

## バイオマスエネルギー： バイオマスエネルギーが開く社会と産業



特 集

奈良先端科学技術大学院大学  
教授 新名 惇彦

本日は大阪大学工学部の先生方の仲間に入れていただき、ありがとうございます。実は平成6年までは大阪大学工学部にいました。もともと私は、阪大在学当時は発酵工学に取り組んでいました。約20年前から植物分野に転向し、現在は植物学をやっております。本日は、今後はバイオマスが重要になってくるだろうということについて話したいと思います。

### 地球温暖化の現状

初めに地球温暖化の現状について、写真を紹介しながら少し触れてみます。この写真はスヴァンテ・アレニウス先生で、1903年に第3回ノーベル化学賞を受賞されています。アレニウス先生はいまから100年以上前の1895年に「二酸化炭素の地表温度への影響」というタイトルで講演をされています。翌年の春には当時の雑誌に40頁にわたる同タイトルの論文を発表。これによると、非常に丁寧な実験をして、二酸化炭素の太陽光エネルギーを遮断する能力、逆に地球から放射する熱とも比較しています。当時の世界で約5億トンの石炭を燃やしていたため、CO<sub>2</sub>の増加を勧告すると、結論としてこれを続けると地球は温暖化すると警鐘を鳴らしました。石炭換算で80億トンの化石燃料を燃やしている現在、ついに地球の温暖化がやってきました。20世紀の100年間で、総埋蔵量の半分弱を使いました。石油に依存した文明の結果といえます。その結果として、大気中のCO<sub>2</sub>濃度が産業革命前に比べ100ppm増えて、平均気温が0.7 上昇しています。

いろんな場所で地球温暖化の影響が現れています。例えばヒマラヤの氷が解けて氷河湖の水量が増え、それが決壊して大洪水が発生しています。南太平洋のツバル国(人口1万人)では海面上昇で街中が浸水し、生活ができなくなった人たちは年間800人がニュージーランドに移住しています。10年後にはこの島はなくなると言われています。このように温度が上り、氷が解けて、海面が上昇するというのは

分かりやすく、計算がしやすいのですが、厄介なのは生態系の変化です。

### カナダでは松くい虫の卵が越冬

この写真はカナダのブリティッシュコロンビア州の松林ですが、松くい虫によって食い荒らされ70~100%が枯れてしまいました。たぶん地球温暖化の影響だろうと言われます。当地域は、かつて冬はマイナス30 ~ マイナス25 になっていたため、虫の卵が越冬できなかった。その虫が今では猛烈に増えていて、次第にロッキー山脈を越えて東に広がっています。被害は日本の面積の約40%に相当する15万km<sup>2</sup>に及んでいます。これはまさに地球温暖化が生物の生態系に影響した予測し難い問題であります。地球温暖化で日本にも近々、熱帯の病気であるマラリヤが入ってくるのではないのでしょうか。

### 禁断の果実を口にした20世紀文明社会

いわゆる禁断の果実を口にしてしまったのが20世紀の文明社会と言えます。化石資源への全面的依存による大量生産、大量消費、食糧増産となり、100年間で世界人口は16億人から65億人になりました。人口増加になったのはそれだけの食糧増産が可能になったからであり、それは植物研究によるの



講師 新名 惇彦 氏

でなく、石油という支えがあったからでしょう。アメリカ、オーストラリアなどの大規模計画機械化農業や、飛行機から種をまく、殺虫剤をまく。案外忘れられているのが化学肥料です。昔は堆肥でしたが、今は硫酸とか尿素とかの化学物質の生産にずいぶんエネルギーを使っています。あるいは灌漑設備を使って生産量を増やしました。つまり石油のおかげで食糧が増え、その結果として人口が増え、その中で私たちが豊かな暮らしを謳歌してきたから、地球がおかしくなったと言えます。

エネルギー使用量の10倍ある植物バイオマスエネルギー

化石燃料がだめだということで、次は再生可能なエネルギーということになります。現在の世界のエネルギー使用量は13テラワット(テラ=1兆)ありますが、圧倒的に大きいのは太陽エネルギーであり、使用量の約1万倍あります。その1,000分の1が全植物により固定されるので、植物バイオマスのエネルギー量は使用量の約10倍あります。ですから一番いいのは太陽エネルギー、次は植物を使うことだと思います。特に植物は、太陽光を使って年々再生するというのが大きな魅力だと言えます。

