

東京大学農学部公開セミナー

第 35 回

バイオエネルギーは 地球を救うか？

(講演要旨集)

バイオエタノール生産・利用をめぐる経済問題と国際情勢
農学国際専攻 教授 鈴木 宣弘

バイオエタノール生産・利用のための原料作物の確保
生圏システム学専攻 教授 森田 茂紀

バイオエタノール生産技術とその周辺を巡る諸問題
応用生命工学専攻 教授 五十嵐 泰夫

日	時	2008年11月1日(土) 13:30~16:45
場	所	東京大学弥生講堂・一条ホール
主	催	東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部
共	催	(財)農学会

目 次

バイオエタノール生産・利用をめぐる経済問題と国際情勢 …… 1

農学国際専攻 教授 鈴木 宣弘

バイオ燃料は食料危機の元凶か？ それとも、地球温暖化抑制の切り札か？ 穀物価格高騰は止まらないのか？ 様々な要因は相互に関連している。バイオ燃料の推進にあたっては、経済的な採算性、食料需給・価格への影響、環境への影響等に関係する様々な自然科学的、社会科学的要因の相互依存のメカニズムを把握し、市場で取引されない価値も含めた総合的な費用便益の視点から妥当な方向性を見いだしていく必要がある。

バイオエタノール生産・利用のための原料作物の確保 …… 17

生圏システム学専攻 教授 森田 茂紀

地球温暖化対策あるいは石油代替エネルギーとして、バイオエタノールが注目されている。一方で、原料作物をめぐる食料とエネルギーとの競合が起こっているし、原料作物の栽培をめぐる環境に負荷をかける心配もある。いずれにしても、バイオエタノールの事業化を考える場合は、単に変換技術の開発だけではなく、原料作物の確保が必要となる。どこで、どの作物を、どのように栽培するかという点から、原料作物の確保について考える。

バイオエタノール生産技術とその周辺を巡る諸問題 …… 24

応用生命工学専攻 教授 五十嵐 泰夫

最近注目されているバイオエタノール生産について、その生産技術、関連した諸問題について触れた後に、ブラジル、アメリカそして東南アジア諸国とも全く異なった状況にある日本での国産バイオマスの資源化と循環利用について、どんな問題があるか、またどうしたら実現し得るのか、長野県信濃町のバイオマス実験棟において私たちが行なっているバイオエタノール（地燃料）実証実験を例に考えてみたい。

バイオエタノール生産・利用をめぐる

経済問題と国際情勢

農学国際専攻 教授 鈴木 宣弘

バイオ燃料は食料危機の元凶か？ それとも、地球温暖化抑制の切り札か？ 穀物価格高騰は止まらないのか？ 様々な要因は相互に関連している。バイオ燃料の推進にあたっては、経済的な採算性、食料需給・価格への影響、環境への影響等に関係する様々な自然科学的、社会科学的要因の相互依存のメカニズムを把握し、市場で取引されない価値も含めた総合的な費用便益の視点から妥当な方向性を見いだしていく必要がある。

1. 穀物価格高騰をどう捉えるかーバイオ燃料需要は主因か？

米国は、穀物価格高騰の主因はバイオ燃料需要の喚起でないと主張するが、そもそも、バイオ燃料需要の喚起は、米国にかぎらず、穀物の過剰在庫を削減し、低迷していた穀物価格の上昇を実現するために推進された側面も大きい。米国は、農村不況の回復のため、穀物在庫率を引下げ、農産物価格を上昇させるべく、中国等への輸出需要の拡大に期待したが、トウモロコシについては、中国も1年分の消費量に相当する在庫をかかえるような過剰状況で、期待が裏切られる中で、何とか国内需要が喚起できないかと思案していた矢先に、9.11事件と原油価格高騰により、エネルギー自給率向上の大義名分の下、バイオエタノール生産拡大の国民的コンセンサスを得る流れが生じたと、農林中金総合研究所の Ruan Wei 主任研究員は指摘する。中国も、膨大なトウモロコシ在庫の削減のためにバイオエタノール生産振興を位置づけたように、米国も中国もトウモロコシの過剰解消がバイオ燃料生産拡大の直接的な動機となっており、地球環境への配慮が本質的な動機ではないという見方ができることに留意が必要である。EUについても、砂糖の輸出制度に対して WTO のパネル(紛争処理委員会)で改善を求められ、輸出向け用途を大幅に削減せざるを得なくなり、行き場を失ったビートの処理のためにバイオエタノール生産が促進された経緯があり、その他の農産物についても、とりわけフランスで顕著だが、過剰在庫処理の有効な手だてとしてバイオ燃料需要喚起が行われたことが農林水産政策研究所の加藤信夫氏等から指摘されている。

このような意図からすれば、国際的な農産物価格の高騰は、まさに目的が達成されたことになるわけだが、今回の穀物価格の異常な高騰は、バイオ燃料需要の拡大による効果を大きく超えた水準になっていることも確かである。

需給の緩和・逼迫は、在庫率に集約して表れるので、在庫が減れば価格が上がるとい

う右下がりの直線的関係が比較的きれいに観察されることが知られているが、2007 年には、在庫水準の割には価格の上昇が激しく、経験則からの大きな乖離が見られる(図 1)。

バイオ燃料需要の増加は、オーストラリアの干ばつなどによる供給減とともに在庫率の低下に反映されているから、実際の需給要因を超えた乖離の要因としては、金融市場の不安からの投機マネーの流入、ドル安による名目価格の上昇等に加え、各国が自国民への供給確保の不安か輸出規制を行い、在庫はあるのに貿易量が減ったことが指摘されている。今回の穀物価格高騰にバイオ燃料需要がどれだけ寄与したかを検証するには、これらの様々な要因を総合的に考慮した上でバイオ燃料によるネット(正味)の影響を分離する経済分析が必要である。

我々の国際トウモロコシ需給モデル(図 2、高木英彰君構築)によるシミュレーション分析では、需給要因で説明可能な 2008 年 6 月時点のトウモロコシ価格は約 3 ドル/ブッシュェルで、実測値の 6 ドルよりも 3 ドルも低い、つまり、需給要因以外の要因によって残りの 3 ドルの暴騰が生じた可能性が示唆されている。

2. バイオ燃料の採算性—私的・社会的の両面から

経済的に利潤が得られなければ、バイオ燃料生産がビジネスとして成立しないから、ガソリン価格に比較して、バイオ燃料生産コストが低いことが条件になる。

アイオワ州立大学の研究所 CARD の研究成果(Elobeid, et al 2007 等)も参考にして、東大農学部柴戸康輔君が卒論研究で試算中の暫定値を図 4,5,6 に示した。この試算では、米国のトウモロコシからのエタノール製造で使用される化石燃料の価格が、原油の高騰と連動して上昇することをコスト計算に組み込んだことが一つの特徴である。

これを見ると、ブラジルのサトウキビについては、各年いずれも、サトウキビからのエタノールがガソリンよりも割安で、コマーシャル・ベースで採算がとれる可能性が示されている一方、米国のトウモロコシについては、逆に、補助金がなければ、ほぼすべての年で採算割れになることが示されている。

ただし、現行の 51 セントのエタノール 1 ガロン当たりの税控除を前提とすると、2005、2006 年は採算がとれ、2007、2008 年はほぼブレイク・イーブンという状態になっており、政府からの補助の効果が発揮されている。

米国のトウモロコシからのバイオエタノールへの補助については、農業補助金として規制する必要があるとの WTO(世界貿易機関)への異議申し立てがカナダ、ブラジル等から行われている。

ただし、もし、米国のトウモロコシからのエタノールが、CO₂ 削減に効果が高く、地球温暖化の抑制への貢献(プラスの外部性)を勘案すると、コマーシャル・ベースではビジネスとして成立しなくても、社会的には、補助金を投入して推進すべき事業であるという大義名分も成り立つ。

しかしながら、コーネル大学の Pimentel 教授の、ガソリンよりもむしろ CO₂ の排出が大きいという最も厳しい評価(Pimentel and Patzek 2005 等)を筆頭に、いずれも、ブラジルのサトウキビ

に比べて、米国のトウモロコシは、はるかに CO2 削減効果が小さいことが一般的な研究成果になっている。こうした中、EU では、バイオ燃料の持続可能性基準の一つとして、「バイオ燃料は、温室効果ガス排出を化石燃料に比べて 35%以上減らすものでなければ推進してはならない」としており、さらに、45%以上、60%以上と強化するとしているとともに、それを国際的な基準にしていこうという動きがあり、こうした基準を適用すれば、米国のトウモロコシからのエタノールへの政府補助による推進は真っ先に困難に直面することになる。これに加えて、トウモロコシを主食とする途上国の国民の栄養不足を招き、家畜飼料の高騰による酪農・畜産農家の困窮を招いたこと(注)等も考慮すると、私的・社会的両面を総合的に考慮した費用対効果の観点で、米国のトウモロコシは、非常に厳しい評価を受けつつある。

(注)家畜飼料の価格高騰は我が国の酪農・畜産にとっても深刻な問題であるが、現在まだ十分に利用が進んでいないバイオエタノール副産物であるトウモロコシ等の DDGS (ソリュブル添加の蒸留カス) が、飼料として本格的に普及することになれば、飼料用穀物需給は緩和されるとの期待もある。

3. 価格は「もう戻らない」か?

