

22. 全世界におけるバイオマステーブルの構築

DEVELOPMENT OF GLOBAL BIOMASS TABLE

藤森真一郎*・河瀬玲奈*・松岡 譲*

Shinichiro FUJIMORI, Reina KAWASE and Yuzuru MATSUOKA

ABSTRACT; Biomass is expected to play an important role to solve global warming problem and energy resource depletion problem. In order to utilize the biomass, we need a reliable estimation of its volume. We developed a “Global Biomass Table” to evaluate comprehensively the biomass flow related to human activity. The global biomass table shows the biomass flow of input, output, export, import and waste at each economic sector in 1997. We used the economic data (GTAP Vr.5) which divided the world into 66 regions and divided the each region into 60 sectors. As a result, we can overview global biomass flows. For example, the waste of biomass is produced 4.76PgC in the world. The waste is equal to 20 % of exhaust carbon emitted from fossil fuel. China and USA and India produce much waste and approximately half of the waste is occupied with agricultural residue. USA and India export much biomass. On the other hand, Japan and Korea import much biomass which equal to two third of domestic biomass consumption.

KEYWORDS; Biomass, Energy, Residue, Carbon

1 はじめに

地球温暖化問題、エネルギー資源枯渇問題に対する一つの解決策として近年バイオマスが注目を集めている。バイオマスは水と二酸化炭素と光で再生可能であり、カーボンニュートラルであるため、燃焼時の正味の二酸化炭素排出量がゼロという利点を有している。さらに供給能力も莫大であると考えられており、山地ら(2000)は、バイオエネルギーについて将来の主要な一次エネルギー供給源になりうるという推計を行っている。しかし、バイオマス資源をエネルギー以外の用途を含めて総合的に評価した研究例は少ない。その要因として以下の二つがある。まずバイオマスは生産から廃棄、リサイクルに至るまでの複雑な過程を経ていること、その二は、バイオマス評価の系統的なデータ整備が行われてこなかったことである。

バイオマス利用の将来推計をする上で、現在のバイオマス資源の評価をすることが必要不可欠となる。そこで、本研究では、世界全域において人間が生産・消費・廃棄するバイオマスを総合的に評価するバイオマステーブルを構築した。ここで、本研究におけるバイオマスとは、人間の消費する食料・木材と、それらを生産・加工・消費する段階で発生する廃棄物を意味する。

一般にバイオマスを対象とした研究においては、バイオマスを表す単位として高位発熱量・低位発熱量などの熱量が用いられるが、本研究ではバイオマスを表す量として炭素量を用いた。その理由は以下の二点である。第一は、バイオマスの有効利用を考える上で残渣系のバイオマスはエネルギー利用以外に土壌調整剤など様々な用途が考えられる。その際には、バイオマス中の窒素やリンの含有量も問題となってくるが、それぞれのバイオマスにおける炭素量に対する元素比は大きく変化するものでない。第二に、バイオマスの利用時に削減可能な二酸化炭素排出量が炭素量として明示される点である。

*京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻、Department of Urban Environmental Engineering, Graduate school of Engineering, Kyoto University

2 研究の内容

2.1 研究の概要

国連食糧農業機関（FAO）の統計(FAO,1997)（以降 FAOSTAT と略す）のバイオマス生産データと米国パーデュ大学で整備された Global Trade, and Production データベースの財投入産出データ（第5版、Hertel, 1997）（以降 GTAP と略す）を用いて調整計算を行い、地域内 IO 表（Input-Output 投入産出の略）、地域間貿易表の二種類の表からなるバイオマステーブルを作成した。

2.2 バイオマステーブル

本研究で作成する地域内 IO 表は、世界 66 地域における地域ごとのバイオマスの産出量、投入量及び輸出入量を 70 行 62 列の項目ごとに表現した表である。図 1 に地域内 IO 表の概要を示す。行項目はバイオマスを産出する産業 i 部門（GTAP(第5版)の区分に従う 57 部門）と廃棄物種 k （家畜糞尿、農業残渣、木材残渣、家畜からのメタン、消費時食料廃棄物、消費時繊維廃棄物、消費時木材廃棄物、加工時食料廃棄物、加工時繊維廃棄物、加工時木材廃棄物、人糞、人間の呼吸の 12 種）、環境で構成されている。列項目はバイオマスを投入される j 部門（産業 57

