

全世界の人間活動に伴う炭素フローの 推計手法の開発に関する研究

藤森真一郎¹・諏訪亮一²・河瀬玲奈³・松岡 譲⁴

1 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail: sfujimori@atthost.env.kyoto-u.ac.jp

2 工修 金融庁 (〒100-8967 東京都千代田区霞が関3-1-1)

3 正会員 工修 京都大学大学院助手 工学研究科・地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

4 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科・地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

本研究では、全世界の人間活動に伴う炭素のフローを推計する手法を開発した。全世界の炭素のフローを記述する表として全世界有機物勘定表 (GOAT) を作成した。GOAT は投入表、産出表、貿易表の3種類の表から構成される。フローの推計には物質密度という考え方をを用い、物質収支調整計算を行った。物質密度とは単位金額あたりの物質質量であり、物質収支調整計算とは財の投入産出データと各種生産統計とを整合的に調整し、産物と部門で物質収支をとる計算である。さらに本研究では、1997 年におけるこれらの表を作成した。その結果、全世界で 14107Mt-C が環境から人間活動に取り込まれ、4237Mt-C は処理・再利用過程を経て土壌や水系へ投入され、9600Mt-C が大気へ放出されることが分かった。

Key Words : material flow, global carbon cycle, input output table, environmental account

1. 背景と目的

産業革命以来、人間活動は環境に対して様々な変化を与えてきた。炭素に関して注目してみると、化石燃料の消費や工業プロセスに伴う二酸化炭素排出量の増大、農業活動に伴うメタン排出量の増大、森林資源として固定されている有機物の減少などは、気候変動やその他の地球環境問題に大きな影響を与えている。

これらの問題に対処していくためには、これらの循環に対する人為的摂動がもたらす悪影響をできるだけ少なくするような社会経済システムの構築が必須となる。そのため、社会経済システム内を循環する物質と人間活動と環境問題の関わりを分析するためには、環境負荷の現状を把握し、環境対策を評価するツールが必要となる。こうした考え方に基づいて、資源生産性の向上等を目的に環境資源勘定の概念を用いたマテリアルフロー分析が行われている。

従来の物量勘定においては、元素単位での勘定体系ではあるが一国のマテリアルフローに注目した研究¹⁾、元素単位ではなく重量で物量を扱う研究²⁾、地球規模での

資源勘定を行った研究³⁾などがある。しかし、全世界を対象とし、産業内の収支や輸出入の物質収支を考慮した研究はない。そこで本研究で、社会経済システム内の物質循環と人間活動と環境問題の関わりを分析し、環境負荷の現状を把握することを目的として、全世界を対象とした人間活動に伴う炭素のフローを推計する手法を開発した。また、手法の開発と同時に適用例として1997年における勘定表を作成した。

2. 全世界有機物勘定表 (GOAT) の枠組み

(1) GOAT

GOAT とは全世界における人間活動に伴う有機物のフローを記述する全世界有機物勘定表 (Global Organic matter Account Table) の略称である。GOAT は、環境と経済部門、国内の経済部門間、多国間の経済部門間における有機物のフローを炭素量単位で記述したものである。対象とする物質は、バイオマスや化石燃料など、炭素を含有し経済活動に取り込まれる物質である。ただし、本

研究における人間活動は、森林管理や放牧地管理などの土地利用に関するフロー（例えば、森林のCO₂吸収）を含まない。また、本研究における環境とは、人間活動以外の部分であり、農地、林地、牧草地も環境の範疇となる。また、本研究では炭素を含有する物質を産物、産物のやりとりをする経済主体を部門と定義した。GOATは、投入表(U表)、産出表(V表)、貿易表(T表)の3種類の表から構成される。U表、V表は地域ごとに作成され、行が産物、列が部門を表す。産物の部門への投入をU表に記述し、部門から産物の産出をV表に記述する。T表は貿易される産物ごとに作成され、行が輸出国、列が輸入国を表す。

(2) 産物・部門の分類

産物は、財、廃棄物・副生物(以降「廃棄物等」と呼ぶ)、環境からの投入物(以降「環境投入物」と呼ぶ)、環境への排出物(以降「環境排出物」と呼ぶ)、蓄積物に分類さ

れる。財とは、部門から産出される主産物で、一つの部門からは一つの主産物を産出すると仮定した。本研究の財区分は、Global Trade Analysis Project データベース(第5.4版, Hertel)⁴⁾(以降「GTAP」と略す)の57経済部門の生産財57財のうちの37財に対応する。廃棄物等とは、財以外として部門から産出され、リサイクル財として、あるいは廃棄物処理の対象物として再び部門に投入される産物である。本研究では、産出された廃棄物等は必ず一度部門に投入されると仮定した。廃棄物の区分は、15種類を設定した。環境排出物とは、財以外に部門から産出され、かつ再び部門に投入されずに環境に排出される産物で33種類を設定した。環境投入物とは、環境から部門に投入される産物で5種類を設定した。蓄積物は基準年以降も部門に残存する産物で4種類を設定した。財、廃棄物等、環境排出物、環境投入物、蓄積物の分類を表-1に示す。