需要と供給の趨勢的伸びから差し引いて、将来には「不足」が生じる、ないし「過剰」になるという類の議論は、価格の需給調整機能を見逃したもので経済学的には論外だが、最近における穀物需給高騰が「構造的」で、価格は「もう戻らない」という見方にも疑問が残る。

原論的には、需給の変化と価格との関係は、図3のように整理できる。バイオ燃料向けの需要増加により穀物への需要がD'にシフトして、供給がシフトしなければ、価格はP'に上昇するが、増産型技術開発の促進による単収の向上等により供給がS'にシフトすれば、価格はPに戻る。さらに、第二世代バイオ燃料が商業化されて需要がDに戻れば、価格はP''まで下落する可能性もある。

価格が戻らない根拠として、需要面でのバイオ燃料需要の拡大と中国、インド等の人口爆発と爆食に対し、供給面での単収の伸びの技術的限界説が指摘される。これらの要因を検討してみよう。

(1) 供給は反応する

価格が上昇すれば、供給が増えて需要を満たし、価格は下がる。この価格シグナルによる調整機能により、国際穀物相場は過去数十年にわたって上昇・下降を繰り返してきており、長期的には決して上昇基調になく、実質的にはむしろ低下してきたのである(注)。バイオ燃料向けの需要が加わっても、価格に応じた反応はやはり発揮されるだろう。米国では、近年停滞していたトウモロコシ作付が、バイオ燃料ブームに呼応して、

2007年には前年比26%も増加した。EUの減反解除だけでも1,000万トン程度の穀物増産が可能になる見込みという。また、ブラジルにおける原料作物の作付は、今後も十分に拡大する余裕があると言われている。FAOデータによると、ブラジルには、アマゾンを除いて約4億haの可耕地があるうち、現在は五分の一程度の6,000万ha強が耕作されているにすぎない。

また、もし耕地面積が不変であっても、価格高騰が続けば、単収が上がる。つまり、需給が逼迫すれば単収は上昇へ向かうのである。今後の単収増加の余地については、すでに技術的に限界に近づいているのではないかという指摘もあるが、単収の伸びが近年鈍化してきたのは、穀物価格が実質的に長らく低迷してきたことを反映している側面を見逃してはならない。穀物価格が上昇すれば、技術開発が促され、単収は上がると期待できる。価格上昇に伴い単収が上昇する傾向は、耕地面積の制約が大きいほど強まる。米国におけるトウモロコシ単収の増大は、密植を可能にする技術開発により実現されてきた。

主要国におけるトウモロコシ価格と単収との関係を定量的に分析した東京大学農学部高木英彰君(現在、農学国際専攻大学院)の卒論研究によると、トウモロコシ価格が1%変化したときの単収増加率(趨勢的な技術進歩とは別に、それに加えて高価格に刺激されて技術開発が促進されたことによる増加部分)は、米国0.2%、EU0.3%、アルゼンチン0.3%、中国0.4%であることが有意に計測されている。農学国際専攻大学院の李想さんも綿密な計測でこの点を実証している。一般的に、食料需給予測の多くは、将来の単収予測においてこのような価格との関係性が考慮されておらず、トレンドのみで近似されている。したがって、価格上昇局面での単収増加の見込みは過小評価され、食料増産の見込みも過小評価されがちなのである。

また、単収は国によって非常に大きな格差があり、それが縮まる可能性は十分あると考えるべきである。たとえば、中国のトウモロコシ単収は米国の半分であり、その格差が埋まるだけでも大幅な増産を見込むことができる。

さらには、バイオ燃料向けの増大につれて遺伝子組み換え作物の作付け割合が急速に拡大する下で、例えば、大豆では、現在主流の除草剤耐性の「ラウンドアップ・レディ」の次に、09年に登場することが予定されている「ラウンドアップ・レディII」は単収がかなり増える要素が強く、これが急速に普及するという観測もある。

(注) 穀物価格が2倍になっても、他の商品の物価も2倍になり、所得も2倍になれば、実質的には何も変化がないことになる。

(2) 第二世代バイオ燃料の可能性

現在主流となっているデンプン質や糖質からのバイオ燃料ではなく、木くずや雑草等からのセルロース系バイオ燃料(第二世代)が実用化されれば、食料や飼料との競合問

題は解消されるだろう。

米国では、ブッシュ大統領が 2007 年の一般教書演説で、バイオ燃料使用量の 2017 年までの義務目標を、350 億ガロンという膨大な量に設定する必要性に言及した。これは、もしトウモロコシで実現するなら、現状のトウモロコシ作付面積をすべてエタノールに向けても足りない量であったことから、エタノール向けトウモロコシ生産の政策的拡大、およびトウモロコシ価格の高騰は避けられないとの議論が盛んに行われた。だが、後に上下両院で可決された法案では、2022 年までに 360 億ガロンの再生可能燃料利用を義務づけるが、そのうち 210 億ガロンはセルロース系原料を用いることとされた。トウモロコシ等によるエタノールは 150 億ガロンということであるが、すでにトウモロコシによるエタノールの生産量は 80 億ガロン近くに上っており、現存するエタノール製造工場のキャパシティが 150 億ガロンに近い規模に達している。つまり、同法ではトウモロコシによるエタノール生産を現有施設能力以上に増やすことはせず、第二世代の実用化を前提にした目標であり、トウモロコシ需要を牽引するものではないことに留意が必要である。

筆者が 2008 年 8 月に滞在したコーネル大学でも、米国に広範に自生するスイッチグラス(イネ科の多年生の雑草)等からのエタノール生産の実用化プロジェクトに大きな予算がつき、関連機関と連携した推進機運が高まっていた。

第二世代の技術が低コストで実用化されれば、食料や飼料と競合し、生産コストがガソリンより割高で、二酸化炭素の排出削減効果も小さいとされるトウモロコシ等へのエタノール向け需要は縮小していくことが見込まれる。

第二世代の利用がいつ本格化するかは、今後の技術開発次第であり、不確定ではある。とは言え、最近の国際穀物市場の混乱は、あくまで第二世代が普及するまでの過渡期をどう乗り切るかという問題として冷静に見ておく必要があるだろう。

ただし、ブラジルのサトウキビについては、トウモロコシからエタノールを製造するときには化石燃料が使われるのに対してバガスと呼ばれるサトウキビの絞りかすが使われること等による生産コストの低さ、二酸化炭素の排出削減効果の大きさに加え、潜在的な可耕地の大きさから食料(砂糖)生産と競合しにくい面があり、第二世代と共存する可能性がある。一方、ブラジルについても、サトウキビ生産の拡大で追われた小農牧民がアマゾンの森林を燃やすという間接的な森林破壊を誘発し、二酸化炭素排出が増加するとの指摘もあり、総合評価が待たれる(参考図)。

(3) 原油価格の動向

バイオ燃料への取り組みは、そもそも今に始まったことではなく、1970 年代のオイルショック時にも浮上していたが、間もなく原油価格が低下したため、相対的なバイオ燃料の採算性が悪化し、ブラジル以外では、長らく生産が停滞していたことも忘れてはならない。今回の再浮上も、原油価格が史上最高値で急伸している中での一時的なブー

ムである可能性を排除できない。

原油価格とエタノール向けトウモロコシ需要との関係を分析した先述の高木君の計測結果によると、原油価格が1%上昇すると、トウモロコシ価格に変化がなければ、エタノール向けトウモロコシへの需要もほぼ1%増えるという関係により、計測期間中（1993～2006年）のエタノール向けトウモロコシ需要の変動の約85%が説明できていた。この関係性は、エタノール混合率の義務化やバイオ燃料増産への助成等の影響が強まった2005および2006年にも保たれていた(図7)。

このように、エタノール需要は原油価格水準と密接な関係をもっている。一方、最近の原油価格の急騰は、大手投機筋による投資額の占める割合が非常に高い中で生じていることから、激しく急転して下落する可能性が各所で指摘されている。また、需給ベースでは、バイオ燃料生産増加をはじめとする代替燃料の増加によるエネルギー需給の緩和が、原油価格を引き下げる。さらには、原油価格が上昇するにつれて、採掘コストの高い油田も採算がとれるようになり、増産が生じるという「経済的埋蔵量」による原油価格下落の可能性も無視できない。それに伴い、エタノール原料の中でも特にコストの高いトウモロコシは、エタノール原料としての需要を急速に失う可能性がある。

ただし、米国を中心に、ガソリンへのエタノール混合等によりバイオ燃料利用を義務化する施策が世界的に強化されつつあることから、バイオ燃料需要が大きく縮小することはないとの見方もある。だが、原油価格の下落によってバイオ燃料の相対的な採算性が大幅に悪化すれば、そうした施策にはさらに多額の補助金が必要となり、それが限度を超えれば、施策の見直しを余儀なくされるであろう。このような現状認識に基づいて、今後の世界のバイオ燃料政策と食料需給の動向については慎重に見極めていく必要がある。

米国では、原油に対するトウモロコシの相対的高騰でエタノールの採算性が悪化しつつあるにもかかわらず、2008年農業法において、現行の51セントのエタノール1ガロン当たりの税控除を引き上げるどころか、45セントに引き下げる決定を行った点が注目される。

(4) 新興国の食は洋風化するか

新興国で食料需要が急増するのではないかという不安も、食料需給逼迫の長期化が主張される理由の一つである。その代表的なレスター・ブラウン博士の主張は、著書「誰が中国を養うのか」(Brown, 1995)にも著されたとおり、膨大な人口を抱える中国等の新興国の食肉需要が、将来的に欧米水準にまで高まり、世界の食料生産力では賄えなくなるというものである。一般に欧米人の多くは、彼ら自身の食生活が「進んで」いて、世界の食生活は経済発展と共に着実に「洋風化」していき、思い込んでいる向きがある。

しかし、筆者らが行ったつぎの2つの分析は、中国の食生活が必ずしも洋風化へ向かってはいない可能性を示唆していた。まず一つめは、世界100カ国以上の食生活パター

ンを主成分分析で類型化した鈴木他（2003）である。その結果は図 8 に示したとおり、過去数十年間において、確かに中国の食生活はデンプン質中心の「途上国型」からタンパク質中心の「先進国型」へと推移してきたが、その向かう先は、タンパク質の摂取源として、肉・乳製品が多い「西欧型」（米国を含む）ではなく、魚介類のウエイトが相対的に高い「東アジア先進国型」（韓国、日本、香港を含む）の方向を示していたのである。

もう一つの分析は、中国都市部における食品需要の所得弾性値を推計した木下・彭（2007）、増田（2008）である。その結果は表 1 のとおり、1996 年から 2005 年にかけて、肉類の需要の所得弾性値は低下してきたが、魚は上昇しており、2005 年には肉類よりも魚の方が弾力的であることを示している。このことは、肉類需要の伸びはすでに年々鈍化してきた一方、魚需要の伸びは堅調なことを意味する。また、この結果を用いて 10 年後の予測を行うと、仮に中国都市住民の所得が過去 10 年来のような速いペースで上昇し続けても、牛肉消費量が現在の日本人の水準 7kg に達することは難しく、ましてや 30kg を超える欧米の水準には遠く及ばないことがわかった。一方、OECD が世界食料需給予測に用いている所得弾性値は、農村部も含めた中国全体の推計値であるため直接の比較はできないが、かなり弾力的な値（牛肉 1.593、豚肉 0.709、鶏肉 0.983 等）であるため、需要増加の程度が過大に予測されている可能性がある。

