

■ 展 望 ■

エネルギー資源としての
バイオマスAvailable Biomass As an Alternate
Energy Source

松田 智*・久保田 宏**

Satoshi Matsuda Hiroshi Kubota



1 はじめに

再生可能 (renewable) なエネルギー資源としてのバイオマスの利用に大きな期待が集まっている。地球全体としてみた時の全バイオマス生産量のエネルギー換算値は、後述のように地球上での現在の一次エネルギー消費の10倍程度と推算されている。

エネルギー資源としてのバイオマスはまた、化石燃料以外のエネルギー源である原子力、水力、風力、波力、潮力、地熱などと異なり、私どもが現在化石燃料を原料として得ている気体および液体燃料に直接変換し得るといふ大きな利点を持っている。従って、バイオマスのエネルギー変換が大量に行われ得るとすれば、私どもの現存のエネルギー利用形態に、大きな変更を加えることなしに、化石燃料に依存しない社会を創り出すことも可能となる。

石油のなる木から得た燃料や、さつま芋から作られたアルコールで自動車を走らせ得る日が、さほど遠くないように多くの人々は考えているのではなからうか。今や、それは得られる燃料の価格だけの問題で、化石燃料の価格が上昇する一方で、バイオマスのエネルギー変換技術が進歩して、得られる燃料価格が低下すれば、自然にバイオマス燃料の時代が到来する筈だと。

バイオマスのエネルギー変換は、そんな簡単な問題であろうか。化石燃料に比べて、地球の表層部に広く分散して存在するバイオマスを集めて多量の自動車用の燃料などを得ることは、果してそんなに容易なことであろうか。それは、技術の進歩に対する安易な過信ではなからうか。また、バイオマスのエネルギー利用の結果としてもたらされる社会・経済そして環境への重大な影響を無視した、現実離れした夢なのではない

だろうか。ここでは、このような私どもの素朴な疑問から出発して、この夢と現実との違いを可能な限り定量化して展望してみることに努めた。

2 技術の進歩と可能性

産業革命以前の人類が利用し得たエネルギー源の大部分は、当然バイオマスであった。産業革命の進展とともに、暖房用および製鉄用に消費される木材の消費が急速に増大し、森林面積は年々減少し、ヨーロッパの森林は一時期消滅の危機に頻した。この危機を救ったのが石炭の利用技術であった。しかも、当時のエネルギーの消費量は現在の1/100のオーダーでしかなかった。

現代文明構築の原動力は、目覚ましい技術の進歩であったが、この技術は、化石燃料の持っている潜在エネルギーを如何に効率よく利用するかに焦点を合わせることによって発達して来たと言ってよいだろう。

現在、バイオマスのエネルギー転換のための技術として利用されようとしているのは、アルビン・トフラー¹⁾の言葉を借りて言えば、実はこの「第2の波」社会で発展してきた技術なのである。再生可能なエネルギー資源として、バイオマスを利用しようとするリサイクル社会、すなわち新しい「第3の波」社会に、「第2の波」社会での古い技術が果してそのまま適用し得るであろうか。

ここで問題提起として、一つの試算例を挙げてみる。1 haの耕地に飼料作物を植えれば、約2.5頭の馬を飼うことができ、これを1日8時間、年間300日働かせた時得られる機械的エネルギーは約 5.8×10^6 kcalと計算される。一方、同じ土地にサトウキビを植えてアルコール自動車を走らせた場合に得られる機械的エネルギーは 3.4×10^6 kcalで、前者の6割に達しない。アルコール生産の場合、生産工程での投入エネルギーを差引け

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科化学環境工学専攻博士課程

〒227 横浜市緑区長津田町4259

** 東京工業大学資源化学研究所資源循環研究施設長・教授

ば両者の比はもっと大きくなるだろう。馬の場合排泄物がそのまま土壌還元され、翌年の牧草の再生産に使えるという有利さも加わる。

この試算例は、まず現在私達の持っているエネルギー変換の技術が、その効率において馬のそれにかなり劣っていることを教えてくれると同時に、単位土地面積当りのバイオマスの生産量が非常に限られたものだというところを改めて知らせてくれる。

