどれだけの熱帯林伐採が防止できるか、といった分析には用いることができない。実際、多くの人々に誤解されているが、紙の原料となる木材は多くが国産や北米産であり、こうした状況を正しく表現するには、木材の種類をさらに細分化した表現が必要である。

一方、こうした産業間フローは、金属やプラスチック等のリサイクルの観点からも、試算値が報告されている¹¹⁾。また、産業連関表によるエネルギー収支分析の考え方を拡張し、産業間の取引金額に比例して資源が移動するとのモデルを用いれば、資源の産業間のフローの推計が可能である。近藤ら¹²⁾は、この方法により鉄のマテリアルフローを推計し、輸出、資本形成、家計消費といった最終需要の分類ごとに、どのような財の中に鉄が移行しているかの分析を行っている。図2に、既発表の1985年の数値と同様の方法を用い産業連関表延長表に基づいて作成された1990年の分析結果を示す。鉄の大半は鉄鋼製品あるいは機械として輸出されたり、建築物として蓄積し、家計消費を通過する量は全体の10%強にとどまることがわかる。

4.2 国際間のフロー分析

自然資源に乏しい日本は、その供給の大半を輸入に頼るが、熱帯林の伐採に代表されるように、自然資源の採取は環境に大きな影響を与える恐れがあり、自然資源の国際フローの分析は重要な課題である。一方、製造業の海外移転に伴い、エネルギー消費量や環境への負荷の大きな工業製品の輸入が増加しつつあるが、これらは国内での環境負荷を低減させる一方で、輸入相手国における環境負荷を増大させる恐れがある。こうした課題の分析には、資源や製品の国際フローの体系的な把握が必要である。国際産業連関分析はその有

表1 日本の木材資源の部門／商品バランス表（1985年）

		(1000m3)									(1000t)			
		丸太	パルプ材	木材チップ	燃料材	その他の製品	残材	製材	合板	削片板	繊維板	パルプ	紙・板紙	紙・板紙
伐採		21511	12714		326	2097	130							
輸入		32250	367	11812	246			4994	613	9	21	2321	300	635
輸出		-46	-77		-1			-61	-248	-4	-37	-21	-18	-891
在庫変動		-654								16		-16	73	-44
一次供給		53061	13004	11812	571	2097	130	4933	365	21	-16	2284	355	-299
製材業	投入	-40792												
	産出						6348	28476						
木材チップ製造業	投入		-10685				-6478							
	産出			17382										
合板・ベニア製造業	投入	-10604						-119						
	産出			333			496		7032					
削片板製造業	投入	-7		-1347			-327				1170			
	産出													
繊維板製造業	投入	-4		-698			-169							
	産出										606			
パルプ製造業	投入		-1857	-29245										
	産出											9279		
紙・板紙製造業	投入											-10828	-10662	
	産出													20243
その他の供給	投入	-191												
	産出													
ロス・統計調整		902	-462	1763	0	0	0	-33290	-1397	-97	19	0	22	-1
最終消費計		2365	0	0	571	2097		0	6000	1094	609	735	-10285	19942
農業・水産業						2097								0
住宅		749						0	1324	209	95			0
建材									951					52
家具		8						0	2106	677	79			11
紙製品・包装								0				160	-906	8586
印刷													-558	5159
新聞出版													-284	1858
その他の製造業		292						0	570	208	435	537		1080
電力・ガス・水道														0
建設・土木		1316						0	1049					1
商業・輸送														189
官公庁														118
家計					571								-5951	867
その他・不明												38	-2586	2022

