バイオエタノールの環境対策としての有効性に関する考察 — CO₂ 削減効果の評価 —

山下正和* 相本裕之*

On the Effectiveness of Bioethanol as an Environmental Measures — Quantity evaluation of the amount of net CO₂ reduction —

Masakazu Yamashita* Hiroyuki Aimoto*

摘 要

本稿では、植物の生育過程から使用までのバイオエタノールのライフサイクル全体における CO₂ 排出量を定量的に評価することによって、その使用による環境対策としての有効性についての検討を行った。

その結果、バイオエタノール製造時のエネルギー投入量が大きいこと、また、そのためのエネルギーが主に化石燃料であることから、結局バイオエタノール製造時の CO₂ 排出量が大きく、現状ではバイオエタノールの CO₂ 削減効果に期待はできないという結論が得られた。とくに、トウモロコシや植林材を原料としたバイオエタノールは、そのガソリン代替使用により CO₂ 排出量は増加するという事になった。

また、バイオエタノールによる CO₂ 削減政策は、経済性に関しても他の CO₂ 削減政策よりも費用対効果の劣る取り組みであって、その効果と経済性の双方で有効的であるとは言い難く、「バイオマス・ニッポン総合戦略」を推し進めるわが国にとって、その第一の目的として掲げられている「地球温暖化防止」の観点でも疑問があるという結果になった。

キーワード：バイオ燃料、バイオエタノール、CO₂ 削減、地球温暖化、ライフサイクルアセスメント

Key words：Bio-fuels, Bio-ethanol, CO₂ reduction, global warming, Life cycle assessment.

1. はじめに

1997 年に京都で開催された国連気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（UNFCCC COP3）において京都議定書が採択され、2008 年～2012 年のわが国における温室効果ガス削減目標は、1990 年比で 6% と決められた。この会議では達成のためのいくつかのメカニズムが提案され、そのなかに、「バイ

オマスの燃焼に伴う CO₂ 排出量はカーボンニュートラルの原理によってエネルギー部門の CO₂ 排出量の合計には算入しない」ということが取り決められている。

カーボンニュートラルの原理とは、植物性資源であるバイオマスを燃焼させても大気中の CO₂ を増大させない、すなわち、炭素の増減に関しては変化がないという考え方である。その理由は、

* 同志社大学理工学部環境システム学科（〒 610-0394 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3）

E-mail：myamashi@mail.doshisha.ac.jp

* Department of Environmental Systems Science, Faculty of Science and Engineering, Doshisha University (1-3, Tatara, Kyo-tanabe, Kyoto 610-0394)

たとえばバイオエタノールを燃焼させた場合でも化石燃料の場合と同様にCO₂を発生するが、バイオエタノールの原料は植物であり、その成長過程で光合成によって大気中からCO₂を吸収しているので、大気中のCO₂の収支は結局のところプラスマイナスゼロであるという考えに基づいている。IPCCのガイドライン（IPCC, 1996）には、COP3にて規定されたバイオマス燃焼に伴うCO₂排出に関する内容が記載されていて、内容は次の3点に集約される。

1. バイオマスの持続的な生産が行われている場合はカーボンニュートラルの原理により、バイオマスの燃焼に伴うCO₂排出量はエネルギー部門のCO₂排出量の合計には算入しない。
2. バイオマスの持続可能でない収穫（バイオマスの年間成長量を上回る収穫）が行われた際は「土地利用変化と森林」セクターでの純生産量として計上する。
3. バイオマスの成長により固定化されない他の温室効果ガス（CH₄, NO_x）はエネルギー部門のCO₂排出量に計上する。

これらの動向を受けて、わが国では2002年12月に「バイオマス・ニッポン総合戦略」を策定し、それに沿った国産バイオエタノールの生産、利用を進めてきている。以下に「バイオマス・ニッポン総合戦略」の主目的を示したが、その第一の目的として「地球温暖化防止」が掲げられている。これは、先に述べたカーボンニュートラルの原理により、バイオエタノールを使用した分だけCO₂排出量を削減できるという見解のもとに目的化されたものである。

1. 地球温暖化防止：カーボンニュートラルの原理により、CO₂の排出を抑制する。
2. 循環社会の形成：資源使い捨てから資源リサイクル社会への移行を促進する。
3. 競争力ある戦略的産業の育成：バイオマスを利用した新たな産業が生まれる。
4. 農林漁業・農山漁村の活性化：エネルギーや素材の供給という新たな役割が期待される。

