

6

全世界における物質フロー勘定表の構築

京都大学 藤森真一郎 松岡 譲

Development of Global Material Flow Accounts

Kyoto Univ. Shinichiro FUJIMORI, Yuzuru MATSUOKA

1. はじめに

産業革命以降、人為活動による環境中への物質の排出量が増加してきており、様々な環境問題を引き起こしてきた。化石燃料を中心とした燃料燃焼による地球温暖化・大気汚染、人間・家畜の排泄物、窒素・リンなどの化学肥料の大量投入による富栄養化などが、その例として挙げられる。また、一部の化石燃料、金属類については資源の枯渇も懸念される。今後数10年から100年程度の間、人類はこうした物質フローの制御を求められる可能性が高く、物質フローの将来的な様相、あるいは物質フローの制御対策がもたらす効果・影響を示すことは重要となると考えられる。

このような知見はモデルシミュレーションによって得られるが、シミュレーションを行うためにはモデル中で用いるパラメータのキャリブレーションが必要となる。しかし、世界全域の物質フローに関する情報は現存せず、キャリブレーションを行うことができないのが現状である。そこで、本研究は、経済統計、工業統計、貿易統計等様々な統計情報を集め、それらを調整し、全世界における過去30年間の物質フローを記述する勘定表(以降、物質フロー勘定表と呼ぶ)を推計する手法を開発した。対象とする物質は炭素、窒素、リン、鉄を含む物質である。本論文ではその手法と、得られた勘定表の解析結果を示す。

2. 物質フロー勘定表

本章では、物質フロー勘定表について示す。物質フロー勘定表は、人間活動に伴う物質のフローを記述する勘定表である。人間活動によって生産、消費、廃棄、排出される有機物、化石燃料、肥料を中心とした炭素、窒素、リンを含む物、それらの加工品、及びそれらを消費した後に発生する物・環境へ排出される物を対象物とする。以降、この対象物を物質と呼び、その物質の投入先、産出先といった入出力先を部門と呼ぶ。環境と部門間、地域内の部門間、貿易による多国・地域間の物質フローを扱う。

物質勘定表は、物質投入表(以降U表と呼ぶ)、物質産出表(以降V表と呼ぶ)、地域間物質移動表(以降T表と呼ぶ)の3種類の表で構成される(表1-3に示す)。U表は物質が生産活動、最終消費部門へ投入されるときにその物質の量が記述し、V表は物質が生産活動、最終消費部門から産出されるときにその物質の量を記述する。U表、V表は行に物質の種類、列に活動主体を対応させ、地域ごとに作成する。T表は各地域間における物質の貿易量を記述する表であり、行に輸出地域、列に輸入地域を対応させ、貿易される物質ごとに作成する。物質は、[1]財、[2]廃棄物、[3]環境からの産出物(以降環境産出物と呼ぶ)、[4]環境への排出物(以降環境排出物と呼ぶ)、[5]蓄積物の5種類に分類した。財は農林水産品、鉄鋼、化石燃料等39種類、廃棄物は農業残渣、鉄スクラップ等16種類、環境産出物は大気中炭素、鉄鉱石など5種類、環境排出物は排出源別のCO₂、NO_x等55種類、蓄積物は建築物、自動車等8種を設定した。

それぞれの表を炭素・窒素・リン・鉄別に作成し、それぞれの元素含有量で記述する。

表1 U表の雛形

		部門			行計
		生産活動	消費	国外	
物質	財	+	+	+	+
	廃棄物等	+	+	+	+
	環境産出物	+			+
	環境排出物				
	蓄積物				
列計		+	+	+	

表2 V表の雛形

		部門			行計
		生産活動	消費	国外	
物質	財	+	+	+	+
	廃棄物等	+	+	+	+
	環境産出物	+	+		
	環境排出物				
	蓄積物	+			+
列計		+	+	+	

