

■ 研究論文 ■

沙漠近接の森林地面積の推算

—太陽エネルギーによるグローバルバイオメタノールの生産に向けて—

Estimation of Forest Area near Deserts —Production of Global Bio-Methanol by Solar Energy—

西上 泰子*・佐野 寛**・小島 紀徳**

Yasuko Nishigami Hiroshi Sano Toshinori Kojima

(原稿受付日1998年10月29日, 受理日1999年4月14日)

Abstract

This paper shows a new methanol synthesis method. Carbon and hydrogen are supplied from wood and electrolysis of water by solar power generation system in desert, respectively. This methanol (global bio-methanol) is renewable and can be an alternative energy after fossil fuels depletion. In this paper world forest area of wood production near deserts is estimated based on various kinds of data such as satellite data and climate data.

In developed countries more than half of potential forest area has been converted to other land use such as cultivation and urbanization by human activities for a long time. Existing forest is to become a plantation for wood production. Recently in developing countries, tropical forest has been destroyed at high rate because of population increase. Natural tropical forest is a treasure of genetic resources. The area of grassland or secondary forest (potential tropical forest area-existing tropical forest area) is to become a plantation. There are 65Mha plantation area except mountains within 500km from deserts in the world. Biomass production from this area will be 810 Mton/year. They are converted to 980Mton methanol with hydrogen from deserts. This amount of methanol is equal to 34% of world car fuel production.

1. はじめに

21世紀には石油が枯渇するといわれている。ガソリンにかわる自動車供給用液体燃料として、クリーンなメタノールがその代替の有力候補の一つである。ガソリンのように内燃機関自動車で燃やすこともできるし、次世代型燃料電池自動車への水素補給としても使える。メタノール (CH_3OH) の合成には炭素と水素が不可欠であるが、化石燃料には両者が含まれているのでメタノールの合成原料には最適である。しかし、天然ガスからのメタノール合成では、天然ガス自体の寿命が石油と同程度しかないので、石油枯渇後の代替燃料源にはなり得ない。石炭のガス化によるメタノール合成では、石炭は来世紀中の枯渇の心配はなく、当面原料は大量安価に供給される。しかし、合成の段階を含めた二酸化炭素 (CO_2) の総排出量は石炭直接利用の場

合より増えることが懸念される。

植物バイオマス (一般には木材) からのメタノール合成法は、石炭メタノールと類似した手順で、バイオマスのガス化と水素生成のシフト反応によりメタノールを合成する。バイオメタノール合成時には原料バイオマス中の炭素の半分以上が消費される。バイオマスは非枯渇性の再生可能型資源であるが、光合成のエネルギー変換率が太陽電池に及ばず (太陽電池の1/10以下)、バイオマス生産のために著しく広い面積の土地を必要とする。よって今後予想される人口急増時においては、農耕地需要と競合するであろう。

メタノール合成に必要な炭素源には木材を用い、水素源は沙漠の太陽エネルギーによる水電解を用いる、再生可能エネルギー・ハイブリッド型のバイオメタノール合成法が新たに提案されている¹⁾。バイオマス単独によるメタノール合成法と比べ所要森林面積が半分になる。本システムでは、木材供給地、電力生産地、及びバイオメタノール需要地は地球規模に分布することから、この合成メタノールをグローバルバイオメタノールと称し、バイオマス単独生成メタノールと区別する。沙漠及びその周囲の乾燥地域は基本的に植生が乏し

* 地球エネルギーシステム研究所 客員研究員

** " " " 代表

〒619-0223 京都府相楽郡木津町相楽台8-11-27

*** 成蹊大学工学部教授

〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1

いので、グローバルバイオメタノール生産には熱帯や温帯等の他地域の木材が利用される。しかしながら、沙漠から遠く離れたところからの木材供給では輸送エネルギーが多くなり、新エネルギー供給システムとして成立しない。本研究では以下に記すように、気象データや人工衛星データ等を用いて沙漠に近接する森林の面積を推算し、先進国と発展途上国の経済・農業事情の違いを考慮しながら、グローバルバイオメタノール合成に供給できるバイオマスの地球規模での資源的限界量を明らかにした。