部門と最終需要 3 部門（投資財、家計、政府））、輸入、輸出で構成される。本研究では、 i 部門が産出する財は一つの財 i のみとした。図 1 中の記号の意味を以下に示す。

- $D_{r,i,j}$: 地域 r の部門 i から部門 j に投入されるバイオマス量
- $IM_{r,i}$: 地域 r が地域 r 以外の部門 i から輸入するバイオマス量
- $XP_{r,i}$: 地域 r の部門 i が輸出するバイオマス量
- $PR_{r,i}$: 地域 r の部門 i が産出するバイオマス量
- $TP_{r,j}$: 地域 r の部門 j が投入するバイオマス量
- $ENV_{r,j}$: 地域 r の部門 j に環境より投入されるバイオマス量
- $wst_{r,j,k}$: 地域 r の部門 j が投入された財を加工または消費する際に発生する廃棄物種 k の排出量

輸入については部門 i へのマイナス投入となる。廃棄物量も j 部門からの排出量となるため、マイナス投入となる。行の合計の項目 $PR_{r,i}$ は、部門 i の財中に含まれるバイオマスの産出量を表している。列の合計の項目 $TP_{r,j}$ は、産業部門においては部門 j の投入量を表していて、最終需要部門ではストックにまわされた量を表す。 $PR_{r,i}$ と $TP_{r,j}$ は式(1)の関係となる。

$$PR_{r,i} = TP_{r,j} \quad (i = j) \quad (1)$$

産業及び 最終需要 j 部門		輸入	輸出	合計
産業 i 部門	$D_{r,i,j}$	$-IM_{r,i}$	$XP_{r,i}$	$PR_{r,i}$
廃棄物 k 種	$-wst_{r,j,k}$			
環境からの投入	$ENV_{r,j}$			
合計	$TP_{r,j}$			

図 1. 地域 r における地域内 IO 表の概要

	地域 s	合計
地域 r	$X_{r,i,s}$	$XP_{r,i}$
合計	$IM_{s,i}$	TT_i

図 2. 部門 i の地域間貿易表の概要

地域間貿易表は、産業 57 部門のうちバイオマスの商品として産出する 27 部門について、部門ごとに地域間における輸出入量を表したものである。行項目はバイオマスを輸出する地域 r 、列項目はバイオマスを輸入する地域 s を表し、66 行 66 列からなる。図 2 にその概要を示す。図 2 中の変数の意味を以下に示す。

$X_{r,i,s}$: 地域 r の部門 i から地域 s へ輸出されるバイオマス量

TT_i : 部門 i で生産される財の世界全域における貿易量

2.3 計算内容

本節では、本研究で行った具体的な計算を示す。

(A) バイオマスの炭素量換算

本研究ではバイオマスを炭素量で表すため、FAOSTAT から得られる物量単位のデータを炭素換算する。食料（農業生産物、畜産生産物）は 105 種類ある品目を 36 に統合し、それぞれの分類ごとに炭素含有率を決定する。食料の炭素含有率は食品成分データ(科学技術庁資源調査会,1999)より算出し設定した。木材、紙、パルプの炭素含有率については、高位発熱量のデータより算出し設定した。

(B) FAOSTAT と GTAP の調整計算

FAOSTAT と GTAP の調整計算をする過程では、GTAP の経済データと前項(A)で炭素換算した FAOSTAT の物量データを用いて計算する。以下に計算に用いた式を示す。