一方、部門を生産活動、消費、国外に分類する。さら

表-1 産物の分類

財		廃棄物・副生物	環境排出物	環境投入物	蓄積物
米	その他肉類	農業残渣	一般廃棄物の最終処分	大気中CO ₂	木製品
小麦	油脂類	家畜糞尿	下水排出	水中有機炭素(魚類等)	繊維製品
穀類	酪農産物	木材収穫時残渣	一般廃棄物の燃焼灰処分	化石燃料	建築物
野菜・果実	精穀	食料加工廃棄物	燃料木材・木炭の焼却灰	陸上有機炭素(牧草等)	紙
油糧作物	砂糖類	木材加工廃棄物	人糞投棄	鉱物中無機炭素	
さとうきび	その他食物	食料消費廃棄物	人間の呼吸のCO ₂ 排出		
繊維作物	酒・タバコ	木材消費廃棄物	家畜の呼吸のCO ₂ 排出		
その他作物	布	紙消費廃棄物	木材・木炭の燃焼時のCO ₂ 排出		
畜産	着物	繊維消費廃棄物	農業残渣燃焼時のCO ₂ 排出		
その他畜産	革製品	人糞	化石燃料燃焼時のCO ₂ 排出		
酪農	木材	食料腐敗等の減耗	工業プロセス由来のCO ₂ 排出		
絹・羊毛	紙・パルプ	ストック切り崩し	家畜糞尿燃焼時のCO ₂ 排出		
林業	石油・石炭製品	黒液	一般廃棄物燃焼時のCO ₂ 排出		
漁業	化学・ゴム製品	下水汚泥	エタノール燃焼時CO ₂ 排出		
石炭	その他製造からの産品	プラスチック等	発電用一般廃棄物燃焼時のCO ₂ 排出		
石油	機械		化学部門のCO ₂ 排出		
ガス	建築物		家畜反芻からのCH ₄ 排出		
鉱物	輸送財		木材・木炭燃焼時のCH ₄ 排出		
加工肉			農業残渣燃焼のCH ₄ 排出		
			化石燃料燃焼時のCH ₄ 排出		
			工業プロセス由来のCH ₄ 排出		
			燃料漏出CH ₄ 排出		
			家畜糞尿燃焼時のCH ₄ 排出		
			家畜糞尿処理のCH ₄ 排出		
			水田からのCH ₄ 排出		
			埋立地からのCH ₄ 排出		
			木炭製造時のCH ₄ 排出		
			種苗耕作地蓄積		
			農業残渣の耕作地蓄積		
			収穫時木材残渣の林地蓄積		
			農業残渣燃焼灰の耕作地蓄積		
			コンポストの蓄積		
			家畜の糞尿の蓄積		

に生産活動は GTAP の 57 経済部門に、消費・資本投資は政府、家計、固定資本形成、在庫増減に分類する。

(3) 各表の説明

以上の情報を記述した GOAT のうち U 表、V 表、T 表を表-2、表-3、表-4 に示す。U 表において"+"で示されるセルは、産物の部門への投入、V 表において"+"で示されるセルは、産物の部門からの産出を意味する。空白のセルは概念上数値の入らないセルである。財、廃棄物等、及び生産活動、消費においては投入と産出の物質収支がとられる。そのため、財、廃棄物等においては U 表と V 表の行計が同じ値をとり、同様に生産活動、消費においては U 表、V 表の列計が同じ値となる。T 表における"+"で示されているセルは、行の輸出地域から列の輸入地域への貿易を意味する。貿易誤差は正負両方の値をとる。

表-2 地域 r の投入表

		部門			行計
		生産活動	消費	国外	
産物	財	+	+	+	+
	廃棄物等	+	+	+	+
	環境投入物	+			+
	環境排出物				
	蓄積物				
列計		+	+	+	

表-3 地域 r の産出表

		部門			行計
		生産活動	消費	国外	
産物	財	+	+	+	+
	廃棄物等	+	+	+	+
	環境投入物				
	環境排出物	+	+		+
	蓄積物	+			+
列計		+	+	+	

表-4 地域 r の産出表

	輸入地域	輸出量計
輸出地域	+	+
貿易誤差	±	±
輸入量計	+	

(4) 適用例に使用したデータ

本研究では、適用例として 1997 年表を作成した。その作成に際して使用したデータを以下に挙げる。

財の投入産出、貿易データとして、米国パーデュー大学で整備された GTAP を用いた。GTAP は全世界の産業連関・貿易統計を金銭単位で扱ったデータであり、各地域の産業連関表、貿易統計などを基に作成された調整値である。エネルギーデータとしては、GTAP に付属のものを使用した。食料や木材などのバイオマス関連の生産、貿易統計、土地利用データとしては国連食糧農業機関 (FAO) の統計⁹⁾(以降 FAOSTAT と略す)を用いた。また、

工業製品の生産統計として、国連が公表している工業生産統計⁶⁾を用いた。その他各種文献^{7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14)}を用いて第3章で示す諸係数を設定した。

3. GOAT の作成手法

(1) 物質収支調整計算

本研究では GOAT の作成に際して物質収支調整計算を行った。物質収支調整作業とは、物質のフローを考慮し金銭の収支と物質量の収支を調整する作業である。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 i に含まれる物質(炭素)の重量と定義される。前章で示した産物、部門の各項目で物質収支を考慮し各情報に最も整合的な物質密度を求解する。図-1 に部門の収支、図-2 に産物の収支の概念を示す。部門収支では財、廃棄物等、環境投入物の投入と財、廃棄物等、環境排出物、蓄積物の産出で計算を行い、産物の収支では生産活動、消費蓄積、国外からの産出と各部門への投入で計算を行う。これらの投入量、産出量の値については各種生産統計、報告値を観測値とみなし、この観測量との誤差が最小となる値を推計量となるように定める。

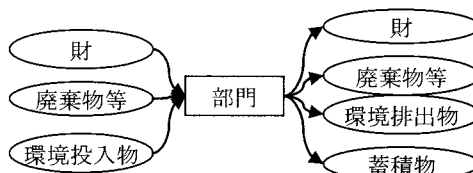


図-1 部門収支

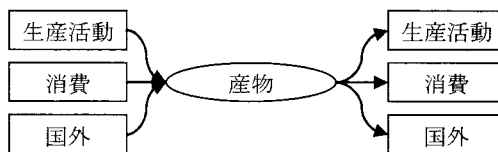


図-2 産物収支

(2) 物質収支調整計算の定式化

本節では、物質収支調整計算において定式化した式を示す。以下の式中で用いられる各変数はアンダーバーを用いた" X_A "の形、もしくはアンダーバーを用いない" Z "の形で表される。" X_A "の形で表される変数のうちアンダーバーの左側" X "の部分が" F "の変数は設定係数、" S "の変数は各種統計から得られる報告値であり、既知変数である。また" Z "の形で表される変数のうち" α "、" w "は、設定係数であり既知変数である。それ以外の変数は全て未知変数である。

