

植物系バイオ燃料開発の可能性

——バイオテクノロジーと社会との架け橋——

山 川 清 栄*

近年エネルギー資源としてのバイオマスはCO₂濃度増加による地球温暖化や化石燃料枯渇によるエネルギー危機の問題を解決する契機となる素材として世界的に注目を集めている。一方、依然として遺伝子組み換え作物への社会的抵抗感は根強い。本稿ではバイオ技術の実用的価値を示す研究題材としての観点から、植物由来のバイオ燃料の有用性と将来性について最近の研究報告や報道資料を基に考察を行った。セルロース系原料を用いたバイオエタノール製造や緑藻を用いたバイオディーゼル生産は化石燃料の代替が可能となりうる潜在的生産力を有するが、実用化の為には技術革新のための更なる研究と投資が必要と考えられる。遺伝子組み換え技術を植物や微生物に応用することによりバイオマスの生産や液体燃料への変換効率に関する飛躍的進歩が期待できる。エネルギー安全保障の為に日本には代替エネルギー開発研究に関してこれまでに蓄積してきた豊富な知的財産を有効利用する明確な戦略が求められている。試算によれば、日本国内でのバイオ燃料生産により需要量のかなりの割合に相当するエネルギー資源の自給が可能となる。バイオ技術開発の成果としてのバイオ燃料の実用化が成功すれば、科学者と市民との相互理解を育む格好の機会が齎されることであろう。

キーワード：バイオ燃料，バイオマス，バイオテクノロジー，遺伝子組み換え産品，植物

I はじめに

昨今、化石燃料の大量使用が齎す地球環境への影響や資源枯渇と現代文明の持続性への懸念が重大な関心事となっており、環境・エネルギー問題は社会活動の際に必ず考慮すべき課題の一つとされている。一方、環境・エネルギー問題の対策は多大な予算措置を伴う為しばしば政治闘争の具となってきた。何れも長期にわたり広範囲に影響の及ぶ課題であり、十分な客観的データを基にした冷静な判断が求められる。従って判断材料となる情報の提供者であり時には広報役ともなる研究者に課せられる役割は極めて重要となっている。

また近年遺伝子組み換え食品の安全性や人為操作遺伝子の自然への拡散に関する懸念が議論的となり、ともすれば遺伝子工学技術自体への疑念となって社会全体に影響を広げつつある。遺伝子組み換え技術は既にインターフェロンなど医薬品開発分野で数多くの実

績を挙げており、研究開発の現場ではその有用性が高く評価されているが、一般社会との認識の乖離は深刻であり、その溝を埋めるのは容易ではない。現代文明の発展は科学研究の成果を基にしており必要性に疑いは無いが、現実には将来性を期待されながら誤った応用や利益を焦った拙速な利用により甚大な被害が起こったため有用性が否定された例、後の研究で欠点が解消された後も社会に許容されず正当な評価が得られない技術は数知れない。斯様な観点から広範囲な応用普及を目指すに際して、遺伝子組み換え技術は今まさに市民権を得られるか否かの重要な岐路にあると言える。

植物に関する研究開発としては、これまで実用化された遺伝子組み換え作物は除草剤耐性や害虫抵抗性など生産者の都合に即した農産物が主流であった。新技術の成果として世に問う最初の産品が、一般消費者が実感できるメリットが無い上、人に無害とは言え毒物関係の遺伝子入り作物だったのは失敗と言わざるを得

*愛知学院大学心身科学部健康科学科
(連絡先) 〒470-0195 愛知県日進市岩崎町阿良池12 E-mail: wwjkf313@yahoo.co.jp

ない。今後の開発は生産能力向上や地球環境改善などを目標に進められる予定であり、研究の進展に伴い認識は徐々に改善すると予想されるが、それでも食品を中心に不審の目は長期間残ると思われる。遺伝子操作技術の実用化研究を推進する為には、まず社会の懸念が出来る限り少ない応用例で信頼を得なければならない。食品以外の遺伝子操作技術の応用例としてはサントリーの青色バラなど花卉植物の品種改良研究が一定の実績を挙げているが、遺伝子操作技術の真の有用性を主張する題材としては些か力不足である。

一方、エネルギー問題と地球環境問題の双方に関わる解決の切り札として、植物バイオマスのエネルギー利用研究が注目されている。植物バイオマスは太陽光をエネルギー源とし、光合成の過程でCO₂を吸収するため使用しても大気中のCO₂濃度変化が起きない（カーボンニュートラル）ことから、特に環境問題の観点から理想的な化石燃料代替エネルギー候補の一つとされてきた。バイオマスは遺伝子操作研究の題材としても興味深い。バイオマスは利用の際に燃焼・分解するため食品に比べ遺伝子操作技術に対する心理的抵抗は低い事が予想される。遺伝子の拡散防止技術や環境への影響の検証を実用前提の現実的観点から進める事により、遺伝子操作技術の利用価値や安全性を実証する試金石としての役割が期待できる。

本稿では遺伝子操作技術の応用例の観点から植物系バイオマスのエネルギー資源としての有用性と将来性について最近の研究例を基に考察すると共に実用化に関する展望を試みる。

II バイオマス利用研究の沿革と現状

植物系バイオマスが近年、化石燃料に代わる再生可能なエネルギー候補として高い関心を集めており、それに伴い学術雑誌への研究成果発表も急増している。PubMedにおける検索例では2010年12月上旬現在、“biofuel”（バイオ燃料）をキーワードにした検索で該当した1655件の論文中、1494件（90.2%）が2007年以降に発表されている。2010年に発表されたものだけで788件（47.6%）に上る。バイオ燃料関係の発表論文数は2007年以降に際立って増加している（図1）。これには2006年の年頭一般教書演説中で米国ブッシュ大統領（当時）が先進エネルギーイニシアティブの概要に触れ、それに呼応して政府や産業界がこぞってバイオ燃料開発に動き出したことが強く影響していると思われる。2006年8月には米国エネルギー省（DOE）