2. 使用するデータベースと解析の手順

2.1 人工衛星データ

現在地球上には、陸地面積の約1/3にあたる約40億haの森林が存在するといわれている²⁾。しかしながら、正確な統計資料の不足とともに、森林タイプや分類の定義そのものが統一されていないということもあって、現在でも森林の面積とその位置は正確に把握されていない³⁾。特に、バイオマスの土地生産性が一番期待できる熱帯林はその破壊が急速に進行中で、年間消失面積は約1700万haである。1960年から1990年の30年間に、4億ha以上の熱帯林が伐採された。その破壊の速さが急であるため、作成基準も作成年度もばらばらである各国作成の地図によって現状森林地を地球規模で把握することは不可能である。

アメリカ航空宇宙局(NASA)ゴダード研究所のMatthewsは世界各国の既存地図と人工衛星LANDSATの画像から世界植生分類図⁴⁾を作成しているが、作成年度が1982年であり、熱帯林に関してはもはや現状を把握しているとは言い難い。

そこで今回は、アメリカ海洋大気庁が気象衛星NOAAの可視域反射光観測値から算出した第三世代植生指標データ(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)⁵⁾を用いて1993年の現存植生図を作成し、全球規模で森林面積を計算した。

2.2 気候データと地形・土壌条件

バイオマス生産基地に適合するのは現存森林の他に、自然状態では気候学上潜在的に森林となりうる土地である。気象データや土壌データを用いて、人類の活動の影響を受けない場合の潜在的な自然森林地を求めた。基本的に森林の分布を支配するのは気温と降水量である。約2万5000地点の地上観測値と多くの文献からの海上推測値をもとに、球面補間法により地球表面をカバーする気温データ⁶⁾と降水量データ⁷⁾を用いた。さ

らに地形と土壌の影響を加味するため、米国海軍フリート研究所作成の標高メッシュデータと米国NASAゴダード研究所作成の地表面土壌分類メッシュデータを使用した。これらのメッシュデータはすべて、米国環境保護局(EPA)から、CD-ROMの形で提供されている⁸⁾。

2.3 山地情報

管理植林候補地として、伐採・収穫・植林を困難にする傾斜地は除く必要がある。地球地表面を山地、湖沼、平坦地等に分類している米国海軍フリート研究所作成のメッシュデータを用いた。このデータも同じく上述のCD-ROMに収録されている。

2.4 沙漠分布図

太陽エネルギー基地を建設する沙漠については、筆者らはすでに降水量データを用いて沙漠の位置を特定し、その面積を23.1億haと算出している⁹⁾。この沙漠分布図をもとに、地球規模で世界陸域の沙漠からの距離を計算した。

2.5 解析の手順

人工衛星データから現存植生図を作成し、気候条件や地形条件から潜在自然植生図を作成した。潜在自然植生図は、現在の気候条件下で人類活動の擾乱がなかった場合の自然植生の分布を表す。よって古代文明により周囲の森林が破壊され、気候や土壌が改変されて沙漠化してしまった場合、その地域は潜在的に森林ではなく沙漠と評価される。

これら2つの植生図を、先進国と発展途上国に分けて比較し、人為的な影響により自然植生が劣化してしまった潜在森林面積を求めた。先進国は1994年時点でのOECD各国(25ヶ国)とOECD以外のヨーロッパ各国(東欧を含む)、及び旧ソ連である。

次に、バイオマス生産管理植林地では定期的に伐採・収穫・植林を行う必要があり、植林候補森林地から傾斜地(山地)は除いた。その後、沙漠近くの森林地を取り出し、先進国・発展途上国別にこれらの面積を計算した。以上の解析の処理フローを図1に示す。解析にあたっては、人工衛星データや気象データ等の地球規模のデータを取り扱うことから、アメリカクラーク大学で開発された地理情報システムIDRISI¹⁰⁾を用いている。

