

## ■ 研究論文 ■

## バイオエネルギー資源評価のためのバイオマスバランス表の作成

## Biomass Balance Table for Evaluating of Bioenergy Resources

藤野 純一\*・山地 憲治\*\*・山本 博巳\*\*\*

Junichi Fujino Kenji Yamaji Hiromi Yamamoto

(原稿受付日1996年11月8日, 受理日1997年6月17日)

## Abstract

Bioenergy is expected to become one of the key energy resources to cope with global warming and exhaustion of fossil fuels. Biomass is renewable and free from net CO<sub>2</sub> emissions as long as it is maintained sustainably. There are several studies about bioenergy potential, but they are hardly comparable because of complexity of assumed parameters which are related to food, timber and paper supply, forest management, etc.

In this study, bioenergy is divided into plantation bioenergy produced on land and bioenergy residues generated in the process of harvest, conversion and consumption for food, timber and paper. The authors propose "Biomass Balance Table" which shows harvest, conversion, and consumption of biomass systematically. The scheme of biomass balance table is similar to that of energy balance table. Biomass processings (harvest, conversion, consumption) are expressed in the column and biomass forms are expressed in the row. We made tables which are expressed in Joule for 10 regions in the world in 1990.

To sum up the assessment of ultimate energy potential from biomass residues, it is understood that the world has an existing potential of 88EJ (26% of 335EJ of primary energy supply in 1990) and even Japan has that of 2.02EJ (10% of 19.52EJ of primary energy supply in 1990). North America, former USSR & East Europe and West Europe have a large potential with wood biomass residues and Centrally Planned Economies Asia and Other Asia have a large potential with food biomass residues.

## 1. はじめに

近年の地球温暖化問題, エネルギー資源問題に対処するエネルギーシステムとして, 適切な利用を続ける限り, 再生可能で, 正味でCO<sub>2</sub>を排出せず, しかも硫黄分が少ないバイオエネルギーの活用が目ざされている。しかしバイオエネルギーには, 食料など他のバイオマス利用との土地競合, 高い含水率・肥料などその他の用途との競合に由来する低い利用可能率, まだ商業化に達していないエネルギー転換技術などのため, 現状では石油や石炭などの枯渇性エネルギー資源と経済的に対抗できる段階に至っておらず, 未だ将来の供給見通しは不透明なままである。

しかし21世紀において, 食料, 原材料, およびエネ

ルギー資源となるバイオマスは人類生存にとってさらに重要な資源になることは必至である。そのためバイオマスのフローを正しく把握することは将来の持続可能な発展を目指す上で, 必要不可欠な作業である。

本研究では世界10地域毎のバイオマスバランス表を作成した。バイオマスバランス表とは, エネルギーバランス表を摸したものであり, 縦軸にバイオマスに関するプロセス, 横軸にバイオマスの種類を記すことで収穫・加工・消費など, 多岐に亘るバイオマスのフロー全体を表現することができる。

バイオマスバランス表に関しては, 我々の研究グループからいくつかの論文が投稿・発表されている<sup>1)~5)</sup>。本論文の目的は, 以下の通りである。

- 1) バイオマスバランス表の作成過程を明示することでデータ設定の妥当性, 今後の課題などを示すこと。
- 2) 世界10地域毎のバランス表を作成することで, 残渣バイオマスについてエネルギー供給可能量を地域毎の特徴を考慮して定量的に示すこと。

\* 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻

\*\* " " " 教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

\*\*\* 財団法人電力中央研究所 経済社会研究所主任研究員

〒100 東京都千代田区大手町1-6-1

## 2. バイオマス

### 2.1 バイオマスフロー

土地を利用して生産される原材料用・燃料用丸太、穀物・牧草・及び海、湖などを利用して生産される魚介類などのバイオマス資源は、紙パルプ・製材業、食料製造・畜産業などで加工され、薪・木炭・紙・用材、食料製品となり人間により消費される。その一部は各プロセスの間でリサイクルされ、最終的には廃棄される。これらのプロセスの間で残渣バイオマスのエネルギー供給可能量が発生する。このフローの詳細は文献1)～5)を参照されたい。