過激な人は、私たちは化石燃料をやめて植物を使う文明に変えるのだと主張しています。われわれ植物分野では、「生命はすべて草である」と言います。植物はCO<sub>2</sub>と水、太陽光を使って、例えばブドウ糖を作る。ブドウ糖から最近言われているのは、エタノールを作ってガソリンに混ぜて車を走らせる。乳酸発酵してポリ乳酸を使ってプラスチックに変える。植物バイオマスを使って生じるCO<sub>2</sub>は、再び

植物に固定される。いわゆるカーボンニュートラルということが、化石資源と根本的に異なるバイオマスの大きな魅力であります。われわれの先輩たちの文明は、19世紀までそれらを使ってきたのです。

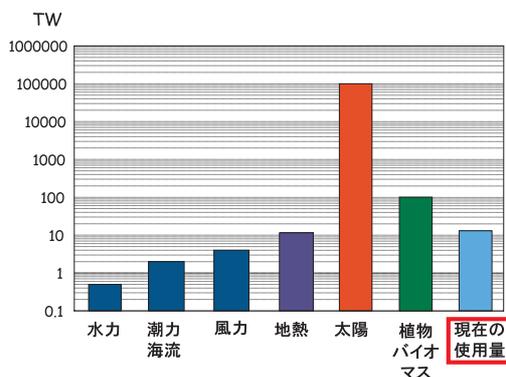
CO<sub>2</sub>を吸収・固定する大事な森林

植物はCO<sub>2</sub>を固定しますが、やはり森が大事だというデータがあります。これは日本上空の大気中のCO<sub>2</sub>濃度の変動を計ったものですが、上空0.2km~4kmで波を打ちながらCO<sub>2</sub>が増えていっています。冬は光合成が下がりますからCO<sub>2</sub>が増え、夏は光合成が上るからCO<sub>2</sub>濃度は減ります。日本全体の森林は減ってはいませんが、森の木を切ったら当然CO<sub>2</sub>は増えることになります。

植物バイオマスエネルギーへの期待

もう一度整理しますと、全植物のバイオマスエネルギーは、世界のエネルギー使用量の約10倍、100テラワット。このうち食用、飼料、木材、紙パルプ、繊維などへの有用バイオマスが約7%、森林維持に必要なバイオマスが約33%という計算になります。残りの60%が、いわゆる未利用あるいは廃棄物バイオマスです。稲ワラ、麦ワラ、雑草、間伐材など、未利用バイオマスは結構大きいのです。林産、農産、畜産をあわせて相当なものです。石油をやめて、植物でエタノールをつかって燃料用に利用しようとしています。アメリカやブラジルで猛烈にやっていますが、困るのが、食用になるトウモロコシからエタノールを作り、サトウキビから砂糖をやめてエタノールをすることによって、ここ日本でも加工食品やマヨネーズの値が上って、生活を圧迫しています。