もし中国において今後、肉類よりも魚の消費が伸びるならば、将来の穀物需要の増加はかなり割り引いて予測できる。というのは、1kg の食肉生産に必要な飼料穀物量（トウモロコシ換算）は、牛肉 11kg、豚肉 7kg、鶏肉 4kg であるのに対して、魚の養殖では 2kg 程度だからである。

ただし、中国の都市部と農村部では、食料需要の格差が極めて大きいため、仮に都市部で需要が頭打ちになっても、農村部が都市化することによって大幅な需要増大が生じる可能性もある。一般に、食料需要への都市化効果は、所得上昇効果と同義に扱われがちだが、最近の研究では、所得上昇効果を取り除いても、都市化そのものの効果によって食習慣が大きく変化し、肉や魚の需要が急増することが実証されている。つまり、都市住民の所得上昇効果のみを考慮した木下・彭の推計を全体に引き延ばすのは過小評価の可能性もある。農村部の都市化効果を考慮すれば、肉類需要の増加の余地はもっと大きいと考えた方がよいだろう。とは言え、農民の食が都市化されたとしても、際限なく洋風化するという見込みはやはり妥当ではない。

インドの食肉需要については宗教的な制約もある。インドは 11 億人という巨大な人口を抱えるが、牛肉（聖なる牛）と豚肉（不浄なる豚）を食べないヒンズー教徒が 80%、豚肉を食べないイスラム教徒が 14% を占めている。したがって、経済発展にもかかわらず、牛肉と豚肉の消費はそれほど伸びていないし、今後もこの制約はほとんど変わらないだろう。

さらに、国連は、中国とインドの人口増加率が今後鈍化していくことを予測している。

中国では、2030年代の14億人がピークとなり減少局面に入るし、インドはそれよりも長く増加を続けるが、増加率は鈍化していくという。この点も含めて、新興国の食料需要増大の見込みはかなり割り引いて考えるべき要素が多い(表2)。

小活

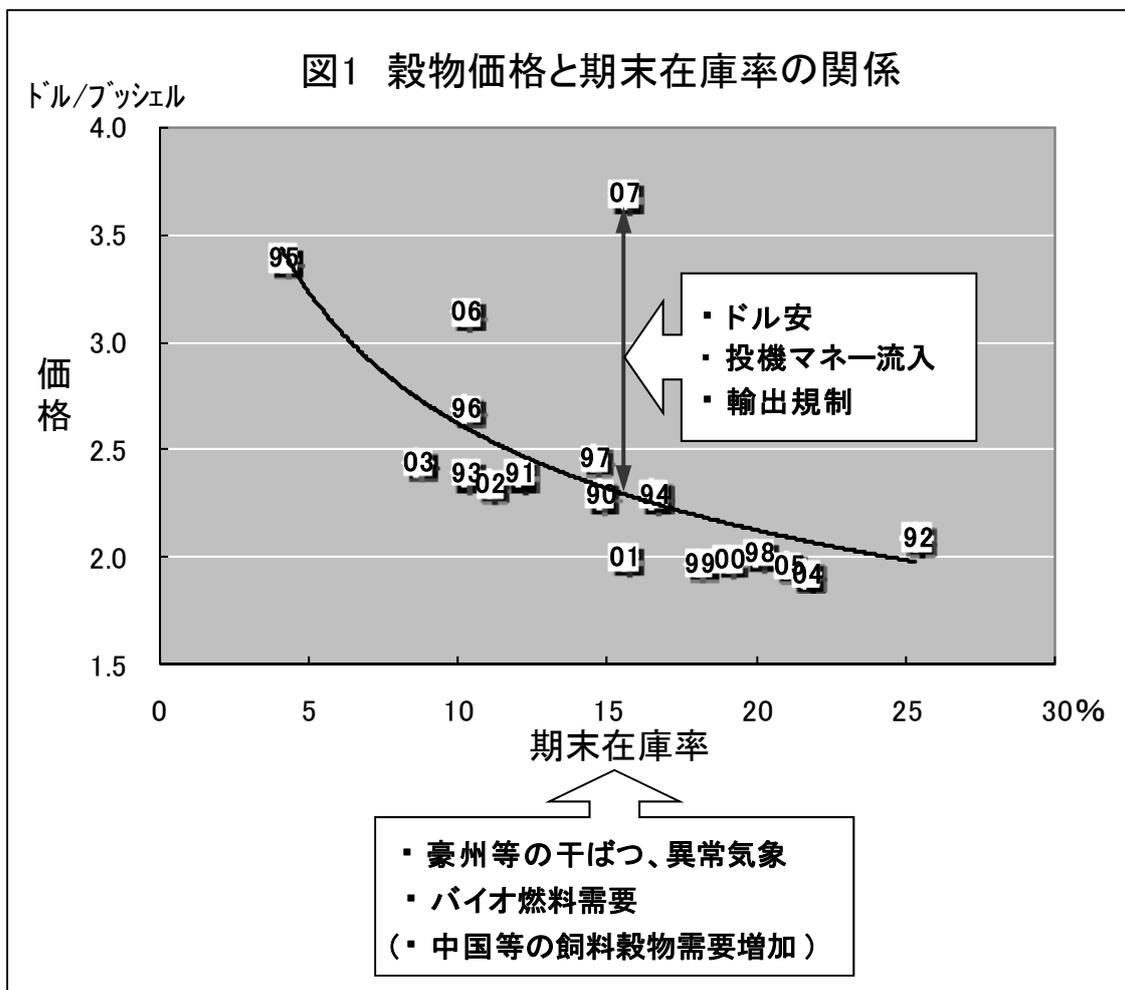
価格が上がれば、それをビジネス・チャンスとして増産が生じるし、何かが極端な方向に進み始めれば、それを相殺しようとする反作用が起こる。したがって、国際的な食料需給も、一方的に逼迫が続くとか、緩和が続くとは考えにくく、価格の上昇と下落は繰り返していくものと思われる。

食料危機が将来的にも続くから国内生産が重要という立論では、危機が収まれば、また輸入に頼ればよい、ということになる。食料は戦略物資であり、不測の事態になれば、輸出規制も簡単に行われることを前提にして、平時から常に準備しておく必要があるという視点が必要であろう。

その意味で、食料農産物をバイオ燃料に仕向けることの是非が問われているときに、日本でコメをバイオ燃料にするというのは、一見、矛盾するようにも見えるが、国内的には、現時点では、コメが過剰な日本においては、日本の水田機能を常に維持しておいて、食料不足時に主食用に回せるようにするという意味で、食料の確保に貢献する政策の一部に位置づけられる。

また、原料の高い日本におけるバイオ燃料生産を一概に不利ということもできない。個別に検討すれば、例えば、沖縄では、砂糖の代わりにエタノールを製造するというのではなく、糖蜜の活用によって、砂糖とエタノールの両方を製造し、しかもサトウキビの新品種によって、従来の品種で砂糖を製造せずにエタノールのみを精製した場合と同じエタノール生産量が確保できるプロジェクトが進められている。また、静岡では、食品廃棄物のオカラからエタノールを精製し、その製造過程の燃料は、廃油からのバイオディーゼルを使う形でコスト低減が図られている。

しかし、税の減免には、財務省の協力が必要であり、E3のバイオエタノール分の3%部分のみのガソリン税減免は実現したが、揮発油税が2回も課税されてしまう問題は、いまだ解決されていないし、ガソリンとの直接混合を実現するには、ガソリン・スタンドの設備更新の費用(1件300~1,000万円)を懸念する石油業界・経済産業省の協力も必要である。本格的な始動のための、バイオ燃料戦略についての国家的な意思統一は、まだ不十分といえよう。



注：豊田通商(株)古米潤氏が示したトウモロコシのデータをイメージ化して農林水産政策研究所木下順子主任研究官が作成。中国等の飼料穀物需要の増加が括弧書きになっているのは、新興国の経済発展は近年継続的に進展してきている現象で、ここ1、2年に急速に伸びた訳ではないから、今回の穀物価格急騰要因とするのは留保条件を付けた方がよいという意味である。この図は模式図であるが、我々の国際トウモロコシ需給モデル(高木英彰君作成)によるシミュレーション分析では、需給要因で説明可能な2008年6月時点のトウモロコシ価格は約3ドル/ブッシェルで、実測値の6ドルよりも3ドルも低い、つまり、需給要因以外の要因によって残りの3ドルの暴騰が生じたといえる。ただし、投機マネーの流入も輸出規制の実施も、バイオ燃料需要の拡大が今後の食料需給を逼迫させる可能性を見込んでの反応とすれば、バイオ燃料需要の拡大の影響は在庫率に反映されているとして限定してしまうのは過小評価の危険がある。