a) 物質収支

式(1)は図-1に示す部門*j*の物質収支式を表し、左辺は部門*j*への投入、右辺は部門*j*からの産出を表す。産物の収支式は、財と廃棄物等それぞれについて定式化する。式(2)は財*i*の収支式で、左辺は各部門からの財の産出、右辺は各部門への財の投入を表す。式(3)は廃棄物等の収支式で、左辺は廃棄物等の投入、右辺は廃棄物等の産出を表す。本研究では、産出された廃棄物等は必ず部門に投入され、そこから環境排出物として排出、あるいはリサイクルされると仮定した。

$$\sum_i M_VAFM_{i,j,r} + \sum_n M_ENVI_{n,j,r} + \sum_k M_TWST_{k,j,r} = M_VOM_{j,r} + \sum_k M_GWST_{k,j,r} + \sum_l M_ENVO_{l,j,r} + \sum_p M_STKF_{p,j,r} \quad (1)$$

$$\sum_s M_VIMS_{i,s,r} + M_VOM_{i,r} = \sum_j M_VAFM_{i,j,r} + \sum_s M_VXM_{i,r,s} + M_STKC_{i,r} \quad (2)$$

$$\sum_j M_TWST_{k,j,r} = \sum_j M_GWST_{k,j,r} \quad (3)$$

ここで、

$M_VAFM_{i,j,r}$: 地域*r*の国内供給財*i*の部門*j*への投入量

$M_ENVI_{n,j,r}$: 地域*r*の部門*j*への環境投入物*n*の投入量

$M_TWST_{k,j,r}$: 地域*r*の部門*j*への廃棄物等*k*の投入量

$M_VOM_{j,r}$: 地域*r*の国産財*j*(または、部門*j*)の産出量

$M_GWST_{k,j,r}$: 地域*r*の部門*j*からの廃棄物等*k*の発生量

$M_ENVO_{l,j,r}$: 地域*r*の部門*j*からの環境排出物*l*の排出量

$M_STKF_{p,j,r}$: 地域*r*の部門*j*における蓄積物*p*の蓄積量

$M_VIMS_{i,s,r}$: 財*i*の地域*r*の地域*s*からの輸入量

$M_VXM_{i,r,s}$: 財*i*の地域*r*から地域*s*への輸出量

$M_STKC_{i,r}$: 地域*r*の財*i*の在庫増減量

以降の項では、式(1)から式(3)で表された各変数を表す式を示す。

b) 財の定式化

本項では、財に関するフローを表す式を示す。式(4)は地域*r*、財*i*の産出量を表す。GTAPの金額量に、物質密度 $d_{i,r}^{vom}$ を乗じることにより金額から物質量に変換される。式(5)は地域*r*、財*i*の部門*j*への投入量を表す。式(6)は地域*r*、財*i*の地域*s*からの輸入量、式(7)は地域*r*、財*i*の地域*s*への輸出量を表す。財の国内投入量、輸出量、輸入量は産出量と同様にGTAPの金額量に物質密度を乗じることによって金額から物質量に変換される。ただし、式(5)が示すように国内投入財のうち投入先部門によって、補正項 $d_{i,r}^{vom}$ を用いて物質密度を変化させる。これは、本研究では一つの部門から一つの財を産出すると仮定しているが、現実には単価の異なる複数の財(例えば、木材

部門は製材、チップなど)を産出しており、その現実を反映させるためである。また、式(6)、(7)においては、国内財と輸出入財との価格に差がある現実を考慮し、国内財とは別に輸出入財の物質密度を用いた。式(9)は国内供給財の投入先部門による物質密度の差の制約条件で、物質密度の差の割合を $\alpha_{i,r}^{vom}$ 以内とした。式(10)は国産財と輸入財、輸入財の物質密度の差の割合を $\alpha_{i,r}^f$ 以内にすることを表す式である。ただし、第4章で示す適用例においては、 $\alpha_{i,r}^f$ は財地域とは無関係に2とした。式(8)は、輸出入量の差を示す式で、本研究ではこの値を貿易時の腐敗などによる減耗量と貿易誤差とした。GTAPの輸入額報告値 $S_VIMS_{i,r,s}$ と輸出額報告値 $S_VXMD_{i,r,s}$ の関係は式(11)となり、輸入額 $S_VIMS_{i,r,s}$ は輸出額 $S_VXMD_{i,r,s}$ に輸出税、貿易運賃、輸入関税が付加された額である。

$$M_VOM_{i,r} = S_VOM_{i,r} \cdot d_{i,r}^{vom} \quad (4)$$

$$M_VAFM_{i,j,r} = S_VAFM_{i,j,r} \cdot (d_{i,r}^{vom} + d_{err_{i,j,r}}^{vom}) \quad (5)$$

$$M_VIMS_{i,s,r} = S_VIMS_{i,s,r} \cdot d_{i,r}^{imp} \quad (6)$$

$$M_VXM_{i,r,s} = S_VXMD_{i,r,s} \cdot d_{i,r}^{exp} \quad (7)$$

$$M_TRDE_{i,r,s} = M_VXM_{i,r,s} - M_VIMS_{i,r,s} \quad (8)$$

$$|d_{err_{i,j,r}}^{vom}| \leq d_{i,r}^{vom} \cdot \alpha_{i,r}^{vom} \quad (j \in A) \quad (9)$$

$$|d_{i,r}^{vom} - d_{i,r}^f| \leq d_{i,r}^{vom} \cdot \alpha_{i,r}^f \quad (f \in "trd") \quad (10)$$

$$S_VIMS_{i,r,s} = S_VXMD_{i,r,s} + S_XTAX_{i,r,s} + S_VTWR_{i,r,s} + S_MTAX_{i,r,s} \quad (11)$$

ここで、

$d_{i,r}^f$: 地域*r*、財*i*、フローの種類*f*の物質密度(フローの種類における、"imp"は輸入、"exp"は輸出、"trd"は貿易の輸入および輸出、"vom"は産出、"vom"は国内供給を表す)