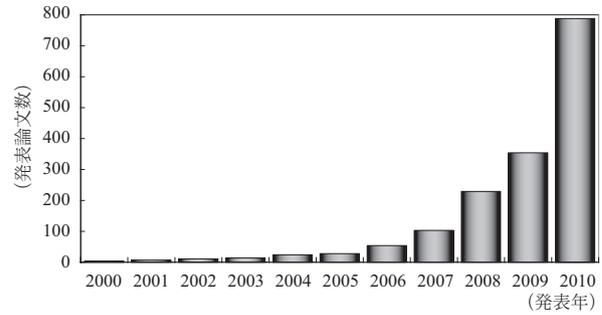


図1 バイオ燃料関連の学術論文発表数の推移

がセルロース系バイオマスによる低コストエタノール燃料製造技術を早期に確立する目標を明示した“Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol: A Joint Research Agenda”と題するロードマップを発表した¹⁾。

植物系バイオマスは元来、人類が最初に手にした最古のエネルギー源である。人類の文明はバイオマスの燃焼によって得た光と熱を自由に操る技術を会得したことにより発展したといえる。地表面に遍在し容易に入手可能なバイオマスは産業革命以前までは人類にとって最も重要なエネルギー源であった。産業革命以後エネルギーの主役を化石燃料に譲ることになった原因は、化石燃料が狭い地域に集中しており採掘効率が高いこと、エネルギー密度が高く輸送や貯蔵に便利であり、インフラの高性能化・小型化を図る際に有利であることなどが挙げられる。

そんなバイオマスが再度注目されるのは今回が初めてではない。過去にもエネルギー事情が逼迫する度に一時的ブームが起りその度に実用化研究が盛んになっている。我が国では今回で3度目になるが、過去2回（第二次大戦中から終戦直後にかけてと石油危機時）は何れも化石燃料に相当する利便性を得るには至らず、エネルギー供給事情の回復後に急速に下火となっている。化石燃料が数億年単位の時間をかけたエネルギー集積を人為的に低コストで行うのは至難の業である。太陽エネルギーは総量としては膨大であるが、薄く広範囲に照射されるため回収の為に受容体（植物）を広い面積に配置する必要がある。地球上の可耕地は限られており食料問題などを考慮すると化石燃料消費に相当するバイオマス生産量を確保するには生産効率の飛躍的向上が必要である。

一方、バイオマス研究はエネルギー生産目的以外にも多くの副次的効用を期待できる。第一は地球環境の改善である。エネルギー植物の研究対象には、生命力は旺盛だが食用に適さない“雑草”も含まれるため従

来は不可能であった乾燥地や寒冷地など過酷な環境下で生育可能な植物の育種が実現する見込みがある。エネルギー植物供給地として未利用地に経済価値が生まれ、居住可能地の拡大が期待できる。地球温暖化の問題に関しても、CO₂吸収効果を持つ植物バイオマス生産はプラスの効果が期待出来る。第二は食料需給に関わる諸問題の改善である。食料問題はその生産量不足もさることながら、気候変動や政治的問題により生産や供給が不安定化し有効利用されないことが原因である場合が多い。この場合エネルギー用途を選択肢として用意すれば、食料不足時の燃料用作物の食用転用など弾力的な政策運営が可能となる。第三は廃棄物問題の改善である。廃棄物の処理やリサイクルには多くのコストを必要とする。実際、現在地球温暖化など環境問題の一環として語られることが多いゴミの減量化やリサイクルの問題は、当初はゴミの最終処分場不足や不法投棄問題が発端となった経緯がある。バイオマスの燃料化研究はセルロースのアルコール発酵など未利用資源の活用が主要課題となっており、経済的合理性のある廃棄物処理方法が開発できる可能性がある。バイオマス燃料の実用化研究は、量的に化石燃料を代替しうる規模でなくとも質的に経済的合理性を得ることで副次的効用を見込める有望なテーマである。

特に今回のバイオ燃料開発ブームが過去2度に比べて有利なのは、遺伝子操作技術を用いた分子育種という画期的技術が利用可能であることである。2007年以降のバイオ燃料関係論文の急増は、バイオ技術の劇的進展を背景に世界中の研究グループがバイオ燃料の将来性に注目し、一気に参入した状況を如実に反映している。以下の項目で現在実用化が有力視される植物と研究の現状について実例を挙げる。

III 分野別の現状・実例と論評

バイオ燃料用バイオマスはその性質から次の様に分類されるのが一般的である。

第1世代：サトウキビ、トウモロコシ、ダイズ、ナタネなど。現在の技術の応用で利用可能な穀物系作物。

第2世代：作物や木材の収穫後の残渣。セルロースの糖化技術開発を必要とするセルロース系バイオマス。

第3世代：スイッチグラス、ポプラ、緑藻などの永年性草本、樹木、藻類。用途が燃料用に限定された“エネルギー作物”。食料と競合せず、高効率のエネルギー生産が期待できる。

それぞれに特徴があり開発目的も役割も様々である。植物種別に代表例と現状を記す。

1. サトウキビ

サトウキビは原材料を糖化する必要がなく、ショ糖や廃糖蜜から直接エタノール発酵を行う為アルコール系バイオ燃料生産を行うには最も効率のいい植物である。サトウキビは太陽エネルギーのバイオマスへの変換効率が2%台と最高水準であり²⁾、ショ糖以外にも大量のバイオマスを生産する。ブラジルでは茎葉やサトウキビの搾りかす（バガス）の燃焼熱を用いた発電により生産プラントの操業必要量以上のエネルギーを生産し、余剰電力を販売している事業所も存在する。輸送コストを必要としない現地での直接利用は余剰バイオマスの利用形態として理想的と言える。ブラジルでのエタノール生産のエネルギー収支は7-9と高水準で³⁾、バイオ燃料植物としては現在最高水準である。