また、同じく主目的の4番目に「農林漁業・農山漁村の活性化」が掲げられている。これは、全国に広がる休耕田を利用したバイオマス資源の栽培が可能になれば、新たな産業が生まれ、わが国の衰退した農業が活性化されるという見方のもとに目的化されているものである。2008年10月には、「農林漁業バイオ燃料法」（正式名称：農林漁業有機物資源のバイオ燃料の原材料としての利用の促進に関する法律）が制定され、この法律によってわが国の農業活性化の手段としてバイオ燃料を生産、利用することが法的に認められることになった。すなわち、バイオ燃料の環境対策としての有効性は、カーボンニュートラルの原理によって国が認めるものとして評価されることになったのである。第一条（目的）の抜粋を次に示す。

農林漁業バイオ燃料法 第一条（目的）

この法律は、農林漁業有機物資源のバイオ燃料の原材料としての利用を促進するための措置を講ずることにより、農林漁業有機物資源の新たな需要の開拓及びその有効な利用の確保並びにバイオ燃料の生産の拡大を図り、もって農林漁業の持続的かつ健全な発展及びエネルギーの供給源の多様化に寄与することを目的とする。

2006年4月には「京都議定書目標達成計画」が閣議決定され、国内において2010年度に輸送用燃料として原油換算で50万[kℓ]のバイオ燃料（エタノール換算で80万[kℓ]）の導入を目指すことになった。原料としては、糖蜜や規格外小麦等、安価に調達可能な農作物が着目され、バイオエタノール80万[kℓ]のうちの5万[kℓ]を国産で賄い、不足分はブラジルを中心とした輸入に頼っている（アルコール協会、2007）。

また、2007年2月には農林水産省、環境省、経済産業省等の関連省庁が連携して、「国産バイオ燃料の大幅な生産拡大に向けた工程表」を作成した。それによると、中長期的な位置づけとして、2030年にかけて、稲わらや木材等のセルロース系原料やコメ等の資源作物からバイオエタノールを高効率に製造する技術開発を推進し、また、他の燃料や国際価格と比べても、競争力を有する国産バイ

オ燃料の大幅な拡大を図るとしている。具体的には、既存のガソリンに10%のバイオエタノールを混合したE10燃料の普及を目指した取り組みが行われている。関連省庁は2030年に生産可能なバイオ燃料の量をエタノール換算で600万[kℓ]（現状のガソリン消費量6000万[kℓ]であるのでその1割に当たる）と試算している（アルコール協会、2007）。

しかし、このカーボンニュートラルの原理は原料作物の成長段階と燃料消費段階という系の中の一部のみを見て定義されてしまっている。現実ではエタノール製造時において多量の化石燃料が投入されており、相応のCO₂の排出が行われているので、系の中では厳密なカーボンニュートラルは成り立たない。バイオエタノールをいわゆるエコ燃料として定義づけるならば、これらのCO₂排出量を加味した上で、ライフサイクル全体におけるCO₂削減効果を評価しなければならないことになる。

近年、ようやくこれらの検討がされ始め、原料や製造方法の指摘もされ、バイオ燃料の持続可能性に関する検討が進められてきている（Luo, 2009; 森口, 2009; 林, 2009; Hedegaard, 2008）。それでもまだ、カーボンニュートラルの原理のみでバイオエタノールの環境対策としての有効性が評価されつづけており、エタノール製造時のCO₂排出量を含めた正味のCO₂削減量の定量評価が行われていない点で問題が残っている。バイオエタノールをエコ燃料として定義づけるならば、これらのCO₂排出量を加味した上でライフサイクル全体を通じたCO₂削減効果の評価を行う必要性が十分にある。

こういった背景より、本研究ではまず、植物の育成過程も含め、バイオエタノール製造時のCO₂排出量を加味したライフサイクル全体におけるCO₂削減効果を定量的に評価し、バイオエタノールの環境対策としての有効性について考察した。

2. CO₂削減効果の評価方法

製造時のCO₂排出量を含め、ガソリンの代わりに使用するバイオエタノールのライフサイクル全体におけるCO₂削減効果を評価するために、①式で与えられる実質的な削減率 α （以下、実質CO₂

削減率と記載）を推計した。

$$\alpha = (A - B) / A \quad \dots \textcircled{1}$$

ここでAは、バイオエタノールのガソリン代替使用における1ℓあたりのCO₂削減量[kg-CO₂/ℓ]を示し、カーボンニュートラルの原理を適用することにより削減可能なCO₂量（エタノール製造時のCO₂排出量を含めない原単位）を表している。またBは、エタノール製造時におけるエネルギー投入に伴うCO₂排出量[kg-CO₂/ℓ]を示し、これにより(A-B)は、エタノール製造時を含めたバイオエタノールのライフサイクル全体におけるCO₂削減量[kg-CO₂/ℓ]を表わす。