この断面での粗鋼換算量は 1.38 億 t

加工現場での鉄くず発生量も含めた最終需要から見た鉄の需数量。減損は鉄くずの量を差し引かなければならない

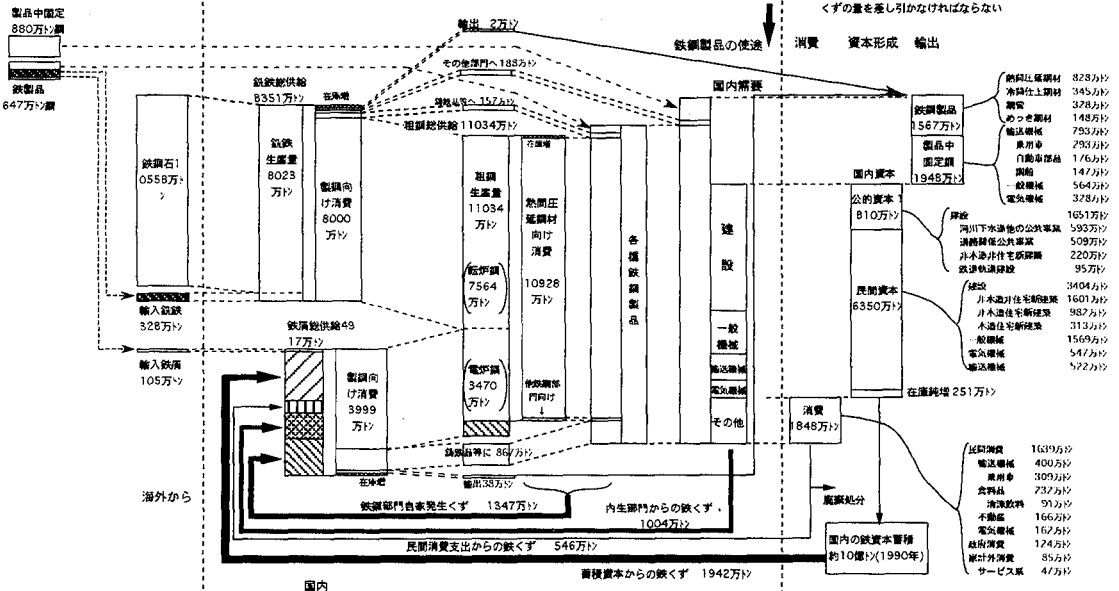


図2 産業連関表により推計した鉄のマテリアルフロー(1990年)