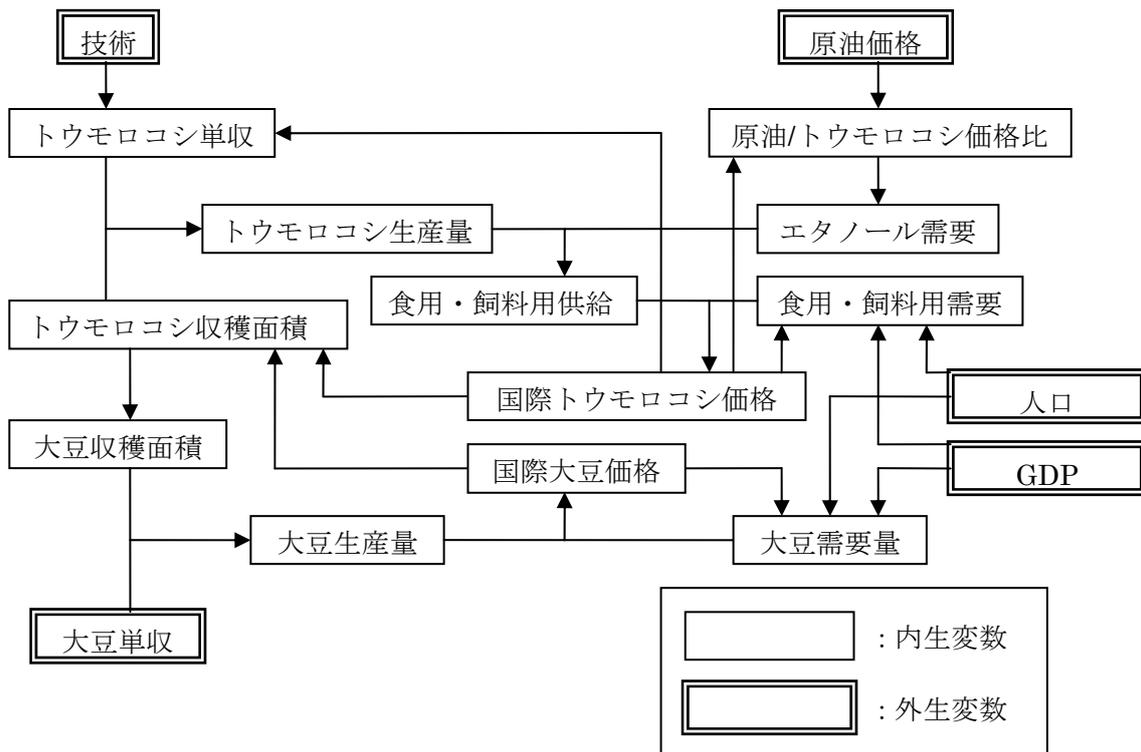


図2 トウモロコシ・エタノールの国際需給モデルの概念図

注: 農林水産政策研究所小泉達治主任研究官のモデルをベースにして高木英彰君が作成。

価格

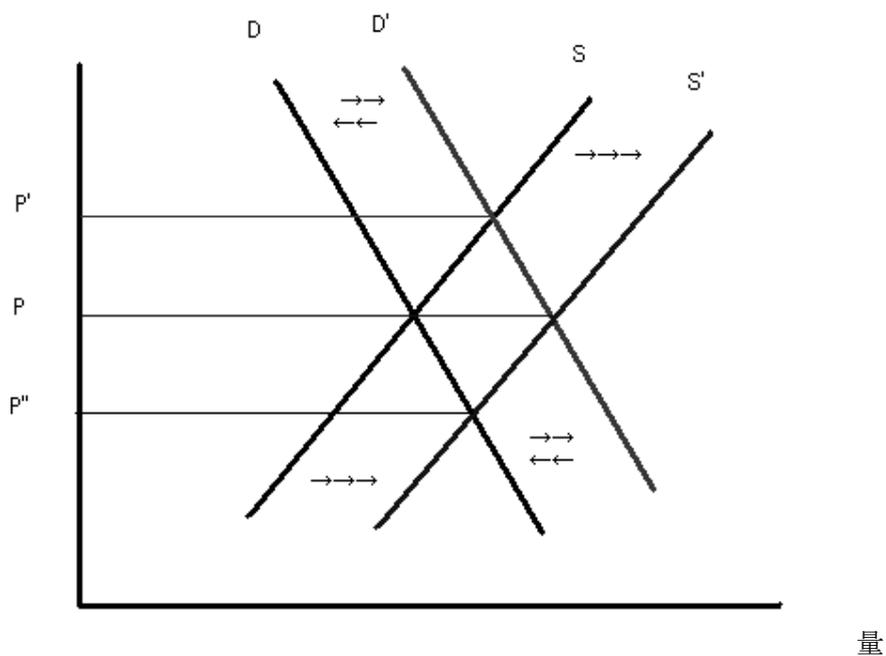


図3 バイオ燃料需要の穀物需給と価格への影響

注: バイオ燃料向けの需要増加により穀物への需要が D' にシフトして、供給がシフトしなければ、価格は P' に上昇するが、増産型技術開発の促進による単収の向上等により供給が S' にシフトすれば、価格は P に戻る。さらに、第二世代バイオ燃料が商業化されて需要が D に戻れば、価格は P'' まで下落する可能性もある。

出所: 筆者作成

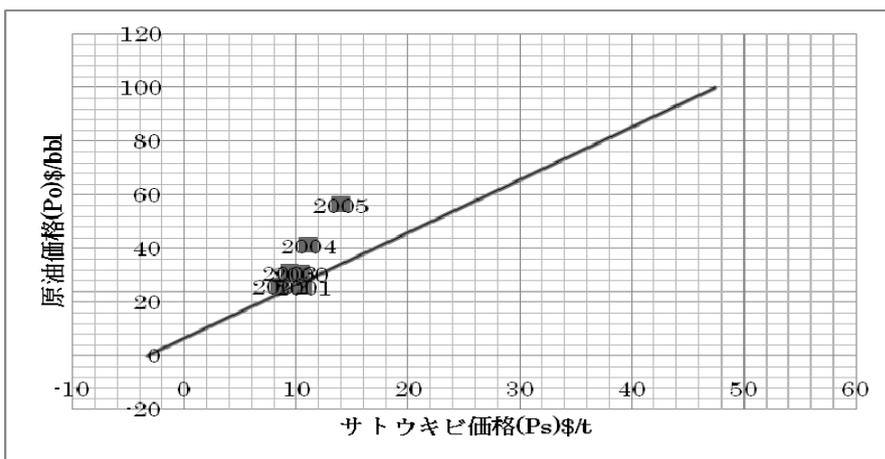


図4 ブラジルのサトウキビの原油と比較した採算性

注: ブレーク・イーブン線の左側にサトウキビ価格があれば、サトウキビからのエタノールのほうがガソリンよりも安く製造できることを示す。ほぼすべての年で満たされている。東大農学部の柴戸康輔君が卒論研究で試算中の暫定値。

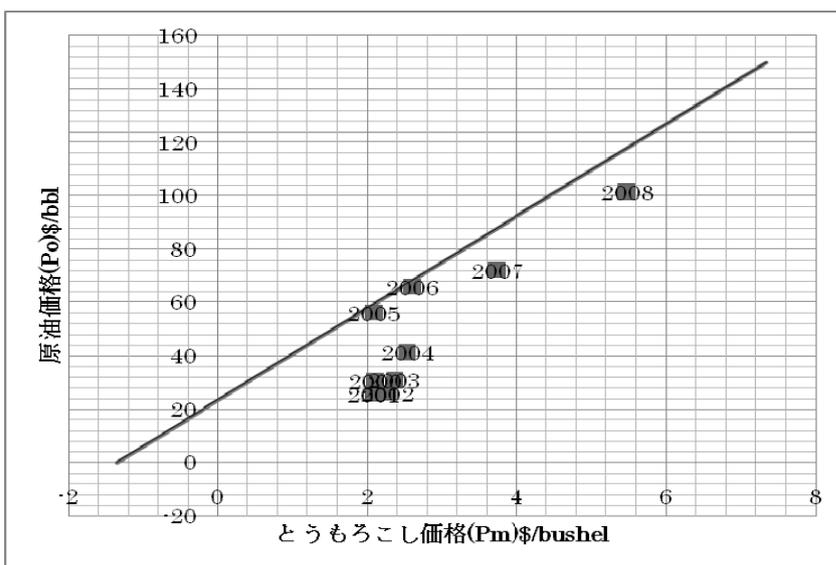


図5 アメリカのトウモロコシの原油と比較した採算性(補助金なしの場合)

注: ブレーク・イーブン線の左側にトウモロコシ価格があれば、トウモロコシからのエタノールのほうがガソリンよりも安く製造できることを示す。補助金なしでは採算が合う年

がほとんどない。東大農学部の新井康輔君が卒論研究で試算中の暫定値。

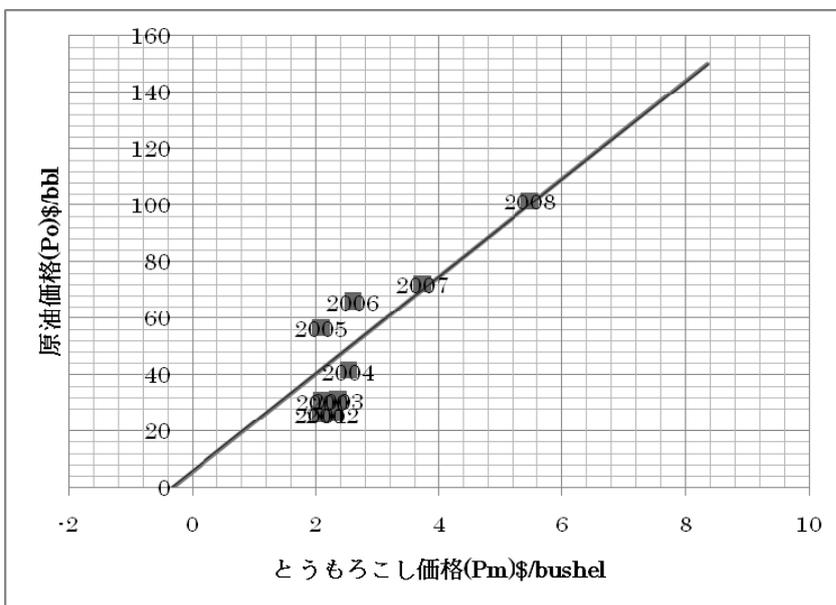


図6 アメリカのトウモロコシの原油と比較した採算性(補助金ありの場合)

