

# わが国における木質系バイオ燃料の現状と将来展望

坂 志 朗

(京都大学大学院エネルギー科学研究科)



## 1 はじめに

46億年という地球の長い歴史の中でほんの一瞬にすぎない200年余りの短期間に化石資源が多用され、地球の温暖化で代表されるエネルギー・環境問題を引き起こしている。その結果、化石資源から得られる化学物質や燃料を循環型、更新型バイオマスから造り出そうとする動きが近年活発化し、バイオマス資源によるポスト石油化学が注目されている。そこで本稿では、バイオマスの王者である樹木などのリグノセルロース系未利用バイオマスからのバイオ燃料(図1)について紹介する。

## 2 わが国におけるバイオマス資源

わが国で発生するバイオマス資源は年間約3億

7,000万トンであり、うち約7,700万トン(CO<sub>2</sub>換算で約1億2,700万トン)が有効利用されずに廃棄され、CO<sub>2</sub>となって放出されている。これは1990年におけるわが国のCO<sub>2</sub>排出量の約11%に相当する<sup>1)</sup>。したがって、バイオマスのエネルギー源や有用物質としての利用は、京都議定書におけるわが国の温室効果ガス排出量削減目標の達成に有効であるのみならず、今後の地球環境にとっても極めて重要である。

## 3 バイオエタノール

エタノールには、バイオマスからのバイオエタノールと化石資源であるエチレンからの合成エタノールがあるが、地球の温暖化抑制に寄与し得るのは前者である。バイオエタノールには、発酵エタノールとバイオガスからの合成エタノール、さらに間接変

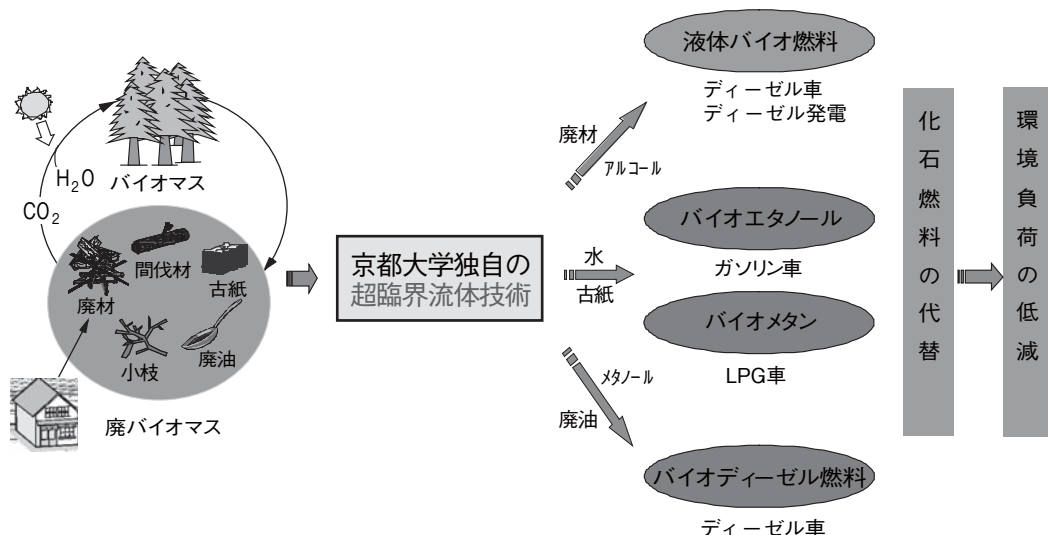


図1 環境負荷の小さい超臨界流体技術によるバイオ燃料の創製

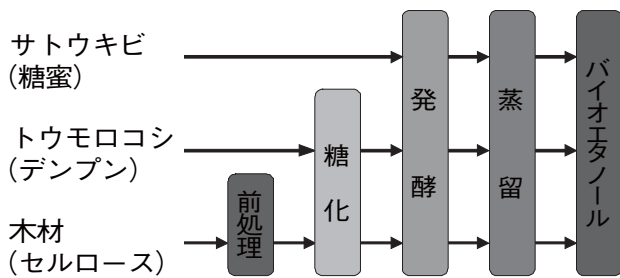


図2 種々のバイオエタノール生産形態

換バイオエタノールがある。

### 3.1 発酵エタノール

発酵エタノールでは、原料として糖蜜やデンプン、セルロース系資源が利用できる。いずれの場合も、それらの構成糖 D-グルコースのエタノールへの発酵であり、主として糖蜜やデンプン資源が用いられてきたが、食糧問題との関係もあり、近年セルロース系資源が注目されている。しかし、セルロースは、図2に示すように、糖蜜やデンプンに比べ、単糖への糖化が容易でなく、前処理が不可欠である。