ブラジルでは1970年代の石油危機による原油価格高騰を契機としてサトウキビによる燃料用エタノールの生産と利用が積極的に進められてきた。既に公的援助の段階を脱し、国家経済を支える一大産業としての期待が持たれている。ブラジルでエタノール生産にかかるコストは米国の半分であり、年間30億キロリットルの燃料エタノールを輸出している。更にブラジル政府はバガスや茎葉などのセルロース性原料よりエタノールを生産する技術開発を強力に推進している。セルロースの糖化技術の進展により生産量は現在の40%増になるという。2010年2月、ロイヤルダッチシェル社とブラジル最大のエタノール生産企業Cosanとがセルロース燃料開発を目的とした合弁会社設立で合意した⁴⁾。

ブラジルの例の通り豊富な土地と水に恵まれた適地であればサトウキビを用いたエネルギー生産が可能である。問題はそんな気候条件の土地は限られている事である。バイオ燃料の商業化と普及の先駆けとしての役割は大きいですが、世界の需要を考えれば生産量には限界がある。エネルギー収支・地球環境などの要素を勘案しながら適地を選べば、長期的にもエネルギー事情の改善に有益な効果が期待できると思われる。

日本では大規模なバイオマス生産は困難とされがちだが、日本でも恵まれた気候の地域であれば産業的に充分影響力を持つ規模のバイオ燃料を生産できる可能性を示す成果が出ている⁵⁾。アサヒビールは農研機構九州沖縄農業研究センターとの共同研究で、高バイオマス量サトウキビを用いて沖縄・伊江島で実証実験を

行っている。この高バイオマス量サトウキビは糖生産目的で繊維含有率が少なく糖の含有比率が多くなる様に改良された従来品種に比べ性質はむしろ野生種に近く、栽培に手間がかからず旺盛に育つため得られる糖の量も多い。沖縄全域でこのサトウキビによる生産を行った場合、年間2万-6万キロリットルのバイオエタノールが生産可能であるという。これは沖縄県内のガソリン消費量の約10%に相当する。荒地でも生育し、根を深く張り土を耕す機能を持つことなどから荒地の土壌改良や耕作地拡大の役割も期待されている。食用植物の育種研究にバイオ燃料としての利用を目的に加えることにより、従来の方針とは全く逆とも言える視点からの品種改良が行われている点が興味深い。

2. トウモロコシなど食用穀物

バイオエタノール生産用途でのトウモロコシ栽培はブッシュ前政権の推進政策を契機として米国で急増している。2006年の米国のバイオエタノール生産量は1997万キロリットル（シェア約36%）で、ブラジル（1700万キロリットル、約33%）と世界のバイオエタノール生産のトップを競っている。穀物からエタノール発酵を行う技術は確立されておりエネルギー収集効率も高い。実用化の際の技術的ハードルは最も低いといえる。補助金付きとは言え米国では産業として成立しており、バイオ燃料の社会認知に果たした貢献は大きい。反面、2008年の穀物相場の高騰は米国のバイオ燃料推進政策が元凶とされるなど、食料・飼料用穀物との競合がしばしば問題視され、米国の独善的ともとれる環境政策転換に対する反発と相まってバイオ燃料無用論者からの格好の攻撃材料とされている。

飼料用穀物との競合については、発酵後の残滓は飼料用として利用されていることから、バイオ燃料用トウモロコシの作付面積拡大はバイオマス総量を増やすことになり直ちに飼料不足を招くとは言えないとの説もある。2008年の価格高騰は中国など新興国の需要増加などの影響が大きく、バイオ燃料の生産が与えた影響は少なかったとの国際食料機関（FAO）の報告がある⁶⁾。しかしながら、世界には常に食料不足に苦しむ人々がいる現状では、明確な食料増産との両立案が示されない限り反発は避けられない。またサトウキビの場合と同様、栽培できる耕作適地には限りがあり、地球環境への影響を考慮すると無理な耕地拡大は困難である。化石燃料に代わりうる規模での生産拡大には品種改良など単位面積あたりの効率を大幅に改善する

画期的技術革新が必要とされる。

米国のトウモロコシを用いたバイオエタノール生産推進政策に関しては、従来から食料問題や遺伝子組み換え作物の管理問題など数多くの批判がある。オバマ政権になって以降、米国政府の推進政策には米国環境保護機関（EPA）など各方面からの批判が特に目立ってきた感がある。その論点の一つとして、環境に優しいとの触れ込みで推進されてきたトウモロコシエタノールは、温暖化防止を目指す低炭素燃料としては寧ろガソリンにも劣るのではないかと、という批判がある⁷⁾。2009年2月、カリフォルニア州大気資源委員会（CARB）はトウモロコシから生産されたバイオエタノールは低炭素燃料の新基準には適合しないと発表した。主な理由としてバイオエタノール生産の拡大の為に森林破壊や草地の開墾、その結果としての温室効果ガス排出量の増大を挙げている。また Searchinger らはエタノール生産増大の影響に関する全球的影響を試算した結果、米国の燃料用エタノールへの作付転換により食料価格は上昇し、その結果世界中の農民が森林や草地を穀物生産地に転換しようとして無理な開墾が急増し、温室効果ガスが大量に放出されるとの結論を発表している⁸⁾。これに対して、現在ある土地の収量増を目指した開発研究の進展が見込めるので、アグリビジネスや農民が農産物の高価格に反応する事は直ちに環境破壊には結びつかないと反論する研究者もいる。大規模な生産拡大の副次的効果に関しては殆ど未研究である為、現状では“バイオ燃料政策は計算不可能な予測と未成熟のサイエンスに基づいて行われている”と結論づけている EPA の見解に同意せざるを得ない。これらの議論はいずれ全てのバイオ燃料が直面する課題である。事業が大規模で方向転換が困難な政策なため、実際の運用に関しては環境など副次的影響について事前に十分に考慮する必要があるだろう。