さて、再生可能なエネルギー資源として、しかもガス或は液体燃料として化石燃料に代替し得る唯一のソースがバイオマスであるならば、私どもは種々の困難を排除しても、やはりその開発に最善の努力を傾けるべきであろう。しかし、そこで先ず行うべきことは、バイオマスの多様なエネルギー変換の形態の中から、何を優先して開発すべきか、その順位を明確にするための定量的な評価でなければならない。

3 バイオマスのエネルギー変換量

地球全体、米国および日本での年間のバイオマスの生産量の推定値を表1に示した。バイオマス量は総乾燥物として集計され、そのエネルギー換算には表中に示したように 4.2×10^3 kcal/kg-乾燥物という値を用いた。

バイオマスのエネルギー換算に際しては、通常その乾燥物の燃焼熱が用いられている。しかし、周知のようにバイオマスは化石燃料に比べて含水率が高く、その直接燃焼に際して利用し得るエネルギーはこの含水率によって大きく左右される。含水有機物の燃焼熱は真発熱量（燃焼の際に生成される水が水蒸気の形で系外に去り、その凝縮熱が利用されない場合の燃焼熱）として、乾燥物に対する総発熱量と区別されている。

表1 バイオマス生産量とそのエネルギー換算値の推定値

バイオマス総生産量 (10^9 乾燥物t/年)	地球全体 ²⁾	米国 ³⁾	日本 ⁴⁾
陸系	117.7	2.827	0.389 *1
水系	55.0	0.392	—
合計	172.7 *2	3.219	0.389
エネルギー換算量*3 (10^{15} kcal/年)	725	13.5	1.63
年間一次エネルギー消費量に占める比率	約10倍	75%	44%

注) *1. 村田⁵⁾⁶⁾による概算では0.372とされている。

*2. Hall⁷⁾によれば 200×10^9 乾燥物t/年。

*3. 4.2×10^3 kcal/kg-乾燥物として換算。

ところで、バイオマスのエネルギー変換利用形態には、直接燃焼のほかにアルコール、メタンガス化などがあり、これらへの変換プロセスでは、原料中の水分は生成物のエネルギー換算値に影響を与えない。従ってバイオマスのエネルギー換算に際しては、多少矛盾を感じるが、通常行われているように原料の総発熱量を用いるのが便利であろう。

表1から、地球全体でみれば、バイオマスの生産量の1/10程度がエネルギー化できれば、地球上での現在のエネルギー需要がまかなえることが判り、これは何とか可能な数字のように思える。しかし、日本のように人口密度の大きい国はともかく、米国においても、全バイオマス生産量をもってしても、現在の化石燃料からのエネルギー消費の75%しかまかなえないことも同時に知らされる。これらの事実は、現在の米国での人口当りのエネルギー消費が、世界平均の5.8倍⁸⁾という大きな値であることによる。後にも強調するように、バイオマスエネルギー変換が意味を持つためには、その前提として人口当りのエネルギー消費を小さくしなければならないが、その理由の1つがここに明らかにされている。

ところで、種々の制約があって、バイオマス生産量の全部がエネルギーに変換できないことは自明である。果してどの程度までそれが可能かについて、その値を正当な根拠のもとに推算した例は米国におけるPimentelら³⁾によるもの以外は見当たらないようである。まず結果のみを図-1に示した。これは、米国における化石