カーボンニュートラルの原理を適用した場合には、使用したバイオエタノールからのCO₂排出量はゼロカウントとみなされるので、代替したガソリン分から排出されるCO₂量が削減されることになる。そこで、Qgをガソリンの発熱量[kcal/ℓ]、kをガソリンとエタノールの発熱量比、Egをガソリンの単位熱量当たりのCO₂排出量[kg-CO₂/kcal]とすると、

$$A = Qg \times k \times Eg \quad \dots \textcircled{2}$$

となる。ガソリンとエタノールは性質の異なるものであり、同量のCO₂排出量を考える場合、発熱量ベースで考える必要があるので発熱量比kで補正する必要がある。

Qeをエタノールの発熱量[kcal/ℓ]とすると、

$$k = Qe / Qg \quad \dots \textcircled{3}$$

であるので、③式を②式に代入して、

$$A = Qe \times Eg \quad \dots \textcircled{4}$$

となる。

一方、エタノール製造時におけるエネルギー投入に伴うCO₂排出量[kg-CO₂/ℓ] (B) も同様に数式化して表わすと、

$$B = Qp \times Ep \quad \dots \textcircled{5}$$

となり、ここで、Qpはエタノール製造時のエネルギー投入量[kcal/ℓ]、Epは単位投入エネルギー量当たりのCO₂排出量[kg-CO₂/kcal]である。

④式、⑤式を①式に代入して整理すると、

$$\alpha = 1 - (Qp / Qe) (Ep / Eg) \quad \dots \textcircled{6}$$

となる。バイオエタノールのエネルギー収支比はQe/Qpであるので、これを係数 γ と置くと、

$$\alpha = 1 - (1 / \gamma) (Ep / Eg) \quad \dots \textcircled{7}$$

となる。以上より、バイオエタノールの実質CO₂

削減率 α はエネルギー収支比 γ とエタノール製造時の一次エネルギー源からの CO_2 排出量の対ガソリン比 E_p/E_g を用いて計算される。

ここで E_p はエタノール製造時に投入される各種一次エネルギー源の CO_2 排出量の和であるので、これを数式化して表わすと、

$$E_p = \sum (X_i \times E_{pi}) \quad \cdots \textcircled{8}$$

なお、 X_i は一次エネルギー源 i の構成比率、 E_{pi} は一次エネルギー源 i の単位熱量当たりの CO_2 排出量 [$\text{kg-CO}_2/\text{kcal}$] である。よって、 E_p/E_g 値は、 $\textcircled{8}$ 式を代入して、

$$E_p/E_g = \sum (X_i \times (E_{pi}/E_g)) \quad \cdots \textcircled{9}$$

となる。この値が大きいほど、エタノール製造時において化石燃料主体の利用およびそれに伴う CO_2 の排出が行われている。

エタノール製造時の CO_2 排出量を含めた、バイオエタノールのライフサイクル全体におけるガソリン代替使用による CO_2 削減量原単位 R [$\text{kg-CO}_2/\ell$] を定量的に評価すると、

$$R = A \times \alpha \quad \cdots \textcircled{10}$$

となり、また、バイオエタノールのライフサイクル全体における CO_2 削減費用対効果を評価するための実質的な CO_2 削減費用対効果を C_{eff} で表わし、バイオエタノールの製造コストを C_e [$\text{円}/\ell$] で表わすと、

$$C_{\text{eff}} = C_e/R = C_e/(A \times \alpha) \quad \cdots \textcircled{11}$$

となる。

$\textcircled{7}$ 式、 $\textcircled{10}$ 式、 $\textcircled{11}$ 式で、 $\alpha > 0$ である場合、バイオエタノールのガソリン代替使用による CO_2 削減効果および経済的な有効性が認められる。ちなみに、 $\alpha = 1$ の場合が、カーボンニュートラルの適用される場合である。 $\alpha < 0$ ならばバイオエタノールのガソリン代替使用により CO_2 を増加させることを示す。

3. バイオエタノールの CO_2 削減効果の評価

3.1 ガソリン代替使用における CO_2 削減量

まず、 $\textcircled{4}$ 式をもとに、バイオエタノールのガソリン代替使用時における CO_2 削減量 [$\text{kg-CO}_2/\ell$] (A) を推計した。なお、この数値はカーボンニュートラルの原理を適用することにより削減可能な CO_2 量を表わし、エタノール製造時の CO_2 排出量を無視した原単位である。計算に使用したデータは以下の表 1 に示す通りである。