3. 解析方法および結果

3.1 現存植生図の作成

植生NDVIデータから、まず地球の陸上生態系全体

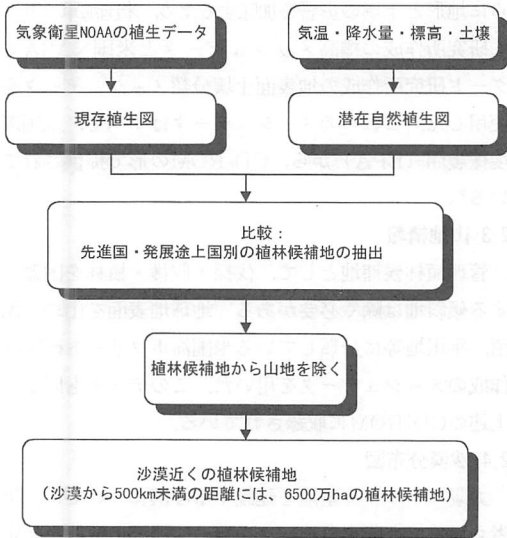


図1 解析の処理フロー

のNPP (Net Primary Production) を推計した。NPPは植物の光合成によってつくられる有機物の量から、呼吸によって消費される量を差し引いた残り、乾燥トン/ha/yearで表される。1991年のピナツポ火山の噴火の影響を受けない1986年から1990年の5年間について、1月から12月までの月別NDVI値を年毎に積算した。その積算値の5年間の平均値(ΣNDVI)に、ロジスティック回帰モデルを用いて、アフリカ大陸におけるNPPの地上観測値¹¹⁾を回帰させた。得られた回帰式は

$$NPP = \frac{1}{1/70 + 1.5583 \times (0.4444 \wedge \Sigma NDVI)}$$

となった。この回帰分析の決定係数は0.71、標準誤差は0.69乾燥トン/ha/yearである。得られた回帰式に、1993年のNDVI年間積算値を変数として代入し、1993年世界NPP分布図を得た。Whittakerの植生分類表¹²⁾を参照しながら、NPP値の違いにより地上植

生を熱帯林(22 ≤ NPP)、熱帯林を除く森林(7 ≤ NPP < 22)、その他(NPP < 7)に分類し世界現存植生図(図2)を作成した。地球上の現存の熱帯林は9.02億ha、熱帯林を除く森林は38.2億haとなった。合計の森林面積は47.2億haである。前述のMatthewsは、1960年から1979年にわたる資料を植生分類の基礎としている。その熱帯林面積は12.3億haである。今回の熱帯林面積との差3.3億haが約20年間における消失面積であるとするれば、その消失速度は約1600万ha/yearとなり、一般に認識される熱帯林の破壊速度とほぼ一致する。

3.2 潜在自然植生図の作成

気温や降水量の気象データと地形や土壌条件を用いて、以下の手順で潜在自然植生図を作成した。

(1) 乾燥指数による分類

Martonneが提案した乾燥指数(Arid Index: AI)³⁾によって、地上植生を森林(30 ≤ AI)とその他(0 ≤ AI < 30)に分類した。

$$AI = \frac{P}{T + 10}$$

ここで、P:年間降水量(mm/year),

T:月別平均気温の年平均値(°C)

(2) 熱帯林の特定

(1)で求めた森林に、熱帯雨林の成立条件(気温24°C以上、年間降水量1500mm以上)をあてはめて熱帯林を特定する。本論文でいう熱帯林は閉鎖林のみを指し、サバンナ等の疎林を含まない。