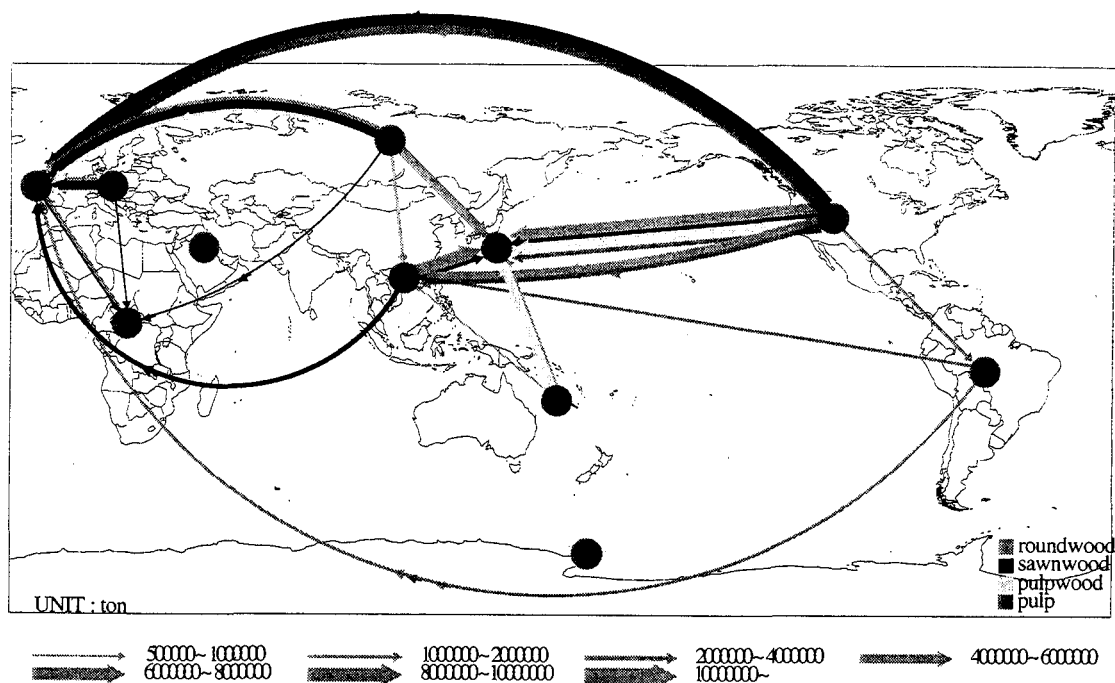


図3 木材資源の国際間フロー（1988年、国連貿易統計による）

力な手段であり、二国間、多国間の産業連関表も作成されつつあるが、対象国が限定されていることなどから、部分的な分析にとどまらざるを得ない。世界的な貿易フローの把握には、国連統計局が編集している国連貿易統計データベースがある。図3は、このデータベースから、木材資源関係のデータを抽出し、地域ブロック間の物量値でのフローを図化したものである。日本の世界の木材貿易に占める位置、さまざまな地域からの供給を受けている事実などが明確に読み取れる。

一方、こうした資源の実フローだけでなく、内包された環境負荷の国際フローの分析も行われており、これらも広い意味でのMFAと位置づけられよう。これには例えば、生産額あたりのCO₂排出量は財の種類によらず地域ごとに決定されるとのモデルを用い、世界貿易マトリックスを用いた行った井村らの分析¹³⁾、日本の産業連関表を用いて求めた財の種類ごとのCO₂排出原単位を用い、全世界に対してこれと同じ値を与えるケースおよびGDP当たりCO₂排出量で補正するケースについて、国連貿易統計との組み合わせによって推計した森口らの試算¹⁴⁾がある。これらは、いずれも輸出入される財の生産に伴うCO₂排出量の、世界の地域ブロック間の貸借関係を表現したものである。

4.3 一国のマテリアルフローの総量の把握

国全体のマテリアルフローの把握は、古くから土木分野でも試みられている¹⁵⁾が、国内では近年、国全体のマテリアルフローをとらえることの必要性が主にリサイクル推進の立場から提起され¹⁶⁾、毎年の環境白書に掲載される環境庁による試算値、クリーン・ジャパン・センターによる計算値¹⁷⁾などが知られている。また、柳沢ら¹⁷⁾は、GRC（総資源消費）概念の提唱とともに、国全体および特定部門における物質収支の試算結果を発表している。これらはいずれも、個々の分野の統計をつなぎあわせ、推計値を交えて作成されたものであり、把握対象は概ね一致しているが、細部の把握漏れや投入と産出の収支が不完全な点が残されている。こうした過去の事例との比較も含め、国際共同研究の一環として作成した日本のマテリアルフローの作成結果について、次に述べる。

5. 国際共同研究による日本のマテリアルフロー勘定の作成と国際比較

5.1 適用した枠組み

ここで示すMFAの枠組みは、ドイツのヴッパータール研究所が開発し、日米独蘭4ヶ国による国際比較研究の実施過程でいくつかの修正を加えたものである。このMFAは、先に述べたわが国のこれまでのマテリアルフローの作成事例とはほぼ同等の内容を含んでいるが、概念の拡張を行うなど、いくつかの相違点がある。この枠組みでは、原則として、自然環境(Ecosphere)と人間活動圏(Technosphere)との境界をフロー計量の断面とする。前者から後者への投入フロー量(図1(a)の第1ブロック)と、後者から前者への排出フロー量(同第3ブロック)の両方、およびそのバランスに着目しながらも、第一段階では投入フローの把握に重点をおいている。これは、資源の枯渇や分配といった問題に目を向けるとともに、投入された資源はすべて潜在的に廃棄物になりうること、一般に資源のフローに付随してさまざまな環境負荷が発生することを考慮したためである。