注: 現行のガロン当たり 51 セントの税の減免があることによって、ここ数年は採算が取れるようになった。東大農学部の新井康輔君が卒論研究で試算中の暫定値。

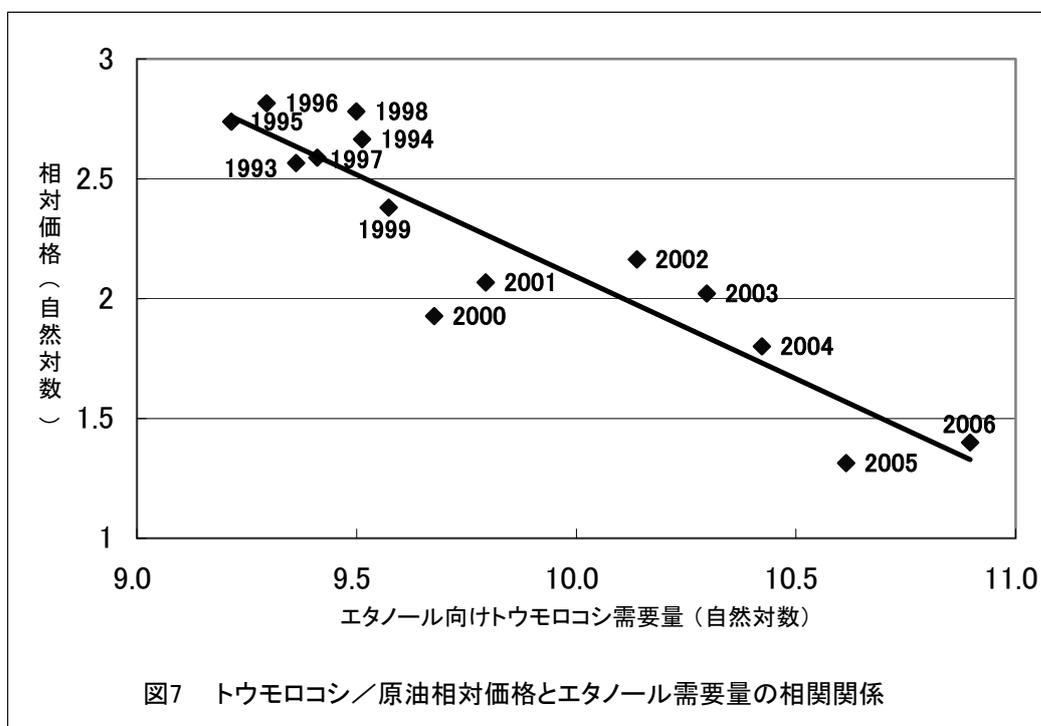


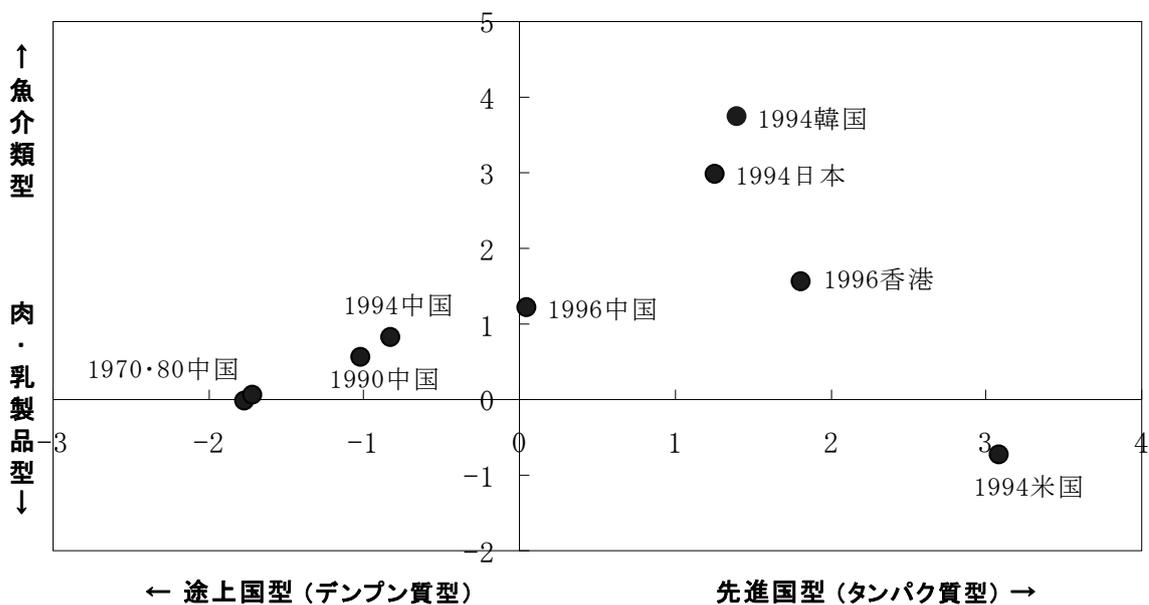
図7 トウモロコシ／原油相対価格とエタノール需要量の相関関係

注: ガソリンへのエタノール混合等によりバイオ燃料利用を義務化する施策が世界的に強

化されたことから、バイオ燃料需要が大きく縮小することはないとの見方もあるが、原油価格の下落によってバイオ燃料の相対的な採算性が悪化すれば、そうした施策にはさらに多額の補助金が必要となり、それが限度を超えれば、義務化そのものが見直しを余儀なくされるであろう。

図8. 中国における食生活の時系列変化の特質

出所: 鈴木・庄野・彭(2003)による主成分分析の結果。



注: 中国の食生活はデンプン質中心の「途上国型」からタンパク質中心の「先進国型」へと推移してきたが、その向かう先は、肉・乳製品が多い「西欧型」ではなく、魚介類のウエイトが相対的に高い「東アジア先進国型」(韓国、日本、香港を含む)に向かっている。

表1 中国都市部における動物性タンパク源需要の所得弾力性推計値

	1996年	2005年	注 ¹ (参考) OECD推計値	注 ² (参考) 生産物1kg当り 飼料穀物量(kg)
牛肉	0.422	0.246	1.593	11
豚肉	0.314	0.158	0.709	7
鶏肉	0.534	0.343	0.983	4
魚	0.336	0.366	—	2
牛乳	0.855	0.559	1.470	—
粉乳	0.722	0.380	脱脂粉乳0.137 全脂粉乳0.703	—

出所: 木下・彭(2007)、増田竜平(2008)による所得階層別クロスセクション分析の結果。

注1: AGLINK-COSIMOモデルによる中国全体(農村含む)の推計値。「魚」は当推計の対象外となっている。

注2: トウモロコシ換算。「魚」については養魚に必要な穀物量を示す。

表2 国連の人口増加率予測(%)

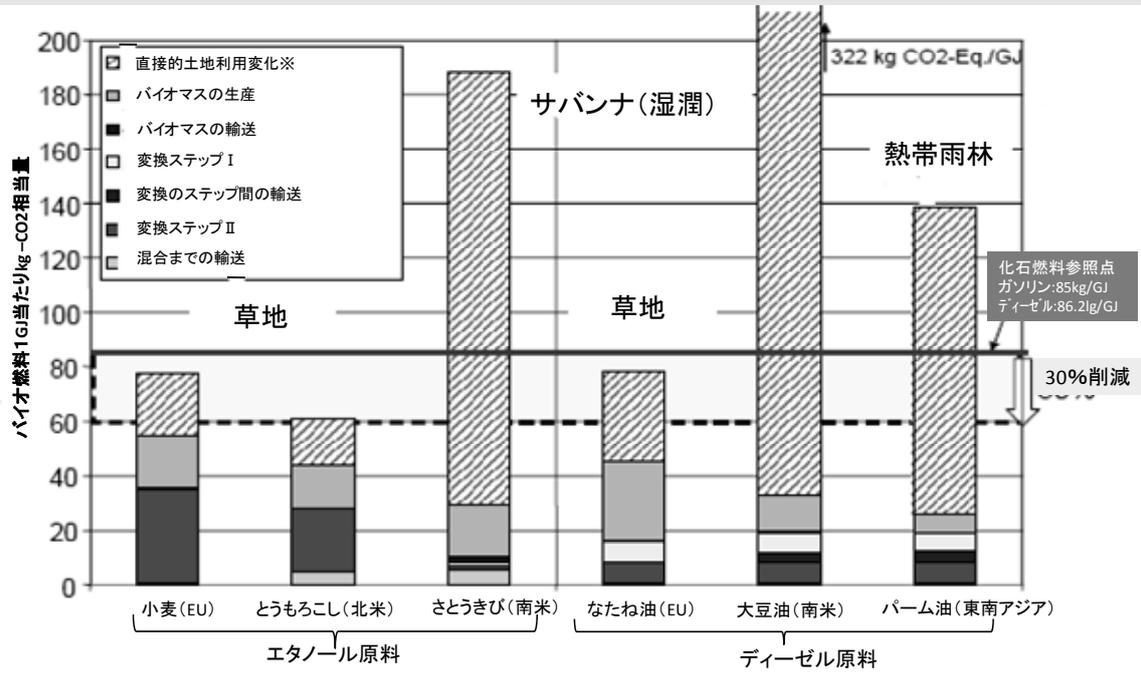
	2005年	2035年	2045年
中国	0.7	0.0	▲ 0.5
インド	1.6	0.6	0.4

出所: UN, *World Population Prospects*, 2005.

注: 中国の13億人に次いで11億人という巨大な人口を抱えるインドは、牛肉と豚肉を食べないヒンズー教徒が80%、豚肉を食べないイスラム教徒が14%を占める。

参考図

LCAの試算例 (GBEPホームページより抜粋)



※直接的土地利用変化: 非持続的なケースに相当する値。定義からすればデフォルト値は持続可能性に沿う必要。
資料: ドイツifew "Greenhouse Gas Balances for the German Biofuels Quota Legislation"
注: 2007年10月GBEP温室効果ガススクワーズにおけるプレゼン資料。試算の一例。

プロフィール

すずき のぶひろ
鈴木 宣弘

所 属

農学国際専攻 国際環境経済学研究室

略 歴

- 1982年 東京大学農学部農業経済学科卒業
- 1982年 農林水産省入省
- 1996年 農業総合研究所研究交流科長
- 1998年 九州大学農学部助教授
- 2004年 九州大学大学院農学研究院教授
- 2005年 九州大学アジア総合政策センター教授（兼任）
- 2006年 9月より現職
- 1998年～2005年夏期 米国コーネル大学客員准教授、教授
- 2006年 日本学術会議連携会員
- 2007年 食料・農業・農村政策審議会委員（会長代理、企画部会長、畜産部会長、農業共済部会長）

主な研究活動

食料・農業政策の変更が食料需給・価格や環境に及ぼす影響の分析

主な著書

- (1) 鈴木宣弘『日豪 EPA と日本の食料』筑波書房、2007
- (2) 鈴木宣弘(共編著)『食べ方で地球が変わるーフードマイレージと食・農・環境』創森社、2007
- (3) 鈴木宣弘(共編著)『農が拓く東アジア共同体』日本経済評論社、2007
- (4) 鈴木宣弘『農のミッションーWTO を超えて』全国農業会議所、2006
- (5) H.M. Kaiser and Nobuhiro Suzuki (ed.), *New Empirical Industrial Organization and Food System*, 2006, Peter Lang Publishing, Inc..
- (6) 鈴木宣弘『食料の海外依存と環境負荷と循環農業』筑波書房、2005
- (7) 鈴木宣弘(編著)『FTA と食料ー評価の論理と分析枠組』筑波書房、2005
- (8) 鈴木宣弘『FTA と日本の食料・農業』筑波書房、2004
- (9) 鈴木宣弘『WTO とアメリカ農業』筑波書房、2003
- (10) 鈴木宣弘『寡占的フードシステムへの計量的接近』農林統計協会、2002