$d_{err_{i,j,r}}^{vom}$: 地域*r*、国内投入財*i*が部門*j*へ投入されるとき物質密度の補正項

$\alpha_{i,r}^f$: 地域*r*、財*i*、フローの種類*f*の物質密度の補正範囲

$S_VOM_{i,r}$: 地域*r*の財*i*の産出額報告値

$S_VXMD_{i,r,s}$: 地域*r*から地域*s*への財*i*の輸出額報告値

$S_VIMS_{i,r,s}$: 地域*s*の地域*r*からの財*i*の輸入額報告値

$S_VAFM_{i,j,r}$: 地域*r*の財*i*の部門*j*への投入額報告値

$S_XTAX_{i,r,s}$: 地域*r*から地域*s*への輸出財*i*の輸出税

報告値

$S_MTAX_{i,r,s}$: 地域 s の地域 r からの輸入財 i の輸入税報告値

$S_VTWR_{i,r,s}$: 地域 r から地域 s への輸出財 i の貿易運賃報告値

$M_TRDE_{i,r,s}$: 地域 r から地域 s への貿易財 i の貿易誤差量

o) 廃棄物等、環境排出物、蓄積物の定式化

式(12)は廃棄物等の発生量 $M_GWST_{k,j,r}$ を表す式である。計算過程において廃棄物等は3種類に分類され、それぞれが右辺に表されている。右辺の第一項は、財の中間投入・最終需要への投入の際に発生する廃棄物(例えば木材加工廃棄物や食料加工廃棄物、人間の食料摂取による人糞の排出等)、第二項は農業・林業・畜産業において財の産出に比例して発生する廃棄物(例えば稲藁などの農業残渣)、第三項は廃棄物の投入量に比例して発生する廃棄物(例えば一般廃棄物の焼却灰等)を表す。財の投入の際に発生する廃棄物等の発生係数 $F_IWST_{k,i,j,r}$ のうち食料の中間投入の際に発生する廃棄物(食料加工廃棄物)に関しては、日本の食品ロス統計⁹⁾などを用いて全地域共通の値を設定した。最終需要への投入の際に発生する廃棄物(人糞・食料消費廃棄物)は各地域の一人当たり GDP を用いて地域ごとに値を設定した。木材供給の際に発生する廃棄物に関しては、山地⁸⁾を参考に各地域を途上国と先進国に分類し設定した。化石燃料の原材料としての投入に関しては IEA のエネルギー統計⁹⁾から得られる値を用いて各地域設定した。 $F_IWST_{k,i,j,r}$ の一例として、食料・繊維財が中間投入される時の廃棄物発生率を表-5(次頁)示す。この廃棄係数は、例えば米の場合、米(初付)のうち精米されたときに発生する割合が 0.313 であることを意味する。財の産出に比例して発生する廃棄物の発生係数 $F_PWST_{k,j,r}$ のうち農業残渣の発生原単位については、Johansson¹⁰⁾などを、木材の収穫時残渣の発生原単位は山地⁸⁾を参考に設定した。家畜の糞尿発生原単位は、IPCC が発行している温室効果ガス排出インベントリ¹¹⁾を基に全地域に同じ値を設定した。廃棄物等 k の投入の際に発生する廃棄物 k の発生係数 $F_GWST_{k,k,j,r}$ は諏訪¹²⁾を基に全地域に同じ値を設定した。

$$M_GWST_{k,j,r} = \sum_i M_VAFM_{i,j,r} \cdot F_IWST_{k,i,j,r} + M_VOM_{j,r} \cdot F_PWST_{k,j,r} + \sum_{k'} M_GWST_{k',j,r} \cdot F_GWST_{k,k',j,r} \quad (12)$$

ここで、

$F_IWST_{k,i,j,r}$: 地域 r , 財 i の部門 j への投入の際に発生する廃棄物等 k の発生割合

$F_PWST_{k,j,r}$: 地域 r , 部門 j における財の産出の際に発生する廃棄物等 k の発生割合

$F_GWST_{k',k,j,r}$: 地域 r , 廃棄物等 k' の部門 j への投入の際に発生する廃棄物等 k の発生割合

表-5 食料・繊維財の加工時廃棄係数

財	廃棄係数	財	廃棄係数
米	0.313	漁業	0.471
小麦	0.270	加工肉	0.128
穀類	0.428	その他肉類	0.128
野菜・果実	0.235	油脂類	0.122
油糧作物	0.542	酪農産物	0.126
さとうきび	0.179	精穀	0.124
繊維作物	0.205	砂糖類	0.131
その他作物	0.188	その他食物	0.146
畜産	0.364	酒・タバコ	0.234
その他畜産	0.270	布	0.300
酪農	0.029	着物	0.300
絹・羊毛	0.205	革製品	0.300

式(13)は廃棄物等の投入量 $M_TWST_{k,j,r}$ を表す式である。廃棄物等の投入量は、部門 j' から発生した廃棄物等 $M_GWST_{k',j',r}$ に対して、投入割合の $F_REC_{k',j',r}$ を乗じることによって定式化される。 $F_REC_{k',j',r}$ のうち、紙消費廃棄物のリサイクルに関しては FAOSTAT の統計を基に各地域設定した。木材のリサイクルに関する廃棄物は山地⁸⁾を基に、地域を途上国先進国に分類し、それ以外の廃棄物処理、リサイクルに関しては諏訪¹²⁾を基に設定した。

$$M_TWST_{k,j,r} = \sum_{j'} M_GWST_{k',j',r} \cdot F_REC_{k',j',r} \quad (13)$$

ここで、

$F_REC_{k',j',r}$: 地域 r , 部門 j' で発生した廃棄物等 k の部門 j への投入割合

式(14)は環境排出物 $M_ENVO_{i,j,r}$ を表す式である。環境排出物は計算過程において3種類に分類され、それぞれが右辺に示される。右辺の第一項は財の投入の際に排出される排出物(例えば人間の呼吸による CO₂ 排出等)、第二項は廃棄物等の投入の際に排出される排出物(例えば一般廃棄物の焼却に伴う CO₂ 排出等)、第三項は工業生産などの際に排出される排出物(例えばセメント製造に伴う CO₂ 排出等)を表す。各設定係数のうち財の投入の際に排出される排出物(木材・木炭の燃焼時の CO₂ 排出、人間の呼吸の CO₂ 排出、化石燃料燃焼時の CO₂ 排出等)の排出係数 $F_EOIP_{i,j,r}$ は藤森¹³⁾を参考に全地域共通の値を設定した。廃棄物等の投入の際に排出される排出物(一般廃棄物の最終処分、家畜糞尿燃焼時の CO₂ 排出、農業残渣燃焼時の CO₂ 排出等)の排出係数 $F_EOWS_{k,j,r}$ は諏訪¹²⁾

