

木質バイオマスの動向と今後の展開

小島康夫

(平成21年1月13日受付)

要約

林地や工場などから発生する木質系バイオマスは、利用しやすい固体、液体、気体燃料に変換されることで魅力的なエネルギー資源になってきている。バイオエネルギーシステムは廃棄系木質バイオマスを含むこともあり、バイオマス変換技術は生化学的、熱化学的、物理化学的などの方法を用いて行われる。環境意識の高まりと原油価格の高騰は再生可能なエネルギー資源の利用を推し進めている。木質系バイオマスは持続的資源となりえるし、限りある化石資源に対して有用な再生可能な代替品ともなりうる。この論文では、日本国内における木質バイオマスの利用技術の展開とその利用における問題点を概説した。

新大農研報, 61(2):119-126, 2009

キーワード：木質バイオマス、カーボンニュートラル、バイオエタノール、木質ペレット、熱分解ガス

1. 何故木質バイオマスなのか？

最近の原油価格の乱高下や世界金融危機など不安定な経済情勢は国際的な地球温暖化対策にも複雑に影響を与えている。2008年12月にポーランドのポズナニ市で開催されたCOP14では2013年以降のいわゆるポスト京都議定書に関して議論されたが、新たな基準年の設定やセクター別削減目標値を導入したいという日本とEUや米国などとの対立、中国やインドにも削減目標値を設定しようとする先進国と途上国の対立が鮮明になってきた。さらに、不安定な経済情勢を背景に積極的な温室効果ガス削減に向けた国際協調は各国の財政的な利害関係もからんで合意に至らなかった。2021年8月に開催されるCOP15で本格的な議論を行うことは採択されたが、その会議では米国とロシアの動向が会議の行方を大きく作用することになるであろう。

新エネルギーの普及は省エネルギーと相まって地球温暖化対策の大きな柱となってきたが、この新エネルギーの普及は原油価格の高騰によって加速してきた側面もある。化石資源の代わりに新エネルギーを利用することの経済的メリットが出てきたのである。しかし、直近の原油価格（12月現在WTI原油価格は40ドル前後）の急落は短期的ではあるが新エネルギーの経済的メリットを失わせている。また金融危機は資本流通の停滞だけに留まらず、産業界全体に大きなダメージを与えていることは周知の通りである。各国の政府予算は大幅にこの対策に充てられ、新エネルギー関連の予算は当初予想より削減されている。一方で、この金融不安による産業界への影響はとりわけ自動車産業に大きな影響を及ぼしている。自動車販売台数は世界的規模で大きく落ちこんでいるのである。このことは製造ラインの縮小を余儀なくさせ、生産工程で排出される二酸化炭素排出量を削減すると同時に、世界の自動車台数の減少によりガソリンや軽油など車両燃料の需要も減少している。世界中で化石資源の消費拡大が減速し、結果的に大きな温室効果ガス抑制効果が生まれて、皮肉にもこの効果は新エネルギー普及より大きいとされる。

現在のエネルギー問題は地球温暖化などの環境問題と化石資

源の枯渇という資源問題の両方にまたがっている。この両方に深く関わっているのが森林ということになる。木質資源を燃料として使用することは有史以来行われてきたことであるが、最近になって木質バイオマスが注目されてきている。資源問題としては石油や天然ガス、石炭の資源埋蔵量と関係する。石油埋蔵量は約1兆億bblで可採年数は41年、天然ガス埋蔵量は約146兆億m³で可採年数は62年とされており（BP統計、2007）、ともに今世紀中頃に消滅する。石炭は埋蔵量が9,800億tで可採年数は200年ということであるが、これは単純に埋蔵量を現在の生産量で割っただけであり、石油や天然ガスを使い切れれば、エネルギーは石炭に集中するようになる。こうなると石炭も100年も持たない。このような資源の問題が近い将来に直面することになることから、現存量が4,220億tと見積られている森林資源（FAO、2004）を効率よくエネルギー利用することが重要とされてきているのである。この森林資源はバイオマスエネルギーとして新エネルギーに位置づけられ、他に新エネルギーとしては他に風力エネルギーや太陽エネルギーが知られている。これらは化石資源を使用せずに電熱供給を行なえるために温暖化抑制効果が期待されている。バイオマス資源は農林業からの生産物や廃棄物、家畜糞尿などを含んでおり（表1参照）、またその形態や分布が多様であるために個々に利用技術や利用形態を考えなくてはいけない難しい対象でもある。