バイオエタノール生産・利用のための 原料作物の確保

生圏システム学専攻 教授 森田 茂紀

1. 地球温暖化とバイオエタノール

2007年4月27日から首都圏の50ヶ所でバイオガソリンの販売が始まった。これは、ガソリンに3%のバイオエタノールを混ぜたものである（正確にはバイオエタノールと石油に由来するイソブテンという物質とから作ったETBE（エチルターシャリーブチルエーテル）という添加剤を約7%混合している）。バイオエタノールが注目されているのは、地球温暖化対策として有効だからである。

石油を燃やせば二酸化炭素が大気中に排出され、徐々に濃度が上がっていく。これが、地球温暖化の原因と考えられている。そこで、二酸化炭素の排出を減らすための様々な努力が進められている。そもそも問題の背景には、大量のエネルギー使用を前提とした大量生産・大量消費・大量廃棄というライフスタイルが20世紀にできてしまったことがある。したがって、少し我慢してエネルギーの総量を減らすことが前提であり、同時に、石油に依存する割合を減らしていくことが、持続的社會を作るために必要である。

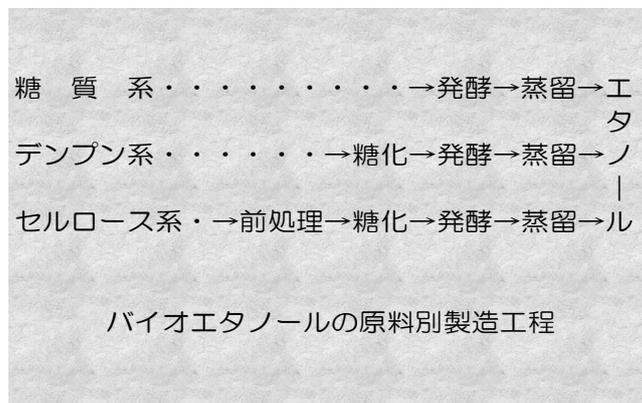
そこで、石油由来のエネルギーの代替として、再生可能エネルギーの開発が進められている。ダムを使わない小規模水力発電、風力発電、地熱発電、太陽光発電、潮汐発電などがある。しかし、ほとんどの再生可能エネルギーは、それぞれの場所の自然条件を活かしたものであり、反対に言えば、日本や世界のどこでも同じように、これらの再生可能エネルギーを利用できるわけではない。

その点、バイオマスは比較的どこにでもあり、集めてみるとかなりの量になるため、最近、注目を集めている。バイオマスに由来するエネルギーにはいくつかのものがあるが、バイオエタノールはその代表である。多くの再生可能エネルギーが電気エネルギーとして取り出されるのに対して、バイオエタノールは液体燃料としてガソリンに混ぜて使えることが大きなメリットである。

2. バイオエタノールの分類と製造

それでは、バイオエタノールを混ぜたガソリンを使うと、どうして二酸化炭素の排出が減り、地球温暖化対策となるのであろうか。それを考えるために、バイオエタノール

はどのようにして作るかを、みておきたい。バイオエタノールは、原料として利用する作物の種類によって3つに分類される。すなわち、糖質系、デンプン系、セルロース系の3つである。



糖質系バイオエタノールは、サトウキビやテンサイから作るもので、これらの作物を搾った液を微生物の力を利用して発酵させるとエタノールができる。ただし、この段階ではエタノール濃度が10%程度なので、これを蒸留・脱水して100%に近いエタノールにする。デンプン系は、米、麦、イモ類などを利用するものである。デンプンは、単糖が非常にたくさんつながったものなので、一つ一つの単糖に切り分ける糖化という過程が必要となる。その後は、糖質系とまったく同じで、発酵、蒸留、脱水してエタノールができる。セルロース系バイオエタノールは、草や木、廃材、古紙などから作る。植物の体を作っている細胞の一番外側の細胞壁の主成分であるセルロースも、非常に多くの単糖がつながっているため、糖化、発酵、蒸留、脱水を経てエタノールになる。ただし、糖化の前に物理的・化学的に前処理する必要がある。このように、糖質系よりデンプン系、またデンプン系よりセルロース系の方が、工程が多くなり、その分、時間、手間、エネルギーが必要となるため、変換効率は低くなる。

3. カーボン・ニュートラルの考え方

バイオエタノールも燃やせば二酸化炭素が出てくることは、ガソリンと同じである。しかし、バイオエタノールから出る二酸化炭素は、元々、大気中にあった二酸化炭素を植物が光合成で取り入れて、体の一部分にしたものに由来する。したがって、大気中に放出された二酸化炭素が、再び植物に取り込まれれば、大気中の二酸化炭素は実質的には増えないことになる。これが、カーボン・ニュートラルという考え方である。

バイオエタノールはカーボン・ニュートラルであるため、バイオエタノールを混ぜたガソリンを使えば、その分、二酸化炭素濃度を上げず、地球温暖化に寄与できるということになる。ただし、糖化・発酵・蒸留・脱水の過程でエネルギーが必要となるため、

ここで化石エネルギーを使えば、カーボン・ニュートラルにはならないことに注意しておく必要がある。いずれにしても、地球温暖化対策として大気中の二酸化炭素の濃度を上げないためにバイオエタノールを利用するので、バイオエタノールを製造・利用するシステム全体の二酸化炭素収支やエネルギー収支が健全でなければならない。

バイオエタノールの製造では変換工程が注目されることが多く、原料作物の栽培過程が問題となることは少なかった。しかし、原料作物の栽培や収集を含めたシステム全体の二酸化炭素収支やエネルギー収支を検討しておく必要がある。

4. バイオエタノール原料作物の確保

様々な思惑のもとで、世界におけるバイオエタノールの生産量は2000年に約3000万キロリットルであったものが急速に増加し、2007年には6000万キロリットルを超えた。アメリカとブラジルが世界の70%程度を占めており（生産ではアメリカがブラジルを抜いたが、輸出は依然、ブラジルがダントツのトップである）、中国とインドがこれを追っている。バイオエタノールの生産増加に伴って原料のトウモロコシの需要が増えたため、世界の市場価格は約2倍近くにまで跳ね上がり、トウモロコシをエサとしている家畜の肉や卵や牛乳も値上がりしている。また、これまではダイズを栽培していた畑をトウモロコシ用に回したためにダイズの生産量が減り、ダイズの価格も上がっている。さらに、この影響でコムギが高騰したりと、バイオエタノールの生産増加は、原料作物の需要の増加に伴って、様々な食料品の値上がりにつながっている。

このような食料とエネルギーをめぐっての競合が起こることにより、途上国の貧困層の食料が不足することが懸念されている。また、原料作物の増産が、環境破壊につながっているという批判もある。例えば、サトウキビを栽培するための畑を確保するために、森林を切り開いていることである。森林を焼いたり、木を切れば二酸化炭素が放出されることになる。したがって、二酸化炭素濃度を下げるためにバイオエタノールを作っているながら、二酸化炭素を放出していることになり、その収支が赤字になる可能性もある。

5. 原料作物は何をどこで作るか？

以上のように、食料とエネルギーとの競合や環境への負荷の問題が指摘されているが、食用作物以外のものを栽培するとしても、農地を使うことになれば、そこで食用作物を栽培する代りにエネルギー作物を栽培することになるので、食料とエネルギーの競合を避けることにはならない。新しく農地を作るとしても、同じことになる。というよりも、問題の本質は、食料とエネルギーの競合とか、環境への負荷ということではなく、土地を中心に、水や肥料といった限られた資源を、作物栽培に回すのか、エネルギー原料に

回すのかということと捉えた方がよい。

バイオエタノールを製造・利用するためには、変換技術の開発も重要であるが、実際の事業化にあたっては原料作物の供給をどうするかがポイントとなる。原料作物の問題は、どの作物を、どこで、どのように栽培するか、という3点に集約できる。

原料作物としては、サトウキビやトウモロコシの栽培面積が大きいですが、食料との競合という観点から、食用作物ではない草本植物で、面積当たりのバイオマス生産が非常に大きいものとして、ミスカンサスやスイッチグラスなどが注目されている。また、食用作物を収穫した後の残渣であるトウモロコシの茎や葉、稲藁や籾殻の利用も検討されている。これらは、いずれもセルロース系原料であり、現在、次世代のバイオエタノール原料として世界的に注目され、変換技術の開発などが進められている。

バイオエタノール原料作物をどこで栽培するかは、大問題である。農地を使うことを避けるとすれば、残る方法は2つである。一つは、休耕田のように現在、使用されていない農地の有効活用であり、もう一つは、現在、農地として使われていない土地の利用である。ただ、農地として使われていないといっても、二酸化炭素を吸収・固定するのに役立っている森林を伐採するわけにはいかないので、塩類集積や砂漠化によって荒廃した土地が候補地となる。このような場所でエネルギー作物の栽培を可能にすることは容易でなく、そのために多くのエネルギーを使うわけにもいかない。現実的には、耕作放棄された土地で比較的条件のいいところを中心に考えていくことになるであろう。

ただし、どこで、何を栽培するかが決まったとしても、それをどう栽培するかという問題が残る。

6. 原料作物の低投入持続的な栽培

20世紀には、世界的な人口増加に見合う食料の増産を行うことが至上命題であり、多量の補助エネルギーを投入して、太陽エネルギーを効率よく捕える努力が続けられてきた。その結果、食料生産の基礎となる作物の生産量は増大し、人口増加に何とか追いついてきた。しかし、投入するエネルギーに対する産出エネルギーの比率は低下を続け、機械と肥料・農薬の形で投入される補助エネルギーの増大や、肥料・農薬による環境への負荷の増大に対する反省もでてきた。

バイオエタノールを生産・利用する目的が、地球温暖化対策としての二酸化炭素排出の削減や、石油代替エネルギー開発にあるとすれば、原料作物の栽培で石油エネルギーを多量に使うことは、システム全体のエネルギー収支や、二酸化炭素収支を健全に保つために、どうしても避けなければならない。

そのための、方法としては、多年生作物を利用して耕起や播種・移植を省略するとか、

移植を省略した直播栽培、耕起を省略した不耕起栽培、肥料や農薬を減らした栽培などを採用するなどして、投入する補助エネルギーを節約する必要がある。また、栽培だけでなく、収穫および保管・調整などに利用するエネルギーも最小限に留める必要がある。すなわち、低投入でありながら、比較的高いバイオマス生産をあげる、しかも持続的なシステムを構築することが求められている。

7. 「イネイネ・日本」プロジェクト (<http://www.ineine-nippon.jp/>)