を基に表-6 に示すような地域区分に分類し設定した。 $F_EOWS_{jkl,r}$ の一例として、各地域における農業残渣の燃焼割合を表-6 に示す。工業生産物などの生産品の生産時に排出される排出物の排出係数 $F_PRD_{jlo,r}$ は IPCC¹¹⁾ を基に全地域共通の値を設定した。 $F_IPRD_{jlo,r}$ の一例として、工業製品生産時の CO₂ および CH₄ 発生原単位を表-7 に示す。表中の数値の単位は工業製品生産量 1t あたりの t-CO₂ もしくは t-CH₄ 排出量である。 $S_IPRD_{jlo,r}$ は、工業統計⁹⁾ より得られる生産量報告値である。

表-6 農業残渣の燃焼割合

地域	燃焼率 (%)	地域	燃焼率 (%)
オセアニア	30	ラテンアメリカ	20
日本	5	OECDヨーロッパ	5
東アジア	2	東ヨーロッパ	20
東南アジア	21	ロシア	20
南アジア	5	中東	30
カナダ	5	アフリカ	25
アメリカ	5		

表-7 工業生産時の CO₂・CH₄ 排出原単位

製品	CO ₂ 排出原単位	製品	CH ₄ 排出原単位
セメント	0.499	カーボンブラック	11.0
生石灰	0.790	エチレン	1.0
ソーダ灰	0.097	スチレン	4.0
アンモニア	1.500	メタノール	2.0
鉄鋼	1.600	コークス	0.5
カルシウム			
カーバイド	0.185		
アルミニウム	1.600		

$$M_ENVO_{i,j,r} = \sum_i M_VAFM_{i,j,r} \cdot F_EOIP_{i,j,l,r} + \sum_k M_TWST_{k,j,r} \cdot F_EOWS_{jkl,r} + \sum_o S_IPRD_{jlo,r} \cdot F_PRD_{jlo,r} \quad (14)$$

ここで、

$F_EOIP_{i,j,r}$: 地域 r , 財 i の部門 j への投入の際に発生する排出物 l の発生率

$F_EOWS_{jkl,r}$: 地域 r , 部門 j への廃棄物等 k の投入の際に発生する排出物 l の発生率

$F_PRD_{jlo,r}$: 地域 r , 部門 j における生産物 o の生産の際に発生する排出物 l の発生率

$S_IPRD_{jlo,r}$: 地域 r , 部門 j における生産物 o の生産量報告値

式(15)は蓄積物 $M_STKF_{p,j,r}$ を表す式である。財の投入量 $M_VAFM_{i,j,r}$ に係数 $F_STK_{i,j,p,r}$ を乗じることで定式化される。係数 $F_STK_{i,j,p,r}$ は、藤森(2004)¹³⁾ を基に全地域共通の値を設定した。

$$M_STKF_{p,j,r} = \sum_i M_VAFM_{i,j,r} \cdot F_STK_{i,j,p,r} \quad (15)$$

ここで、

$F_STK_{i,j,p,r}$: 地域 r , 財 i の部門 j への投入の際に蓄積される蓄積物 p の割合

d) 統計値との整合性

式(16)から式(21)は財の報告されている生産統計値 $FAO_{ele,i,r}$ と整合性をとるための式である。式(16)は財の生産量、式(17)は財の輸出量、式(18)は財の輸入量に関する式である。式(19)は農作物財の種苗量に関する式で、式中の i の要素 agr は農業部門を意味する。式(20)は食料財の飼料量に関する式で、式中の j の要素 hvk は家畜部門を、 i の要素 fod は食料財を意味する。式(21)は財の在庫増減量に関する式である。また、式(22)は重量値で示された生産統計 FAOSTAT を炭素換算する式である。炭素含有率を乗じ、FAOSTAT の生産品 q を GTAP の財区分 i に集約化する。生産品の炭素換算率 F_CBN_q は、食品成分表¹⁴⁾ を基に設定した。 F_CBN_q のうち食料に関する生産品の値を表-8 に示す。表-8 の数値は、食料生産品 1t あたりの炭素含有率を百分率 Cin で表したものである。

表-8 食料生産品の炭素含有率(%)

食品	$C_{in}(\%)$	食品	$C_{in}(\%)$	食品	$C_{in}(\%)$
コメ	37	油絞り粕類	46	牛乳	39.2
穀類	38	砂糖類	43.8	クリーム	36.8
根菜類	10.8	ゴム類	87	蜂蜜	35.5
果実類	5.32	肉類	15.7	動物性油脂	63.5
野菜類	3.5	バター	62.5	魚類	18.6
繊維類	39.2	チーズ	35.7	その他魚介類	10
お茶類	34	スキムミルク	50.6	海産哺乳類	13.2
種子類	60.8	油脂植物類	51	海藻類	3.5
豆類	41	砂糖きび類	43.8	ナッツ類	61.3
スパイス類	39.2	卵	14.5	飲み物類	5.69
植物性油脂	76.5	皮類	15.7		
タバコ	21.7	くず肉類	14.8		

$$M_VOM_{i,r} = FAO_{pro",i,r} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{pro"}) \quad (16)$$

$$\sum_s M_VXM_{i,r,s} = FAO_{exp",i,r} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{exp"}) \quad (17)$$

$$\sum_s M_VIMS_{i,s,r} = FAO_{imp",i,r} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{imp"}) \quad (18)$$

$$M_VAFM_{i,j,r} = FAO_{sed",i,r} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{sed"}) \quad (j=i, i \in agr) \quad (19)$$

$$\sum_{j \in hvk} M_VAFM_{i,j,r} = FAO_{fed",i,r} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{fed"}) \quad (i \in fod) \quad (20)$$

$$M_STKC_{i,r} = FAO_{stk",i,r} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{stk"}) \quad (21)$$

$$FAO_{ele,i,r} = \sum_{q \in i} S_FAO_{ele,q,r} \cdot F_CBN_q \quad (22)$$

ここで、

$S_FAO_{ele,q,r}$: 地域 r , 生産品 q の生産量・貿易量などの重

量報告値(ただし、*ele* は"pro"のとき生産、"imp"のとき輸入、"exp"のとき輸出、"sed"のとき種苗、"fed"のとき飼料、"stk"のとき在庫増減を意味する)