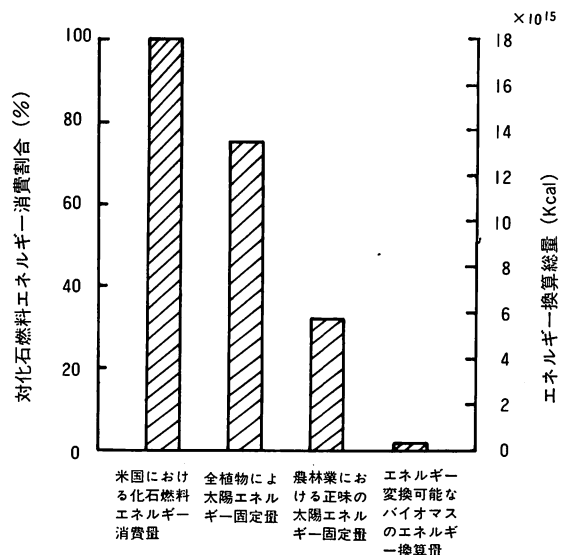


図-1 米国における年間の植物による太陽エネルギー固定量³⁾

燃料によるエネルギー消費量と対比して示した利用可能バイオマスエネルギー量を種々のレベルで考えたものである。表1にも示したように、米全土での光合成によるバイオマス固定量のエネルギー換算値は、化石燃料エネルギー消費 18×10^{15} kcal/年の約75%に達するが、そのうち農林業における正味の太陽エネルギー固定量は、 5.8×10^{15} kcal/年で化石燃料エネルギー消費の32%に相当する。勿論これらは食糧、繊維、材木等国民経済にとって主要な産物である。これ以外のバイオマスで直ちにエネルギー変換可能な量を、Pimentelらは 0.34×10^{15} kcal/年、すなわち現状のエネルギー消費の僅か1.9%という値にしかならないと推算している。

具体的にどのようなバイオマス源がどれだけエネルギー変換し得ると考えられるかを示したのが表2である。バイオマスとしての理論収量の最も大きい農作物遺体が、実際利用可能量としてはゼロとして評価されている。農作物遺体のエネルギー利用は、土壌中の有機質含有量を低下させ、風雨による土壌の侵食を促進し、長期的に見た農作物生産量の低下を招くため、農作物遺体はその全量を農地還元すべきだと主張されている。

表2 米国におけるバイオマスからのエネルギー収量試算例³⁾

バイオマス源	理論 利用 可能量 (10^6 t)	実際の 利用 可能量 (10^6 t)	エネ ルギ ー収量 (10^{12} kcal)
燃料木	70	70	92
林産加工廃棄物	81	20	85
林業廃棄物	340	44	50
都市ごみ (産業廃棄物を含む)	163	82	45
食品加工廃棄物 (20~70%含水率)	4	4	18
(70~90%含水率)	14	14	10
畜産廃棄物	255	128	27
炭化水素木	16	16	13
下水汚泥	13	2	1.3
水生植物	17	3	0.6
農業廃棄物	430	0	0
合計	1,403	372	342

注) 1. 原報を若干整理して示した。
 2. エネルギー収量は、運搬などの所要エネルギーを差引いた正味の回収エネルギー量とされている。
 3. 重量は乾燥物重量で示す。
 4. 含水率の高いものは、主としてメタン発酵、低いものでは直接燃焼するなど、バイオマス源により利用法が異なる。

最近、Pimentelら⁹⁾は、エネルギー変換潜在量の大きい農作物遺体および林業廃棄物について再検討を加え、これらを最大限エネルギー利用することを前提としてその適正利用可能量について、より詳細な検討を行っている。これについては後に述べることにする。

4 エネルギー収率、収量、効率

農業生産など、光合成によって生産されるバイオマスのエネルギー収率を表わす指標として、産出・投入比が用いられる。これは、

$$\mu = \text{生産物の持つエネルギー} / \text{人為的に投入されたエネルギー} \quad (1)$$

で表わされる指標である。式(1)で表わされるエネルギー収率は、バイオマスからのアルコール生産に対しても用いられている。この場合式(1)の分子としては、生産されるアルコールの総発熱量が用いられる。当然 $\mu > 1$ でなければ、代替資源としてのアルコール生産の意味がなくなる。表3には、アルコール生産での μ の試算例を示した。式(1)の分母の投入エネルギーとしてはバイオマス生産およびそのエネルギー変換のために投入されるエネルギーが、プラント建設などのエネルギー換算値も含めて総て加算されなければならない。

μ の試算に際して、大きな誤差の原因となるのは、人為的投入エネルギーの推算値である。周知のように、エネルギーはあくまでも相対的な値として評価されているので、その基準のとり方で値が大幅に変わってしまう¹⁰⁾。現在では、化石燃料の持つ一次エネルギーが、エネルギーの基準として用いられているが、代替燃料でのエネルギー収率を計算する場合には、現状のエネルギー消費構造システムでのエネルギー消費の推定値をそのまま用いることはできない筈である。

コスト計算の場合にも同様の問題が生ずる。その絶対的価値から考える時、現在でも十分安価に供給されている石油の消費をベースとして与えられている現状でのコスト値が、バイオマスエネルギーの時代にそのまま適用されることは有り得ない。安易なコスト計算の結果からは勿論、エネルギー収支の結果からも、それをバイオマスエネルギー変換の妥当性と直接結び付けることのないように注意を促しておきたい。