最後に、それでは日本はどうしたらよいか、について考えておきたい。現状で、単に経済性だけを考えれば、ブラジルから輸入したバイオエタノールをガソリンに混合して使うというのが最も効率的であろう。しかし、バイオエタノールを海外から輸入することは、日本のエネルギー安全保障という点から問題がある。できるだけ日本で供給できる原料作物からバイオエタノールを作り、利用していくべきである。

そう考えると、原料作物はイネしかない。もちろん、北海道ではテンサイを、沖縄ではサトウキビを使えばよいし、各地の自然条件・社会条件にあった作物や植物があれば、それを使えばよい。ただ、日本全体で考えた場合、イネが最も効率よく利用できることは間違いない。そこで、私たちは「イネイネ・日本」プロジェクトを立ち上げた。

東京大学大学院農学生命科学研究科には産学官民連携型農学生命科学研究インキュベータ機構、通称アグリコクーンという組織があり、5つのフォーラムグループが活動している。その1つに「農学におけるバイオマス利用研究フォーラムグループ」があり、メンバーが分担・協力して「バイオマス利用研究特論Ⅰ・Ⅱ」と「バイオマス利用研究ゼミナールⅠ・Ⅱ」を担当している。これらの活動の中から、イネのバイオエタノール化の産業化を目指す「イネイネ・日本」プロジェクトが2007年に生まれた。「イネイネ・日本」というネーミングは、Innovation in New Energy with INE in Nippon の頭文字を取ったものであり、休耕田を利用してエネルギー作物としてのイネを栽培し、ホールクロップ利用して（コメ部分だけでなく、稲藁や籾殻も利用して）エタノールを作り、それを通じて持続的な日本社会を作るためのプロジェクトである。

8. ライス・ルネサンス

ミニマム・アクセス米を別にして、コメは100%自給できている数少ない食料である。したがって、休耕田でイネを栽培しても食料との競合にはならない。イネ以外の作物を栽培しても効率的でなく、水田ではイネを栽培するのがよい。放棄したら雑草が入って、荒れてくる水田の保全にも役立ち、いざというときは、すぐに食用米を生産することもできる。

休耕田で栽培するのは、飼料イネや多収イネのように面積当たりのバイオマス生産の高い品種が有力な候補である。もちろん、畜産地域であれば、飼料として利用して耕畜連携を促進するのも一つの手である。全国的にみればエネルギー作物としてイネを捉え、コメ部分だけでなく、稲藁や籾殻も利用すればよい。



休耕田のうちですぐに使えるところを利用すれば年間 100 万キロリットル、また現在の稲作から生ずる稲藁と籾殻のそれぞれ 4 分の 3 を利用すれば年間 200 万キロリットル、合計年間 300 万キロリットルのバイオエタノールを生産できるポテンシャルがあるという計算になる。文字通り、机上の計算にすぎないが、2030 年までに年間 600 万キロリットルのバイオエタノールを供給するためには、イネは外せないことは間違いない。私たちは、休耕田におけるエネルギー作物としてのイネを栽培し、ホールクロップ利用することで日本農業の振興を目指したいと考えている。

参考文献

- ・ 服部太一郎・森田茂紀（2008）食料と競合しない資源とエタノールーセルロース系バイオエタノールの現状と展望．2008 年版食料白書．農山漁村文化協会．94-109.
- ・ 川島博之（2008）世界の食料生産とバイオマスエネルギー．東京大学出版会．
- ・ 森田茂紀（2008）エネルギー作物イネのホールクロップ利用バイオエタノール化．農林水産技術研究ジャーナル 31（3）：47-49.
- ・ 森田茂紀（2008）バイオエタノールと持続的な日本社会の構築－「イネイネ・日本」プロジェクトによるライス・ルネサンス．化学経済 55（1）：48-52.
- ・ 山家公雄（2008）日本型バイオエタノール革命．日本経済新聞社．

プロフィール

もりた しげのり
森田 茂紀

所 属

生圏システム学専攻 耕地生圏生態学研究室

略 歴

- 1976年 東京大学農学部農業生物学科卒業
- 1978年 東京大学大学院農学系研究科農業生物学専門課程修士課程修了
- 1981年 東京大学大学院農学系研究科農業生物学専門課程博士課程
単位取得退学
- 1981年 東京大学農学部助手
- 1983年 東京大学大学院農学系研究科農業生物学専門課程博士課程修了
- 1988年 アメリカ農業省農業研究部外国人客員研究員（併任）
- 1989年 東京大学農学部助教授
- 1995年 鳥取大学乾燥地研究センター客員助教授（併任）
- 1996年 東京大学大学院農学生命科学研究科助教授
- 2002年 東京大学大学院農学生命科学研究科教授
- 2003年 鳥取大学乾燥地研究センター客員教授（併任）

主な研究活動

「根のデザイン」（理想型根系の解明、制御技術の開発、測定評価方法の確立）と観点に立ち、水稻や畑作物の根系の形態と機能、根粒菌・菌根菌を含む土壌微生物の生態、根系の非破壊的調査方法の開発などについて研究を進めている。最近は、イネのバイオエタノール化を通じて持続的な日本社会を構築するための「イネイネ・日本」プロジェクトを立ち上げ、バイオエタノール原料作物の低投入持続的栽培方法について検討している。

主な著書・訳書

- (1) 森田茂紀・大門弘幸・阿部淳（編）栽培学 朝倉書店 2006年
- (2) 森田茂紀 根の発育学 東京大学出版会 2000年
- (3) 森田茂紀（編）根のデザイン 養賢堂 2003年
- (4) 森田茂紀・田島亮介（監訳）根の生態学（Kroon and Visser eds. Root Ecology Springer）シュプリンガー・ジャパン 2008年
- (5) 森田茂紀・阿部淳（監修）根の事典 朝倉書店 1998年

バイオエタノール生産技術と その周辺を巡る諸問題

応用生命工学専攻 教授 五十嵐 泰夫

1. はじめに

最近、大気中炭酸ガス濃度の上昇および石油価格の高騰から、石油代替または補完エネルギーとしてのバイオマスエネルギーの利用に関心が高まっている。特に糖質からの発酵生産によって得られるエタノール(バイオエタノール)は、自動車等の輸送燃料として広く利用可能なことから注目を集めている。一方で、世界人口の増加や一部途上国の生活向上等から、食糧・飼料の供給不足問題も生じている。さらには食糧とバイオエタノールを巡る有機資源の取り合いなどといったことまでもが、議論の対象になりつつある。

現実に、食飼料、エネルギーなどの資源の安定確保は、21世紀において最も重要な課題となると考えられる。すなわち、地球上における人類生存に最も重要なエネルギー問題、環境問題、さらには人口増加の問題等から考えて、地球上の炭素循環システムを正常に機能させることが、循環型かつ持続型の社会の形成、維持のために現在最も重要かつ必要な課題であると断言できる。

本講演では、バイオマス資源の有効利用について、特に最近注目されているバイオエタノール生産について、その生産技術、関連した諸問題について触れた後に、日本における国産バイオマスの資源化と循環利用について、どんな問題があるか、またどうしたら実現し得るのか、長野県信濃町のバイオマス実験棟において私たちが行なっているバイオエタノール(地燃料)実証実験を例に考えてみたい。

2. 生産技術と課題

バイオエタノールの生産技術は、基本的には焼酎の生産技術と同様である。すなわち工程として、米を例に取れば、

バイオマス→洗浄→(粉碎)→前処理→糖化→発酵→蒸留→無水化→エタノール

となる。技術的課題としては、

- (1) 原料の生産・収集 省エネ化、省コスト化
- (2) 前処理・糖化 特に未利用バイオマス(セルロース系資源)
- (3) 醗酵 醗酵温度、再利用(凝集性酵母等)、

5 単糖利用性、複醗酵技術、等

- (4) 蒸留・無水化 省エネ (バイオマスボイラー、膜利用技術、等)
- (5) 廃水・廃棄物処理 省エネ・省コスト化、肥料・飼料・燃料利用
- (6) 流通・利用 どうやって使うか？

などが挙げられる。

特に最近話題となっている技術開発要素としては、食糧との競合問題から、イネわら等の非可食部 (セルロース等) からのエタノール生産が挙げられる。現状では、まだセルロース系バイオマスを加水分解して発酵性の糖質に変える技術が確立していない。特に環境調和型技術として注目される酵素セルラーゼを用いたセルロース糖化技術の確立が必須とされ、現在世界各国でその研究開発が精力的に推進されている。非可食部利用の場合、セルロースだけでなく同時に含まれるヘミセルロースをアルコールにすることも重要であり、ヘミセルロース分解でできる 5 単糖も利用できる微生物 (酵母等) の開発も行なわれている。

また、酵母等による発酵でできるエタノールの濃度は概ね 10% 程度であり、ガソリンに混ぜるためにはこれを 99.5% までに濃縮しなければならない。そのための蒸留、脱水を如何に省エネルギー的に行なうかも重要技術である。さらに廃棄物処理も重要である。基本的に廃棄物を出さないことが求められ、できる限り副産物として有効利用すること、さらには廃液等からメタン発酵でさらにエネルギーを回収する技術などが重要となる。

3. バイオエタノールを巡る諸問題

バイオエタノールは、基本的にエネルギー変換技術である。バイオマスからのエネルギー生産・変換における重要な問題として、以下のような点が挙げられる。

- (1) 食糧との競合
- (2) 生産量
- (3) エネルギーコスト
- (4) 生産コスト

すなわち、(1) 食糧との競合はあってはならず、(2) エネルギーとして利用するからには、それだけの量が確保されなければならない、(3) エネルギー生産というからにはエタノール生産に使われたエネルギーより生産されたエタノールの持つエネルギーの方が大きくなければならない。この比率をエネルギー利益率: EPR といい、この値が 1 を超えなければ、すなわち生産されたエタノールのエネルギーの方が大きくなければ、エネルギー生産とはならず、逆に化石燃料を無駄使いし、地球の温暖化に貢献することになる。この点は、現在の日本のバイオエタノールを巡る議論の中で最も欠けている点と考えられる。さらに、社会に受け入れられるためには、(4) バイオエタノールが