別の面からの考えとして、バイオ燃料用の穀物栽培は食料安全保障や国土保全などエネルギー政策以外の戦略的見地から有益であるとの意見がある。穀物は数%の過剰や不足が社会経済全体に大きな影響を齎す為、需要と供給のバランスに常に気を配る必要がある。その際バイオ燃料用穀物を安全弁として利用できるという方法論である。フランスでは過剰生産小麦をバイオ燃料に転換する政策が定着している。ドイツのビート（砂糖大根）は畑の輪作に不可欠で過剰生産した砂糖を中東に輸出していたが、WTO による輸出農産物への補助金禁止勧告により現在では燃料への転用が一般的である。2005年の世界のバイオエタノールの用

途別内訳は燃料用が77%で、飲用の15%や工業用の8%を大きく上回る。現状では燃料用エタノールは採算面で化石燃料に劣るとされながら生産が行われるのは、重要な農産物は過剰気味にした方が食料安全保障上有利であるとの国策からである。こうした考え方から、日本でも休耕地を利用して燃料用イネを栽培すべきという意見がある⁹⁾。現在の減反政策を転換し、休耕地にエネルギー生産用の稲を栽培することは、稲作可能な耕地を維持し有事の際に食料への転換を可能にする手段として有効である。バイオ燃料米の試験栽培は実際に日本各地で開始されている。岐阜県では2008年より郡上市と海津市において、休耕地を使って多収種イネ計6品種の試験栽培を始めた。国土保全や土地資源の有効活用の観点からも、イネのバイオ燃料利用政策は総合的に見て工夫次第では収支がプラスになる見込みがある。

3. スイッチグラスなど永年性草本植物

食料と競合せず、エネルギー生産のみを目的とする第3世代バイオ燃料用作物候補の一分野である永年性草本植物として、スイッチグラス（キビ属）、ジャイアント・リード（ダンチク属）、ミスカンサス（ススキ属）などの植物が有望視されている。スイッチグラスは中でも実用化の期待の高い植物種である。スイッチグラスは北アメリカに自生する多年生植物である。栽培の際に肥料を殆ど与える必要がない。少量の水でも生育可能で耕作不適地でも栽培が可能である場合がある。エネルギー密度の高い高セルロース性植物であり食用穀物より多くのエネルギーを生産できる可能性がある。スイッチグラスより生産されるバイオエタノールのエネルギーは、栽培およびエタノール変換過程に必要な化石燃料エネルギーの54%になるとの試算もある¹⁰⁾。2006年の米国ブッシュ大統領（当時）による年頭一般教書演説以来、民間企業の参入も相次いでいる。デンマークの酵素開発企業ノボザイムと米国のエネルギー作物企業セレスは2010年、セルロース性バイオ燃料開発を生産植物と処理酵素の両面から推進する為の提携を発表した¹¹⁾。

生産能力や地球環境改善効果の面で将来的には有望なスイッチグラスであるが、実用化までの技術的な課題は多い。セルロース系バイオマス生産植物のエネルギー利用にはセルロースの高効率な糖化技術の確立が必要となる。土壌中の菌やシロアリの体内菌から有用なグリコシダーゼ生産菌株が発見されており¹²⁾、酵素生産効率の向上や酵素特性の最適化を目指した研究が

進行中である。また産業利用の際には構成が単純である事が望ましいが、バイオマス（細胞壁）は主成分のセルロースの他にも植物種ごとに様々な性質を持つヘミセルロース、難分解性のリグニン等が混在する複雑な構造を有するため、産業として成立させる為にはこれらを分離し有効利用する技術開発が必要である。

4. 緑藻

緑藻類は生産能力やコスト面から、化石燃料の代替となりうる規模の生産が可能なバイオマス生産植物として注目されている。米国では2008年に藻類から作った燃料を用いたジェット機の飛行に成功しており、高度利用に耐える燃料が生産できることを実証している。緑藻の利点は生物としての効率の高さとバイオマス生産能力の高さである。緑藻は水に浮くため自身の体を支える構造体を築く必要がなく、光合成によるエネルギーを全て生長と生殖のみに用いる単純な生態を持つ。水面に高密度に広がり太陽光の受容効率が高い為狭い面積でも大量のバイオマスを生産できる。油の生産量では、2008年現在で大豆による生産量は1ヘクタールあたり446リットルに対して藻類は98500リットルと200倍以上となる¹³⁾。また緑藻の有利な点として水の問題がある。高等植物は根から水を汲み上げるために気孔からの蒸散を行う必要があり、エネルギー生産に必要な量を大幅に上回る水を消費する。緑藻は各細胞が直接細胞膜を通して水を吸収する為、必要な水の量は高等植物に比べ遥かに少ない。

緑藻で主に注目されているのはバイオディーゼル製造用油の生産能力である。油は発酵を行うアルコール系燃料に比べ精製など最小限の後処理だけで利用可能になるためコスト面で有利である。第1世代バイオ燃料は原料が農産物である為、生産地域はアメリカやブラジルなど農業大国に限られ、日本の参入できる余地は少なかった。それに対して緑藻は比較的狭い面積で高効率の生産が期待できる上、生産管理面において日本の得意な工業的手法を必要とすることから、日本が研究開発のトップを目指し国内での自給生産を試みる事も可能である。またエネルギー生産以外にも工業プラントの排出するCO₂や副産物の吸収処理などの用途が考えられ、技術開発の方向性次第では日本の優位性はさらに増す。

現在では生産コストなどの面で未だ化石燃料や太陽電池に及ばないため、開発グループの多くは当面のセールスポイントをCO₂固定による地球温暖化防止効果に置いており、今後の生産効率の向上が課題となっ

ているが、研究推進に不可欠な有用品種探索や品種改良についても緑藻は有利である。緑藻は少なく見積もっても地球上に数万種いると言われる。小型で未発見の種も多く残るため、今後も有用品種の探索研究から大きな成果が見込める。ライフサイクルが短いため品種改良速度は高等植物に比べ遥かに速く、遺伝子操作などの分子育種技術も発達している。従って有用形質の発見や生産性改良の急速な進展が期待できる。