表3 T表の雛形

	輸入地域	輸出量計
輸出地域	+	+
輸入量計	+	

3. 推計手法

本節では、物質フロー勘定表の推計方法の基本的な考え方、式体系について示す。

物質フロー勘定表の推計には物質収支調整作業を行った。物質収支調整作業とは、貨幣単位と物量単位で表された財フローの情報の調整・統合作業である。この作業の中心となる概念は「物質密度」であり、1 単位額の財に含まれる物質の重量と定義される。各財、部門の投入と算出の物質収支バランスを考慮し各情報に最も整合的な物質密度を求解する。

ここで、U 表に記述される物質 i が部門 j への投入量を $M_{i,j,r}^u$ 、V 表に記述される部門 j における物質 i の産出を $M_{i,j,r}^v$ 、T 表に記述される物質 i の地域 r から地域 s への貿易量を $MT_{i,r,s}$ とする。物質収支条件より、財と廃棄物は投入量と産出量が等しくなる。

$$\sum_j M_{i,j,r}^u = \sum_j M_{i,j,r}^v \quad \forall i \in I_{gw}, r \in R, \quad I_{gw} = \text{財、廃棄物}$$

また輸出入を除く各部門は物質の投入量、産出量の合計量が等しくなる。

$$\sum_i M_{i,j,r}^u = \sum_i M_{i,j,r}^v \quad \forall j \in J_{dom}, r \in R, \quad J_{dom} = \text{輸出入以外の部門}$$

各地域の U 表の財の輸出量、輸入量は T 表の輸出入量と等しくなる。

$$M_{i,"row",r}^u = \sum_s MT_{i,r,s}, \quad M_{i,"row",r}^v = \sum_s MT_{i,s,r} \quad \forall i \in I, r \in R \quad \text{ただし、} J = \text{"row"} \text{は国外を表す。}$$

統計報告値と各財のフローの乖離を最小化する。ここでは、統計報告値と変数の二乗和を乖離関数とする。また、各財 i の物質密度に大きな差がないと仮定して、財 i の投入先、産出元の物質密度の差を上記の最適化関数に加える。ここでは、各財 i の U 表、V 表の物質密度を $D_{i,j,r}^u$ 、 $D_{i,j,r}^v$ とし、産出の物質密度と輸出の物質密度の差を表す関数を加えたものを例として示す。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i,j,r \in \text{stat}_{i,j,r}^u > 0} w_{i,j,r}^u (M_{i,j,r}^u - \text{stat}_{i,j,r}^u)^2 + \sum_{i,j,r \in \text{stat}_{i,j,r}^v > 0} w_{i,j,r}^v (M_{i,j,r}^v - \text{stat}_{i,j,r}^v)^2 \\ & + \sum_{i,r} wd_{i,j,r}^{\text{pro-exp}} (D_{i,j,r}^v - D_{i,"row",r}^u)^2 \end{aligned}$$

$$\text{ただし、} D_{i,j,r}^u = \frac{M_{i,j,r}^u}{\text{sam}_{i,j,r}^u}, \quad D_{i,j,r}^v = \frac{M_{i,j,r}^v}{\text{sam}_{i,j,r}^v} \text{ である。}$$

ここで、 $\text{sam}_{i,j,r}^u$ 、 $\text{sam}_{i,j,r}^v$ は社会会計表から得られる財のやりとりを金額で表した情報であり、物質フロー勘定表の U 表、V 表に対応するものである。 $w_{i,j,r}^u$ 、 $w_{i,j,r}^v$ は統計報告値に対する重みを表す係数、 $wd_{i,j,r}^{\text{pro-exp}}$ は財の産出と輸出の物質密度の差に対する重みを表す係数である。環境への排出、廃棄物の発生量等は、財のフローや廃棄物のフローに諸係数を乗じることで推計する。例えば、農業残渣は、財(農業産品)の産出量にある一定係数をかけたものとした。

$$MV_{\text{ard"},j,r} = \alpha_{i,r}^{\text{ard}} \cdot MV_{i,j,r} \quad \forall j \in J, r \in R, \quad I = \text{"ard"} \text{は農業残渣を表す。}$$

本研究では、全世界を 24 地域に区分し、1971 年から 2000 年を対象とした。社会会計表には藤森ら(2008)を、農業統計は FAOSTAT(FAO,2005 等を使用した。