ガソリンの CO_2 排出量 (LCI 値) $2.554[\text{kg-CO}_2/\ell]$ は、原料資源の採掘から輸入に伴う輸送、燃料の精製、燃料燃焼時までの CO_2 排出量を表わしている。これらの数値を参考にすると、 $\textcircled{4}$ 式中の E_g (ガソリンの単位熱量当たりの CO_2 排出量 [$\text{kg-CO}_2/\text{kcal}$]) は、 $3.041 \times 10^{-4}[\text{kg-CO}_2/\text{kcal}]$ ($\div 2.554[\text{kg-CO}_2/\ell]/8,399[\text{kcal}/\ell]$) である。これに、エタノールの低位発熱量の Q_e を乗じると、 A はおよそ $1.541[\text{kg-CO}_2/\ell]$ ($\div 3.041 \times 10^{-4}[\text{kg-CO}_2/\text{kcal}] \times 5,067[\text{kcal}/\ell]$) であることが推計される。この数値は、バイオエタノールをガソリンの代わりに 1ℓ 使用した場合に、削減できる CO_2 量がおおよそ 1.541kg であることを表わしている。なお、エタノールは「低位発熱量」、ガソリンは「高位発熱量」であり、「低位」と「高位」によって計算値に $5-10\%$ の差が生じる。

3.2 一次エネルギー源からの CO_2 排出量の対ガソリン比

次に、 $\textcircled{9}$ 式をもとに、エタノール製造時の一次エネルギー源からからの CO_2 排出量の対ガソリン比 E_p/E_g 値を推計した。ここでは、主要一次エネルギー源として構成比率の割合が大きい石油、天然ガス、石炭、原子力、水力をとり上げた。

石油系燃料・天然ガス・石炭それぞれの熱量当たりの CO_2 排出量 [$\text{kg-CO}_2/\text{kcal}$] E_{pi} 値を以下の表 2 に示した。これらの数値は、原料資源の採掘

表 1：使用データ (熱力学データ)

エタノール低位発熱量	$5,067[\text{kcal}/\ell]$
ガソリン発熱量	$8,399[\text{kcal}/\ell]$
ガソリン CO_2 排出量 (LCI 値)	$2.554[\text{kg-CO}_2/\ell]$

出所：再生可能燃料利用推進会 (2003) および日本エネルギー経済研究所 (2009) の資料より筆者作成

から輸入に伴う輸送，燃料の精製，燃料燃焼時までの CO₂ 排出量（LCI 値）である。また，表 2 中には各種一次エネルギー源の CO₂ 排出量の対ガソリン比 Epi/Eg 値（それぞれの Epi 値をガソリンの CO₂ 排出量原単位 3.041[kg-CO₂/kcal] で除した数値）も示した。

原子力，水力は発電時に限ると CO₂ を排出しないと言われていて，それを踏襲するとライフサイクル全体での CO₂ 排出量は主に設備建設，廃止措置段階に限られることになる。関西電力のホームページを参考にすると原子力，水力それぞれの設備建設，廃止措置段階における CO₂ 排出量は原子力 25g/kWh，水力 11g/kWh と試算されており，1kWh ≒ 857kcal であるので，これらの数値を参考にすると原子力，水力の CO₂ 排出量の対ガソリン比 Epi/Eg 値は，

原子力 9.593×10^{-6} (≒ 0.025[kg-CO₂/kWh]/857[kcal/kWh]/ 3.041[kg-CO₂/kcal])

水力 4.221×10^{-6} (≒ 0.011[kg-CO₂/kWh]/ 857[kcal/kWh]/3.041[kg-CO₂/kcal]) となる。この数字は，「発電時」に限ったものであり，水力発電，原子力発電全体を指すものではない（Jacobson, 2009）。

次に，日本，米国，ブラジル，EU（27 カ国）それぞれの一次エネルギー源の構成比率 Xi 値を，上記で算出した各種一次エネルギー源から排出され

る CO₂ 排出量の対ガソリン比 Epi/Eg 値の結果と共に以下の表 3 にまとめた。なお，石油の CO₂ 排出量の対ガソリン比は石油系燃料（表 5 中のガソリン，軽油，灯油，軽油）の平均値をとって 1.020 とした。

表 3 の結果から⑨式を基に，日本，米国，ブラジル，EU（27 カ国）のそれぞれの一次エネルギー源から排出される CO₂ 量の対ガソリン比 Ep/Eg 値は，日本 0.888，米国 0.916，ブラジル 0.597，EU0.802 と推計される。この値が大きいほど，エタノール製造時において化石燃料主体の利用およびそれに伴う CO₂ の排出が行われていることになる。結果は，日本，米国，EU がそれぞれ大きい数値となり，一方でブラジルは対照的に低い数値となっている。ブラジルの場合は，ライフサイクル全体を通じて CO₂ 排出量の少ない水力の構成比が 40% と高い割合を占めており，エタノール製造時の CO₂ 排出量は他国と比較して小さいことが考えられる。

3.3 燃料生産のエネルギー収支比

エネルギー収支比とは，産出されたエタノールおよび副生成物のエネルギー量を，投入した化石燃料のエネルギー量で除した指標である。この数値が大きい程，正味のエネルギー生産が行われており，エネルギーとしての有効性を評価できることを示している。なお，エネルギー収支比が 1 を