日本国内でも緑藻を用いたエネルギー生産研究に関する優れた研究例がある。以下の2例はいずれも自動車関連メーカー・デンソー株式会社が関わっており、大学等との共同開発が行われている。

デンソーの蔵野らが用いている *Pseudochoricystis ellipsoidea* は、温泉中より新種新属として単離された体長5 μm 程度の単細胞緑藻である^{14, 15)}。窒素分の欠乏する環境下で油分を大量に生産する性質を有し、その量は乾燥重量にして約30%になり、そのうち約2/3がバイオディーゼル燃料に変換可能な中性脂質である。蓄積する直鎖状炭化水素の炭素鎖数は17-20で、軽油に相当する分子量である。

Botryococcus brautini は、直径30-500 μm のコロニーを形成する緑藻で、筑波大学大学院生命環境科学研究科の渡邊信教授らを中心に研究が進められている¹⁶⁾。その成分は重油に相当し炭素鎖数30以上であり、生産量は乾燥重量の20-75%になる。油分を細胞外に分泌するため油回収後の細胞で再度生産が出来る。有力株の一つである沖縄県産の品種を用いた場合現在1 haあたり100-120トン/年の生産量が得られるが、これを2013年までに1000トンまで向上させる目標で品種改良が行われている。これが実現すると、例えば返還予定の米軍普天間飛行場の面積で培養を行うと沖縄県内の年間石油使用量(約220万トン)の20%以上に相当する48万トンの油が生産できるという¹⁷⁾。

IV バイオマス燃料の効率的生産と遺伝子操作技術

バイオ燃料の生産効率改良には遺伝子操作技術が不可欠である。遺伝子組み換え微生物を用いたバイオマスのエネルギー変換に関する画期的な研究例を挙げる。

1. グリコシダーゼ遺伝子導入酵母によるセルロースからのエタノール発酵¹⁸⁾

リグノセルロース系バイオマスを用いたアルコール発酵のコストを上げる要因として、細胞壁セルロース

を酵母に利用可能な単糖に変換する為の酵素処理が挙げられる。最初にバイオマス原料にグリコシダーゼを添加してセルロースを分解するが、酵母は分解の結果生じるセロデキストリンを直接用いて発酵を行う事が出来ないため、さらに β -グリコシダーゼによりグルコースに変換しなければならない。Galazkaらはセルロース分解性真菌アカパンカビ (*Neurospora crassa*) の持つセロデキストリントランスポーター遺伝子と β -グリコシダーゼ遺伝子を酵母に導入し、細胞内でセロデキストリンの糖化と発酵を同時に行う酵母を育種した。組み換え酵母のセルロース発酵による原料グラムあたりのエタノール量は理論値の86.3%であり、グルコースを用いた通常のエタノール発酵の値である90-93%に迫るものであった。

リグノセルロースを用いたエタノール発酵のボトルネックをクリアし、グルコースを用いた場合に迫る生産量を達成した事で、セルロース系バイオ燃料を低コストで開発出来る可能性が高まったと言える。

2. バイオマスを油脂に変換する大腸菌の育種¹⁹⁾

穀物の場合と同様、植物油のバイオディーゼル化は、需要拡大による食品との競合や価格高騰、また耕地開発に伴う環境問題などの懸念を常に孕んでいる。この問題の解決法の一つとして植物から油脂を搾るのではなく、豊富に存在するバイオマスを用いて微生物発酵法により直接油脂を生産する事が考えられる。Steenらは大腸菌による脂肪酸エステルなどの大量生産を試みた。まず大腸菌自身の脂肪酸代謝関連遺伝子を改変して脂肪酸生成抑制機能を解除し、脂肪酸の大量生産能力を持つ大腸菌を育成した。次に脂肪酸エステル生産の原料であるエタノールを大腸菌内で生産できる様、大腸菌に *Zymomonas mobilis* のエタノール生産関連遺伝子を導入した。さらにバイオマスを直接栄養源として利用する為に *Clostridium stercorarium* のエンドキシラナーゼ遺伝子と *Bacteroides ovatus* のキシラナーゼ遺伝子を追加導入した。こうして育成された多重組み換え大腸菌は培地中に加えたヘミセルロースを栄養源として脂肪酸エチルエステルを高効率で生産した。Steenらは今後、グリコシダーゼを分泌する大腸菌を同様の手法で育種する事により高価な酵素処理や分離精製の手間をかけず発酵を行い、生産コストを採算レベルまで下げられるとしている。

微生物触媒は様々なニーズに応じた複雑な反応機構を遺伝子の編集により作成可能である事、生成反応を一細胞内で単純なプロセスでしかも低コストで行え

るなど利点が多く、研究の進展が期待される。

3. 光合成効率上昇によるバイオマス生産効率向上の試み²⁰⁻²²⁾

植物の光合成によるエネルギー変換効率の向上そのものを目的とした研究も行われている。植物は太陽光供給量の変化によって光合成のCO₂固定効率（エネルギー需要）と集光効率（エネルギー供給）のバランスが崩れるとエネルギーの過不足が生じ発育障害がおこる。そのため植物は集光アンテナの大きさや光化学系の量のバランスを調節して障害を避けている。Melisらは*Chlamidomonas reinhardtii*を用いて、集光および光合成機構関連遺伝子群を操作する事により高密度培養下での光合成生産能を最適化した品種の育成を試みた。緑藻類は強光下では光合成活性が落ち、折角受容したエネルギーの多くを利用せず熱として放散する。その一方水面表層の緑藻の集光効率が高いため水中深くまで日光が届かず、垂直方向への増殖が妨げられる。Mulisらは遺伝子破壊法により、光受容力が低下しながら完全な光合成能力を持つ変異体を選抜した。得られた変異体は光合成によるエネルギー変換効率や生産量が約3倍に上昇していた。彼らはこの手法は緑藻のみならずバイオマス生産を行う他の高等植物にも応用可能であるとしている。