### 2.2 バイオエネルギー

バイオマスをエネルギーとして利用する際、土地を利用して生産から手掛けるプランテーションバイオエネルギーと収穫・加工・消費プロセスの中で発生する残渣バイオマスをエネルギー利用するものの2つに大別することができる(表1)。

表1 バイオエネルギーの種類

	プランテーション バイオエネルギー	残渣バイオマスの エネルギー利用
特徴	生産から手掛ける	収穫, 加工, 消費 プロセスで発生
種類	エネルギー(森林) エネルギー(耕地)	副産物 廃棄物
品目	サトウキビ ユーカリ 柳など	枝, わら 黒液, バガス, 糞尿, 紙ごみ, 台所ごみなど
問題点	農業, 林業などとの 土地競合	一般的に分散

## 3. バイオマスバランス表

### 3.1 テーブルの概要

バイオマスの収穫、加工、消費、リサイクルなどのフローをエネルギーバランス表の考え方をを用いて表現したものが「バイオマスバランス表」である<sup>2)</sup>。

本研究では1990年の世界全体、先進地域、途上地域、世界10地域(New Earth 21モデルで行われている地域分けに準じた<sup>6)</sup>)についてエネルギー(J)で表現したバイオマスバランス表を作成したが、紙面の制約から日本と世界全体のバランス表だけを掲載する(表2～5)。

### 3.2 バランス表の読み方

バランス表の縦軸(Column)はバイオマスの利用形態(収穫・加工・消費)を表わし、横軸(Row)

はバイオマスの種類(一次・二次・スクラップ)を表している。ここで縦軸の「バイオエネルギー消費」とはエネルギー生産の為に消費されるバイオマスのことであり、エネルギー転換機器から見ると、その機器への投入量を示していることに注意を要する。

各項の数値の「+」は各バイオマスが収穫、生産、輸入されていることを示し、「-」は投入、消費、輸出されていることを示す。記号の「-」はそこには数字が入らないことを表している。

例えば「表2 木材のバイオマスバランス表(日本, 1990年, EJ)」の原材料用丸太に注目すると、国内で0.39EJの収穫があり、輸入は0.50EJ、輸出はなく、計0.89EJの原材料用丸太が日本国内に供給されている。このうち0.39EJは紙パルプ生産に、0.50EJは用材生産に投入されている。次に木材パルプ生産に注目すると、木材パルプ生産用に投入された原材料用丸太0.39EJのうち実際に木材パルプになるのは0.17EJであり、副産物である黒液が0.18EJ発生し、0.04EJがロスになっていることがわかる。そして黒液のバイオエネルギー消費を見ると、下に別掲してある残渣バイオマスの究極エネルギー利用可能量0.18EJの全量が既にエネルギー生産のために利用されていることがわかる。

### 3.3 データ設定

基本的にはFAOのデータを利用した<sup>7)8)9)</sup>。

#### 3.3.1 木材データの設定

##### (1) 発熱量

木材一般15GJ/t(20%水分含む)、木炭28GJ/t<sup>10)</sup>、黒液12.5GJ/t<sup>11)</sup>を用いた。

##### (2) 原材料用丸太, 薪, 木炭

FAOでは原材料用丸太を紙パルプ用、製材用、その他用の3種類に分類している。このうち製材用とその他用が用材生産に利用されるとし、その55%が用材に残りの45%が材木工場残渣になるとした<sup>12)</sup>。

木炭1Jを生産するのに燃料用丸太2.5J投入されるとした<sup>13)</sup>。

非木材繊維(わら, バガス, 竹など)の40%が非木材パルプに加工されるとし、非木材パルプの生産量から投入される非木材繊維の量を逆算した<sup>14)</sup>。

##### (3) 原材料用丸太, 燃料用丸太収穫時の残渣

地上部の森林バイオマスの61%が原材料用丸太として収穫され、残りの39%が森林に残されるといわれている<sup>15)</sup>。そこで原材料用丸太生産1に対して、0.64(=0.39/0.61)の原材料用丸太収穫時残渣が発生すると