この枠組みの最大の特徴は、人間活動によって引き起こされながらも、財として扱われないために従来のマテリアルフローの把握から漏れていた「隠れたフロー」に着目した点である。隠れたフローという表現は、国際共同研究で最終的に採用された英語表現の訳であり、ヴッパータール研究所ではこれを「エコロジカル・リュックサック」と名付けている。リュックサックは、「背後に隠れた」「背負った」とのニュアンスを含み、日本語の「負荷」という用語ともよく合致する。これには、鉱物の採鉱段階において掘削される表土・岩石や、選鉱段階で鉱物から分離される不純物、木材資源の採取段階で伐採されながら商品化されない木材などが該当する。自然資源の大半を輸入に頼るわが国にとって、資源産出国で発生するこうした廃棄物は、これまで視野の外におかれてきた。隠れたフローの概念は、国内の経済活動にも適用しており、国内での鉱物採掘のほか、建設活動に伴う地表の掘削などをこれに含めている。また、土地造成や土木構造物の建設に伴う表土の改変量を推計して加えている。この項目は、廃棄物側では、建設残土問題と対応する。

この枠組みでは、こうした鉱業活動や建設活動による土壌の掘削のほか、農業生産による土壌の侵食も加えており、これら「土の移動」を加えていることも特徴の一つにあげられよう。これは土の移動が、生態系や景観の破壊、土壌の生産力の低下に結びついているとの理由からである。なお、これら固体のフローのほか、気体や水のフローも概念的には捕捉対象にしているが、後に述べる指標計算では除外している。

こうして計算される自然から経済活動への資源の実投入量はDMI(Direct Material Input)、隠れたフローを含めた総量はTMR(Total Material Requirement)と名付けられ、人口一人あたり、GDPあたりといった規格化した指標で提示される。なお、TMRは従来ヴッパータール研究所がTMIと名付けたものと同義であるが、隠れたフローは実際には「投入」されないため、“Input”という語の使用を避けたものである。

なお、こうした物質フロー量を、個々の製品やサービス1単位あたりについて求めたMIPS(Material Input Per Service unit)と呼ばれる指標を、環境への負荷を概括的に表す近似指標(proxy indicator)とする考え方が提唱されている¹⁸⁾。MIPSがエネルギー・アナリシスにおけるEnergy Intensityと同様の概念であることは容易に理解されよう。

5.2 日本のマテリアルフロー勘定の作成

先述のとおり、わが国全体のマテリアルフローの作成には、既にいくつかの事例がある。ここではこれまで用いられてきたデータを可能な限り活用しながら、国際共同研究の枠組みにあわせたMFAに拡張するため、修正、追加データの収集を行った。今回の推計では、投入側に重点をおいたが、排出側を含めたバランス全体についても粗い試算を行った。化石燃料に対応する排出側の項目として、二酸化炭素と水蒸気量を推計し、これとバランスさせるのに必要な酸素量を投入側に加えた。また、汚泥や家畜糞尿等の廃棄物について、これまで考慮されていなかったこの水分のバランスを補正した。データソースや計算方法は既報¹⁹⁾のとおりであり、特筆すべき重要な点のみ示す。

- ・石炭、鉱物の隠れたフロー量は、主に国際共同研究を通じて提供された係数を用いて推計した。
- ・農産物については、面積あたり収量から作付け面積を推計し、米国における土壌侵食係数を適用した。
- ・木材については、南洋材について、輸入された純木材量に対して5.5倍の材積が伐採されたとした。
- ・建設工事による掘削量に関しては、建設残土量に加え、土工量を $3\text{m}^3/\text{m}^2$ と仮定して宅地造成による土地掘削量を推定した。宅地造成以外でも現場埋戻しは除外しており、過小推計の恐れがある。