彼らは最終的にはバイオマスを経ず、光合成によって利用可能なエネルギーを直接生産する事を目的としている。その目的の達成には数多くの光合成および各

種代謝関連遺伝子を全ゲノムレベルで改変・再構成する必要が生じる。この試みを実現に近づける契機となる可能性を持つ研究成果も発表されている。Venterらは*Mycoplasma mycoides*のゲノム配列情報を基に人工合成した各1080残基のDNAカセット群を用い酵母の系を用いてそれらを4段階の過程を経て1.08Mbpの人工ゲノム配列に連結・再構成した。この人工ゲノムを別種である*Mycoplasma capricolum*に移植すると、作製された組み換え体生物は元の*M. mycoides*の表現型を全て示し、自己増殖を行った。人工合成したゲノムの制御を受ける細胞の創造に成功した事になる。

同様の技術が緑藻に応用されれば、例えば光合成能力を大幅に向上させた酵素セットを導入したゲノムを移植する事により、エネルギー生産に適した緑藻を目的に応じて育種する事が可能になる。この試みは人工生命体の創造に繋がる技術開発であり、哲学・倫理学など各方面での議論を引き起こす事になるであろうが、望ましい形で実用化できるとすれば、核融合技術などの次世代エネルギー生産技術と併用する事により、エネルギー問題が人類文明発展の律速にはならない時代が訪れるかもしれない。

V バイオ燃料研究の今後の展望

1. バイオ燃料開発の役割と効果

バイオ燃料開発に期待される役割は多岐にわたる。目的や規模に着目すると表1に示す4区に分類でき

表1 燃料生産バイオマスの特徴と役割

	バイオマスの性格	代表的な素材, 植物種	世代	特徴と役割	実用化の状況と可能性
区分1	廃材処理や資源の有効活用に主眼を置き、新たな原料生産を目的としないもの	家庭ゴミ、建築廃材、稲わら、バガス	第2世代	処理費用の削減を含めた収支がプラスであればよい。第1世代バイオ燃料のコストダウンに寄与。	技術開発・試験運用の段階。技術革新が盛んで一部は実用化。化石燃料の代替となりうる規模の生産は困難。
区分2	エネルギー生産目的で新たな開墾・作付転換を行っても経済的利益が得られる穀物類	トウモロコシ、サトウキビ、ダイズ	第1世代	バイオ燃料普及の先駆的役割。既存技術の応用が主で実用化が比較的容易。	地域・植物種によっては実用化。資源枯渇、食料との競合の問題から規模拡大には課題有り。
区分3	CO ₂ 削減、地球温暖化防止、砂漠化防止など地球環境改善を主眼に栽培される植物バイオマスの副次的有効利用	各種ストレス耐性植物	一部は第3世代	研究目的が燃料生産とは異質の種も含み、採算は他産業などからの援助を念頭に置く。スイッチグラス、ユーカリなども区分4相当種も含む。	エネルギー生産目的では区分1に準ずる。地球環境改善目的では有望。何れも技術開発・試験運用の段階。
区分4	化石燃料に代わるバイオエネルギーの大量生産を主目的とする植物	緑藻、スイッチグラス	第3世代	食料と競合しない。水・肥料などの投入量は少量で済む。潜在的生産能力が高い。	技術開発の段階。実用化目標は5-10年後。生産力拡大の点では最も有望。実用化には生産量や効率拡大の為の大幅な技術革新が必要。

る。

バイオ燃料利用の普及と採算ラインのクリアを目指す上では区分2が最も近道である。昨今の批判の通りエネルギー収支や地球温暖化防止効果に疑問のあるケースも多いが、インフラ整備や利用ノウハウの開発を行わなければ需要が開拓できない。区分4の条件を満たす植物としては生産能力やコスト面で緑藻が最も理想に近い。但し技術革新の進展が不可欠であり、実用化までには時間と資金が必要である。研究開発資金の調達には区分1に含まれる廃棄物処理問題、区分3に含まれる地球環境問題等と絡めた複合的戦略が求められる。区分1、区分3はエネルギー問題の根本的な解決には結びつかない場合もあるが、経済的には高い利益が見込める分野である。特に国土の狭い日本において廃棄物処理や国土保全に寄与する技術開発に対する社会的要望は大変高い。環境保全技術は日本の科学力を世界にアピールする格好の素材である。

2. 遺伝子組み換え技術の植物育種への応用

低コストで高効率なバイオマス生産を実現する為に鍵となる今後の研究の一分野として、ゲノム科学や分子育種技術を用いた高等植物の品種改良の試みが挙げられる。バイオマスの糖化・分解効率向上等を目指した微生物側からの試みに比べ、植物は品種改良に多大な時間とコストがかかるためどうしても開発速度面での劣勢は否めず、社会の期待に充分応えられるレベルではなかった。しかし近年ゲノム情報の蓄積に伴い、有用形質の選抜に際して植物の表現型を確認するのではなく、目的の特性にリンクした遺伝子マーカーを検出しそれを指標とすることで迅速な選抜を行う手法が発達し、品種改良速度の飛躍的向上が望める様になった²³⁾。また、現在遺伝子組み換え作物は農薬や除草剤耐性用途に限られているが、今後の実用化ロードマップとして各種ストレス耐性、光合成活性強化、窒素固定機能などの機能付与が視野に置かれていることが示されている^{24, 25)}。微生物や酵素科学の研究の進展によるセルロースのエタノール変換技術の実用化を前提として、光合成効率の向上によるバイオマス生産量増大、エネルギー変換効率の向上を目指した植物細胞壁構成の改変、高ストレス環境への抵抗性を増強した植物の分子育種も現実的になってきた。組換え遺伝子の環境への拡散問題についても、植物の生殖機構の研究が進展しており、生殖生長と栄養生長の人為的制御などを通じて遺伝子の拡散を防ぐ技術の開発も可能であると思われる。高等植物の品種改良の成果は食用植物への