バイオマスのエネルギー変換の効率を表わす指標として、次式で定義されるエネルギー効率が用いられる。

$$\eta = \frac{\text{(製品の持つエネルギー)} - \text{(投入エネルギー)}}{\text{(原料の持つエネルギー)}} \quad (2)$$

この場合、先に述べたように原料の持つエネルギーと

しては(原料乾物質量)×(総発熱量)として分母を基準化しておくのが便利である。式(2)で定義される η は、あくまでもプラントまで運ばれたバイオマスのエネルギー変換工程での効率であって、分子の投入エネルギーとしてはバイオマスの取得のための投入エネルギーは勿論、その輸送費なども含まない。

η の値は、代替エネルギーの形態によって大幅に変化する。Pimentelら¹⁹⁾は、農林作物遺体のエネルギー変換に対し原料の持つエネルギーを乾物のそれを基準にとった時の η の値として、アルコール変換では11.8%、メタンガスへの変換に対しては4.8%と推算している。

エネルギー効率という指標で比較する限り、上記のように、バイオマスのメタンガス化はアルコール化に

比べてかなり不利になる。しかしながら、何らかの形で処理しなければならぬ廃棄物を原料とした場合には、上記のエネルギー効率による比較は余り意味を持たなくなる。すなわち原料の持っているエネルギー的価値がもはや基準とはなり得ないからである。バイオマス廃棄物の発生規模の小さいところ、或いは原料の性状によっては、アルコール発酵よりはメタンガス化のほうが経済的に有利な場合が多いだろう。

5 エネルギー利用形態とバイオマス収穫量

エネルギー変換の対象となる主なバイオマス源と、それらのエネルギー変換形態について、エネルギー変換技術の現状を勘案しながらコメントを付して表4に示した。

表3 糖または、でんぷんからのアルコール製造のエネルギー効率 μ の計算例

バイオマス	μ	備	考
さとうきび	5.90 * 1	* 1, * 2 : ともに文献10)に掲げられた値, * 1 はブラジル G. de Silva, * 2 は米国 Lipinsky によるとされている。 * 3 : 文献11) のデータより著者らが算出。副生バガスの一部を糖化し、エタノール収率を高め、かつバガスの燃焼で蒸留・加水分解のエネルギーを全部まかなえる計算となっている。 * 4 : 文献12) 及び13) のデータより著者らが算出。原報と異なり生産エネルギーには生成アルコールだけをとり、副生燃料を蒸留用エネルギーなどとして利用している場合は、これらを製造工程でのエネルギーから差引いて投入エネルギーを算出している。 * 5 ~ 8 : 文献14) に紹介されたデータより著者が算出。原報ではとうもろこし1 ブッシュェルから2.5 ガロンのエタノールが得られるとして、それに必要な投入エネルギーを各研究者ごとに整理してある。 μ の算出に当り生産エネルギーをエタノール2.5 ガロン当り210 KBtu (原報では240 Btu)と修正した。このうち、* 8 は通常のとうもろこし栽培・エタノール発酵による場合で、* 5 ~ * 7 は以下の改善案のもとに投入エネルギーを計算している。 * 5 Scheller ら ¹⁵⁾ : バガスをボイラー燃料に利用。 * 6 ACR 社 ¹⁶⁾ : 蒸留・熱交換方式の改良。 * 7 Reilley ら ¹⁷⁾ : 生産性の高い品種の選択。	
	2.67 * 2		
	4.35 * 3		
	4.29 * 4		
とうもろこし	5.02 * 1		
	1.00 * 5		
	0.82 * 6		
	0.57 * 7		
	0.42 * 8		
キャッサバ	1.16 * 4	* 9, * 10 : ともに * 4 に同じ、但し、* 9 は茎と子実を利用する場合、* 10 は茎のみを利用する場合の値である。	
	3.29 * 9		
ソルガム	2.21 * 10		

注) 試算例の中には、産出・投入エネルギーの内容の詳細が不明なものが多い。また、ほとんどの試算例で、投入エネルギーのうち、工業(アルコール製造)部門では運転エネルギーのみが対象とされ、建設エネルギーは考慮されていないようである。