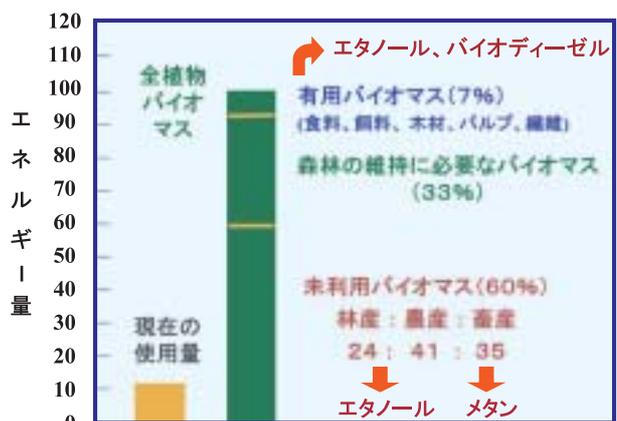
### 再生可能なエネルギー量



TW (tera watt)=1 兆ワット

C. Somerville (NEDO Workshop, Osaka, 2006, 9, 14)

### 植物バイオマスエネルギーへの期待



## 急成長する燃料用エタノール生産

京都議定書を批准するとアメリカ経済が停滞するとしていたブッシュ大統領も、これではおかしいと反省し、未利用のセルロース系バイオマスへと方向転換することになりました。間伐材、建築廃材によるセルロースからエタノールを作る。あるいは家畜の糞尿からメタンを作る。これらが脚光を浴びてきました。ただ、デンプンはブドウ糖にアミラーゼで生分解されて発酵しますが、セルロースは難しいというか、アミラーゼに比べて反応が悪いようです。言い換えれば、もともとデンプンというのは、植物が次の世代に新たに芽を出して育つときにエネルギーとして使う、いわゆる貯蔵エネルギーです。だから使いやすい、分解しやすいわけです。一方のセルロースは、そう簡単に分解と関係しないわけですが、これを今後は変えていこうというのがわれわれの研究課題であります。アメリカのトウモロコシのデンプンがエタノールに換えられ、困った状況にあります。アメリカ国内には既に90以上のエタノール工場が稼働し、建設中が50あるそうです。ブッシュ大統領は2007年1月にガソリン消費量を10年以内に20%削減しエタノールに換えると宣言しました。そうすると食用のトウモロコシが不足することになるため、セルロース系へと方向転換しようとしているのです。もう1つはブラジルです。2004年のデータですが、エタノール生産は3,900万kl。これを生産するために使っているのは国土の0.6%、全耕作面積の10%です。ブラジルはまだ農地を侵食しない範囲で、サトウキビからエタノールを作っています。これをうまくやれば6.3億klとれるそうです。

## セルロース革命

米国エネルギー省は、セルロース系バイオマスを使ってエタノールを作ろうと、5年間に2億ドルの研究費を予算化し、2007年9月に全米から研究の募集を開始し2050年までにセルロース革命を行おうという政策を打ち出しました。日本でも経産省、農水省が躍起になっています。2005年にカナダのオタワで国有ベンチャーがスタートしました。廃棄物バイオマスからエタノールを作ろうというものです。ポイントは遺伝子組み換え技術を使って、酵素を分解しやすいようにするもので、原料は麦わら、茎

を使用し、2010年の市場規模は100億ドルと見込まれています。当時の首相のマーティンさんも立ち会って、これでカナダに石油はいらないと発言したそうですが、私は今年2月にカナダに行って訪ねてみましたが、なかなか見せていただけませんでした。

## エネルギーバランス

やはりエネルギーを作る場合に、エネルギーバランスが重要ことだと思います。エタノールを作る場合、投入エネルギーに対して、どの程度のエタノールが得られるかだと思います。トウモロコシの場合、種をまいて栽培し、肥料をやって刈り取って、加工して発酵して、全てをやって作るのですが、それに対してどれだけエタノールエネルギーが得られるかというところ。サトウキビだと9.20で、非常に効率がいいわけです。セルロースだって、頑張ればアメリカの間伐材のデータによれば2.0です。エタノールの最大の欠点は発酵で最大濃度20%しか集まりません。これをやれるのは日本の製紙工場が清酒企業です。このあと燃料を使って99%まで濃縮しなければなりません。サトウキビは、搾りかすを燃料として燃やすから効率的なのです。セルロースがデンプンより優れているのは、実は木材にはリグニンという成分があり、これを燃やすことによって効率が上り、デンプンとの差はその違いということになります。この2.0を3, 4, 5に上げる技術、それは酵素の改良、発酵技術の改良、濃縮技術の改良によって、3, 4, 5と稼いで行くのがわれわれの研究だと思っています。

アルコールは濃縮にエネルギーが多く要すると言いましたが、そういう意味ではバイオディーゼル燃料は魅力的です。その原料は植物油ですが、油というのはグリセロールに脂肪酸が3つ付いている。これがトリプルセットグリセリドです。これをメタノールでアルカリ浄化処理すると、グリセリンと脂肪酸、(トル)メチルエステルができる。そのまま燃料になりますから、濃縮しなくてよい随分とうまい方法です。ヨーロッパではこれをよくやっています。原料は植物油を用い日本では滋賀県でやっているのが有名ですが、原料としてテンプラの廃油を使っています。アルカリ分解するとグリセリンが傷み、流動誘導体ができてしまいます。本当にきれいなグリセリンができるなら他の用途にも使えるので、酵素