4. 結果

4.1. 直接物質投入量の変遷

直接物質投入量(以降 DMI と呼ぶ)の変遷について見てみる。図 1 は 1971 年を 1 としたときの全世界の炭

素、窒素、リン、鉄の DMI の変遷を表したものである。また、人口と GDP の変遷もグラフに示した。1971 年から 2000 年の間でやや上下はするもののすべての物質の DMI が増加傾向にあり、炭素、窒素、リン、鉄それぞれ 1.6、2.0、1.7、1.5 倍となった。この間 GDP は 2.5 倍、人口は 1.5 倍の増加であった。GDP と比べるとすべての DMI の増加割合は小さかった。炭素は人口とほぼ比例するように増加してきた。一方、窒素は 1990 年頃まで GDP と同様の増加をしてきたが、1990 年以降やや GDP の伸びから乖離するようになった。リンは 1985 年頃まで GDP に近い増加割合を示してきたが、それ以降 GDP から乖離するようになった。鉄は 1990 年付近まで人口と同程度の増加を示してきたが、それ以降やや減少し、再び増加してきている。

これを先進国(OECD 諸国)、新興国(ブラジル、ロシア、インド、中国)、その他途上国に分けて見てみる(図 2-4)。OECD はこの 30 年間で、GDP のみが大きく増加し、DMI は GDP とは大きく乖離している。一方、新興国、その他途上国について見ると、窒素、リンが GDP と同様の増加を示していることがわかる。すなわち、OECD 諸国の過去 30 年間の経済成長は物質投入量の大きな増加を伴うものではなかったが、新興国や途上国の経済成長は物質投入量の増加を伴うものであったことがわかる。

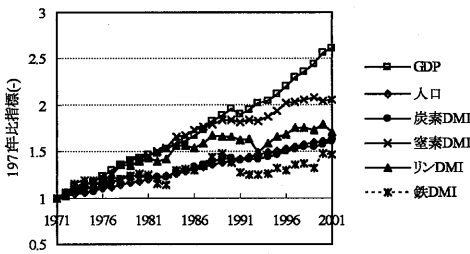


図 1 世界全体の変遷

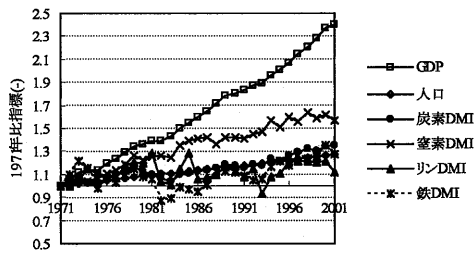


図 2 先進国の DMI の変遷

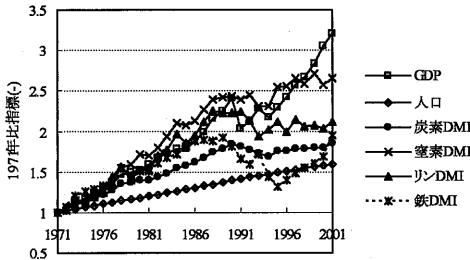


図 3 新興国の変遷

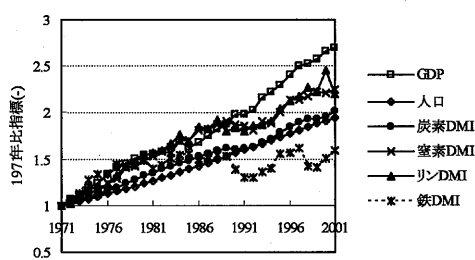


図 2 途上国の DMI の変遷

4.2. 経済水準と直接物質投入量の関係

経済水準と直接物質投入量の関係について見てみる。ここでは、経済水準として一人当たりの購買力平価で表した GDP を用いる。図 5-8 は炭素、窒素、リン、鉄の GDP あたりの直接物質投入量と一人当たり GDP の関係をプロットしたものである。炭素、窒素、リンは似たような傾向を示し、経済水準の向上とともに GDP あたりの直接物質投入量は減少していく。一方、鉄は他の元素とは異なる傾向を示し、GDP が 10000\$ 付近で最大となる山を描くような図となった。これは、経済発展の初期の段階ではインフラ等の整備に伴い鉄需要が増加し、ある一定水準を越えると、鉄需要が小さくなっていくことを意味している。