森林資源の場合、化石資源と異なって再生可能であり、利用した分だけを植林を行い、全体として森林の機能を損なわないように利用していくことでエネルギー源として永久に使用していくことが可能である。そうはいつても、伐採した木材をすべてエネルギー源に利用するわけにはいかないのである。伐採した木材から派生する未利用部、使用済み木質材料などを利用していくことが重要である。できるだけ利用価値の高いところ（建材や家具）から順に利用価値の低いところへリサイクルしていく。これをカスケード型リサイクルと言い、他に利用方法がなくなる最下層の木質資源をエネルギーとして利用することが上手な木質バイオマスの利用法となる。また利用されていない木質資源でも無理に利用することで逆に大きなエネルギーを失う場合もある。例えば奥深い山奥に残された枝などを町に運んで

表 1 バイオマスの賦存量と利用率

種別	2002 年		2005 年	
	賦存量、万 ^ト	利用率、%	賦存量、万 ^ト	利用率、%
家畜排泄物	9,100	80	8,900	90
食品廃棄物	1,900	10	2,200	20
製材工場廃材	610	90	500	90
建設発生木材	480	40	460	60
下水汚泥	7,600	60	7,500	64
林地残材(間伐材含まず)	390	0	370	0
農作物非食用部	1,300	30	1,300	30

2007 年バイオマスニッポン総合戦略資料より

取り出すエネルギーよりも、この枝を集めて運搬するエネルギーの方が大きくなれば意味を持たない。LCA で評価することも必要なのである。利用すべきバイオマスと利用できないバイオマスがあるのである。

木質バイオマス利用してカーボンニュートラルという概念がある。すなわち、「樹木をはじめ植物は光合成で二酸化炭素を固定し体の一部として取り込んでいることから、木質バイオマス由来の炭素は炭素循環のサイクルに入っている炭素である。従って、これを燃やして二酸化炭素を排出しても二酸化炭素の増加にはならない。大気中に返すだけである。」という考え方であり、これは京都議定書でも認められている。しかし、だからといってむやみに木質バイオマスを利用するわけにはいかないのである。炭素循環は時間軸の概念でもあり、炭素固定と炭素遊離の速度差のひずみが生み出した現象でもある。80 年や 100 年かけて生育してきた樹木を数分で燃やすことに問題がないと考える人はいないであろう。1 年間で日本国内の森林に吸収される二酸化炭素は約 6 千億トン程度であり、この範囲で森林資源をエネルギー利用することで始めてカーボンニュートラルという概念が成立するのである。

また、森林資源の利用には他のバイオマスと決定的に異なる側面がある。未利用木質バイオマスや廃棄系木質バイオマスを利用することで、林業や林産業に経済効果を与え、それを資金に植林など森林を整備・育成されることが期待されるのである。京都議定書ではよくプロトコルが重要視されているがむしろメカニズムのほうが重要である。いわゆる CDM (クリーン・デベロップメント・メカニズム) と呼ばれる規約で、そのなかで森林を二酸化炭素吸収源としてその維持・管理活動に対して二酸化炭素の吸収量を割り当て、プロトコルで示されている二酸化炭素削減目標値に加えることが認められている。日本では 1990 年基準で 6 %、現時点で 14% の削減が義務付けられているが、ここに最大 3.9% の森林吸収量を加味して、2.1% (90 年ベース) にまで削減義務値が減少できるのである。森林吸収量が最大 3.9% とされているが、すべての要因を満たせば、という条件付きである。現状では 2.5% 程度しか認められないであろう。森林吸収の条件は AF-CDM (新植林)、RF-CDM (再植林)、持続的森林経営の 3 点が重要な指標となる。日本ではすでに新植林や再植林を行なう場所はない。とすると 3 番目の持続的森林経営が対象となる。これは 1990 年以降、適切な森林施業 (植栽、下刈、除伐・間伐等の行為) が行われていること、法令等に基づき伐採・転用規制等の保護・保全措置がとられていることが条件となり、日本では 60% の森林しか適用さ