F_CBN_q : 産物 q の炭素含有率

$FAO_{ele,i,r}$: 地域 r における財 i に含まれる炭素量

$\varepsilon_{i,r}^{ele}$: 地域 r , 財 i の ele に関する誤差

e) 目的関数

式(23)は誤差を最小にする目的関数である。誤差項、補正項の重みである $w_{\varepsilon_{i,r}^{ele}}$, $w_{trd_{i,r}^f}$, $w_{vf_{i,j,r}}$ は、計算前に定めておく必要がある。本計算では、 $w_{\varepsilon_{i,r}^{ele}}$ に関しては $FAO_{ele,i,r}$, $w_{trd_{i,r}^f}$ の輸入に関しては $\sum S_VIMS_{i,s,r}$, 輸出に関しては $\sum S_VXMD_{i,r,s}$, $w_{vf_{i,j,r}}$ に関しては $S_VAFM_{i,j,r}$ を使用した。

$$\sum_{ele} \sum_i \sum_r \left(\left| \varepsilon_{i,r}^{ele} \right| \cdot w_{\varepsilon_{i,r}^{ele}} \right) + \sum_i \sum_j \sum_r \left(\left| d_{i,j,r}^{vafm} - d_{i,j,r}^f \right| \cdot w_{vf_{i,j,r}} \right) + \sum_{f \in trd} \sum_i \sum_r \left(\left| d_{i,r}^{vom} - d_{i,r}^f \right| \cdot w_{trd_{i,r}^f} \right) \rightarrow \min \quad (23)$$

ここで、

$w_{\varepsilon_{i,r}^{ele}}$: 地域 r , 財 i の要素 ele における誤差項の重み

$w_{trd_{i,r}^f}$: 地域 r , 財 i のフローの種類 f における物質密度の補正項の重み

$w_{vf_{i,j,r}}$: 地域 r , 財 i が部門 j に投入される際の物質密度の補正項の重み

以上(1)から(23)の各式は線形計画法として記述し、GAMS21.4を用いて実装した。ソルバーにはCplexを用いて求解した。

4. 結果・考察

本研究では、実証データとして1997年表を作成した。本章では、その推計結果および分析結果を以下で示す。

(1) 世界の炭素フローの概観

推計結果として得られたGOATの値を基にして作成した、1997年における全世界の人間活動に伴う炭素のフロー図を図-3に示す。図-3は1997年における全世界の炭素のフロー図で、矢印の太さはフローの大きさを表し、図中数値の単位はMt-Cである。また、図の右端にある凡例のように、矢印の先の根元が開いているものは化石燃料由来の産物のフローを表す。図中のバイオマス生産部門とは農業・畜産業・漁業、バイオマス加工部門は食料加工業・木材加工業・繊維工業などを意味する。化石燃料生産・鉱業部門は石油・石炭、石灰石などの採掘業、化石燃料加工・化学部門は石油化学工業などの化学工業を意味する。廃棄物処理部門は、下水処理、一般廃棄物処理を行う部門で、GTAPの部門区分における「公共機関」である。消費とは、家計・政府に加え、生産活動において化石燃料を燃焼する、あるいはバイオマスを消費する活動も含む。ストックとは、資本蓄積及び、繊維製品などの資本蓄積以外の蓄積物を意味する。ガス(CO₂, CH₄)排出は、第2章で示した環境排出物のうち、大気に排出されるCO₂やCH₄を意味する。環境排出物とは、表-1で示した分類のうち、農地、牧草地や林地に排出される農業残渣、家畜糞尿や収穫時木材残渣、焼却灰などである。環境投入物は第2章で示した環境からの投入物である。

まずバイオマスに注目してみると、環境投入物のうち陸上有機炭素、大気中CO₂、水中有機炭素がバイオマス

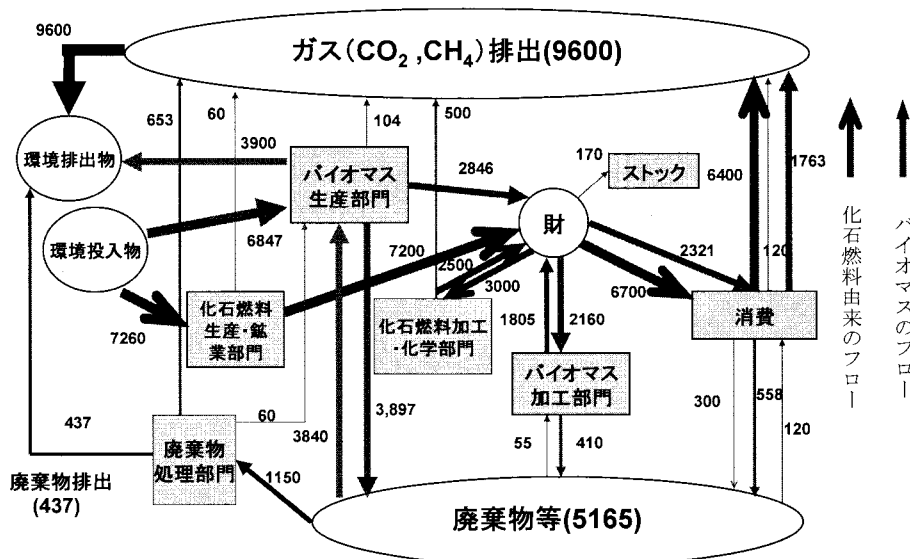


図-3 全世界の炭素フロー(単位はMt-C)