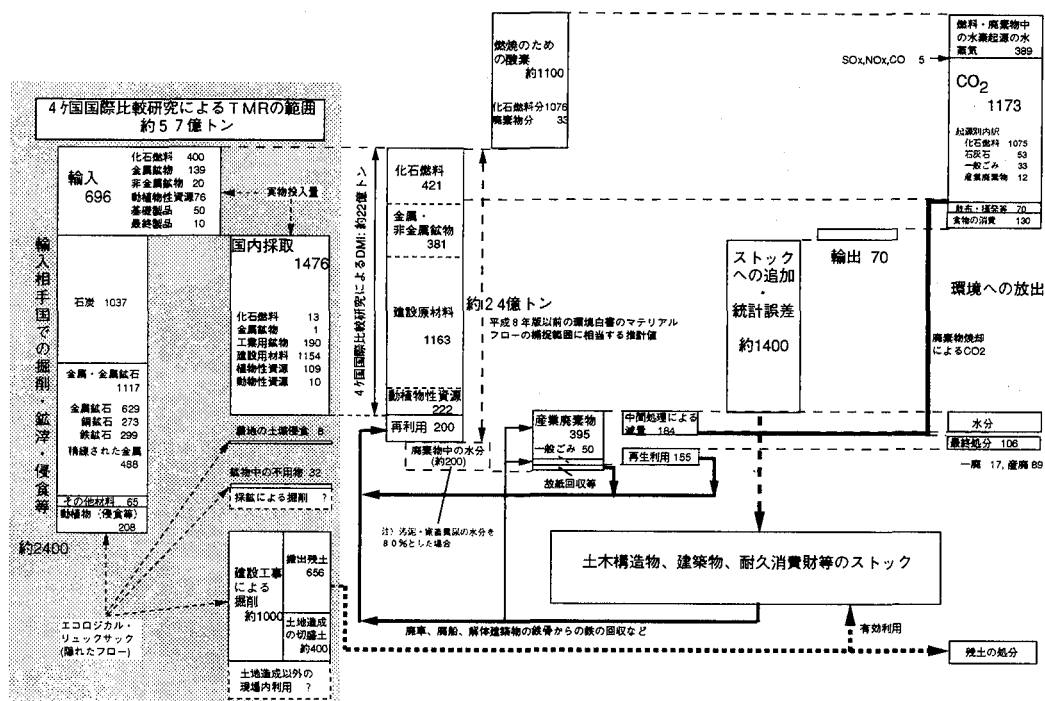


図4 拡張された日本のマテリアルフロー（1990年度） 単位：100万トン

5.3 マテリアルフロー勘定に基づく指標を用いた国際比較

日米独蘭４ケ国の比較研究は、1996年中に共通の分析の枠組みづくりとデータ収集を進め、1997年4月に世界資源研究所、ヴッパータール研究所、オランダ住宅・国土計画・環境省および日本の国立環境研究所の４機関の共同出版の形で成果を発表した²⁰⁾。以下に示す内容は、この共同研究成果に基づく。

図5は、TMRを資源直接投入量（DMI）と隠れたフロー、国内起源と国外起源に分けて、各々の寄与を示したものである。日本のTMRの45トン／人・年は、他の3ヶ国に比べてかなり小さいが、各国とも隠れたフローがTMRの半分ないし4分の3を占め、DMIでみると、日本の17トン／人・年は米国、ドイツと大差はない。国外起源のフローの比率は、自然資源の対外依存度を如実に示し、その比率は米国では数％程度にとどまるのに対し、日本やオランダは国外起源のフローが過半を占め、とくに隠れたフローの比率が

高いことが特徴である。また、図6はTMRの種類別内訳を示したもので、日本の化石燃料の寄与が他国に比べて小さいことが明らかである。さらに詳細にみると、隠れたフローの大きい石炭への依存度が低いことが、一人あたりのTMRが小さいことに寄与している。