いずれの場合も、酵母などの微生物によって嫌気性条件下、糖質（1モル）はエタノール（2モル）と CO<sub>2</sub>（2モル）に変換される。



これより糖質6個の炭素は4個がエタノールに変換され2個は CO<sub>2</sub> となり、炭素の利用効率が低い。

### 3.2 バイオガスからの合成エタノール

バイオガス合成エタノール法<sup>2)</sup>は、バイオマスを水蒸気ガス化して CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> の合成ガスとし、これらから嫌気性菌 *Clostridium ljungdahlii* を用いてエタノールを生合成する方法で、糖類のみならずリグニンも合成ガスとしてエタノールに変換できる点に特徴がある。CO<sub>2</sub> へのガス化を極力抑え、より多くの CO をエタノールへと変換することが課題である。

### 3.3 間接変換バイオエタノール

間接変換バイオエタノールでは、①糖の発酵による酢酸の生成、②得られた酢酸のアルコールによるエステル化反応、および③酢酸エステルの水素化分解によるエタノール生産の3プロセスが関与しており、それらから以下の反応が導ける<sup>3)</sup>。



糖質6個の炭素は6個ともエタノールに変換され、上述の発酵エタノールに比べて1.5倍のエタノール生産が実現する。

### 3.4 バイオエタノールの政策とゆくえ

エタノール生産に適する資源は、糖質・デンプン資源および木質系資源であるが、前者は現在、宮古島などでのサトウキビからの廃糖蜜や北海道での規格外小麦が利用の対象となっている。しかし、食糧問題との関連で、長期的に利用可能な資源は後者の木質系資源であり、森林資源、林産廃棄物、農産廃棄物などが含まれるが、その利用可能量は年間約3,000万トン、そこから得られるエタノールは従来の発酵エタノール生産で約840万kℓと推定される。

日本政府は2003年6月にバイオエタノールを3%混合したガソリン（E3）の使用を解禁した。3%と低濃度であるためエンジンの腐食の問題はなく、現在の自動車をそのまま利用することができる。沖縄、宮古島では、全島あがてのE3ガソリン利用が府省連携の国家プロジェクトとして2008年度からスタートする。将来E10に伸びることを想定した検討もなされるが、そのためにはわが国で利用されるガソリン約6,000万kℓのうち600万kℓがバイオエタノールで代替されなければならない。今後この量をどのようにして確保するかが課題である。

一方、ガソリンへのエタノール混合にはいくつかの問題点がある。その一つはエタノールとの共沸現象により混合ガソリンの蒸気圧が上昇し、蒸発ガスが増加する点にある。さらに、吸水しやすいエタノールの添加による水分の混入が混合ガソリンの相分離を招き、燃料品質の劣化を引き起こす恐れがある。このような視点から、ETBE（エチルターシャリーブチルエーテル）をガソリンに添加することが検討され、昨年（2007年）4月27日より首都圏中心に50のガソリンスタンドで7% ETBE（エタノール3%に相当）添加ガソリンである“バイオガソリン”が販売されている。2010年度には全国に広げ、ETBE84万kℓ（エタノール換算；36万kℓ、原油換算；21万kℓ）が利用される予定である。

今後、バイオエタノールに対する注目は益々大きくなるものと思われる。とりわけ木質資源からのエタノール変換技術の確立は、わが国にとって“国産のエネルギー”を産出する点で極めて重要であり、科学技術創造立国を自負するわが国に課せられた大きな課題である<sup>4)</sup>。

#### 4 バイオメタノール

バイオマスのガス化によるメタノール合成には、植物系バイオマスのほとんどが原料（利用可能量約4,500万トン／年）となり、前述のエタノール生産に比べ原料の範囲が広い<sup>1)</sup>。

このメタノール製造では、ガス化プロセスで炭化物やタール状物質が生成しやすく、効率よくこれらをもガス化することがポイントである。そこで原料を粉碎し浮遊させて分解する噴流床方式が提案されており、バイオマスは $H_2$ 、CO および  $CO_2$  となる。次にガス精製改質塔にて、得られたガスが精製され、ガス組成が調整され、亜鉛系触媒を用いてメタノールが合成される。