表 2：Epi 値および Epi/Eg 値の使用データ

項 目	石油系燃料				天然ガス	石炭
	ガソリン	軽油	灯油	重油		
Epi 値* ¹	3.041	3.135	3.095	3.131	2.211	4.059
Epi/Eg 値	1	1.031	1.018	1.030	0.727	1.335

* 1：単位：× 10⁻⁴[kg-CO₂/kcal]

出所：日本エネルギー経済研究所（2009 年）より計算して作成。

表 3：Xi 値及び Epi/Eg 値の結果

項 目		石油	天然ガス	石炭	原子力	水力
Xi 値* ¹	日本	0.47	0.14	0.23	0.12	0.04
	米国	0.40	0.24	0.25	0.08	0.03
	ブラジル	0.43	0.09	0.07	0.01	0.40
	EU	0.38	0.24	0.18	0.14	0.06
Epi/Eg 値		1.020	0.727	1.335	9.593×10^{-6}	4.221×10^{-6}

* 1：エネルギー総合工学研究所 IAE（2005）および田中（2007）より計算して作成。

下回ると、正味のエネルギー生産が行われていないので、エネルギーとしての有効性が否定されることになる。

エネルギー収支比の解析法は、従来から農作物の生産におけるエネルギー効率を表わすために用いられてきた。そのため、産出エネルギーとして高位発熱量が用いられたり、エタノール製造工程で発生する副生成物の発熱量が産出エネルギーに加えられたりする。しかし、バイオエタノールのように燃料として評価する場合は、エタノールの発熱量として低位 5,067[kcal/ℓ] (表 4 参照) を用いるべきであり、また、バイオエタノールの生産を目的とするので、産出エネルギーに副生成物の保有エネルギーを加えるべきではない。

バイオエタノールの製造工程は、原料生産工程とエタノール製造工程に分けられる。各工程において計上されているエネルギー量は、試算者、試算団体により項目に違いがあるが、

- ① 直接的に投入される化石燃料（直接エネルギー投入量）、
- ② 各工程に投入される資源（農薬、化学肥料、化学薬品、潤滑油）の製造や発電のために使用される化石燃料（間接エネルギー投入量）、
- ③ 直接消費をするための機器、機械、さらに

燃料生産のための施設、設備などの製造、組立や機器のメンテナンスにおいて使用される付加的なエネルギー量

である。また、Pimentel ら (Pimentel ら 2005) の試算結果に関しては、これらに加えて原料生産工程における人力、畜力のエネルギーやエタノール製造工程における排水処理に必要なエネルギー量が加えられている。しかし、人力、畜力のエネルギーは化石燃料としての投入量ではないのでここでは除外して考えた。

以上の点に留意して、以下の表 4、表 5 に、国外バイオエタノールの現状のエネルギー収支比をまとめた。なお、これらは実績に基づく数値である。表中の括弧内数値が、産出エネルギーに余剰副生成物を除外して考えた場合のエネルギー収支比を表わす。結果を見ると、米国トウモロコシ、米国植林材（セルロース系原料）および EU 小麦のエネルギー収支比は 1 前後の数値を示しており、正味のエネルギーが得られていないことになる。

表 5 には、代替対象となる化石燃料（ガソリン、ディーゼル燃料）のエネルギー収支比も示した。燃料製造時のエネルギー投入量に着目すると、バイオエタノールは化石燃料（ガソリン、ディーゼル燃料）の 3.3-4.5 倍投入されている。燃料製造時には、エネルギー投入量に比例した CO₂

表 4：国外バイオエタノールの現状のエネルギー収支比*1

生産地：原料		米国： トウモロコシ	米国： トウモロコシ	米国： トウモロコシ	米国：植林材	ブラジル： サトウキビ	輸入 エタノール
単 位		[kcal/ℓ]					
エネルギー 投入量	原料生産	2,715	1,694	1,786	1,580	532	723
	エタノール製造	3,764	3,447	3,633	6,382	130	130
	合 計	6,479	5,141	5,379	7,962	662	853
エネルギー 産出量	エタノール発熱量	5,067	5,067	5,067	5,067	5067	5067
	余剰副生成物	—	957 (0)	921 (0)	—	490 (0)	490 (0)
	合 計	5,067	6,024 (5,067)	5,988 (5,067)	5,067	5,557 (5,067)	5,557 (5,067)
エネルギー収支比 γ		0.782	1.17 (0.986)	1.11 (0.942)	0.636	8.39 (7.65)	6.51 (5.94)
備 考		* 2	* 3	* 4	* 5	* 6	* 7