(3) 暖かさの指数の適用

森林成立限界は、Köppenの暖かさの指数WI¹³⁾が15以上とした。WIは月別平均気温t(°C)が5°C以上の月についてt-5を年間積算した値である。

(4) 地形条件の適用

標高が3,000m以上のところは植生が生育しないので、森林から除いた。

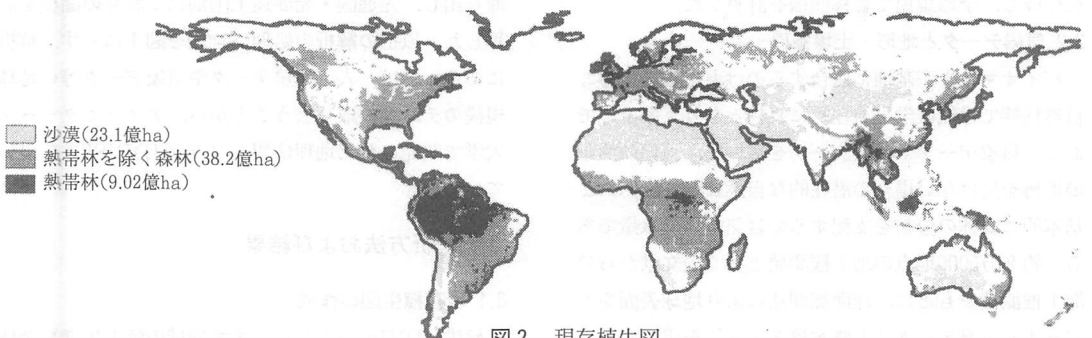


図2 現存植生図

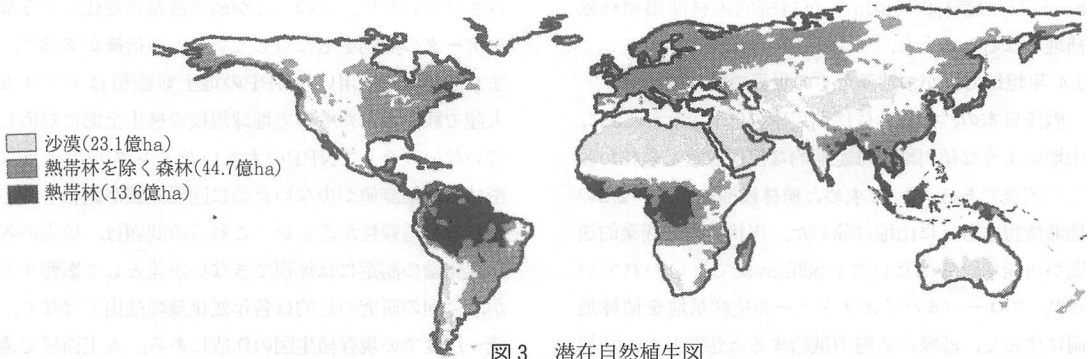


図3 潜在自然植生図

(5) 土壌条件

塩類土壌のところは植生が生育しないので、塩類が存在するとの情報が得られた地域を森林から除いた。

(6) 潜在自然植生図

以上のプロセスを経て潜在自然植生図を作成した。潜在的な熱帯林は13.6億ha、熱帯林を除く森林は44.7億haとなった(図3)。合計森林面積は58.3億haとなり、3.1で推算した現存森林面積より11億ha多い。これらの大部分は人間活動により植生が劣化してしまった潜在的な森林地といえる。

3.3 先進国・発展途上国別の森林の分類比較

現存植生図と潜在自然植生図とを、先進国と発展途上国に分けて比較した分類を表1、表2に示す。先進国では、気候学的な潜在森林23.5億haの約半分で植生が劣化している。そして発展途上国では、潜在的な熱帯林13.4億haの約半分が二次林に変化している。

表中の各種森林地のうち、グローバルバイオメタノール用木材生産基地に利用できる森林地は先進国と発展途上国で本質的な差がある。先進国の天然森林地は、旧大陸では有史以来、また新大陸では300年という長い時間をかけて都市及び農耕地へと転用されてきた。気候条件から、潜在的に森林地であると特定しても、土地利用法は他の産業用途へと既に転換され、固定化している。そして現存する森林に対しては、人工林と天然林を区別し森林管理を行っている。人工林では伐採・植林が計画的に行われ、木材を持続可能な資源として供給している。先進国では新たに植林を行える土地を見つけるのは難しいが、現存する森林は持続的に経営されている。よって、本研究では、木材生産のための土地は、現存の森林地14.14億ha(現存森林13.76億ha+現存熱帯林0.38億ha)がその候補になると考えた。