生産部門に 6847Mt-C 投入される。バイオマス生産部門からは、廃棄物等が農業残渣、収穫時木材残渣、家畜糞尿としてそれぞれ、2501Mt-C、425Mt-C、971Mt-C 発生し、3840Mt-C は再びバイオマス生産部門に投入される。これは、産出された農業残渣や家畜の糞尿の大部分が、一部の燃料に使用されるものを除き、そのまま自部門に投入されることを意味する。また、再投入された廃棄物と種苗が農地、牧草地、林地に 3900Mt-C 投入され環境排出物となる。またバイオマス生産部門は、食料や木材などの財として 2846Mt-C を産出する。バイオマス加工部門は 2160Mt-C の財が投入され、財として 1805Mt-C が産出される。その際に廃棄物等が 410Mt-C 発生する。古紙や木材残渣の一部である 55Mt-C はバイオマス加工部門に投入される。産出された財のうち 2321Mt-C は消費にまわる。そのうち大気への排出物として 1763Mt-C 排出され、廃棄物等は 558Mt-C 発生する。廃棄物等のうち 120Mt-C は消費へリサイクル投入される。

一方、化石燃料に注目してみると、環境投入物のうち化石燃料が化石燃料生産部門に 7260Mt-C 投入される。化石燃料生産部門は 7200Mt-C を財として産出する。化石燃料加工部門は 3000Mt-C を投入し、2500Mt-C を財として産出する。消費においては、6700Mt-C を燃焼し 6400Mt-C を大気に排出し、300Mt-C が廃棄物等として発生する。廃棄物等は 5165Mt-C 発生し、そのうち廃棄物処理部門に回るものが 1150Mt-C で、最終的に環境排出物として水系や陸地へ排出されるのは 437Mt-C である。一方、生産・消費・廃棄すべての過程で CO₂ や CH₄ として大気へ放出されるのは 9600Mt-C であった。農地や牧

草地に排出される廃棄物量 3900Mt-C は、化石燃料の産出量 7260Mt-C の約 54% にあたりバイオマス廃棄物はエネルギー資源としても莫大な量を有していることがわかる。地球温暖化の防止のためにもカーボンニュートラルという特性を持つバイオマスエネルギーは、化石燃料に代替する新たなエネルギー供給源の一つになる可能性を持っている。

(2) 貿易マトリクス

次に、全有機物の各地域の貿易についての結果を示す。表-9 は 75 地域で表示される T 表を地域ごとに集約化して示したものである。表中の数値は、化石燃料中の炭素量とバイオマス中の炭素量の合計値である。世界合計値 3295Mt-C のうち化石燃料中の炭素貿易量の世界合計値は 2813Mt-C で、バイオマス中の炭素は 482Mt-C であった。

地域別に見ると、化石燃料を多く産出する中東やアフリカなどの途上国の輸出量が多く、食料資源や化石燃料を大量に輸入する日本の輸入量の大きさが目立つ。北アメリカ、西ヨーロッパは、バイオマスの輸出量が多いが、化石燃料の輸入量もそれ以上に多いために、輸入量から輸出量を引いた貿易バランスについては、輸入超過という結果になっている。この結果から、総じて、エネルギーを大量に消費している先進国に大量の炭素が流入しているといえる。

(3) 推計結果の誤差値

第 3 章で示した物質収支調整計算における推計結果の

表-9 炭素の貿易マトリクス(単位はMt-C)

	オセアニア	東アジア	日本	東南アジア	南アジア	北アメリカ	中東	ラテンアメリカ	西ヨーロッパ
オセアニア	3.3	16.3	57.4	6.7	6.6	2.7	3.6	5.2	16.4
東アジア	0.1	0.0	8.5	3.0	0.1	0.9	0.8	0.3	0.7
日本	0.1	0.9	0.0	2.6	0.3	1.9	1.0	0.3	2.0
東南アジア	9.0	20.4	52.5	44.5	6.1	8.1	1.9	1.3	7.3
南アジア	0.1	0.1	0.6	1.4	0.5	0.8	2.7	0.4	2.2
北アメリカ	1.0	14.0	46.0	10.4	2.3	171.2	15.0	40.0	50.1
中東	10.7	93.1	196.5	90.1	41.2	90.5	22.8	14.4	162.5
ラテンアメリカ	0.3	3.0	5.5	2.6	0.7	186.9	9.3	73.4	41.0
西ヨーロッパ	1.4	1.7	6.3	9.5	3.3	53.6	24.3	6.8	396.2
東ヨーロッパ	0.0	0.1	0.4	0.5	0.1	1.0	1.6	0.7	31.0
ロシア	0.0	1.1	6.0	1.0	0.2	1.6	14.2	4.8	126.3
アフリカ	0.6	12.8	7.0	5.8	8.7	87.9	18.2	11.3	177.4
その他	1.3	1.0	2.6	1.3	0.5	0.4	0.3	0.2	1.2
中国	0.5	12.2	21.1	8.8	1.4	6.2	1.5	0.6	4.5
合計	28.6	176.9	410.3	188.0	71.9	613.6	117.0	159.8	1018.7
輸入－輸出	-113.9	150.7	396.3	-11.1	60.1	228.9	-651.9	-180.3	448.4

	東ヨーロッパ	ロシア	アフリカ	その他	中国	合計
オセアニア	0.8	0.2	1.7	1.0	20.9	142.5
東アジア	0.1	0.1	0.2	0.0	11.3	26.2
日本	0.1	0.2	0.5	0.1	3.9	13.9
東南アジア	0.8	0.3	1.0	1.6	44.2	199.0
南アジア	0.2	0.5	1.1	0.3	0.9	11.7
北アメリカ	3.1	1.4	11.0	0.7	18.5	384.7
中東	6.4	1.4	16.2	0.6	22.6	769.0
ラテンアメリカ	1.4	1.5	8.7	0.8	5.0	340.1
西ヨーロッパ	18.7	7.5	19.3	3.6	18.1	570.4
東ヨーロッパ	11.4	8.7	1.0	0.9	0.3	57.8
ロシア	72.3	101.8	0.7	5.7	4.6	340.3
アフリカ	3.4	0.3	12.0	0.8	9.9	356.1
その他	0.1	0.1	0.2	0.5	0.9	10.5
中国	0.6	0.6	1.3	1.4	12.4	73.1
合計	119.4	124.5	75.1	18.1	173.4	3295.3
輸入－輸出	61.6	-215.8	-281.0	7.7	100.3	