* 1：表中の括弧内数値は産出エネルギーに余剰副生成物を除外して考えた計算値。エタノール発熱量を 5,067 [kcal/ℓ] として計算。

* 2：Pimentel ら (2005) より筆者作成 * 3：Shapouri ら (2002) より筆者作成 * 4：Lorenz ら (1995) より筆者作成 * 5：Pimentel ら (2005) より筆者作成 * 6：サンパウロ州政府資料 (2004) より筆者作成 * 7：大聖 (2008) より計算して作成

が排出されるので、大きな環境負荷をかけていることになる。また、バイオエタノールの発熱量は化石燃料の60%程度であり、得られるエネルギーも小さい。結果的にEUにおいては、バイオエタノールと化石燃料のエネルギー収支比には5倍以上の開きが生じている。

バイオエタノールはまた、脱水工程に多量のエネルギーが必要となり（表6）、そのためにエネルギー転換効率が低くなって、代替対象となる化石燃料よりもエネルギー収支比が小さくなる。一般的には、蒸留によってワインからアルコール濃度の高いブランデーに変える手間とエネルギーを思い浮かべればよく理解できる。その結果、エネルギー量として1の化石燃料を投入して、1のバイオエタノールを得ている状況であり、有効的なエネルギー生産が行えておらず、エタノールを燃料として利用することの非効率性が見てとれる。

3.4 現状のCO₂削減効果

各国の一次エネルギー源からのCO₂排出量の対ガソリン比E_p/E_gの値、すなわち、米国0.916、ブラジル0.597、EU0.802（3.2参照）および、パ

イオエタノールのエネルギー収支比 γ （3.3参照）の値を参考にして、現状のCO₂削減効果に関する評価を行った。なお、エネルギー収支比 γ の値は、バイオエタノールの生産を目的とするので、産出エネルギーに副生成物の保有エネルギーを除外して考えた数値（表4、表5中の括弧内数値）を使用した。⑦式を基に実質CO₂削減率 α を、⑩式を基にCO₂削減量原単位Rを推計し、以下の表7にまとめた。

結果を見ると、米国のトウモロコシの一部および米国植林材（セルロース系原料）の実質CO₂削減率 α の値がマイナスとなっている。これらは、ガソリンの代替としてバイオエタノールを使用することで、逆にCO₂を増加させている現状を表わしている。また、ブラジルのサトウキビを除く他の結果も、削減率 α の値は小さく、若干量のCO₂削減効果しか得られていない。カーボンニュートラル適用時（エタノール製造時のCO₂排出量を含めない場合）のCO₂削減量がおよそ1.541[kg-CO₂/ℓ]であったので、表中のCO₂削減量Rの値と比較して、現状では期待されたCO₂削減効果が得ら

表5：EUにおける燃料生産のエネルギー収支比*1、*2

原 料		小麦	テンサイ	ガソリン	ディーゼル燃料
単 位		[kcal/ℓ]			
エネルギー投入量	原料生産	1,301	1,125	1,270	1,184
	燃料製造	4,079	3,031		
	合 計	5,380	4,156	1,270	1,184
エネルギー産出量	発熱量	5,067	5,067	8,339	8,581
	余剰副生成物	414 (0)	299 (0)	—	—
	合 計	5,481 (5,067)	5,366 (5,067)	8,339	8,581
エネルギー収支比 γ		1.02 (0.942)	1.29 (1.22)	6.57	7.25

*1：表中の括弧内数値は産出エネルギーに余剰副生成物を除外して考えた計算値。エタノール発熱量を5,067 [kcal/ℓ]として計算。

*2：Santos（2002）より筆者作成

表6：エタノール濃縮に必要なエネルギー量の現状

工 程	エタノール濃度 [wt%]	エネルギー投入量 [kcal/ℓ]	総エネルギー投入量に占める割合 [%]
発 酵	7.3 → 42	980	36
蒸 留	42 → 93	350	13
脱水（共沸蒸留）	93 → 99.5	1,380	51
合 計	7.3 → 99.5	2,710	100

出所：新潟大学工学部化学工学資料のページ（2008）、膜による水とアルコールの分離より筆者作成。

れていない。この理由として、Ep/Eg 値の結果からエタノール製造時におけるCO₂排出量の大きいことが考えられる（3.2 参照）。

表 8、表 9 中の文献を参考にすると、米国のトウモロコシ生育のための化学肥料や農薬に投入されるエネルギー量は、熱量ベースで原料生産時の総投入エネルギー量の 48% と高い割合を占め、また、ブラジルのサトウキビの場合についても、42% と高い割合を占める（表 10）。

これらの結果は、原料生産時における投入エネルギーのなかでも化学肥料、農薬による影響が大きいことを示している。とりわけ、米国のトウモロコシの場合は、化学肥料、農薬に投入されるエネルギー量が、ブラジルのサトウキビの実に 6 倍近くにまで達しており、これらの影響の大きいことが見てとれる。また、ブラジルサトウキビの CO₂ 削減効果は高水準にあることが見られるが、ブラジルの場合は、製糖時に発生する副生成物バガスを燃焼させて電力に変換し、エタノール製造時に必