原料に廃棄物を用いる場合、防腐剤として広く使用されてきたCCA薬剤（銅（Cu）、クロム（Cr）、ヒ素（As）からなる防腐剤）を含む建築廃材からは $As_2O_3$ などの有毒ガスが発生する。また、ダイオキシンの発生にも注意が必要で、これらの除去機能をもつガス化プロセスの開発が望まれる。

メタノール製造には現在、経済性の理由から天然

ガスが用いられているが、バイオメタノールへの転換が望まれる。バイオマスより $H_2$ とCOが得られれば、ジメチルエーテルへの変換もあわせて燃料電池や自動車燃料としての利用が可能となる。

#### 5 バイオメタン

一般に、家畜糞尿、水産加工残渣、投棄魚、下水汚泥などがメタン生産に適しており、利用可能量は年間2,900万トンと推定されている<sup>1)</sup>。しかし、メタン発酵に供する資源は他にも多くあり、セルロースなどの多糖類、タンパク質や脂肪なども対象となる。

メタン発酵の初期段階では、セルロースなどの多糖類を単糖に分解する酵素（加水分解菌）が分泌され、酸生成細菌によって酢酸やプロピオン酸などの低分子有機酸や水素に変換される。さらに有機酸はメタン生成菌によりメタンと二酸化炭素に変換される<sup>5)</sup>。

さて、木材などのリグノセルロースからは超臨界水処理により短時間で効果的に多くの有機酸（ギ酸、ピルビン酸、グリコール酸、酢酸、乳酸、レブリン酸など）が得られるため、これらをメタンに誘導<sup>6)</sup>、さらにメタンモノオキシゲナーゼによりバイオメタノールに変換が可能である<sup>7)</sup>。

#### 6 液体バイオ燃料<sup>8)</sup>

近年我々は、木質バイオマスを20～30分の超臨界メタノール（ $350^\circ C / 43MPa$ ）処理で可溶化し得ることを見出した<sup>8)</sup>。上述のバイオメタノールを

●好評発売中・創立20周年記念出版

### 木を植えよう

人生にはさまざまな出会いがあり、別れがある。その時々思いは忘れ難く、心に深く刻まれている。本書はそんな思いを「木を植える」ことで長く語り継ぐ縁としてほしいとの願いをこめて「記念樹にふさわしい木とそのいわれ」を出版したものである。緑化行事の参考図書として広く配布していただければ幸いである。

目次／新築・転居祝い／結婚祝い／結婚記念日／帯祝い／誕生祝い／子供の成長／父や母への感

謝／願を立てる／合格祝い／巣立ち記念／婚約や友情／退院・快気祝い／敬老や長寿祝い／故人をしのぶ／成人記念／卒業記念／入学、入社／開業、開所、開店／創立記念日／安全祈願／豊作、大漁祈願／昇進、栄転／誉栄をたたえる／出版／ホールインワン／優勝、勝利の記念／植樹の基礎知識。

監修林野庁／指導小林義雄／制作第一プランニングセンター／A5判64頁（カラー）、

価格550円（1000部以上500円）

申込先／日本緑化センター／〒107-0052

東京都港区赤坂1-9-13／三会堂ビル

電話03（3585）3561 FAX03（3582）7714

ここに用いることで、100%バイオマスベースの液体燃料が得られることになる。木質バイオマスは古くから燃料として用いられてきたが、固体でかさ高く取り扱いにくい。しかし、このような液体バイオ燃料が創製できれば、その意義は大きい。また可溶化した化合物には多くの有用な化学物質が含まれており、我々の身のまわりのバイオ材料へと転換することも可能となる。