によって分解してやれば完璧に取れます。われわれはそういった研究を進めていますが、同僚の神戸大学の福田教授は非常にいい酵素を見つけています。

EUにおけるBDF(バイオディーゼル燃料)

ヨーロッパはバイオディーゼルが浸透していて、年間生産量は90万トン。ドイツがいちばん熱心で2005年には115万トン、次いでフランス、イタリアと続いています。問題は原料の油はほとんどが菜種油で、食用になる油です。食糧を作る農地に菜種を育てているため、たぶん食糧生産を圧迫し、あまり賢い方法とはいえません。

カナダで枯れた松からエネルギー回収

さきほど、カナダの松の木が松くい虫にやられていると申しました。実はカナダのバンクーバーのDynamotive社は、枯れた松からエネルギーを回収するという装置を開発しました。木を粉碎し密閉反応器に投入し500℃、2秒間加熱すると大部分の木質成分が気化する。揮発したものを冷却装置で冷却すれば、ドロツとした真っ黒な油が回収されます。液化しない低沸点成分は、反応器を過熱する燃料にする。これは完全な閉鎖系です。1L30円以下で作れるそうです。ただし燃費が悪くて燃焼熱量は16-18メガジュール/kgで、軽油(42メガジュール/kg)の半分以下。しかし値段が1L60円~70円なら、結構いけるかと思えます。日本にも売り込みに来ていて、吉野の間伐材をこれでやってみたらどうかと提案もしているそうです思います。

国産バイオマスによる3E実証試験

日本ではやっとE3、すなわちエタノールを3%入れた混合ガソリンの段階で、各地で実証試験が行われています。よく聞くのは、堺市での建築廃材からの燃料用エタノール製造とE3実証試験です。ただし、これはNEDOから随分お金をつぎ込んでいますので、どこまで自前でやれるのかが見ものだと思っています。アサヒビールが沖縄県伊江村でサトウキビからのエタノール生産の実証試験をしています。聞いてみますと、九州沖縄農林センターが作った成長度がよいサトウキビの新品種から作っていて、そこで技術を完成させたら東南アジアに持って行くという話です。山形県ではソルガム(こうりゃん)

から作るという小規模な実証試験が始まっています。

バイオエタノールのコスト

このグラフはバイオエタノールの生産コストを示したものです。昨年の資料ですが、ガソリンは出荷価格66円/Lで、ガソリン税53.8円/Lを足して120円/Lで売っている。ブラジルからエタノールを買ってくる場合、CIF価格76.48円/L、関税を掛けて、ガソリン税と同じ税金を掛けると146円/L。北海道の食べられない小麦の場合は、栽培、製造のコストがあって、税金を足して152円/L。ヨーロッパでは、バイオ燃料を作る場合は免税になるから、十分に対抗できることとなります。

Cost Insurance & Freight 貿易条件の一つで、運賃・保険料込み条件のこと。

植物をもっと作るべき

先ほども説明しましたが、世界のエネルギー使用量が13テラワットで、全植物のバイオマスは約10倍の100テラワットある。有用バイオマスが約7%、森林維持に必要なバイオマスが約33%で、残りの60%が未利用あるいは廃棄物バイオマスです。しかし、これはいま現在のことで、2001年の世界人口は61億人で、これが2050年には95億人になると言われています。1つは食糧生産を今より1.5倍に増やさなければなりません。あるいは中国、インド、ブラジル、ロシアがものすごい勢いで発電が発展していますので、2050年には最低に見積もってもエネルギーは今の2倍は必要になる。あるいは食糧は人口に比例して1.5倍ですが、途上国が発展すると飽食になります。植物バイオマスは上手に栽培、加工して、使っていないものをこちらに回す。さきほどお話したように、セルロースからエタノールを作る際のエネルギーバランスは2.0。ということは全部使ってエタノールに回しても、2.0ですから半分はロスします。どう頑張ってもこれだけではまかないきれません。解決策は、植物をもっと作るべきだということです。今の50%アップ、150%作ればいいたらと思います。