他方、発展途上国では近年の人口急増を背景に森林

破壊圧力が高まってきている。焼き畑等のため熱帯林は急激に減少してきている。サバンナ等の疎林は薪炭需要による伐採で沙漠化が進行中である。熱帯林の伐採跡地に計画的に植林されることは少なく、国別に事情は違うが、多くの場合土地利用計画も森林管理もはっきりしていない。資金や人材、植林技術の不足がその原因である。熱帯林の減少は二酸化炭素の放出につながり、地球温暖化を引き起こす。今回のグローバルバイオメタノール原料木材は、更新が確実な管理植林地から供給されるので、二酸化炭素の放出源になることはない。しかし、天然熱帯林は地上で最も生物種が豊かで、「遺伝子資源の宝庫」ともいわれている²⁾。発展途上国では現存する天然の熱帯林は生物資源保護の立場から開発対象地にするのは難しく、また一般の森林では沙漠化進行のような問題がある。湿润温暖な熱帯地域は平均的な森林よりもバイオマスの土地生産性が高いので、天然原生林から二次林や草原へ変化した潜在的熱帯林地7.28億ha(潜在自然熱帯林13.44億

表1 潜在自然植生と現存植生の比較(先進国)

		潜在自然植生			
		沙漠・草原	熱帯林を除く森林	熱帯林	合計
現存植生	沙漠・草原	29.38	12.04	0.01	41.43
	熱帯林を除く森林	2.54	11.14	0.08	13.76
	熱帯林	0.01	0.33	0.05	0.38
	合計	31.93	23.51	0.13	55.57

(単位: 億ha)

表2 潜在自然植生と現存植生の比較(発展途上国)

		潜在自然植生			
		沙漠・草原	熱帯林を除く森林	熱帯林	合計
現存植生	沙漠・草原	35.63	4.59	0.79	41.00
	熱帯林を除く森林	3.76	14.21	6.50	24.47
	熱帯林	0.06	2.42	6.16	8.64
	合計	39.45	21.22	13.44	74.11

(単位: 億ha)

ha—現存熱帯林6.16億ha)が持続的木材産出植林候補地になると考えた。

3.4 平坦地で、かつ沙漠近くの世界の植林候補地

戦後日本の、山林の伐採利用率の低下が示すように、山地のような傾斜地では定期的な伐採収穫と植林が著しく困難である。3.3で求めた植林候補地から、2.3の地形情報をもとに山地は除いた。現状技術で商業的送電が可能な距離はだいたい500kmまでといわれている¹⁰⁾。グローバルバイオメタノール生産基地を植林地側に建設し、沙漠から電力供給すると想定した。沙漠から500kmまでに植林候補地は先進国では6100万ha、発展途上国では主に南米の熱帯地域を中心に400万ha存在する。

3.5 生産メタノール量

森林の平均的なNPP値12.5(乾燥トン/ha/year)を用いると、6500万haの森林から年間8億1000万トンの乾燥バイオマスを得る。グローバルバイオメタノール生産では、沙漠の太陽エネルギーから必要エネルギーと水素が供給されるので、乾燥バイオマスの約45%を占める炭素の全量がメタノールに転換される。年間供給されるメタノール量は9億8000万トンで、石油に熱量換算すれば5億3000万TOE(Ton Oil Equivalent)になり、世界の年間石油消費量30億TOEの18%になる。自動車燃料(ガソリンと軽油の合計)に熱量換算すれば、1992年の世界生産量の34%、日本の生産量の約6倍に相当する。

4. 考察

森林分類に用いたNPPの区分値はWhittakerの植生分類を参照した。しかしNPPの大小の違いだけで植生を分類することは難しい。実際、現存熱帯林が米国カリフォルニアに見られるが、これは手入れの行き届いた人工林で、単にNPP値が高いというだけで本当の熱帯林ではない。また、カリフォルニアやオーストラリアの沙漠周辺の森林地は、かんがいによる果樹園や穀物生産等の良く耕作されている農耕地が含まれると思われる。農耕地と森林の区別は今後の課題としたい。