応用が容易である。食用に用いる前の安全評価としてエネルギー植物の開発を行う手法も有効であろう。

3. 将来の展望：日本は何をすべきか、日本で何が出来るのか

最後にバイオ燃料問題に関して日本の採るべき戦略を考える。先ず国内でのエネルギー自給の問題である。これには先ず安全保障上現実的に必要な生産量（自給率）はどれだけか、その生産の実現性と国土改良（環境破壊）の影響は如何程なのかを冷静に分析し、その上で我が国の特性を考慮し不足分を補う為の戦略を明確にすることが肝要である。例えば食料に関しては我が国の現在の食料自給率は約40%であり、2010年3月閣議決定の食料・農業・農村基本計画によればこれを2020年迄に50%に引き上げることになっている。この目標の達成は実質的に有事の際の安全を意味しない。第二次大戦中の食料困窮は知られているが、戦前の我が国の食料自給率は内地だけで80%強に達していたという。現在の化石燃料依存の農業システムを考えれば、輸入が停止した際の影響がより深刻になる事は明らかである。斯様な状況下では数%程度の自給率向上を目指した無理な土地開発は負の作用が大き過ぎて割に合わない。日本農業が高付加価値製品の海外輸出に活路を目指していること、商社がアフリカやロシアにおける農地権益を欧米・中国・韓国などと激しく争っていることなどは食料問題の現実的な打開策を模索する行動の一環といえる。

この構図はバイオ燃料植物にも当てはまる。現実には主な供給先を海外に求めざるを得ない。金で資源を買い漁るといった方法論は世界的に窮乏した場合には無力である。先ずバイオ技術を用いた燃料・食料資源開発技術を糧に相互に必要な関係を外国と築く事である。高生産性作物やストレス環境耐性植物の育種研究に知的資源を注ぎ、取得したライセンスを武器として国外での権益確保を目指し、技術供与や指導を行うことにより現地の利益にもなる様農業発展をサポートするのが現実の方針と考えられる。知的財産の蓄積という点では日本にはその素養は既に備わっている。

知的財産権保護を目的とする国連機関 WIPO (World Intellectual Property Organization) の報告書によれば、2009年までのバイオ燃料その他全般を含めた化石燃料代替エネルギーに関する日本の特許出願件数は世界での当該分野出願総数の実に55%を占めている²⁶⁾。エネルギー資源の大半を輸入に頼っている国情に対す

る危機意識を反映してか、代替エネルギーの研究開発分野で日本は世界でも傑出した国である事が判る。しかしエネルギー関連投資額では日本は世界の20分の1に過ぎず、世界を圧倒する研究資産を実用化に結びつける試みが不足している。

バイオ燃料開発には主要各国が巨額の開発予算を投じ、国益を賭けた激しい競争となっている。ブラジルのバイオエタノール科学技術センター（CTBE）所長は投資のリスクについて問われ「投資を行わない事が最大のリスクである」と述べている⁴⁾。“よりサイエンスを駆使する国がより多くの技術的進歩を勝ち取る”という認識も既に各国共通と言える。単に親切を施すだけの“お人好し”であってはならない。頼る価値を認められるパートナーとしての互恵関係を築くことが重要である。

また休耕田や荒廃した森林の再開発の観点から、国内でのバイオ燃料用植物栽培の試みは有益である。この場合は視野を広げ、バイオ燃料用植物栽培の目的を多角的に考える事で総合的利益を算出するシステムを構築する必要がある。この場合補助金が絡む場合も多い為、充分に説明責任を果たせる客観的基準を示すことが必要である。農業振興、環境保全、ゴミの減量化、CO₂削減など、バイオ燃料植物栽培やバイオマス利用技術の進展によって利益となる要素は数多い。国土保全、環境保護などの諸問題は世界共通の懸案であり、技術の海外輸出が有望である。温室効果ガス排出問題においては排出権取引の際の商品価値もある。

国内でのバイオ燃料生産の潜在能力を推定する為に、緑藻（ボトリオコッカス）^{16,17)}と休耕田を用いてバイオ燃料生産を行った場合の生産可能量を、公表されている最新データを基に試算した結果を表2に示した。現在の生産力で未利用耕地のみを用いた場合（条件1）でも石油使用量の1/4に相当する燃料生産が可能となる計算になる。無論これは実験施設での結果を

基にした試算であり実際の圃場では条件が大きく異なることが予想される。しかし今後の品種改良や技術革新の進展に伴い生産効率は本試算に迫りうる大幅な向上が望める。生産量の点でエネルギー消費に一定の影響力を与えうる潜在力が判明したことは、国内でのバイオ燃料生産の試みが、あながち“螻蛄の斧”とは言えない可能性を有することを示唆する。

地球環境変動やバイオ燃料の問題は現代社会において最も注目されている課題の一つであるが故、その研究進捗も速い。政治的社会的評価も時々の情報に応じて二転三転し、研究者を含む利害関係者はその都度一喜一憂している状況である。確実なことは、枯渇の懸念はどうあれ化石燃料生産コストは今後上昇し続けること、環境循環系から隔離されていた数万年分の蓄積を一年で放出し続ける様な消費スタイルはいずれ環境に少なからぬ影響を齎すであろうこと、である。“研究開発を行わず放置することが最も危険”といえる。

遺伝子操作技術に限らず技術革新には常にリスクが伴う。その危険性を監視する為にも、権益を一部の国家や集団に独占させない為にも、新たな技術は受け入れを前提として有用性や危険性を多方面から充分吟味し、情報を広く公開し理解を深める事が必要である。理解不足から導かれる最も危険なシナリオは1993年の米輸入解禁の事例である。当時は日本中が直前まで米輸入反対一色だったが、冷害による想定外の供給不足からなし崩し的に米市場が開放され、有用性や危険性に関する議論は結論の出ぬまうやむやになった。遺伝子操作技術やバイオ燃料開発についても同様のことは起こりうる。斯様な事態は仮に凶と出た場合サイエンスへの信頼を著しく損ない今後の発展の障害になるだけでなく、地球環境に修復不可能な影響を与えかねない。積極的に良心的な広報を行って一般社会の正しい認識を促すことは勿論であるが、それを単なる“啓蒙”とは位置づけず、一般社会から噴出するクレーム