れないのである。森に人手が入らない、除伐・間伐が行なわれていない、などの理由で 40% が森林吸収林として認められていない。除伐・間伐が行なわれない理由はコストの問題であり、間伐材・除伐材は土場に運んでも利用されずに放置され、廃棄物扱いになるだけである。これらがエネルギー材として利用されるなら資源として価値も生まれる。さらにエネルギー材であれば伐採から搬出までの作業で、柱材などのように大事に扱う事もなく、粗雑な作業で充分である。作業コストも低減し、搬出材も売れる。木質バイオマスがエネルギー利用され、二酸化炭素排出削減に寄与することができる。しかも森林整備により、二酸化炭素吸収林として評価され、認定最大値である 3.9% に近づけることができるのである。すなわち二重の削減効果が生まれるのである。このように様々な面で木質バイオマスを利用することが重要になってきているのである。どのような利用方法があり、どのような問題が起きているのか、以下で論じる。

2. 木質バイオマスのエネルギー評価

日本国内におけるバイオマス賦存量と利用率についてはバイオマスニッポン総合戦略 (2007) で資料として公表されている (表 1 参照)。ここでは廃棄していない割合を利用率としているが、エネルギー回収や循環利用などに利用されているかどうかは不明であり、家畜排泄物や下水汚泥は堆肥や土壌剤と称して効率の悪い減容化処理が施され (処理工程で大量の二酸化炭素を排出するなど)、畑地に散布されるものも少なくない。木質バイオマスの賦存量は製材端材や樹皮、建設発生木材、林地残材 (枝条や切捨て間伐材など) を合わせると約 2,000 万トン程度と予想される (BP 統計 2007)。各段階で排出される木質バイオマスはすべてエネルギーとして利用することは出来ないが、ほぼ 60% が未利用木質バイオマスとして捉えられる。さらに経済的、物理的理由から利用可能な量はその 50% 程度と見込まれている。すなわち約 600 万 t になる。こうした見積りは旧来の集材形態から評価されているもので、エネルギー利用としての集材技術をあらたに改良することでさらに利用可能な木質バイオマス量は増加する可能性がある。こうした資源量評価はまだ不確定要素が多く、今後は全国レベルで精度の高い調査とその結果に基づいた評価をしていく必要がある。

さて、600 万 t の木質バイオマスがエネルギー利用されるとして、そのエネルギー評価を行うと、高位発熱量ではおよそ 120 PJ になる。P は 10^{15} を意味する。このエネルギー量は石油約 300 万 t に相当し、日本国内で使用される石油量の 1 % に当

表2 石炭、木材、重油のエネルギー単価

	石炭 ^{*1}	木材	灯油 ^{*2}
単価 (円)	10～12/kg	8～16/kg	60～80円/L
高位発熱量 (MJ/kg)	28.9	18.1	36.7
エネルギーコスト (円/MJ)	0.35～0.42	0.55～0.83	1.63～2.18

*1：2008年10月価格 ジェトロセンサー 2008年12月号

*2：財務省貿易統計 2008年10～12月速報値より計算

たる。この1%をどう評価するかはそれぞれであろうが、未利用の木質資源を有効に利用することが基本であり、木質以外の農林産廃棄物や都市型有機性廃棄物などの有効利用も含めて、こうした積み重ねが環境問題や資源問題を解決していくことになる。