本研究に使用したNOAAの第三世代の植生指標データはそれまでの第二世代までのものと比べて多くの改良点に加えられ、衛星の交代によるセンサーの不連続性とセンサー自体の経年劣化については補正がなされた。しかし、その補正は完全ではなく、また衛星の軌道のずれがもたらす観測時刻の変化については補正が

なされていない。そのことが植生被覆の変化によらないデータの変動をもたらししているとの指摘がある¹⁵⁾。また回帰分析で用いたNPPの地上観測値はアフリカ大陸で観測されたもので地球規模の植生全部に対応していない。そしてNPPの大きいジャングルのような密林での観測値が少ないために回帰曲線が飽和するあたりでの信頼性が乏しい。これらの問題は、植生の各年変化量の測定には無視できない誤差として影響するが、今回の研究の目的は各年変化量の抽出ではなく、統一尺度での現存植生図の作成にある。人工衛星で遠隔に計測した測定量をもって地上植生を定量化するには解決すべき数多くの問題点が残っているが、詳細で均質な森林面積の情報を地球規模で得るためには現在のところ人工衛星によるリモートセンシングが最も有力な手段である。今後の解析手法の向上と世界各地の地上観測NPPデータの整備が待たれる。

バイオマスは容量当たりの熱量が小さいために、陸上輸送は現状ではかなり問題がある。今回はメタノール合成基地をバイオマス生産の森林地側に置き、沙漠から電力を輸送するシステムを想定したが、水素のパイプライン輸送やバイオマス圧縮輸送¹⁶⁾等の新規輸送技術の将来的な開発により、グローバルバイオメタノール合成に取り込みできる森林地は、500kmよりもさらに遠隔地まで拡大できる可能性はある。沙漠から1000kmまでに距離をのばせば、植林候補地は4倍の2億6800万haに増える。

発展途上国では人口爆発により、沙漠拡大と森林減少が急速に進行中である。グローバルバイオメタノールの資源的限界量は今後ダイナミックに変化することが予想される。将来的に天然熱帯林の伐採が進み、グローバルバイオメタノール生産用の木材産出管理植林候補地面積が増えることは、人類にとって決して喜ばしいことではない。既に開発してしまった伐採跡地を経済的に高度に利用していくことは結果的に現存する天然林を守るであろう。熱帯林伐採跡地の管理植林候補地にアグロフォレストリーを導入し穀物生産と木材生産を同時に行い、人口急増による農耕地拡大要求に応えることができれば、植林に対する理解も得やすい。植林樹木にマメ科植物を選択して窒素肥料供給を行う等、農業技術の複合的植林経営が重要になるものと考えられる。

5. 結論

沙漠からは太陽エネルギーによる水素と電力を、森

林地からはバイオマスを得て、再生可能型の両者のエネルギーからグローバルバイオメタノールを生産する際の資源的限界量を明らかにした。

先進国諸国では植生劣化がその長い開拓の歴史の中でゆっくり進行し、土地利用計画は固定化している。現存する森林に対しては持続的な管理伐採が行われているので、木材生産基地は現存する森林地が対象になると考えた。植林や伐採等の森林管理経営を困難にする山地は除き、送電可能な沙漠から500km未満の距離に限ると対象森林地は先進国全体で6100万haになった。

一方発展途上国は、今後予想される人口爆発により森林破壊の圧力はますます高まりつつある。熱帯林は平均な森林よりもNPP値が約2倍程度高いので、熱帯林地域はバイオマス供給に有利であるが、現存する天然熱帯林は生物の多様性と遺伝子の宝庫という別の生物資源的価値がある。新エネルギー獲得のために、それらの価値が犠牲になることは許されないと考えられる。そこで、気候的な潜在自然熱帯林から現存熱帯林を除いた植生劣化潜在熱帯林（現存では草原もしくは二次林）を木材生産基地候補に考えた。沙漠から500km未満の距離に、山地ではない対象潜在熱帯林地は全体で400万ha存在する。