した。一方薪を収穫する際には小枝なども収穫しているため、残渣発生率は半分の19.5%になるとした。つまり、燃料用丸太生産1に対して、0.24 (=0.195/0.805) の燃料用丸太収穫時残渣が発生するとした。

(4) 紙・木材パルプ生産

日本の紙・パルプ産業のデータによると、黒液を除くとそれ以外のロスは少ない(木材パルプ生産時のロス投入丸太量の1.4%(0.36Mt)<sup>15)</sup>、紙生産時のロス0.46Mt(投入パルプの1.6%)<sup>17)</sup>、<sup>18)</sup>ので、パルプ用丸太はトンベースでは全て木材パルプか黒液になるとし(但し黒液の発熱量は丸太の発熱量より小さいためエネルギー的には極僅かのロスが生じる)、紙生産で生じるロスを0とした。

(5) 紙のリサイクル・廃棄

スクラップとなった紙のうち、一部は回収され古紙パルプとなり紙生産に利用されている。紙生産に必要なパルプに対し、木材パルプ・非木材パルプだけでは不足する分は古紙パルプにより補われているものとして逆算した。それ以外は全て都市ごみとして廃棄されるとした。

(6) 用材のリサイクル・廃棄

日本で廃棄された用材のうち、木屑(6.57Mt)<sup>19)</sup>と建設廃材に含まれる建設発生木材(7.5Mt)<sup>18)</sup>の一部は再利用(前者3.09Mt、後者2.3Mt)されていたが、全量が燃料チップ生成に利用され新型エネルギーとして消費されているとした。その他地域では利用状況が掴めなかったので全てエネルギー利用の可能性のあるものとして残渣バイオマスの究極エネルギー利用可能量の欄に計上した。リサイクルについても同様に扱った。

3.3.2 食料データの設定

(1) 発熱量

FAOのAgrostat PC<sup>9)</sup>に掲載されている各品目の、人間の消費に向けられる「食料 (ton)」と「一人当たり供給 (cal/cap)」に「人口 (cap)」をかけて得られる「熱量 (cal)」から発熱量(エネルギー/重量)を求めた。

(2) エネルギー作物

ブラジルではサトウキビから0.24EJの液体燃料を生産している<sup>19)</sup>。但し、エネルギー作物と後述するバガスについて、世界全体のエネルギー消費状況に関するデータが完備されなかったのでバイオエネルギー消費の項には計上していない。

(3) 穀物残渣, サトウキビ収穫時残渣

穀物1ton当たり1.3t、15.6GJの穀物残渣が発生し、サトウキビ1ton当たり0.15t(乾燥重量)、2.30GJのサトウキビ収穫時残渣が発生するとした<sup>12)</sup>。

(4) バガス

サトウキビ1t当たり0.283t(乾物率50%)、2.13GJのバガスが発生するとした<sup>12)</sup>。ブラジルでは既に0.48EJ<sup>19)</sup>のバガスがエネルギー利用されている。沖縄でも25万t(2.6PJ)のバガスがエネルギー利用されている<sup>19)</sup>が、オーダーが小さいため表3には現れていない。

(5) 肉類生産

家畜に投入される飼料は大きく分けて肉類(精肉、牛乳、卵、動物油脂)、糞尿、呼吸用エネルギーに変換される。牧草、糞、呼吸ロスの量を求めるために、1990年の日本における家畜の生理過程(表6)を求め、この割合を各地域に適用した。

表6 家畜の生理過程(日本, 1990年)

	飼料	糞	肉類	呼吸
牛, 豚, 鶏	565.8PJ (1.00)	193.1PJ (0.34)	61.8PJ (0.11)	310.9PJ (0.55)
豚	110.3PJ (1.00)	33.5PJ (0.30)	23.0PJ (0.21)	53.8PJ (0.49)

注: ここで扱っている肉類は精肉、牛乳、卵であり動物油脂は除いている。

飼料、糞、肉類の各種値は21)、22)から求めた

(6) 台所で生じる残渣

1990年、日本人一人当たりの食事エネルギー供給量は2,633kcal/day、摂取量は2,061kcal/day、ロス率21.8%であった<sup>20)</sup>。そこで、食料供給量の21.8%は生ごみとして廃棄されると仮定した。この一部は都市エネルギーとして利用されているが、ここでは0としている。