ここで重要な点は、木質バイオマスの「木質」という定義であるが、木部を形成している植物という意味では、チシマザサや竹類は木質資源となる。いわゆるリグノセルロースという概念になる。上述したように木質バイオマスの賦存量は約2,400万トンとされているが、これは政府機関の統計にすぎない。資産とならない（経済的価値を有さない）植物は統計の対象外である。その辺の雑草はもちろん、笹や竹も対象外である。笹の中でも木部が発達しているチシマザサ（別名ネマガリダケ）は高さ3mにも達し、稈の部分も太く硬いので木質資源とされる。こうした笹や竹は地下茎を伸張していくことで生育地を拡大し、樹木の更新や畑地への侵食を行なっている。また生態系の多様性を縮小させ、地下茎は浅いために表土の崩壊が起こり易いとされる（表土固定の初期には笹を利用することもあるが表層固定に留まる）。このように厄介ものの笹・竹であるが、掻き起し（レーキなどで地下茎を切り刻む）や刈払い（地上部を切り払う）などの作業はほとんど行われていない。これらの賦存量（経済的資源ではないので正しくは蓄積量）は例えばチシマザサで約9千万トン、竹類で約800万トンと見積られている（林業科学技術振興所、1983）。これらの20%が利用可能量としても2千万トンに達する。しかもこうした笹・竹は成長が著しく早いのである。木質バイオマス以外でもこのような統計には表れないバイオマス資源がある。巨大海藻類であるジャイアントケルプなどもそのひとつであろう。こうした地域のバイオマスを上手に利用し、利用することで2次的な効果も生まれるような利用システムを構築することが重要になっている。

価格変動が大きくエネルギー単価を示すのは難しいが、1例として、2008年10月～12月時点での石炭、木材、灯油の単価とエネルギーを比較した結果を表2に示した。木材の単価はここではトンあたり8,000円～16,000円にしているが、場合によってはもう少し安く入手できることもある。原価0円の林地残材にしても、集材コスト、チップ化コストなどを見積もれば2,000円/m³近くの単価にはなってしまう。木材のエネルギー単価は石炭よりやや高いが、灯油よりはかなり低い数値で示される。さらに、化石資源にかけられる炭素税（炭素ベースでトンあたり3,000円の予定）や環境税が施行されると、木質バイオマスも大きな経済的メリットが生まれると期待する向きもあるが、エネルギー形態として木材（もしくはチップ）はエネルギー密度の低さや運送コストが高いなどの問題があり、固

体燃料としてそのままエネルギー利用することは燃焼機器などが限定される。このためにエネルギー形態を変える必要性があり、ガス化、液化などの後述する技術開発が盛んに行われてきているのである。このように木質バイオマスはそのまま利用するのではなく、さらに何らかの形態変換の工程を必要とし、ここでコストがかかってしまうのである。結局は灯油と比較してもいくらか割高になってしまっているのが現状である。こうした背景から、現状では木質バイオマスのエネルギー利用についてはカスケード型利用の最下層である廃棄系木質バイオマスが対象とならざるを得ないのである。木質バイオマスが本格的にエネルギー市場で優位性を持つには、木質バイオマスの利用技術をいっそう開発していくことや資源集約コストの削減も重要であるが、施策としてエネルギー行政に委ねざるを得ないのも事実である。バイオマスエネルギーが事業として経済的に成立するような社会環境を作り上げなければ地球環境の問題は解決できないのである。