これらの森林地で生産されるバイオマスを全量グローバルバイオメタノール合成に供給すると、年間メタノール生産量は9億8000万トンになった。世界の自動車燃料（ガソリンと軽油の合計）に熱量換算すれば、1992年の世界生産量の34%、日本の生産量の約6倍に相当する。

グローバルバイオメタノールは2種類の再生可能エネルギーのハイブリッドにより生成されるので、化石燃料に替わる新エネルギーとして位置づけられる。沙漠太陽エネルギー基地やメタノール合成プラント基地建設にかかわる新たなCO₂排出量は差し引かなければならないが、グローバルバイオメタノール生産量相当分の石油消費削減によるCO₂排出削減量がカウントできる。世界最大のCO₂排出国の米国の西海岸には、すでに日本向け木材輸出港が整備されている。燃料需要国の日本が、CO₂削減の共同実施という形で、沙漠と森林の両者を持つ米国と協調するという選択肢もあり得る。

地球規模の電力長距離輸送はコスト的に不可能なために、沙漠の自然エネルギーによる大規模発電の実現性についてこれまで論じられることは少なかった。今

回のグローバルバイオメタノール構想は現状技術のみで構成されるエネルギー長距離輸送手段である。太陽光発電等の自然エネルギー大規模導入の可能性を考察する際、本研究の試算結果は貴重な情報となりうる。

謝辞 ご教授頂いた千葉大学環境リモートセンシング研究センターの本多嘉明先生、東京大学工学部の柳沢幸雄先生、およびパシフィックコンサルタンツ株式会社の原雄一氏に、ここに記して深謝いたします。

引用文献

- 1) 佐野寛；未利用バイオマス資源化への道(Ⅲ)－バイオメタノール、燃料及燃焼, Vol.65, No.8 (1998), 3~11.
- 2) 内嶋善兵衛；地球温暖化とその影響－生態系・農業・人間社会－(1996), 裳華房.
- 3) 本多嘉明他3名；人間活動による地球環境影響評価に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.38, No.2 (1993), 30~52.
- 4) Matthews, E. ; Global Vegetation and Land Use : New High-Resolution Data Bases for Climate Studies, Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol.22 (1983), 474~487.
- 5) Kidwell, K. B. ; Global Vegetation Index User's Guide (1994), National Climate Data Center.
- 6) Legates, D. R., Willmott, C. J. ; Mean Seasonal and Spatial Variability in Global Surface Air Temperature, Theoretical and Applied Climatology, Vol.41 (1990), 11~21.
- 7) Legates, D. R., Willmott, C. J. ; Mean Seasonal and Spatial Variability in Gauge-Corrected Global Precipitation, International Journal of Climatology, Vol.10 (1990), 111~127.
- 8) Kineman, J. J., Ohrenschall, M. A. ; Global Ecosystems Database Documentation Manual (1992), United States Environmental Protection Agency.
- 9) 西上泰子；沙漠開発の視点からみた世界の沙漠面積, 沙漠研究, Vol.7, No.1 (1997), 47~52.
- 10) Eastman, J. R. ; IDRISI for window's User's Guide (1995), Clark University.
- 11) Chong, D. L. S., Mougin, E., Gastellu-Etchegorry ; Relating the Global Vegetation Index to Net Primary Productivity and Actual Evapotranspiration over Africa, International Journal of Remote Sensing, Vol. 14, No.8 (1993), 1517~1546.
- 12) ロバート・ホイットカー (宝月欣二訳)；生態学概説(第二版)(1994), 培風館
- 13) 地球環境データブック編集委員会編；地球環境データブック(1993), オーム社
- 14) 西澤潤一；水力エネルギーへの期待, エネルギー・資源, Vol.16, No.1 (1995), 75~76.
- 15) Gutman, G., Ignatov, A. ; Global Land Monitoring from AVHRR : Potential and Limitations, International Journal of Remote Sensing, Vol.16, No.13 (1995), 2301~2309.
- 16) 本庄孝子；未利用バイオマス資源化への道(Ⅱ)－BCD Fへの道－, 燃料及燃焼, Vol.65, No.7 (1998), 10~17.