## 7 バイオディーゼル

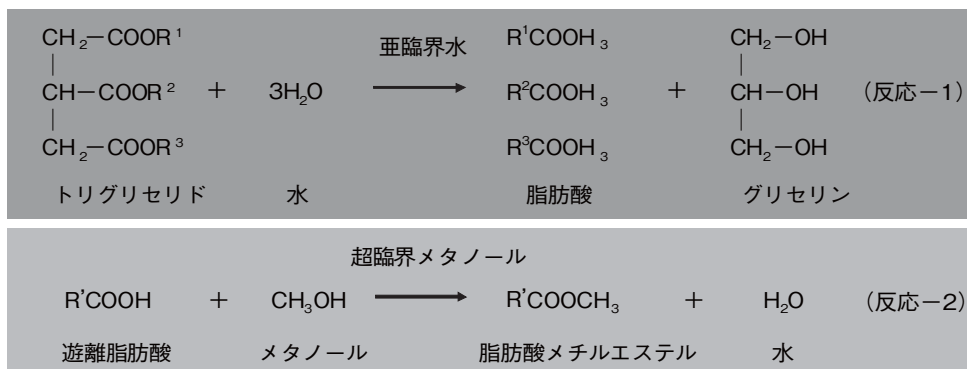
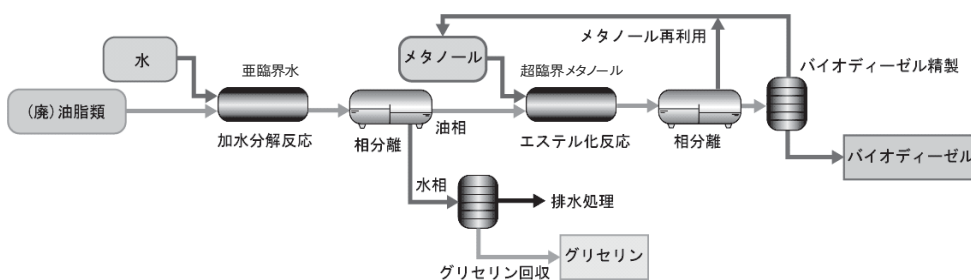
樹木の総体利用を考える上で、樹木由来の油脂資源の利用は重要である。特に、アブラヤシ (*Elaeis guineens*) からのパーム油は大豆油に次ぐ生産量をほこり、近年マレーシアやインドネシアでそのプランテーションが拡大している。また、ナンヨウアブラギリ (*Jatropha curcas*)、カタワ (*Hura crepitans*)、ミフクラギ (*Cerbera manghas*) 等の樹木の種子にも油脂が豊富に含まれている。

油脂資源の利活用のひとつにバイオディーゼル燃料（脂肪酸メチルエステル）があり、商業的にはアルカリ触媒法が適用されている。しかし、この方法では反応後に触媒やアルカリ石ケン除去する必要がある<sup>9)</sup>。そこで我々は図3に示す二段階超臨界メ

タノール法（以降二段階法と呼ぶ）を開発した<sup>10)</sup>。トリグリセリドを亜臨界水（270℃、10～15MPa）にて加水分解して脂肪酸とグリセリン（反応1）とし、水に溶解したグリセリンを脂肪酸から分離する。続いて得られた脂肪酸を超臨界メタノールでエステル化（反応2）とする。この方法はアルカリ触媒法とは異なり無触媒法であるため、バイオディーゼルの精製が容易でアルカリ石ケンをつくらず、遊離の脂肪酸もバイオディーゼルとなり、収率が向上する<sup>10)</sup>。

バイオディーゼルは、酸性雨の原因となる硫黄酸化物（SO<sub>x</sub>）や黒煙が軽油に比べて少なく、浮遊粒子状物質が減少するため、排ガスのクリーン化効果がある。さらにバイオマス起源であるため、地球上の炭素バランスを崩さないなど、環境保全の観点から好ましい燃料である。

バイオディーゼルに対し、EUでは軽油に5～30%添加して利用しており、358万トンの生産量に達しているが、わが国では京都市を中心に0.4～0.5万トン程度の利用にとどまっている。日本における年間の廃油量は42～56万トンで<sup>1)</sup> 現実にはこのうち数万トン程度の廃油しか回収が見込めない。現在日本で利用されている軽油約4,100万ℓ（2003年度）