図7は、各々の通貨単位の実質GDPあたりTMRの過去約20年間の推移を、1975年を100として比較したもので、最近数年を除いて漸減傾向が各国に共通している。日本では1980年代後半から下げどまりの傾向が見られ、また、ドイツの最近の変化は、東西ドイツの統合前後のデータの不連続性による。一方、国民一人あたりTMRの推移をみると、米国で農地の土壌侵食対策の効果などによる漸減傾向がみられるが、日本を含めた他の3ヶ国は漸増傾向にあり、絶対的な意味での経済成長と物的成長の分離には成功していない。

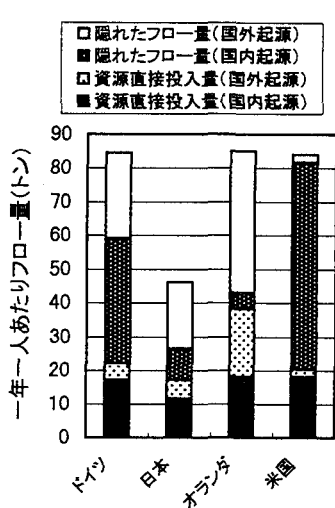


図5 4ヶ国の総物質需要量 (TMR)の比較(1991年)

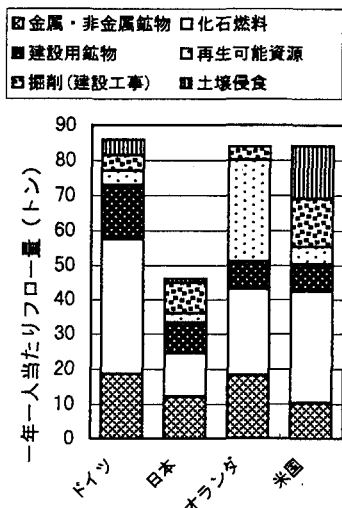


図6 4ヶ国の総物質需要量 (TMR)の種類別内訳(1991年)

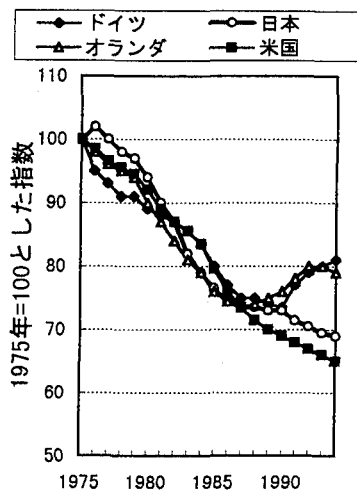


図7 4ヶ国の総物質集約度 (TMR/GDP)の経年変化

6. MFAの今後の展開

6.1 IHDP研究における役割

IHDPの現在の研究計画には、3つのコアプロジェクトがあるが、その一つにあげられているIT(産業転換)プロジェクトとMFAの関わりについて触れる。ITプロジェクトは、「製品やサービスの生産および消費に関する空間的・時間的な傾向、組織および技術、これらが引き起こす物質やエネルギーの変換およびそれに伴う環境への影響、さらにそれによる生活の質への影響を記述することに重点をおいたさまざまな研究活動を包む傘の役割を果たすもの」とされている²¹⁾。その切り口としては、①社会全体を対象としたシステム分析的視点、②企業を対象とした産業エコロジーやエコ効率の視点、③組織の構成や環境管理システムの視点、④消費者を対象とした持続可能な消費形態の視点、の4つに整理されている。このうち、①では地域および製品の観点からみたマテリアルフロー分析、Industrial Metabolism, Ecological Economics などについて言及されている。また、ミクロなマテリアルフロー分析の性格をもつLCAが、②の産業エコロジーの重要な要素であること、④の消費が環境に及ぼす影響の分析の項でも、貿易を通じた環境負荷の転嫁との関連でエコロジカル・リュックサックやMIPSに言及されていることを考慮すれば、マテリアルフロー分析はIT全般における数量的分析の一つの柱となるものと考えられる。