表 7：バイオエタノールの現状の CO₂ 削減効果に関する評価

生産地：原料	エネルギー収支比 γ	実質 CO ₂ 削減率 α	CO ₂ 削減量原単位 R [kg-CO ₂ /ℓ]	作成データの出所
米国：トウモロコシ	0.782	-0.171	-0.264	Pimentel ら（2005）
米国：トウモロコシ	0.986	0.0710	0.109	Shapouri ら（2002）
米国：トウモロコシ	0.942	0.0276	0.0425	Lorenz ら（1995）
米国：植林材	0.636	-0.440	-0.678	Pimentel ら（2005）
ブラジル：サトウキビ	7.65	0.922	1.42	サンパウロ州（2004）
輸入エタノール	5.94	0.899	1.39	大聖（2004）
EU: 小麦	0.942	0.149	0.229	Santos（2002）
EU: テンサイ	1.22	0.343	0.528	Santos（2002）

表 8：米国、トウモロコシのエネルギー投入量

原料生産工程…計 2,715[kcal/ℓ]			
石油系燃料	448	機械、資材	316
化学肥料	925	農薬	378
種子	163	灌漑	99
電力	11	輸送	375
エタノール転換工程…計 3,764[kcal/ℓ]			
工業用水	90	装置	32
蒸気	2,560	電力	1,013
廃水処理	69		

出所：Pimentel ら（2005）をもとに作成。

表 9：ブラジル、サトウキビのエネルギー投入量

原料生産工程…計 532[kcal/ℓ]			
石油系燃料	100	機械、資材	77
化学肥料	177	農薬	50
種子	15	輸送	113
エタノール転換工程…計 130[kcal/ℓ]			
電力	0	化学薬品、潤滑油	17
建屋	31	装置	82

出所：サンパウロ州環境局（2004）をもとに作成。

要な電力の全てを賄っていることによると見られる（公表文献によると外部からの購入電力は0となっている。表9参照）。これにより、エネルギー収支比は良好なものになり、外部からのエネルギー投入量を抑えて、エタノール製造時のCO₂排出量を最小限に抑えている。

バイオエタノールは主に発酵、蒸留、脱水という工程を経る（但し、セルロース系原料、デンプン質原料は発酵前に糖化工程が余分に必要となる）。工程別のエネルギー投入量に着目すると、脱水工程時に投入されるエネルギー量が大きい（表6）。発酵エタノールを濃縮して無水エタノールにするために投入されるエネルギーのおよそ半分（51%）は、脱水（共沸蒸留）工程において消費されている。エタノール1ℓの発熱量がおよそ5.067[kcal/ℓ]（表4）であるので、その4分の1以上（27%）のエネルギーが既に脱水工程で失われていることになる。原料生産時には化学肥料、農薬により、また、エタノール製造時には脱水工程に多量の化石燃料が投入されており、これらのCO₂排出の影響が大きいと考えられる。

そもそも、カーボンニュートラルの原理により、ガソリン代替としてバイオエタノールを使用した分だけガソリン消費量を抑えることができ、抑制されたガソリン分からのCO₂排出量を削減できるという考え方が生まれてきている。しかし、現実にはエタノール製造時において化石燃料の投入に伴うCO₂の排出が行われているので、バイオエタノールのガソリン代替使用分がそのままの

CO₂削減量にはつながらない。現状では期待されたCO₂削減効果の得られていない状況であり、わが国が「バイオマス・ニッポン総合戦略」の第一目的として「地球温暖化防止」を掲げ、バイオエタノールを推し進める理由が問われることとなっている。

4. 結論

現状のバイオエタノールの環境対策としての有効性は、国が認めるカーボンニュートラルの原理が適用されることによって評価されている。しかし、エタノール製造時におけるCO₂排出量を含めた正味のCO₂削減量の定量評価が行われていない点が問題であった。そこで、これらのCO₂排出量を含めたCO₂削減効果に関する定量評価を行い、その効果についての考察を進めてきた。

結果は、エネルギー収支比の結果が劣ることから、エタノール製造時のエネルギー投入量の大きいこと、またエネルギーの利用形態が化石燃料中心であることから、エタノール製造時のCO₂排出量が大きく、現状では期待されたCO₂削減効果が得られていないということになった。米国トウモロコシの一部や米国植林材（セルロース系原料）の実質的なCO₂削減率はマイナスであった。また、バイオエタノールによるCO₂削減政策は、他の政策と比較してもあまりにも費用対効果の劣る取り組みであることが指摘される。現状では、バイオエタノールによるCO₂削減政策は、その効果と経済性の双方で有効であるとは言い難く、国策「バイオマス・ニッポン総合戦略」を推し進めるわが国にとって、その第一目的である「地球温暖化防止」の観点でも意義が問われる。エタノール製造時のCO₂排出量を含めた正味のCO₂削減量の定量評価が行われずに政策が推し進められている点が問題であるということになる。