表4 主なバイオマス源とそのエネルギー利用形態

a) 栽培原料		
種類	主なエネルギー利用形態	コメント
燃料木	燃焼, 熱分解*1, ガス化*2	ローカルエネルギーとして既に実用化されている。 木質原料需要と競合。
穀類 (含いも類)	エタノール	食糧との競合が最大の問題点。
炭化水素木 燃料まぐさ	液体炭化水素 燃料, エタノール*3	現状では正味で正のエネルギーが得られない。 特定地域での生産が期待される。
水生植物	メタン	エネルギー収支, 収率, 大規模生産の可能性など今後の検討必要。
b) 廃棄物原料		
種類	主なエネルギー利用形態	コメント
農作物遺体	燃焼, エタノール*3, メタン	賦存量最大。利用制限が大きい。
林産加工廃棄物	燃焼, 熱分解*1, ガス化*2 エタノール*3	現在でも大部分が利用済み。ボード用など原料利用と競合。
林業廃棄物*4	燃焼, 熱分解*1, ガス化*2 エタノール*3	運搬費用大。森林生態系保護, 土壌侵食防止の観点から利用制限大。
食品加工廃棄物	メタン, エタノール*3	原料は一般に多量の水分を含む。
畜産廃棄物	メタン	利用可能性の最も大きい原料。経済性のみが問題。
都市ごみ	燃焼, エタノール*3, メタン, RDF*5	燃焼による都市ごみ発電は既に実用化。生成エネルギーはごみ中の水分, 紙の含有率に依存。有機物の分離回収が最大の技術的問題。
下水汚泥	メタン	生成エネルギーは下水処理場の自家消費程度。

- 注) *1. 熱分解生成ガス・液体燃料の品質が問題。
 *2. 空気または酸素による部分燃焼ガス化による低カロリーガスの製造。
 *3. 効率の良いセルロースの糖化工程の技術開発が課題。現状ではセルロースの加水分解からは正味で正のエネルギーを得られないとの指摘²⁰⁾もある。
 *4. 丸太の切り出しの際の小枝, 森林管理の際の間引材など。
 *5. Refuse Derived Fuel の略。都市ごみの中の有機物を回収した固型燃料。

栽培原料については、当初の期待にも拘らず、そのエネルギー変換を阻む要因が多く、現状では燃料木がほとんど唯一の経済性のあるバイオマス源と考えてよいだろう。

結局エネルギー用のバイオマス源としては、先にも述べたように廃棄物として処理されなければならないものについて、その処理の過程でエネルギーを副産するというケースが主要な部分を占めることになるだろう。

農作物遺体は、その生産量も大きく、後述するように食糧とも競合せず、有力なエネルギー資源と考えられる。先に述べたようにPimentelら⁹⁾は、投入エネ

ギーと産出エネルギーの収支から、この農作物遺体のエネルギー利用可能量について詳細な検討を試みている。

投入エネルギーとしては、耕地での収集エネルギー、耕地からエネルギー変換プラントへの輸送エネルギーのほかに、通常の耕作条件での風雨によってもたらされる土壌侵食を補償して農業生産を保つために必要なエネルギーと、さらに耕地からの農作物遺体を選び出すことによって加速される土壌侵食を補償するためのエネルギー、また農作物遺体として持ち出される窒素、リン酸、カリなどの肥料分を補給するために必要なエ

エネルギー値が詳細に検討・推算されている。当然のことであるが耕地の勾配は、土壌の侵食と密接な関係がある。農作物遺体を収穫することによって、エネルギー的に正味の利益を得ることができるかどうかは、耕地の管理法に大きく依存することも示されている。

林業廃棄物についても同様な検討がなされており、結論として、米国においては農作物遺体および林業廃棄物の22%が利用可能で、得られるアルコール燃料のエネルギー換算値は、現在の米国におけるガソリン使用量の4%、総エネルギー量の1%に相当するとされている。

水田における稲作においては、稲わらの水田からの持出しが土壌侵食につながることはない。しかし、他の作物についてもそうであるが、作物遺体の完全農地還元によっても土壌中の有機質濃度は年々減少し、耕地の生産力が低下しつつあることが指摘されている。現在は化学肥料の多投によって生産力が維持されているが、土壌中の有機質の回復の必要性が、土壌学者のみならず多くの農民から強く要望されていることを付言しておく。