また、IHDPの研究計画の中では、環境経済学全般のアプローチが必ずしも十分には組み入れられていないが、マテリアルフロー分析が自然科学と社会科学の橋渡しの役割を果たすことが期待されることを考えれば、動的な環境経済モデルとの連携など、社会科学側との連携強化が一つの重要な課題となるものと考えられる。この意味では、物量単位のアプローチと貨幣単位のアプローチを共存させることが可能な環境経済

統合勘定や投入産出分析の中にマテリアルフローに関する情報を組み入れ、これらを仲介として、動的な環境経済モデルと自然科学とを結合することが将来の課題であると考え。

6.2 MFA研究および実践面での今後の課題

(1) 統計基盤としての強化

投入産出分析を資源や環境汚染問題に適用すること自身は、20年以上前から提案され、試みられてきている。わが国で産業連関分析の環境への応用が盛んに行われているのは、世界有数の精度の高い産業連関表に支えられたものであるが、環境分析目的にあった拡張など、統計実務面での強化も望まれる。この点で、科学研究側からも、明確な枠組みと優先的な統計整備対象項目を提示していくことが求められよう。MFAが環境に関わる社会科学と自然科学の接点として重要であるためである。

(2) ミクロ・ボトムアップ／マクロ・トップダウンの融合

ミクロレベル、ボトムアップ型のマテリアルフロー分析（LCIや企業レベルの物的な環境会計）とマクロ、トップダウン型のマテリアルフロー分析の融合も重要な課題である。LCAについての公的なデータベースづくりのような、業界単位の積み上げデータの整備と、上記のトップダウン的な統計整備が進めば、急速に両者の距離は縮まるものと思われる。

(3) マテリアルフロー分析と環境変化との統合モデル

環境中での汚染物質の移動を扱うSFAを除けば、MFAは環境の状態の変化そのものを扱う手法というよりは、環境変化のドライビングフォースを扱う手法である。環境指標開発で用いられるPSR（DSR）フレームワークでいえばちょうどP（D）とSが接する断面の分析手法である。産業連関とMFAの融合は、この断面とP（D）の側の結びつきをより詳細なものとするための課題である。一方、この断面とSとの結びつきを強めるには、各々のマテリアルフローがどのような環境の質的・量的変化と結びついているかを記述しなければならない。これはLCAにおけるいわゆるインパクトアセスメント手法と極めて似た性質をもったものであり、その意味でMFAは経済全体についてのLCIとの性格をもつといえよう。このSとの結びつきを、属地的に行えるならば、MFAを介して、部門別分解を基本とする経済統計と、地域別分解を基本とする環境データとをリンクすることが可能となり、投入産出分析やLCAで欠落しがちであった環境問題の地域性を加味することが可能となるだろう。さらにGISの活用等による土地に着目した勘定体系とのリンクまでも視野に入れるが必要であろう。

7. おわりに

本論文では、マテリアルフロー分析およびこれに関係する分析手法の動向を整理し、これらを投入産出分析の枠組みの中に位置づけることを試みた。また、産業間・国際間のマテリアルフローの作成事例や、ヴァーチャル研究所等との国際共同研究で定めた分析の枠組みによる勘定の日本について作成結果、勘定から得られる指標の国際比較の結果を示し、さらに、IHDP／IT研究の動向も視野に入れながら、MFA研究の今後の課題について展望した。MFAの枠組み自身は必ずしも新しいものではないが、今日話題となっているエネルギーや資源に関わる地球環境問題の記述、環境問題の社会科学的側面と自然科学的側面の接点の記述、持続可能な発展の指標の算定基盤としての利用などにおいて、有用なものと考えられる。現時点でのMFAは、刊行されている個別の統計値と、多くの推定をつなぎあわせて作成した試算値の段階であり、より精度の高い分析のためには、基礎となる統計や係数の確立にまで遡った検討が必要である。