$$D_{r,i,j} = VDSM_{r,i,j} \cdot dd_{r,i} \quad (2)$$

$$M_{r,i,j} = VISM_{r,i,j} \cdot di_{r,i} \quad (3)$$

$$X_{r,i,s} = VXS_{r,i,s} \cdot dx_{r,i} \quad (4)$$

$$dd_{r,i} = \frac{PR_{r,i}}{\sum_j VDSM_{r,i,j}} \quad (5)$$

$$di_{r,i} = \frac{IM_{r,i}}{\sum_j VISM_{r,i,j}} \quad (6)$$

$$dt_{r,i} = \frac{XP_{r,i}}{\sum_s VXS_{r,i,s}} \quad (7)$$

$$PR_{r,j} = \sum_i (D_{r,i,j} + M_{r,i,j}) \cdot pc_{r,i} \quad (8)$$

$$XP_{r,i} = \sum_s VXS_{r,i,s} \cdot dd_{r,i} \quad (9)$$

$$IM_{s,i} = \sum_r X_{r,i,s} \quad (10)$$

$$wst1_{r,j,k1} = PR_{r,j} \cdot wc_{j,k1} \quad (11)$$

$$wst2_{r,j,k2} = \sum_i (D_{r,i,j} + M_{r,i,j}) \cdot cc_{r,i,k2} \quad (12)$$

ここで、

$M_{r,i,j}$: 地域 r の部門 j が地域 r 以外の部門 i から輸入するバイオマス量

$dd_{r,i}$: 地域 r の部門 i において産出される財の原単位
 $di_{r,i}$: 地域 r が地域 r 以外の部門 i から輸入する財の原単位
 $dx_{r,i}$: 地域 r の部門 i から輸出される財の原単位
 $VDSM_{r,i,j}$: 地域 r の部門 i から部門 j へ投入されるとき取引額
 $VISM_{r,i,j}$: 地域 r の部門 j が地域 r 以外の部門 i から輸入するとき取引額
 $VXSM_{r,i,s}$: 地域 r の部門 i から地域 s へ輸出されるとき取引額
 $wst1_{r,i,k1}$: 地域 r の部門 i が財を産出する際に発生する廃棄物種 $k1$ の排出量
 $wst2_{r,j,k2}$: 地域 r の部門 j が投入された財を加工または消費する際に発生する廃棄物種 $k2$ の排出量
 $pc_{r,j}$: 地域 r の部門 j から中間投入される財が加工され、生産財になる割合
 $wc_{j,k1}$: 部門 j が生産する財の物量に対する廃棄物種 $k1$ の排出量の割合
 $cc_{r,j,k2}$: 地域 r における部門 j に投入された物量に対する廃棄物種 $k2$ の排出量の割合
 ij : 地域内の産業部門 57 部門と最終需要部門 3 部門あわせて 60 部門 (GTAP の区分に従う)
 r : 世界の地域区分 66 (GTAP の区分に従う)
 s : 世界の地域区分 66 (GTAP の区分に従う)

式(2)は地域 r における部門 i から部門 j へのバイオマスの投入量 $D_{r,ij}$ を計算する式である。GTAP より得られる取引額データ $VDSM_{r,ij}$ に原単位 $dd_{r,i}$ をかけることによって算出される。式(3)も式(2)と同様に GTAP の輸入額データ $VIM_{r,ij}$ と原単位 $di_{r,i}$ を用いて、地域 r における部門 j が地域 r 以外の部門 i から輸入してくるバイオマス量 $M_{r,ij}$ を計算する式である。式(4)も同様の計算方法で、GTAP の輸出額データ $VXSM_{r,i,s}$ に原単位 $dx_{r,i}$ を用いて地域 r における部門 i から地域 s へのバイオマスの輸出量 $X_{r,i,s}$ を計算する式である。式(5)、(6)、(7)は原単位 $dd_{r,i}$ 、 $di_{r,i}$ 、 $dt_{r,i}$ を計算する式で、それぞれ部門 i から産出、輸入、輸出されるバイオマス量 $PR_{r,i}$ 、 $IM_{r,i}$ 、 $XP_{r,i}$ を、GTAP の全取引額で割ることによって計算される。ここで、 $PR_{r,i}$ 、 $IM_{r,i}$ 、 $XP_{r,i}$ のデータは主に FAOSTAT から得る。しかし FAOSTAT にデータがない部門があるため、そういった部門 (以降加工部門と呼ぶ) については産出量 $PR_{r,i}$ 、 $IM_{r,i}$ 、 $XP_{r,i}$ を推計する。式(8)は加工部門の $PR_{r,i}$ を推計する式で、部門 i から部門 j へ中間投入されるバイオマスのうち、割合 $pc_{r,i}$ をかけた量が部門 j の生産する財と仮定した。式(9)は加工部門の輸出量 $XP_{r,i}$ を推計する式で、総輸出取引額に原単位 $dd_{r,i}$ をかけて算出する。式(10)は輸入量と輸出量の関係式で、この関係式より加工部門の輸入量 $IM_{r,i}$ を推計する。式(11)は加工部門以外の部門 j が、バイオマスを生産する時に発生する農業残渣や家畜の糞尿などの残渣発生量を計算する式である。地域 r における部門 j から発生する廃棄物種 $k1$ の発生割合 $wc_{r,j,k1}$ を設定した。式(12)はバイオマスを消費・加工したときに発生する廃棄物を計算する式である。一人あたりの GDP と、食料の廃棄率の関係を用いて地域 r 、部門 j 、廃棄物種 $k2$ ごとに廃棄物の発生率 $cc_{r,j,k2}$ を設定した。