燃料として適正な価格で生産・販売されなければならないことは言うまでもない。

上記 4 つの問題点などは当たり前のことではないか、と皆さんは考えるかも知れない。しかし現実はこの 4 点をクリアーしているのは、ブラジルにおけるさとうきびからのバイオエタノールのみと考えられる。例えば、ブラジルと並んで世界で最も大量のバイオエタノールを生産しているアメリカにおいて、とうもろこしでん粉からのエタノール生産の E P R は約 1.3 といわれている。これでは本当にエネルギー生産になっているのかわからない。ちなみにブラジルでは E P R は 8 - 9 といわれている。また、アメリカで生産されているとうもろこしを全てエタノールにしたとしても、その量はアメリカで使用されている自動車燃料(ジーゼル油を含む)の 5% 程度にしかならないといわれている。

それでは日本ではどうか。(1) の食糧との競合は政策的な意味も大きいので考慮外としても、(2) - (4) の問題のいずれもが、日本でクリアーするのは並大抵のことではない。わが国においては、諸外国とは異なった地域バイオマスの生産・消費システムが考えられる必要がある。そうでもしない限りは、上記問題をクリアーした「意味のあるバイオエタノール生産」など、とてもできそうにない。

4. 日本で何ができるか？—長野県信濃町における地燃料実証試験—

それでは、アメリカともブラジルとも、それと今回は取り上げなかったがアジア諸国とも状況の全く異なった日本で何ができるであろうか。演者らは、日本型のバイオ燃料システムとして、東大生産技術研究所の迫田章義教授、望月和博准教授等と共に、「地産地消バイオ燃料システム(地燃料システム)」を考え(図-1 参照)、現在長野県信濃町で実証試験を行なっている(JST: 科学技術振興調整費)。

国内のエタノール生産を考える場合、最も問題となるのは、原料となるバイオマスの確保である。例えば、アメリカではバイオエタノールを生産するのに最も経済的・エネルギー的に効率的なのは、年産約 20 万 KL 程度の規模の施設であるというのが一般的である。ブラジル・中国等ではもう少し大きな規模の工場も稼働している。しかし、わが国では、これだけの量のバイオマスを効率的に一箇所に集めるのは、例え大規模農業の進んだ北海道でも困難であり、実際現在日本で計画されている最大のバイオエタノールプラントは年産 15,000KL の生産能力である。

このような小さなエネルギー生産システムにおける最大の問題点は、いかにエネルギー利益率(EPR)を確保するかということである。「エネルギー利益率を確保したままで、どこまで設備を小さくできるか」、これが現在我々のプロジェクトの最大課題であり、また日本のバイオエタノール生産の鍵となると考えている。

この課題克服のために、信濃町プラントを動かすに当たり、我々は以下のよ
うな戦略を考えた。

- (1) 特別な最新技術を使わず、また地元の人材で動かす。
- (2) 地域の諸々のバイオマスを使う。
- (3) 95%のエタノールを生産し、農業トラック、農業機械等地域で利用する。
- (4) 廃棄物から飼料・堆肥・バイオガス等の有用生産物を生産する。
- (5) 原料、生産物を 20-30km 以上動かさない。

2年以上にわたる検証の結果、判ってきた問題点としては、

1. 如何に効率的にバイオマスを集めるか？
2. セルロース系資源を如何に安く糖化するか？
3. 如何にできたアルコール燃料を使うか？
4. 如何に廃棄物・廃水を出さないか？
5. 如何に炭酸ガス発生量を減らすか？
6. 農家のメリットは何か？

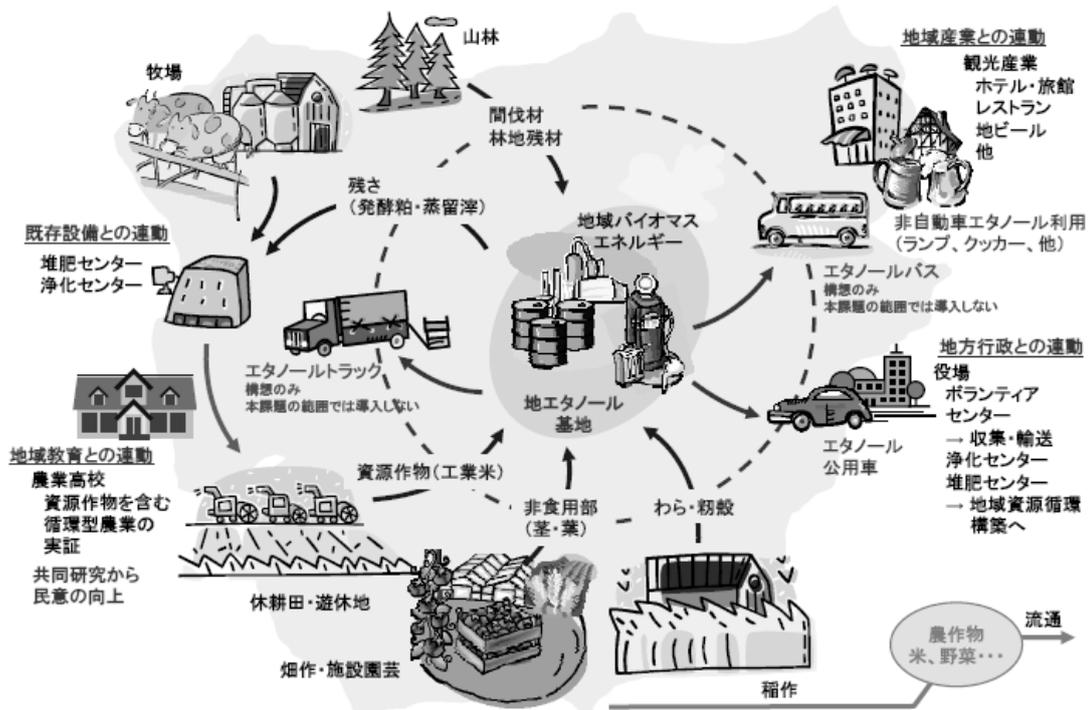
などが挙げられる。

バイオマスとしては、現時点では休耕田を利用した稲作を中心に考えている。
信濃町地区の水田はその 40%が休耕田であり、コーリヤン、そば、大豆、と
うもろこし等への転作が試みられているが、いずれも切り札とはなり得ていな
い。我々は、休耕田の一部 16 アールを借りて、資料用米（多収量米、夢あお
ば）を造り、それからのエタノール生産の可能性を検討している。この場合、
でん粉質からのアルコール生産のみではエネルギー利益率の確保は不可能で
あり、稲わらからのアルコール生産、籾殻の燃料利用等、稲の全量利用が必須
である。そのため、信濃町でも稲わらの糖化・エタノール生産を技術開発の中
心に据えて総合的な実験・実証を続けている（図-2）。

現在、日本人の人口は減少に向かっています。このような循環型・持続型の
地域バイオマスシステムの構築によって、地方が活性化され、若い人が増え、
その人たちが恵まれた環境で子育てができるようになることが、将来のこの国
の繁栄に最も必要なことと信じています。

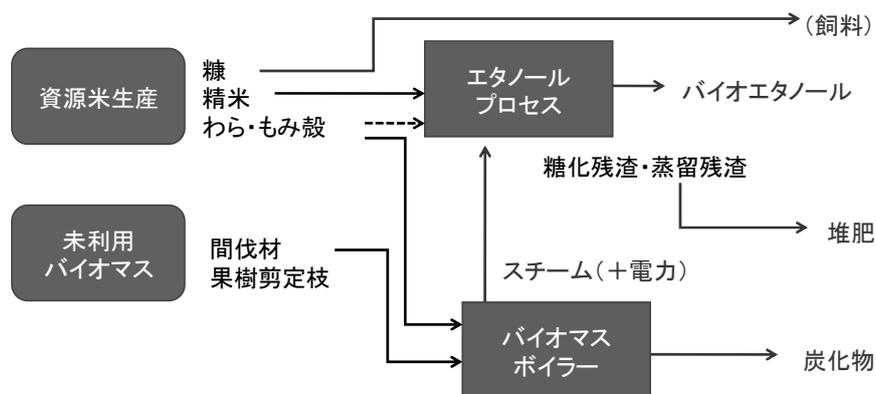
参考文献

- (1) 五十嵐泰夫、五十嵐春子、バイオエタノール—何が問題なのか、日本で何ができ
るか、PETROTECH、31、No.7、525-530、石油学会、2008.
- (2) 五十嵐泰夫、春田伸、バイオマス資源の有効利用を展望する—いつ、どこで、ど
のように—、生物工学、85、168-170、日本生物工学会、2007.
- (3) 五十嵐泰夫・斉木隆監修、「稲わら等バイオマスからのエタノール生産」、地域資
源循環技術センター、2008.



図—1 地燃料システム(持続可能なエネルギーの地産地消)構想図

図—2 地産地消型バイオマス循環利用システム



プロフィール

いがらし やすお
五十嵐 泰夫

所 属

応用生命工学専攻 応用微生物学研究室

略 歴

- 1972年 東京大学農学部農芸化学科卒業
- 1977年 東京大学大学院農学系研究科農芸化学専攻博士課程修了
- 1977年 日本学術振興会奨励研究員
- 1978年 東京大学農学部助手
- 1994年 東京大学農学部助教授
- 1996年 東京大学大学院農学生命科学研究科教授

主な研究活動

微生物が何十億年もの間様々な環境で生き抜いてきた知恵を学び、それに人間の知恵を加えて21世紀を生き抜く、これが私の応用微生物学です。様々な環境に生育する微生物および微生物集団について、その代謝生理の多様性と環境に対する応答適応機構、集団の社会構造、さらにはその利用法などについて研究しています。また、近年は特に各種バイオマスからのエタノール生産の研究にも力を注いでいます。

主な著書

- (1) 五十嵐 泰夫、斉木 隆監修 「稲わら等バイオマスからのエタノール生産」、地域資源循環技術センター、2008
- (2) 五十嵐 泰夫、五十嵐 春子 バイオ燃料の技術動向（第2回）バイオエタノール 何が問題なのか、日本で何が出来るか PETROTECH Vol.31, No.7 2008
- (3) 五十嵐泰夫・春田 伸 資源循環型産業・社会構築とバイオインダストリーバイオマス資源の有効利用を展望する ― いつ、どこで、どのように ― 生物工学会誌 第85巻 第4号 2007
- (4) 石井正治、春田伸、五十嵐泰夫 ポストゲノム時代を迎えたスローフード微生物―日本の発酵醸造食品― 生物工学会誌 第84巻 第9号 2006
- (5) 春田伸、五十嵐泰夫 有機性廃棄物分解・再資源化の微生物バイオテクノロジー 学術月報 Vol.58 No.10 2005