(7) 人間の成長, 呼吸エネルギー, 人糞

豚の生理過程から食料摂取量の30%が糞になるとした(表6)。人糞はエネルギーとして利用可能である

表7 残渣に関するデータ

種類	設定
原材料用丸太収穫時残余	原材料用丸太生産1に対して0.64
燃料用丸太収穫時残余	燃料材生産1に対して0.24
穀物残余	穀物1tあたり15.6GJ
サトウキビ収穫時残余	サトウキビ1tあたり2.3GJ
バガス	サトウキビ1tあたり2.13GJ
家畜の糞	肉類生産1に対して3.09
台所ごみ	食料供給1に対して0.218
人糞	食料摂取1に対して0.30

が、現在のところほとんど利用されていないため、利用量を0とした。

以上、残渣に関するデータをまとめると表7のようになる。

#### 4. バイオマスバランス表の活用

##### 4.1 バイオエネルギーの利用可能量評価

バイオエネルギーの利用可能量の評価基準として、理論最大量である「究極」利用可能量と、究極利用可能量に「エネルギー利用率」（回収不能分やリサイクル、肥料などの他用途に使用される分を考慮）をかけた「实际的」利用可能量の2つの評価基準が考えられる。ここでは前者の究極利用可能量について評価する。但しプランテーションバイオエネルギー（燃料用丸太（二次形式として薪または木炭）、エネルギー作物）については土地利用変化を考慮していないため現状の利用量を評価する。

1990年における世界10地域毎のバイオマスバランス表を作成することにより各地域、各バイオマスの究極エネルギー利用可能量が得られた。表8に世界全体・日本における残渣バイオマスの究極エネルギー利用可能量を示した。世界での木材系・食料系残渣バイオマスの究極エネルギー利用可能量は世界の一次エネルギー供給量の26%、日本でも一次エネルギー供給量の10%という比較的大きなエネルギー供給可能性が存在することがわかった。

図-1に各地域におけるバイオマスの究極エネルギー利用可能量を示した。木材系残渣バイオマスの究極エネルギー利用可能量は北アメリカが最も多く、次いで旧ソ連・東欧、西ヨーロッパの順になっており、この3地域で全体の62%を占めているが、近年途上国での丸太生産量が増加しているため、この比率は減少傾向にある<sup>13)</sup>。残渣の内訳としては、原材料用丸太残渣、次に用材に関する残渣である用材スクラップ、材木工場残渣が多く、紙・パルプに関する残渣である黒液、

表8 世界全体・日本における残渣バイオマスの究極エネルギー利用可能量

	世界全体	日本
一次エネルギー供給量	335	19.52
残渣バイオマスの合計	88.32	2.02
木材系残渣バイオマス	34.75	1.26
食料系残渣バイオマス	53.57	0.76