誤差値を示す。図-4に各地域の財の産出量に関する誤差、図-5に輸入量に関する誤差を示す。地域 r 、財 i の ele に関する誤差 $\varepsilon_{i,r}^{ele}$ を財 i について平均を取り、地域別に集約化したものを図-4、図-5 に示した。図中のプロットは誤差の地域平均値を、縦バーは 1σ の範囲を示す。まず、産出量に関する誤差について見ると、アフリカで-20%、それ以外の地域は±10%以下であった。輸入量に関する誤差については、アフリカ、ラテンアメリカ、西欧、東欧で-20%~-30%であったが、それ以外の地域は±10%以下であった。

次に、生産量に関する誤差 $\varepsilon_{i,r}^{pro}$ の、財ごとの誤差値を表-10に示す。表-10は、米、羊毛、材木の産出量に関する誤差 $\varepsilon_{i,r}^{pro}$ を地域ごとに集約化した値である。表中の値は百分率で示される。東南アジアの羊毛、アフリカの材木でそれぞれ+46%、-42%となっているが、それ以外の地域、財に関しては、比較的小きな値で収まった。

表-10 米・羊毛・材木の産出量の誤差(%)

	オセアニア	東アジア	東南アジア	南アジア	北アメリカ	西欧
米	0	0	0	0	0	4
羊毛	0	0	46	-29	-22	35
材木	0	-18	-16	-17	0	-2
	ラテンアメリカ	東欧	ロシア	アフリカ	その他	
米	0	0	0	-8	0	
羊毛	-8	-15	0	-17	0	
材木	-18	0	0	-42	0	

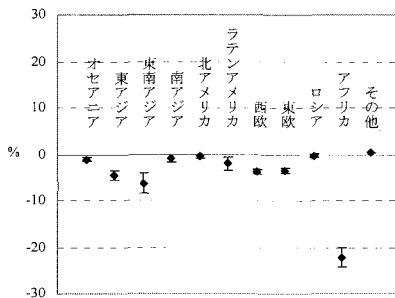


図-4 産出量誤差

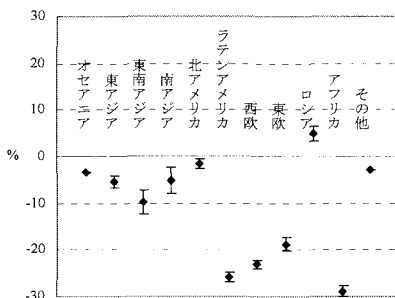


図-5 輸入量誤差

5. 結論

本研究では、全世界の人間活動に関する炭素のフローの推計手法を提案した。具体的には、フローを記述する表として全世界有機物勘定表(GOAT)を開発した。その推計例として、1997年における勘定表を示した。その結果、全世界で人間活動に取り込まれる炭素量は、バイオマスとして 6847Mt-C、化石燃料として 7260Mt-C であった。それらのうち廃棄物として発生するのは 5165Mt-C であった。人間活動から環境へ排出される炭素のうち、大気への排出物が 9600Mt-C、土壌や水系に排出されるのが 4237Mt-C であった。バイオマス生産部門において発生するバイオマス廃棄物の発生量は 3897Mt-C であった。これは化石燃料の生産量の約 54%を占めており、今後バイオマス廃棄物の有効利用が期待される。世界の貿易に関しては、バイオマスに比べて化石燃料の貿易される割合が大きかった。そのため、エネルギー消費の多い先進国に大量の炭素が流入していることが示された。

参考文献

- 1) Kubezcko, K. (2001): Austrian Carbon Database: Production and Waste. Material Flow Based Carbon Accounting for 1990, IIASA.
- 2) 森口祐一, 寺園淳, 南齋規介(2003): 環境勘定・環境指標を用いた企業・産業・国民経済レベルでの持続可能性評価手法, 国立環境研究所.
- 3) 槌屋治紀 (1990): 地球環境とグローバル資源テーブル, 環境研究, No.78, 83-91.
- 4) Hertel, T.(2003): Global Trade, Assistance, and Production The GTAP 5 Data Base, Purdue University.
- 5) FAO(1997): http://www.fao.org/waicent/portal/statistics_en.asp
- 6) UN(2003): Industrial Commodity Statistics, United Nation.
- 7) 農林水産省統計部(2000): 食品ロス統計調査報告書, 農林統計協会.
- 8) 山地憲治, 山本博巳, 藤野純一(2000): バイオエネルギー, ミオシン出版.
- 9) IEA(2000): Energy Statistics.
- 10) Johansson, T.B., H. Kelly, A.K.N. Reddy, R.H. Williams (1993): Renewable Energy Source for Fuels and Electricity. Biomass for Energy: Supply Prospects, Island Press.
- 11) IPCC(1997): Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Reference Manual, IPCC.
- 12) 諏訪亮一(2005): 人間活動に伴う炭素, 窒素, リンのマテリアルフローに関する研究, 京都大学修士論文.
- 13) 藤森真一郎(2004): 全世界のバイオマステーブルの構築, 京都大学卒業論文.
- 14) 科学技術庁資源調査会編(2004): 五訂日本食品標準成分表, 女子栄養大学出版部.

A STUDY ON DEVELOPMENT OF ESTIMATING METHOD OF GLOBAL CARBON FLOW INDUCED BY HUMAN ACTIVITY

Shinichiro FUJIMORI, Ryoichi SUWA, Reina KAWASE and Yuzuru MATSUOKA

In this study, we developed a method of estimating global carbon flows induced by human activity. We propose Global Organic matter Account Table (GOAT) to describe the flows. GOAT consists of an input table, an output table and a trade table. To estimate the flows, we reconciled reported production and consumption values to material balances using material densities. Material density is defined as the mass of material per unit of money. The reconciliation of material balances is the way to balance out input and output flows. We make the tables in year 1997 to demonstrate the method. In the results, human activities take in 14107Mt-C from environment. The human returns 4237Mt-C to soil or water environment through disposing and exhausts 9600Mt-C to the air.