表2 緑藻（ボトリオコッカス）を用いた石油代替油生産量の試算

	条件1	条件2	条件3
利用する遊休地	耕作放棄地（40万ha）	休耕田（水田面積から水稲作付面積を減じた値：87.5万ha）	耕作放棄地（40万ha）
生産効率の想定値	120トン/ha/年 (2010年現在の実績値)	120トン/ha/年 (2010年現在の実績値)	1000トン/ha/年 (2013年の目標値)
油の推定生産量	4800万トン/年	10500万トン/年	40000万トン/年
油生産量の国内石油消費量に対する比率	24.6%	53.8%	204.9%

（農林水産省および資源エネルギー庁公表の統計データより著者試算・一部単位は著者が換算・変更）

については、誤解に基づくものは丁寧に説明すると共に、独善に陥らぬよう謙虚に耳を傾ける姿勢が研究開発に携わる者には今後特に強く求められると考える。

謝辞

本論文の執筆を御薦め下さり、執筆に際して御校閲と適切な御助言を賜りました、愛知学院大学心身科学部教授 村松喬先生に感謝致します。

文 献

- 1) http://genomicscience.energy.gov/biofuels/2005workshop/2005low_execsumm.pdf
- 2) Gilbert RA et al (2006), The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. *Field Crops Res.*, 95, 156–170.
- 3) 竹田みぎわ, 柴田大輔 (2008), 植物バイオ燃料をめぐる視点, *化学と生物*, 46, 286–290.
- 4) Regalado A (2010), Race for cellulose fuels spurs Brazilian research program. *Science*, 327, 928–929.
- 5) アサヒビールニュースリリース2010年4月13日：
http://asahibeer.co.jp/news/2010/0413_4.html
- 6) The state of food and agriculture 2008, <http://www.fao.org/docrep/011/i0100e/i0100e00.htm>
- 7) Charles D (2009), Corn-based ethanol flunks key test. 324, 587.
- 8) Searchinger T et al (2008), Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319, 1238–1240.
- 9) 山家公雄 (2008) 石油・食料危機のウソ：水田を油田に変えよ. *文芸春秋*10月号, 129–133.
- 10) Schmer MR et al (2008), Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 105, 464–469.
- 11) <http://www.businesswire.com/news/home/20100520005103/en/Novozymes-Ceres-Partner-Biofuel-Crops>
- 12) Warnecke F et al (2007), Metagenomic and functional analysis of hindgut microbiota of a wood-feeding higher termite. *Nature*, 450, 560–565.
- 13) Schenk PM et al (2008). Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioeng. Res.*, 1, 20–43.
- 14) 蔵野憲秀ら (2009) 微細藻類によるバイオ燃料生産, *デンソーテクニカルレビュー*, 14, 59–64.
- 15) Satoh A et al (2010), Characterization of the lipid accumulation in a new microalgal species, *Pseudochoircystis ellipsoidea* (*Trebouxiophyceae*). *J. Japan Inst. Energy*, 89, 909–913.
- 16) Tanoi T et al (2010), Effects of carbon source on growth and morphology of *Botryococcus raunii*. *J. Appl. Phycology*, DOI: 10.1007/s10811-010-9528-4.
- 17) 琉球新報 2009. 9. 7.
- 18) Galazka JM et al (2010). Cellodextrin transport in yeast for Improved biofuel production. *Science*, 330, 84–86.
- 19) Steen EJ et al (2010), Microbial production of fatty-acid-derived fuels and chemicals from plant biomass. *Nature*, 463, 559–562.
- 20) Melis A (2009), Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency. *Plant Sci.*, 177, 272–280.
- 21) Hunter P (2010), The tide turns towards microalgae. *EMBO reports*, 11, 583–586.
- 22) Gibson DG et al (2010), Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science*, 329, 52–56.
- 23) Tester M & Langridge P (2010), Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 327, 818–822.
- 24) Godfray HCJ et al (2010), Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812–818.
- 25) Gilbert N (2010), Inside the hot houses of industry. *Nature*, 466, 548–551.
- 26) Patent-based technology analysis report—Alternative energy technology. http://www.wipo.int/patentscope/en/technology_focus/pdf/landscape_alternative_energy.pdf

最終版平成22年12月20日受理

The Examination of Feasibility of Plant-derived Biofuels —As an Intermediary Between Biotechnology and Society—

Seiyei YAMAKAWA

Abstract

In recent years, the utilization of biomass as an energy-generating resource has received global attention with the hope of providing a clue to solving the problem of global warming caused by increasing amounts of CO₂ in the atmosphere and the energy crisis caused by the depletion of fossil fuel resources. On the other hand, deep-rooted repulsion toward genetically modified crops is prevalent in civil society. In this review, the feasibility and possibility of plant-derived biofuels were examined by studying recent reports and news as sounding boards that present the practical values of biotechnology.

Bioethanol from lignocellulosic feedstocks and biodiesel from green algae are promising as alternative energy sources for fossil fuel from the view point of productivity, but additional studies and investment toward technical innovation will be needed in order to achieve commercial viability. Molecular breeding of microbes and plants through genetic engineering will bring about progressive improvement in the efficiency of biomass production and conversion to liquid fuel. It is necessary for Japanese policy on energy security that a specific strategy be adopted to make the most of the wealth of intellectual property about alternative energies which has been accumulated over many years through research and development. The Calculated Japanese capacity of biofuel production has the potential to supply an energy source that corresponds to a certain percentage of the domestic demand. The practical realization of biofuels as the fruit of biotechnology will provide the ideal opportunity for fostering mutual understanding between researchers and citizens.

Keywords: biofuel, biomass, biotechnology, genetically-modified products, plant