6 バイオマスのエネルギー変換を阻む諸要因

バイオマスのエネルギー変換を阻む要因としては、すでに述べた土壌侵食以外にも、多くが挙げられる。まず第一に指摘されるのは食糧生産との競合の問題であろう。現在、地球上の全人口の1/3近い10億人が飢餓或いは空腹状態にあるという²¹⁾ 現実の中で、先進国におけるバイオマスのエネルギー変換による自動車燃料の確保が果して地球全体として有益な方法であろうか。特に、現在米国において実行されている余剰穀類のアルコール化には、道徳的な見地からの批判もなされている。世界の穀類生産量17億tのうち2.4億tが貿易に回されているが、その半分の1.2億tが米国からの輸出であり、この輸出量の削減は地球上の人類の食生活に重大な影響をもたらす。輸出食糧が戦略物資となり得ることは、昨年のアフガニスタン事件に関連したカーター大統領による穀類輸出制限問題で実証された²¹⁾。一方でこの穀類の輸出代金は、米国の原油の輸入代金と釣合っており、輸出穀類の全量をアルコール燃料に回し得たとして、そのエネルギー換算値はアメリカのガソリン消費の2%程度にしか相当せず、経済的にも全く引き合わない。

ここでブラジルでのアルコール生産問題について触れておく。周知のように、ブラジルでは1975年以降大

規模な国家アルコール計画が進行している。この計画の目的は、1) 原油輸入代金の削減、2) 砂糖の過剰生産による値くずれ防止、3) 労働市場の開拓にあるとされている¹²⁾。変動し易い農産物価格を維持しながら、高騰を続ける原油輸入代金の節減をはかろうとするもので、広大な土地を有するという特殊事情のほかに、国民1人当りのエネルギー消費が米国の1/15、原油輸入代金が我が国の1/5という現状においてのみ成立し得る計画であることに注意する必要がある。

バイオマスのエネルギー変換を阻むもう一つの要因として繊維質資源の需要の増加が挙げられる。発展途上国での紙の需要量の増加に伴って、現在でも地球上の森林面積は年々減少しており、この森林の伐採によってもたらされる洪水等の被害が世界各地で顕在化している。

さて栽培バイオマスのエネルギー変換利用を考える場合に、対象となるバイオマスの生産地として、現在の未利用地、例えば砂漠のような所も考えられているようである。しかし不足する雨量を灌漑によって補おうとすれば、その投入エネルギーだけで生産エネルギーを遥かに上回ることは間違いない。さらに、バイオマスの生産に必要な施肥のためのエネルギー投入を考えると、地球全体としても将来の食糧需要に見合うだけの農耕地の確保すら危ういというのが現実の姿ではなからうか。

ほかにもバイオマスのエネルギー変換を阻む要因は数多くある。例えばアルコール或いはメタンガス化技術に関連した問題でも、これらのプロセスで排出された固体・液体の廃棄物処理についての検討はほとんどなされていない。本来、これらは土壌還元され、土壌への栄養補給がはかられるべきである。しかしながら、例えばアルコール生産では、経済的最少規模とされている4万kl/年程度 of アルコールプラントからの廃水を、全量土壌還元することが可能であろうか。トウモロコシからエタノール生産の際の最適規模と考えられている10万kl/年プラントでの廃水中のBOD総量は人口100万の都市下水のBOD総量に等しく、これを通常の活性汚泥法で処理する際の必要なエネルギーは、生産されるアルコールの持つエネルギーの10~15%程度と推算される。

廃水以前の問題として、プラントへの用水供給の問題もある。石炭液化プロセスが実用規模で行われるとすると、用水の供給が立地の最重要条件の一つになることが指摘されているが、バイオマスからのアルコー