3 結果と考察

3.1 地域内 IO 表

バイオマステーブルの一例として日本における地域内 IO 表を表 1 に示す。ただし、紙面の都合上部門、廃棄物種を統合して表示した。地域内 IO 表を見ると、部門ごとの廃棄物発生量がわかり、日本の場合農業部門からの廃棄物の発生量が多いことがわかる。

表1. 日本における地域内IO表（単位はGgC/yr）

	農業	畜産業	林業	食料加工業	繊維加工業	木材加工業	その他部門	最終需要	輸入	輸出	合計
農業	175	1379	1	15725	130	0	772	1168	-11027	185	8507
畜産業	431	803	1	4871	19	0	1030	694	-2345	89	5593
林業	1	0	103	128	43	11366	625	524	-6164	2	6628
食料加工業	38	2819	4	5740	46	7	3612	11318	-8817	143	14910
繊維加工業	0	0	0	0	6	0	2	6	-9	2	7
木材加工業	99	12	4	691	151	13215	15972	1474	-14253	181	17546
廃棄物 環境からの 投入	-14497	-7001	-516	-12245	-389	-7042	-11780	-1688	0	0	-55157
合計	22261	7581	7031	0	0	0	0	0	0	0	36873
	8507	5593	6628	14910	7	17546	10233	13497	-42615	601	34906

3.2 廃棄物の発生量

廃棄物の発生量を地域別に比較する。

表2に廃棄物発生量の多い地域とその発生量、化石燃料の燃焼による炭素の排出量、また化石燃料の燃焼時排出炭素量あたりの廃棄物量と廃棄物中に占める農業残渣の割合を示す。化石燃料の燃焼による炭素の排出量は国際エネルギー機関の統計の化石燃料由来二酸化炭素排出量データ(IEA,1999)を用いた。世界全域で

表2. 廃棄物量と化石燃料燃焼量の比較

	廃棄物量 (PgC)	化石燃料 (PgC)	廃棄物/化 石燃料(%)	農業残渣/廃 棄物量(%)
中国	0.733	0.851	86	61
アメリカ	0.549	1.567	35	64
インド	0.520	0.240	216	48
ブラジル	0.375	0.0821	456	41
インドネシア	0.158	0.0700	225	53
世界全域	4.758	6.267	76	53

バイオマスの廃棄物は4.758PgC発生していることがわかった。これは、世界における化石燃料の燃焼による炭素の排出量の75%に相当する。上位地域のうちアメリカ以外は途上地域であるが、化石燃料にかなり近い量もしくは化石燃料の数倍の廃棄物を排出していることがわかる。従って、今後これらの地域のバイオマス廃棄物は、エネルギー資源として大きな供給能力を有していると考えられる。廃棄物の内訳を見ると農業残渣の割合が高く、発生する廃棄物の半分以上を農業残渣が占めていた。このことより、今後のバイオマス廃棄物の利用を考えるにあたって、農業残渣が重要であると考えられる。