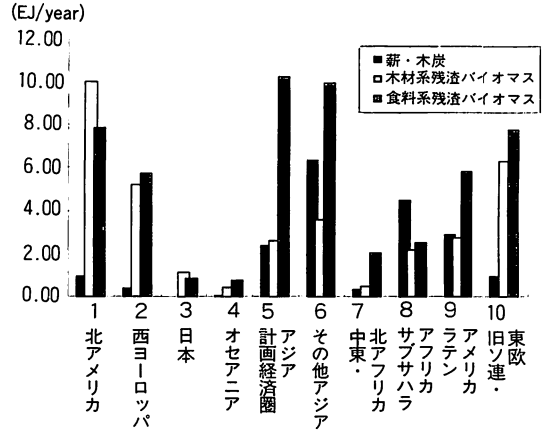


図-1 各地域におけるバイオマスの究極エネルギー利用可能量（ただし薪・木炭については現状の利用量）

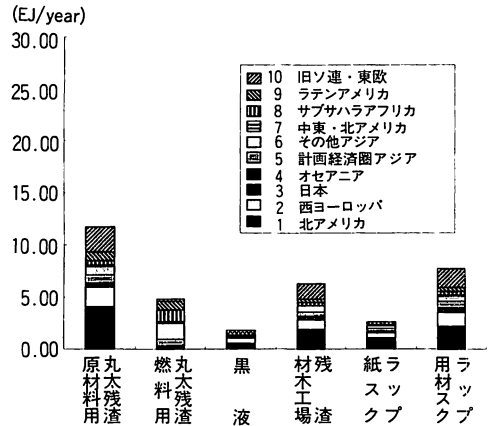


図-2 木材系残渣バイオマスの究極エネルギー利用可能量

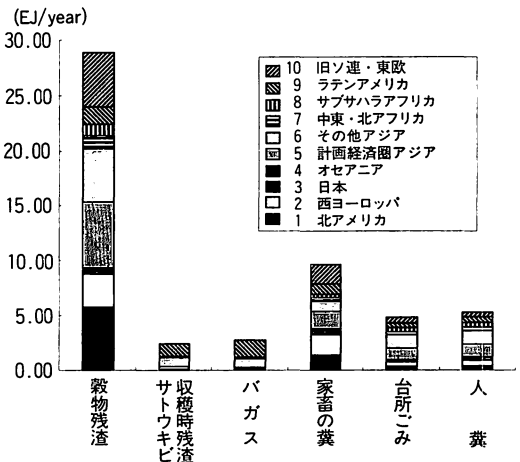


図-3 食料系残渣バイオマスの究極エネルギー利用可能量

紙スクラップは少ない(図-2)。

一方、食料系残渣バイオマスの究極エネルギー利用可能量はその他アジア(10.21EJ)と計画経済圏アジア(9.95EJ)が多く、続いて旧ソ連・東欧、北アメリカの順になっており、人口の多い地域に残渣が多く存在していることがわかる。残渣の内訳としては、穀物残渣が最も多く、食料系残渣の約2分の1を占めている。ついで家畜の糞、人糞となっている(図-3)。

プランテーションバイオエネルギーの究極利用可能量は、土地利用の変化を考慮していないため実際に利用された量を評価している。世界では薪18.25EJ、木炭0.65EJ、計18.90EJが利用されており、その他アジア、サブサハラアフリカ、ラテンアメリカなどの途上地域に利用が集中している(図-1)。

4.2 一次・最終バイオマスの供給・消費量

図-4、図-5に各地域の木材系・食料系一次バイオマス資源の地域内生産量・輸入量・輸出量を示した。日本に注目すると木材系・食料系一次バイオマス資源の国内生産量が世界全体に占める割合はそれぞれ1.01% (=0.39EJ/38.71EJ), 0.71% (=0.38EJ/53.68EJ)と極めて小さい。日本国内では他地域に比べて、供給されるバイオマス資源のうち輸入の占める割合が特に大きい。

木材系一次バイオマスの生産量の多い地域では食料系一次バイオマスの生産量も多いが、各地域における両者の関係を見ると、西ヨーロッパ、計画経済圏アジアでは、食料系一次バイオマス供給の割合が高く、逆に多くの飢餓人口を抱えるサブサハラアフリカでは、食料系一次バイオマス供給の割合が低くなっている。

図-5で興味深い点は、北アメリカ、オーストラリアの食料輸入依存度の低さであり、両地域の食料供給能力の高さが伺える。サブサハラアフリカも食料の輸入依存度が低い、こちらは経済的な要因(貧困)が強いと思われる。

図-6、図-7に各地域の木材系・食料系最終バイオマス資源の消費量を示した。日本を見ると木材系では紙・用材消費がほぼ同量消費されており、食料系では動物性食料消費の比率が欧米に比べてそれ程高くない。図-6を見ると、用材・紙・薪・木炭からなる各地域の木材系最終バイオマス消費の中で、薪消費の占める割合の高い地域と途上地域がほぼ一致する。逆に先進地域では、まず用材消費が、そして紙消費の比率が高い。次に図-7を見ると、図-6と同様に動物性食料消費の占める割合が高い地域が先進地域と一致する傾向にある