R<sup>1</sup>, R<sup>2</sup>, R<sup>3</sup>, R<sup>i</sup>; 炭化水素基

図3 二段階超臨界メタノール法によるバイオディーゼル製造プロセス

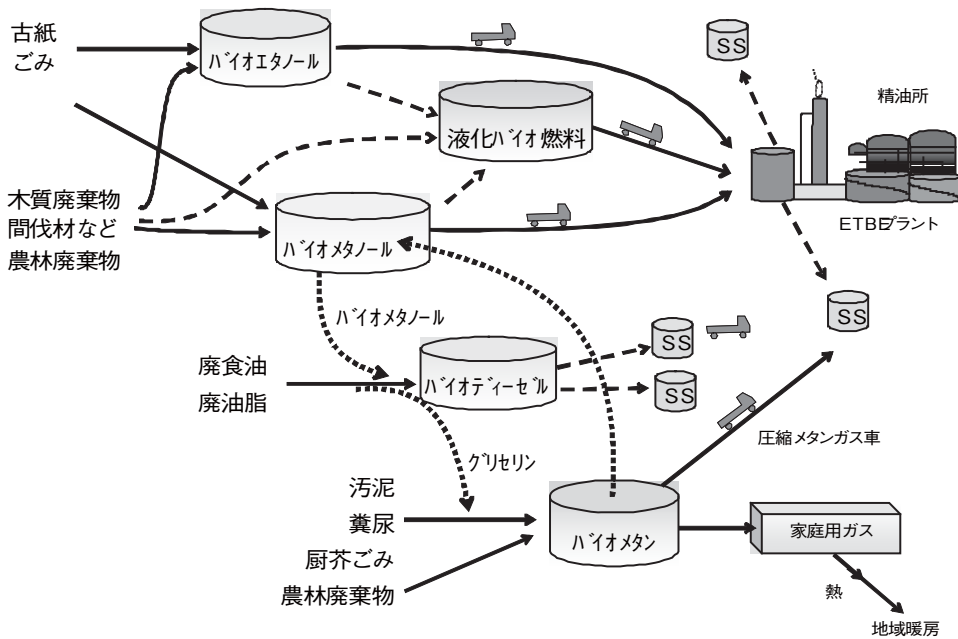


図4 ゼロエミッション型バイオ燃料生産・利用システム

の0.1～0.2%程度しかまかなうことができない。今後、休耕田を有効に利用して菜種栽培を推進するか、東南アジアに目を向け、アブラヤシのパーム油やナンヨウアブラギリ (*Jatropha curcas*) からのクルカス油を利用するなど原料の確保が課題である。

## 8 バイオマス資源のゼロエミッション型エネルギー生産・利用システム

種々のバイオマス資源からのこれらバイオ燃料製造プロセスは、現在実用化に向けて個々に検討が進められている。しかし、それぞれの製造プロセスを単独で確立するのではなく、それらを相互に融合し、製造過程で排出する副産物も利用するゼロエミッション型バイオ燃料製造プロセスを構築することが重要である。その概念を図4にまとめて示す。すなわちバイオメタンはメタンモノオキシゲナーゼ(MMO)によりバイオメタノールに変換され、バイオエタノールとともに固体バイオマスを液体バイオ燃料に変換する溶媒として利用される。また、油脂類からのバイオディーゼル製造では、バイオメタノールを反応溶媒とし100%バイオマスベースの究極のバイオディーゼルの製造する。さらに、副生するグリセリンはバイオメタンへの変換の良基質として再利用する。これらの融合、相互乗り入れにより、廃棄物を産出しないゼロエミッション型バイオ燃料

生産とその利用システムの構築が可能となる。

化石資源の枯渇と地球環境の悪化に伴い、今後益々バイオマス資源の有効利用が進展するものと思われる。その際のゼロエミッション型エネルギー生産・利用システムのモデルの一つとしてここでの提案が役に立てれば幸いである。

### <引用文献>

- 1) 南 英治, 坂 志朗, バイオマス・エネルギー・環境、アイピーシー、東京、2001、pp.61-103.
- 2) Klasson, K.T., Ackerson, M.D., Clausen, E.C., Gaddy, J.L., Enzyme Microb. Technol. 14, 602-608, 1992.
- 3) Eggeman, T., Verser, D., Appl. Biochem. Biotechnol. 129-132, 361-381, 2006.
- 4) 坂 志朗, 化学 61, 12-16, 2006.
- 5) バイオマスハンドブック、日本エネルギー学会 編、オーム社、東京、2002、pp.152-156.
- 6) 吉田 敬、江原克信、坂 志朗、キッチン・キトサンの開発と応用、シーエムシー、東京、2004、pp.51-61.
- 7) 京都大学 21 世紀 COE 広報、環境調和型エネルギーの研究教育拠点の形成、2003 年度版
- 8) 坂 志朗、南 英治、ECO INDUSTRY 7, 5-13, 2002.
- 9) 坂 志朗、Dadan Kusdiana、バイオマス・エネルギー・環境、アイピーシー、東京、2001、pp.454-462.
- 10) 坂 志朗、Dadan Kusdiana、Jasco Report 7, 10-13, 2003.