植物バイオマス増産プログラム

ではどうするか。1つは、栽培面積を増やしましょう。ただし、いま世界の耕地面積が24億haあり

ますが、砂漠化の進行などもあって、今後世界の耕地面積は減ることはあっても増えないというのが常識です。それでは面積あたりの増収、生産効率を上げましょう。しかし、日本でも戦後そうだったように、灌漑、肥料、農薬とさんざんやってきました。だからこれもあまり期待できません。途上国のアフリカ、南米、アジアで灌漑設備をつくってどんどん水や陽・肥料を当てやる。これもコスト、つまりエネルギーが掛かり過ぎてあまりよい方向ではありません。そうすると残った方策は植物の育種、改良であり、高成長、高収量、高品質なものに変える。あるいは乾燥に強い、低温に強い、虫に強い。そういうものをつくったらいいだろうと思います。これしか効果方法がないわけです。いろいろな育種をすれば、先進国の足らない種の省エネ型の増産、途上国の生産性の大幅拡大が期待できます。

救世主 遺伝子組み換え

それでは次に、これをどのようにつくっていくのでしょうか。昔どおりの掛け合わせの交配育種ではスピードと効果は出ません。しかし人類の救世主、遺伝子組み換えが今では使えます。突然変異が困難な植物の育種にはこれしかないと思います。交配育種、例えば赤い花と黄色の花を掛け合わせて、青いものを作りたいとします。偶然に期待して昔からやってきたわけですが、たまたま出来たのが新品種だったり、虫に強いものだったりするのです。遺伝子組み換えでは、青い花が好きだったら青い花の遺伝子を入れてやればいわけです。掛け合わせの交配は近縁種しかできませんし、米と麦の交配はできません。遺伝子組み換えでは、微生物でもいいし植物でもいい。目的とする遺伝子を持ってきたらできるということです。だから交配の育種が大幅に広がります。有名なサントリーの青いバラですが、青い色素を作るにはデルフィニジンという色素が要のですが、バラは持っていません。このイソフラボンにOHが入りますと、これが赤い色素になるし、これが黄色い色素になる。そしてOHが2個付くと、青色色素になります。青いバラは、たぶん年内には発売されることになると思います。

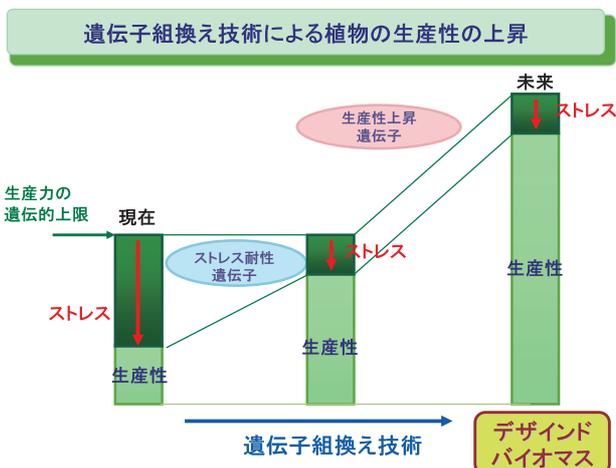
生態系への影響は心配か？

遺伝子組み換え作物が登場して、ちょうど10年が

経過しました。世界の大豆の60%、トウモロコシの20%が組み替え作物で、2006年に世界で栽培している国はアメリカ、カナダ、アルゼンチン、中国、オーストラリア。ヨーロッパでも活発で、ドイツ、フランスも栽培しています。これだけ多く普及していますが、今までに、遺伝子組み換えの大豆を食べた死んだ人はどこにもいません。1回も事故を起こしていないと思っています。今では電気冷蔵庫、自動車、ヘアドライヤーなどでは頻りに事故が発生していますが、遺伝子組み換え技術は安全です。ただし、これは将来まで安全とは断言できません。われわれが唯一心配しているのは、生態系への影響問題で、この研究には慎重に取り組んでおります。しかし、遺伝子組み換えをしたからといって、危険が広がるとは思いません。遺伝子を受け取ったとしても、得か損か、あるいは危険か危険でないかを判断できます。植物の中には猛毒を持ったもの、例えばトリカブトや彼岸花などがそうですが、トリカブトの毒、アコニチンは他の植物にはありません。何万年も生きていますが、移動しないのです。だからそれほど心配することはないと思います。