現在実施されている環境対策のすべてが真に有効であるとは限っておらず、バイオエタノールに関しても、カーボンニュートラルという如何にもエコ的な響きのある言葉だけで解決しようとしてはならないと思われる。環境問題の解決には、情緒的な判断を廃し、徹底のかつ科学的に吟味することが必要である。国はその本質を見極め、計画の実現可能性、経済性のある有効的な環境対策に

表10 米国およびブラジルの、トウモロコシの原料生産工程における投入エネルギーの比率（%）

	米国（%）	ブラジル（%）
石油系燃料	16	19
機械、資材	12	15
化学肥料	34	33
農薬	14	9
種子	6	3
灌漑	4	
電力	0	
輸送	14	21
計	100	100

投資を行うことが必要ではなかろうか。

引用文献

アルコール協会 (2007) 図解バイオエタノール製造技術, 工業調査会, 15-25.

エネルギー総合工学研究所 IAE (2005), 各国のエネルギー構成.

<<http://www.iae.or.jp/energyinfo/energydata/data1016.html>> (2011 年 6 月 27 日)

林岳 (2009) バイオ燃料導入の諸効果とその評価方法, 環境プロジェクト研究資料第 1 号.

<<http://www.maff.go.jp/primaff/koho/seika/project/pdf/biofuel-1.pdf>> (2011 年 6 月 27 日)

Hedegaard K., Thyo K.A. and Wenzel H. (2008) Life Cycle Assesment of an Advanced Bioethanol Technology in the Perspective of Constrained Biomass Availability, Environmental Science & Technology, 42, 7992.

IPCC-NGGIP, Rivesed 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventries, <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>> (2011 年 6 月 27 日)

Jacobson M.Z. (2009) Review of Solutions to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security, Energy and Environmental Science, No.2, 148.

関西電力, エネルギー／環境. <<http://www.kepco.co.jp/gensi/teitanso/01.html>> (2011 年 6 月 27 日).

Lorenz D and Morris D. (1995) How Much Energy Does It Take to Make a Gallon of Ethanol?

<http://www.carbohydrateeconomy.org/library/admin/uploadedfiles/How_Much_Energy_Does_it_Take_to_Make_a_Gallon_.html> (2011 年 6 月 27 日)

Luo L., Voet E. v. d. and Huppel G. (2009) Life Cycle Assesment and Life Cycle Costing of Bioethanol from Sugarcane in Brazil, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 1613.

森口祐一 (2009) 温暖化対策としてのバイオ燃料

の効果の評価, 環境情報科学, 38, 63.

日本エネルギー経済研究所 (2009) 計量分析ユニット, EDMC/ エネルギー・経済統計要覧 (2009 年版), 財団法人省エネルギーセンター.

新潟大学工学部化学工学資料のページ (2008)) 膜

による水とアルコールの分離
<<http://chemeng.in.coocan.jp/memb/et.html>> (2011 年 6 月 27 日)

農林水産省 (2008), 「農林漁業有機物資源のバイオ燃料の原材料としての利用の促進に関する法律」の施行について. <<http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/bio/081001.html>> (2011 年 6 月 27 日).

農林水産省 (2009), バイオマス・ニッポン総合戦略.

<http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf> (2011 年 6 月 27 日).

大聖泰弘 (2008) 図解バイオエタノール最前線改訂版, 工業調査会, 28-36.

Pimentel D. and Petzek T.W. (2005) Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood. Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower, Natural Resources Research, 14(1), 65, 72.

再生可能燃料利用推進会 (2007) 第 3 回再生可能燃料利用推進会議資料, エタノール 3% 混合ガソリン (E3) の CO₂ 削減の費用対効果の試算, 3.

サンパウロ州環境局 (2004) Govement of the State of Sao Paulo (2004) Assessment of greenhouse gas emission in the production and use of fuel ethanol in Brazil, 37.

Santos M.A. (2002) Energy Analysis of Crops Used for Producing Ethanol and CO₂ Emissions, <<http://www.ivig.coppe.ufrj.br/docs/alcofoen.pdf>> (2011 年 6 月 27 日)

Shapouri H., Duffield J.A. and M.Wang (2002) The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update, Agricultural Economic Report, 814, 28.

田中信世 (2007) EU のエネルギー政策とエネルギー需給, 季刊 国際貿易と投資, 68, 7-24.

(2011 年 4 月 25 日受付, 2011 年 9 月 6 日受理)