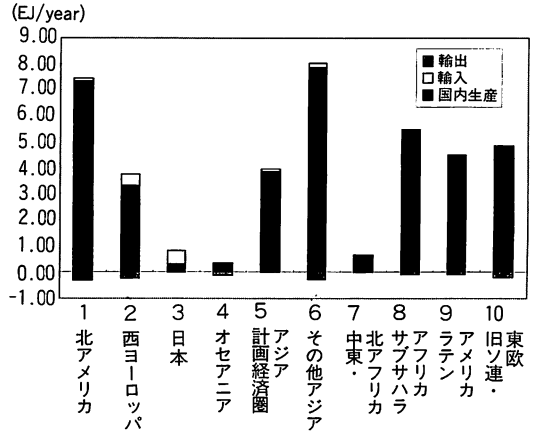


図-4 木材系一次バイオマス資源の国内生産・輸入・輸出量

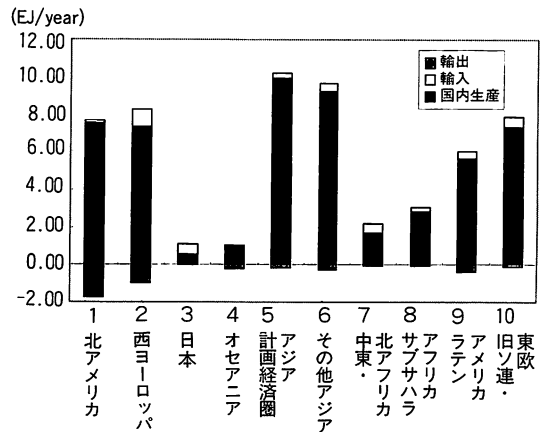


図-5 食料系一次バイオマス資源の国内生産・輸入・輸出量

が、日本はその比率が低く、ラテンアメリカは逆に高くなっており、図-6ほど顕著にはなっていない。食の方が経済的要因に拠らず、嗜好性が強いことが一因として挙げられよう。

最後に図-4と図-6、図-5と図-7について比較検討を行なう。世界的に見れば一次バイオマスの輸出入は一次バイオマス総供給量の5.70% (=5.26EJ/92.31EJ)しか行われていないので、二次バイオマスの輸出入を考慮にいれても、地域毎の一次バイオマス供給量と最終バイオマス消費量には強い相関があることが予想される。実際、木材系バイオマスについての比較では、図-4と図-6のグラフの形状はよく似通っていることが見てとれる。一方、食料系バイオマスについての比較を行うために図-5と図-7を見ると、動物性食料消費の多い地域では、一次バイオマス供給に比べて最終バイ