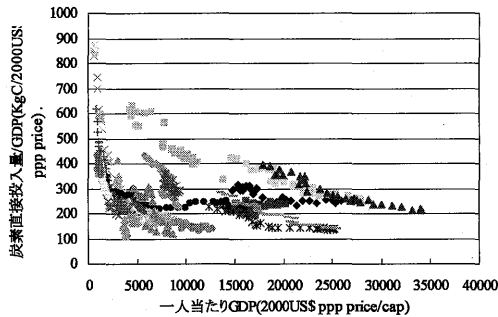


図5 炭素 DMI と経済水準の関係

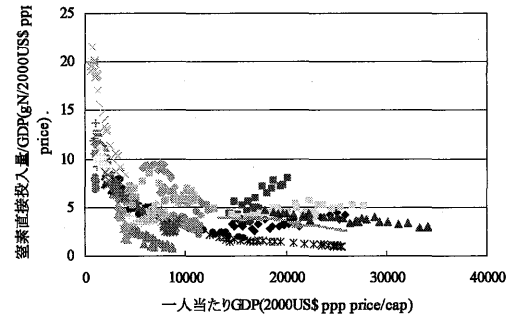


図6 窒素 DMI と経済水準の関係

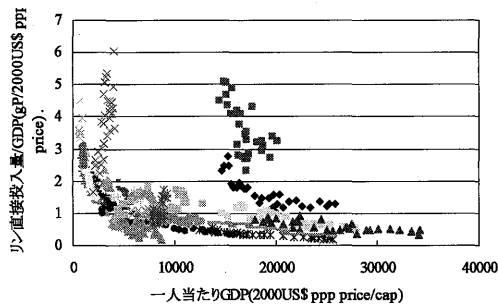


図7 リン DMI と経済水準の関係

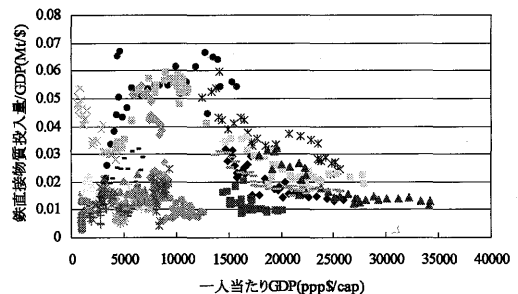


図8 鉄 DMI と経済水準の関係

5. まとめ

本研究では、全世界を対象とした物質フロー勘定表の勘定体系、その勘定表の推計手法、推計結果を示した。対象は全世界 24 地域とし、1971 年から 2000 年までの炭素、窒素、リン、鉄の物質フローを推計した。その結果、対象期間において、いずれの物質の投入量増加し、1.5-2.0 倍になった。先進国では物質フローの増加割合は低かったのに対して、新興国、途上国では増加割合が高かった。また、一人当たり GDP と GDP あたりの物質の投入量に着目すると、炭素、窒素、リンは経済水準の増加とともに GDP あたりの物質投入量は減少する傾向であるのに対して、鉄は経済発展の初期段階で投入量が増加し、それ以降は減少するという傾向が見られた。

謝辞

本研究は、環境省地球環境研究総合推進費 BC-088 「統合評価モデルを用いた気候変動統合シナリオの作成及び気候変動政策分析」、日本学術振興会科学研究費補助金 1061 「世界全域を対象とした社会経済システムにおける物質フローとストックの解明」による研究成果の一部である。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 藤森真一郎, 松岡謙(2008): エネルギー統計・経済統計の統合とそれを用いた世界全域における化石燃料起源のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の推計に関する研究, 環境システム研究論文集, 36, p37-48.
- 2) FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations)(2005): FAO Statistical Databases, Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, Italy.

キーワード: 物質フロー勘定, 社会会計表, データ調整

Key Words: Material Flow Account, Social Accounting Matrix, Data Reconciliation