3.3 貿易量

バイオマスの正味の貿易量について比較する。

本節では正味の貿易量を「純輸出量」として（輸出量）－（輸入量）と定義する。表3は、正味のバイオマス貿易量が大きい地域と小さい地域それぞれ5地域ずつの純輸出量、それらの地域におけるバイオマスの生産量、生産量に対する純輸出量の割合について示している。純輸出量の小さい地域は輸入量が輸出量を超えているため、値はマイナス値となっている。純輸出量が多いアメリカ、インドでは生産量も多く、生産量に対する純輸出量の割合は約10%にとどまっている。カナダ、

表3. 純輸出量と生産量の比較

	純輸出量 (TgC)	生産量 (TgC)	純輸出量/ 生産量(%)
アメリカ	38	399	9.5
インド	34.1	359	9.4
カナダ	26.8	86.8	31
アルゼンチン	17.8	45.4	39
オーストラリア	16.6	40.7	41
その他北アフリカ	-10.5	27.2	-39
イタリア	-12.0	27.4	-44
韓国	-17.0	6.6	-258
その他中東	-33.0	21.1	-157
日本	-60.2	20.6	-292

オーストラリア、アルゼンチンは純貿易量とともに自国での生産量も少ない分、純輸出量の割合が大きくなっている。逆に純輸出量がマイナス値となっている地域を見ると、日本、韓国、その他中東では生産量に対する純輸出量の割合が100%を超えていて食料・木材の自給率の低さが読み取れる。

次に、一人あたりの純輸出量と、化石燃料燃焼による炭素の排出量との比較を行ったのが表4である。ニュージーランドや、アルゼンチンでは化石燃料の燃焼時に排出される炭素量に対する割合が非常に高くなっている。これらの地域では、化石燃料の燃焼による二酸化炭素排出

量の半分近く、もしくはそれ以上に相当する炭素を自国でバイオマスとして環境中からとりこみ、その分を他地域へ純輸出していることになる。逆に日本など純輸出量が低い地域では、化石燃料の燃焼時に排出される炭素の10~20%に相当する炭素をバイオマスとして輸入し、その一部はストックとなり、残りは大気へ排出していることになる。

表4. 一人あたりの純輸出量と化石燃料燃焼量の比較

	純輸出量 (kgC/人)	化石燃料 (kgC/人)	純輸出量/化石燃料(%)
ニュージーランド	1593	2453	65
オーストラリア	900.6	4510	20
カナダ	896.0	4348	21
アルゼンチン	499.7	1053	47
マレーシア	386.6	1613	24
ポルトガル	-227.2	1424	-16
スイス	-348.3	1704	-20
韓国	-372.9	2518	-15
その他EFTA	-400.8	2978	-13
日本	-476.8	2534	-19

4 結論

本研究では、現在の全世界における人間活動にかかわるバイオマス量を総合評価した。経済データを用いて世界全域における66地域と60部門でのバイオマスの産出投入量、廃棄量、さらに貿易量を表現するバイオマステーブルを構築した。それにより、バイオマスの流れが把握可能となった。具体的には、バイオマスの廃棄物は全世界で4.758PgC排出されており、化石燃料燃焼時の排出炭素量全部で6.27PgCの約75%に相当する。廃棄物の中でも農業残渣が半分以上を占めていて、今後農業残渣の有効利用が期待される。また、純輸出量では、アメリカ、インドなどで多いが、一人あたりの貿易量ではニュージーランド、オーストラリアなどが多い。一方、日本、韓国などは地域内で消費するバイオマスの大部分を輸入に頼っていることがわかった。

文献

- FAO(1997): http://www.fao.org/waicent/portal/statistics_en.asp
 IEA (1999): CO2 Emissions from fuel combustion (1971-1997), STEDI.
 科学技術庁資源調査会編(1999): 五訂日本食品標準成分表
 (<http://cgi.members.interq.or.jp/sapphire/satoshi/cgi-bin/nutrition/>) .
 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.