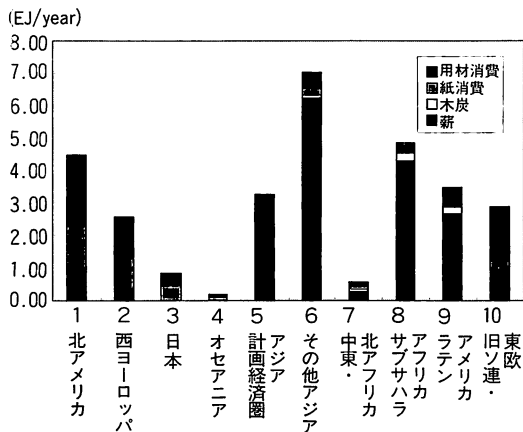


図-6 木材系最終バイオマス資源の消費量

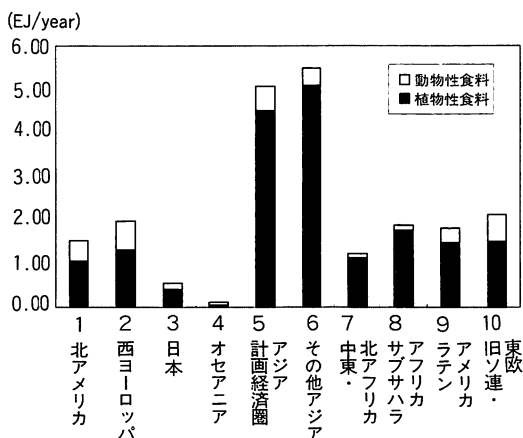


図-7 食料系最終バイオマス資源の消費量

オマス消費の比率が低くなっていることがわかる。これは飼料から家畜を生産し動物性食料を生産する際に生じる転換ロスに由来する。木材系・食料系バイオマスの一次総供給(残渣を除く)から最終消費への転換率はそれぞれ78% (=30.13EJ/38.74EJ), 41% (=21.85EJ/53.57EJ)である。

## 5. おわりに

本研究では、バイオマスバランス表の基本構造を提示し、1990年の世界10地域におけるバイオマスバランス表を作成した。各地域の特性を評価することで、バイオマスバランス表がバイオマス利用解析の共通のフレームワークになることを示した。

今後、アジア、アフリカで人口の急増が予想される中、限りあるバイオマス資源を如何に効率的に利用するかは、エネルギー資源問題と同様、人類の大きな問

題となるであろう。バイオマスバランス表はエネルギーバランス表同様、これらの問題解決に対して有効な情報を提供することが期待される。

なお本研究は住友財団の支援を受けていることを付記し謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 山本博巳, 山地憲治; SD手法の世界エネルギー・土地利用モデルによるバイオマス資源の総合的な評価, 第12回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集(1996), 263~268
- 2) 山地憲治, 藤野純一, 山本博巳; バイオマスエネルギー資源評価のためのバイオマスバランス表の提案, エネルギー・資源学会第15回研究発表会講演論文集(1996), 275~280
- 3) 山本博巳, 山地憲治; 世界土地利用エネルギー・モデル(GLUE)によるバイオエネルギー・ポテンシャルの評価(1996), 電力中央研究所研究報告Y96001
- 4) 山本博巳, 山地憲治; バイオマス・フローを考慮した世界土地利用エネルギー・モデル(GLUE)の開発(1996), 電力中央研究所研究報告Y96002
- 5) 山本博巳, 山地憲治, 藤野純一; SD手法の世界土地利用エネルギー・モデルによる総合的なバイオエネルギー資源評価, エネルギー・資源Vol.18 No.3 (1997.5)
- 6) 藤井康正; エネルギーシステムにおけるCO<sub>2</sub>問題対策の評価(1992), 東京大学学位論文
- 7) FAO; Forest Production 1991 (1993), FAO Rome
- 8) FAO; FAO Production Yearbook 1992 (1993), FAO Rome
- 9) FAO; Agrostat PC on diskette (1993), FAO Rome
- 10) J.Woods and D.O.Hall; Bioenergy for development: Technical and environmental dimensions (1994), FAO Rome
- 11) 環境庁企画調整局地球環境部; 地球温暖化防止ハンドブック<第2巻 産業編>(1992)
- 12) Johansson et al.; Renewable Energy-Sources for Fuels and Electricity- (1993), Island Press
- 13) アレキサンダー・メイサー; 世界の森林資源(1992), 築地書館
- 14) 紙パルプ技術協会; クラフトパルプ・非木材パルプ(1979)
- 15) 日本開発銀行調査部; 統計要覧1995(1994)
- 16) 通商産業大臣官房調査統計部; 平成6年 紙・パルプ統計年報(1995)
- 17) NTS; 生ごみ・有機性廃棄物のリサイクルと市場動向(1995)
- 18) 工業技術会; 廃棄物の処理・再資源化技術と有効利用(1994)
- 19) Ministry of Mines and Energy Brazilia; National energy balance (1995)
- 20) 沖縄総合事務局通商産業部公益事業課; 第22回 発電設備関係主任技術者会議(1996)
- 21) 農林水産省畜産局流通飼料課; 1992 飼料便覧, (財)農林統計協会(1992)
- 22) 柴田和雄, 木谷収[編]; バイオマス-生産と変換<上>(1981), 学会出版センター
- 23) 荏開津典生; 「飢餓」と「飽食」(1994), 講談社