ル生産での用水量は、同一エネルギー換算の生産量をもつ石炭液化プラントよりほぼ1桁大きい量として見込まれている。

アルコールプラントに比較すれば、メタン生成プラントは比較的小規模プラントとして成立し、廃水の土壌還元は比較的容易かもしれない。しかしながら、この場合にも設備費と発酵槽の適温（中温発酵で37°C前後）を保つための加熱源が大きな問題となる。また、発生ガスの利用にも問題が多い。これを圧縮して輸送機器の動力用に利用するには、小規模装置では圧縮設備費が大きくなり経済的に引き合わない。発電して売電するにも発電量の季節変動が大きいいため、やはり経済的に引き合う価格での売電は難しい。結局畜糞の利用としてはコンポスト化の方が経済的であるとの実証プラント試験結果に基く試算例も報告されている²²⁾。

7 迫られるエネルギー消費構造の変革

A. ロビンス²³⁾によって提唱されたソフトエネルギーパスは、A. トフラー¹⁾による「第3の波」社会建設の前提でもあり、21世紀において人類が破滅から逃がれ得る唯一の道であるという指摘は基本的に正しいと思う。ソフトエネルギーパスの社会では、環境インパクトの大きい原子力、化石燃料への依存を最小限に留め、多様な更新性のエネルギーが開発されなければならない。植屋²⁴⁾によるソフトエネルギーパスを指向した我が国のエネルギー自給計画の試案を要約して表5に示した。試算の根拠は明らかでないが、1次エネルギー総量が現状の40%程度に減少し、その中でバイオマスエネルギーの占める割合がケースAの試算では、21.5%に達している。これだけの可搬燃料としてのエネルギー作物を作るためには、現在の日本の耕地面積（国土の15.9%）と同程度の面積が新たに開発されなければならない。勿論、穀類自給率33%の我が国では、これはとうてい不可能な数値である。

エネルギー作物に比べれば、廃棄物バイオマスの有効利用としてのエネルギー化は、積極的に推進されるべきであろう。しかし得られるエネルギー総量の推算値は、ここに示されている数値の1/3程度と考えることが妥当であろう。

このようにして見てくると、可搬燃料源としてのバイオマスの利用には非常に大きな制約がある。現在のエネルギー消費構造を維持する限り、他に可搬燃料源を探さなければならないことになる。当面、石油よりは確認埋蔵量の大きい石炭の液化に頼る以外にない

表5 ソフトエネルギーパスを指向した1次エネルギー自給計画²⁴⁾
バイオマスを主体として抄録

(単位10¹³ Kcal)

項目	ケース A	ケース B
総エネルギー	159.1	159.1
バイオマスエネルギー	34.2	14.2
バイオマスの総エネルギーに占める比率	21.5%	8.9%
バイオマスエネルギー源の内訳		
廃棄物	4.5	4.5
エネルギー作物	29.7	9.7
バイオマスエネルギーの用途		
熱源	8.4	8.4
可搬燃料	25.8	5.8

表6 石炭を利用した輸送システムと一次エネルギー消費の概算

計算基準：単位質量の石炭の持つ一次エネルギーを1.0とする。
(I) 石炭液化・液体燃料自動車システム
石炭液化燃料の保有エネルギー* : 0.2 液体燃料自動車のエンジン効率 : 0.2 総括輸送エネルギー効率 : 0.2 × 0.2 = 0.04
(II) 石炭直接燃焼・電池自動車システム
発生電気エネルギー効率 : 0.3 電池自動車のエンジン効率 ²⁵⁾ : 0.8 総括輸送エネルギー効率 : 0.3 × 0.8 = 0.24

注) システムIではシステムIIの8倍もの1次エネルギー消費を伴う。

* 石炭液化で得られる燃料の1次エネルギー換算値は石炭のその25%程度と考えられるが、さらに自動車燃料として改質するためのエネルギーが必要である。

いうことになるかもしれない。しかし石炭を液化して燃料に用いる場合には、石油に比べ5倍程度の1次エネルギー消費が伴うことを忘れてはならないだろう。もし石炭を利用するのであれば、直接燃焼で電力エネルギーとして変換し、長距離輸送は電車で、短距離輸送は電気自動車を利用するという輸送システムへの変換を考えるべきであろう。このシステムでは表6に試算結果を示すように著しいエネルギー消費の節約が見込まれる筈である。電気自動車はエネルギー効率で見る限り、ガソリン自動車を上回っていることも示されている²⁵⁾。また輸送システムの改革に伴う液体燃料消費量の削減は、石油の寿命を永びかせることにも役立つであろう。