本研究に関して、国際共同研究成果報告²⁰⁾の共著者からは、多くの基礎データと示唆をいただいた。また、国内の専門家からの多くの助言、環境庁から民間機関に委託されたマテリアルフローに関するデータ提供をいただいた。表1の木材資源のバランス表作成には、林政総合調査研究所の小池浩一郎氏（現島根大学）の多大なるご協力をいただき、また図2は国立環境研究所の近藤美則氏による算定結果をここに掲載させていただいた。関係各位に謝意を表する。

[引用文献]

- 1) 植田和弘・落合仁司・北島佳房・寺西俊一：環境経済学，有斐閣ブックス(1991)。
- 2) 森口祐一・中杉修身：評価の基本的枠組みと指標体系の構築、文部省科学研究費重点領域研究「人間地球系」研究報告集B009-E11, 1-20(1996)。
- 3) SCOPE:Report of Scientific Workshop on Indicators of Sustainable Development(1996)
- 4) 環境庁リスク対策研究会監修：P R T Rパイロット事業排出量推計マニュアル、化学工業日報社(1997)
- 5) 茅陽一編：エネルギー・アナリシス、電力新報社(1980)。
- 6) W. Leontief:Input-Output Economics (Second Edition) Oxford University Press (1986)。
- 7) W. Radermacher & C. Stahmer:Material and Energy Flow Analysis in Germany Accounting Framework, Proc. Int'l Symp. of Intergrated Environmental and Economic Accounting in Theory and practice, Vol.2, 207-242, (March 1996)。
- 8) 資源エネルギー庁企画調査課編：総合エネルギー統計（毎年刊行）。
- 9) 森口祐一・近藤美則・清水浩：わが国における部門別・起源別CO2排出量の推計, エネルギー・資源, 14(1), 32-41(1993)。
- 10) OECD:Natural Resource Accounts:Taking Stocks in OECD Countries, Environmental Monographs No. 84, OECD/GD(94)17, (1994)
- 11) クリーン・ジャパン・センター編:最新リサイクルキーワード第2版、経済調査会(1995)。
- 12) 近藤美則・森口祐一・清水浩：産業連関表を用いた鉄のマテリアルフローの分析, 環境科学会1993年会, 1B16(1993)。
- 13) 井村秀文・森口祐一・白土廣信・坂井徹：国際貿易に付随する環境負荷移動に関する考察：エネルギーとCO₂, 環境科学会誌, 7(3), 225-236(1994)。
- 14) 森口祐一・近藤美則・井村秀文：品目別貿易OD表を用いた国際環境負荷収支勘定, 環境科学会1993年会, 1B13(1993)。
- 15) 平岡正勝：新体系土木工学91 廃棄物処理, 技報堂出版(1979)。
- 16) 環境庁リサイクル研究会:リサイクル新時代、中央法規出版(1991)。
- 17) 柳沢幸雄・外岡豊・稲葉敦：G R Cによる人間活動の環境基礎負荷量の評価、第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集、261~266(1994)。
- 18) F. シュミット=ブレーク（佐々木建訳）：ファクター10、シェフリンガーフェアラーク東京(1997)
- 19) 森口祐一・吉田雅哉：マテリアルフロー勘定と資源輸入の環境負荷分析、第13回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集、37-42(1997)。
- 20) A. Adriaanse, S. Bringezu, A. Hammond, Y. Moriguchi, E. Rodenburg, D. Rogich, H. Schuetz: Resource Flows : The Material Basis of Industrial Economies, WRI(1997)
- 21) S. de Bruyn, P. Vellinga, R. Heintz (ed.):Industrial Transformation, An Inventory of Research (1997)。