3. 木質バイオマスのエネルギー利用

木質資源のエネルギー利用は種々の変換工程を経て利用される。変換方法は表3に示すように3つに分類される。

3.1 物理的変換と利用

最もコストのかからない利用法であり、木質バイオマスを破碎し燃焼するというものである。主に専焼と混焼とに分けられ、専焼は木質資源だけで燃焼するもので、薪ストーブの他、チップ状に破碎してボイラー燃料として用いる場合と、粉状にまで破碎してからペレット状に成型してストーブ燃料やボイラー燃料として用いる場合がある。表4に用途別の適合性（横山伸哉他、2002）を示した。薪はストーブや小型ボイラーなどで用いられるが、ハンドリングの問題はある。チップは大型のボイラーで利用するには有効である。熱利用としてボイラー燃料に利用されている例は全国的にも多いが、発電用としての利用は比較的少ない。この発電についていくつかの事例を紹介する。ひとつは秋田県能代市にある木質バイオマス発電所である。ここでは平成15年に事業化を行い、スギ樹皮・製材端材など約5千トンを燃料として発電規模を3,000kWhを目標としている。事業実施主体は能代森林資源利用協同組合で、組合員5団体（森林組合、木材団体2、チップ企業、ボード企業）、構成員数は70社となっている。事業費は14億4千3百万円（国1/2、県1/10、市1億）で行なわれた。原料は逆有償で受入れ、組合員は非組合員より安く廃材を引き受けてもらえる。現在では周辺の木工場の閉鎖や輸入材の減少で原料不足が続いて、稼

表 3 木質バイオマスの変換方法とその利用形態

変換法	エネルギー形態	利用形態	エネルギー
物理的変換 破砕、成型	チップ、ペレット バイオブリケット	専焼 混焼	熱供給、発電 熱供給、発電
熱化学的変換 熱分解ガス化 熱分解液化 高压ガス化・液化	燃焼ガス (メタン、一酸化炭素、水素) メタノール変換、DME 変換	タービン燃料 エンジン燃料 燃料電池	熱供給、発電 熱供給、発電 発電
物化学的変換 エタノール発酵 メタン発酵 水素発酵	エタノール メタン 水素	混合ガソリン 消化ガス発電 燃料電池	自動車燃料 熱供給、発電 発電

バイオマスハンドブックより

表 4 直接燃焼における利用形態適正

	ストーブ	小型 ボイラー	中・大型 ボイラー
薪	良	良	悪
チップ	悪	中	良
ペレット	良	良	中

バイオマスハンドブックより

働率が下がってきている。

もうひとつは岐阜県白川町の木質バイオマス発電所「別称：森の発電所」である。こちらは規模が小さく、600KWh で 1 時間 3 t 程度の廃材を利用している。事業主体は東濃ヒノキ製品流通組合で、総事業費 5 億 5,886 万円で、国（林野庁）が 2 億 6,600 万円、県が 5,300 万円、町費 1 億 5,000 万円、自己負担 8,951 万円を投入して設立された。電熱は町内の工場などに配給され、売電の必要はない。

また最近ファーストエスコ(株)が国内 3 箇所 で 1 万 KW の木質バイオマス発電を行なっている。山口県岩国に「株式会社岩国ウッドパワー」、福島県白河に「株式会社岩国ウッドパワー」、大分県日田に「株式会社日田ウッドパワー」である。これらは地域に木質バイオマス発電の会社を設立し、電力会社に売電を行なっている。それぞれ蒸気タービンでの発電を行っており、使用する木質バイオマスは年間 10 万トン前後である。この原料は県内だけでは不足するので、周辺の県からも木質バイオマスを供給する組織を立ち上げて、通年の原料確保が必要となる。

ペレットは薪と同様に小型ボイラーやストーブで有効であり、自動供給が可能なことなどハンドリングも良い。木質ペレットは 1970 年代から欧米で発展してきた。ペレット製造には設備費や製造コストが高く、まだ日本では事業化が難しいところもあるが、ペレットストーブの保有台数は急激に増加してきており、関心は高まってきている。一時期は石油ショックの影響で木質資源が注目され、1980 年前後では国内で 30 近いペレット製造工場があったが、石油価格の低下などで市場性を失い、2 工場まで減少した。しかしバイオマスエネルギーの利活用が重要視されてきている現在、再び注目されるようになり、全国で 30 工場を超えるようになってきた。さらに全国的にペレット生産を検討している地域が数多くある。問題は、未だ日本ではペレットの需要が多くないことであり、需要と供給のバラン