植物は環境から様々なストレスを受けている

植物は一生涯移動しません。だから環境からさまざまなストレスを受けています。それによって植物の生産力は激減し、アメリカの農業でも植物の生産能力の約5分の4が失われているそうです。実際には干ばつ、冷害、水害、虫の被害に遭います。そこで植物に遺伝子組み換えで種々のストレス耐性を付与し、虫に強い、乾燥に強い、低温に強いように変えることができます。研究では、アメリカでも乾燥に



強い、冷害に強い植物に換えてやると、約3倍の収穫が得られるということです。そんなに難しい話ではないと思っています。まとめますと、遺伝子組み換え技術をうまく使えば、植物が持っている生産性の上限が決められていますが、いろんなストレスが激減しますから、それを改革することができます。炭酸固定の上限を上げてやる、あるいは成長を早めてやるなどによって、生産性は上るはずなのです。だから世界のバイオマスの3倍、5倍の増産は、そんなに難しいことではないと思っております。

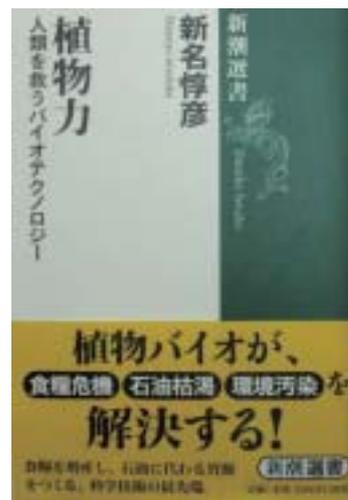
クエン酸でユーカリの酸性土壌での生育改善

私は1999年から経産省、NEDOの関係の植物系プロジェクトに携ってきました。その中の1つで、これは王子製紙との研究成果です。パルプ原料の約半分はユーカリです。ユーカリはうまく育てますと、年間5m伸びます。5~6年経ったら伐採して、チップにしてパルプにするのですが、当然のように王子製紙だけでなく大企業は世界中で大規模植林をやっています。酸性土壌の山にも行かなければなりません。酸性土壌では、栄養素のリン酸が吸収できません。クエン酸を根っ子から出してやると、これが溶けてリンの吸収が解ける。実際にクエン酸をユーカリに入れて植えてやると、野生のユーカリより根っ子が24%大きくなり、葉っぱも立派に大きくなります。研究開発の成功で10%増産が可能となり、これは非常に大きな経済効果につながります。

おわりに

エジプト文明は5000年、ローマ帝国は2000年、江戸幕府は300年、しかし、石油文明はたぶん150年くらいでしょうか。それは人口の増加と関係して

くると思われます。われわれは、たまたま20世紀半ばから生まれ、育っていますが、変な時代にしてしまったと感じています。石油のおかげでわれわれは、いい思いもしましたが、20世紀はネガティブな石油の世紀「ブラックゴールド」。そして21世紀は、植物バイオの世界「グリーンバイオ」、緑の時代にしなければいけないと思います。植物バイオだけがエネルギーだとは申しません。原子力も太陽光発電も大事です。やはり日本は狭い国で、植物バイオマスは少ない。しかし考えたら、20世紀の日本には石油はなかったのですが、世界第2位のエネルギー経済大国になりました。それは科学技術のおかげです。今度は植物の科学技術を磨かなければなりません。そのまま放っておいたら、たぶん20~30年後に日本は貧しい国に成り下がるかもしれません。最後に昨年、私は「植物力」(新潮選書)という本を出しました。ご一読いただければ幸いです。



植物力 - 人類を救うバイオテクノロジー -  
新名惇彦 著 新潮選書