8 むすび

以上、バイオマスのエネルギー変換問題について、私どもの乏しい知見から限られた紙数内で私見的展望を試みた。

まず指摘したいことは得られるバイオマスエネルギーと、そのための投入エネルギーとの定量的な収支を詳細に検討してみた場合に、利用できるバイオマスエネルギーは、一般に楽観的に予測されているよりも遥かに小さくなると推定されるという事実である。しかも、バイオマスのエネルギー変換に際しては、その結果としてもたらされる社会的・経済的影響、環境へのインパクトなど先立って十分検討されなければならない要因が極めて多いことを強調したい。

また、バイオマスから得られるエネルギー取得量が大きくないという予測は、代替エネルギー問題を考える場合、その開発に先立って現状のエネルギー消費構造に基本的な改革を迫る必要性の重要な根拠を提供すると言ってよいだろう。

引用文献

- 1) アルビン・トフラー (徳山二郎監修, 鈴木健次他訳) : 第三の波, 日本放送出版協会, 642pp. (1980)
- 2) Lieth, H. and R. H. Whittaker (ed.) : *Primary Productivity of the Biosphere*, Sprenger, pp. 305 (1975)
- 3) Pimentel, D., Nafus, D., Vergara, W., Papaj, D., Jaconetta, L., Wulfe, W., Olsvig, L., Frech, K., Loye, M. and E. Mendoza : *Bio Science*, 28, 6, 376 (1978)
- 4) 岩城英夫 : 環境情報科学, 10, 2, 54 (1981)
- 5) 村田吉男 : エネルギー・資源, 2, 261 (1981)
- 6) 柴田和雄, 木谷収編 : バイオマス生産と変換一, (上), 学会出版センター, 282 pp. (1981)
- 7) Hall, D. O. : *Solar Energy*, 22, 307 (1979)
- 8) 矢野一郎監修 : 日本国勢図会 (1980年版) pp. 135, 国勢社, (1980)
- 9) Pimentel, D., Moran, M. A., Fast, S., Weber, G., Bukantis, R., Balliett, L., Boveng, P., Cleveland, C., Hindman, S. and M. Young : *Science*, 212, 5, 1110 (1981)
- 10) 猪居武 : 化学経済, 28, 1, 74 (1981)
- 11) 西村肇 : 化学工学協会関東支部第20回研究討論会資料 (1980)
- 12) U. K. I. S. E. S. 編 (宇井勝昭監修, 速水昭彦他訳) : バイオマス・エネルギー, 学会出版センター, 131 pp. (1980)
- 13) Da Silve, J. G., Serra, G. E., Moreira, J. R., Concalves, J. C. and J. Goldemberg : *Science*, 201, 903 (1978)
- 14) Chambers, R. S., Herendeen, R. A., Joyce, J. J. and P. S. Penner : *Science*, 206, 789 (1979)
- 15) Scheller, W. and B. Mohr : *Chem. Technol.*, 7, 616 (1977)
- 16) ACR Preprocess Corporation : *Energy balance*, part of a

- preliminary pilot project application to the U. S. Department of Agriculture (1978)
- 17) P. Reilly : paper presented at Energy Conference, Iowa Farm Bureau, Des Moines (1977)
- 18) 松田智, 久保田宏 : ペトロテック, 4, 10, 949 (1981)
- 19) Pimentel, D., Moran, M. A., Fast, S., Weber, G., Bukantis, R., Balliett, L., Boveng, P., Cleveland, C., Hindman, S. and M. Young : *Environmental Biology Report 81-1*, Cornell University, Ithaca, N. Y., (1981)
- 20) 西村肇 : 化学工学, 45, 5, 291 (1981)
- 21) 大島清 : 食糧と農業を考える, 岩波書店, 209 pp. (1981)
- 22) D. Demmel : *Compost Science/Land Utilization*, January/February 1980, 42 (1980)
- 23) エイモリー・ロビンズ (室田泰弘, 植屋治紀訳) : ソフト・エネルギー・パス, 時事通信社, 410 pp. (1979)
- 24) 植屋治紀 : 環境情報科学, 9-2, 16 (1980)
- 25) 外島忍 : ペトロテック, 4, 8, 761 (1981)