スを取りながら発展させていかなければならない。木質ペレットの製造は、破砕—乾燥—粉碎—成型—冷却—選別の工程が必要になる。成型はスクリュウ押し成型方式、ロール展圧成型方式（フラットダイ、リングダイ）があるが、最近主にはリングダイ展圧成型が採用されている。この方式では、ダイス内の温度を 100～150℃にして、圧力を加えながら押し出し切断することでペレットが出来るが、原料の性状や粒径、含水率などで製造条件が微妙に変化し、経験的に条件を設定していくことになる。木質ペレットの価格は 30～50 円/kg 前後で販売されているが、利用者にとってはこの程度が適当であり、最近の原油価格からすると 35 円程度で市場性が生まれる。

混焼では、石炭とオガ粉を混合して成型するバイオブリケット、都市ゴミなどと木屑を固形燃料として成型する RDF などが代表的である。他にも古紙や農産廃棄物、廃食用油などと木質資源を混合した固形燃料化は将来的に有望である。森林資源がさほど豊富ではない地域でも他の廃棄系有機資源で原料を補うことができるのであれば、供給力が増加する。ただし、こうした木質資源と他の有機資源を混合する場合は、発酵性の高い有機資源はストックの際のメタン発生に注意が必要である。

3.2 熱化学的変換と利用

これは、木質資源を熱処理してエネルギー密度を高めること、ガス化や液化でハンドリング性を向上させること、新たなエネルギー源を作出することなどを目的として行われる変換法である。

1) 炭化

最も古くから行われているのは炭化であり、昔から燃料はもとより浄化や除湿などに使われてきた。また高カロリーであるため、鑄造にも欠かせない燃料でもある。炭化自体は熱損失が大きい、その野外での利用の簡便さは他を圧倒する。特別な器具をいっさい必要としないで、煮炊きが可能である。また燃焼時に水を発生しないので魚や肉などの食味を損なわないで焼ける。発電や熱供給用のエネルギーとして利用は困難であるが、近年、燃料以外の用途で使用されることが多く、土壌改良材などで用いることも多い。この利用法は恒久的な炭素固定法でもあり、循環系炭素を減少させることができる。自然炭と呼ばれる、火山弾が森林に落下して自然にできた炭は富士吉田や鹿児島高知町で発見されており、数千万年以上も前にできた炭で、安定して炭素を固定したままである。

2) 熱分解ガス化

熱分解ガス化は木質資源を水蒸気や空気などのガス化剤を用いて800℃以上に加熱するもので、触媒を利用する場合もある。生成ガスとしては二酸化炭素、一酸化炭素、水素、メタンなどが含まれる。これらのガスをそのままガスタービンやガスエンジンの燃料にして熱供給や発電を行ったり、メタノールやDME（ジメチルエーテル）を合成して液体燃料や燃料電池の水素供給体として利用したりする。ガス化方式は多様で、表に示したように分類される（横山伸哉他、2002）。

木質バイオマスを原料として熱分解する場合は、常圧で連続式の直接ガス化法が一般的である。ガス化炉の形式は流動床、固定床、噴流床、ロータリーキルンなどが各メーカーで開発、試験されてきている。ガス化剤は空気、酸素、水蒸気、混合ガスなどが状況に応じて用いられる。熱分解温度を高温（800℃）で維持するには、ガス化原料の1部を部分燃焼させる必要があり、完全酸化に必要な酸素の20-30%くらいを導入する。得られるガスの発熱量は直接ガス化法で8-12 MJ/m³程度である。このガス化工程では炭化物やタール、フェノール類なども副生する。とくにタールは反応効率の低下やシステムの作動トラブルの原因となり、可能な限り少なくする技術が重要である。このために、熱分解ガス化炉のあとにガス改質炉を設置し、ここで高熱で水蒸気と接触させて完全にガス化を行う工程を入れる場合もある（伏見と堤、2007）。またガス化剤として酸素や空気を用いた場合に二酸化炭素濃度が高くなり、その後のガス利用に問題がある場合は、二酸化炭素を除去するシステムを導入することもある。

熱分解で得たガスの利用法には、直説利用と液化変換利用とに分けられる。直接利用はコージェネレーション（CGS）で発電—熱供給の燃料に用いる。ひとつはガスタービンで発電する方法であるが、これは発電効率が低く（20 - 25%）単独では用いられないが、複合発電法（ガスタービンで発電したあと、排ガスを熱交換して水蒸気をつくり蒸気タービンで再度発電する方法）を採用することで、発電効率を45 - 50%近くまで向上させることができる。またガスタービンの後の水蒸気を給湯・暖房に用いることでコージェネレーションが行われる。ただし、ガスタービンは大型のプラント向きであり、生成ガスの組成や熱量に対する条件が厳しく、最近では以下に述べるガスエンジンを用いる方法が一般的になってきている。ガスエンジンでは、車両用ディーゼルエンジンを改良して用いることが多い。基本

的にはデュアルフルール型で軽油などをバックアップ燃料として用いる。こうすることで、熱分解ガスの成分組成の変動や熱量の変動に対応して、バックアップ燃料を補完させて、安定して発電を行うことができる。コスト的に有利でありかつ小規模発電にも対応しており将来的に有望な発電システムとなる。この場合も排熱を利用して給湯・暖房が可能である。発電効率は30%前後であるが、熱交換器による熱回収で、最終的なエネルギー効率は80%を上回る。

間接利用である液化利用は、生成ガスを改質した後、メタノールやジメチルエーテル（DME）に変換する方法である。水素と一酸化炭素の比（モル比）を2：1になるよう組成調整してメタノールを合成し、モル比1：1にしてジメチルエーテルを合成することになる。メタノールは天然ガスから合成されるのが一般的であるが、熱分解ガスも改質によって優良なメタノール原料となることがわかり、燃料電池での水素供給用としてメタノールの需要が見込まれることから、技術開発が進んできている。また車両用液体燃料としての利用も検討されてきている。DMEは現状ではエアゾール噴射剤や塗料などに用いられ、国内で年間約1万tの需要であるが、環境汚染のない液化燃料として自動車用燃料や燃料電池向けの水素供給体として高い評価を得て、すでに天然ガスからの製造プラントも建設されている。最近ではフィシャー・トロプシュ（FT）合成により熱分解ガスから低級炭化水素を合成する方法も有力視されてきている。これは高効率な合成を可能にする触媒の開発が進んできているためである。

筆者らはこれまでに新たなガス化方法として、木材を炭化して、その木炭と水から水素を生産させる方法を開発し、北海道大学として特許を取得して現在石川県や埼玉県で実証試験を行っている。これは2段階ガス化法として開発したもので、炭化の過程で生産される木ガスを熱源として木炭の熱分解に利用し、水をガス化剤として水素リッチな水性ガスを得るもので、完全にタールの発生を抑え、高い発熱量のガスが得られる。また水素と一酸化炭素の生成比を自由に制御できるのが特徴である。図1にその概要を示した（Kojima and Umemura, 2005）。

3) 熱分解液化

通常の熱分解ガス化でも液化物（熱分解油、タール）は生成するが、液化を前提とする熱分解は急速加熱法という瞬間的に原料を高温に過熱する条件で行われ、高次反応（ガス化反応）を押さえながら熱分解を行ってタール生成量を増加させる方法である。得られるタールは直接燃焼用の燃料やディーゼルエンジンの燃料、化成品原料などに用いられるが、場合によってはクラッキングや水素化などの改質が行われ、用途を拡大していくことも検討されてきている。

表5 熱分解ガス化の分類

分類	条件
ガス化圧力	常圧 (0.1-0.12 MPa) 加圧 (0.5-2.5 MPa)
ガス化温度	低温ガス化 (700℃以下)、 高温ガス化 (700℃以上)、 高温溶融炉 (灰融点以上)
ガス化剤	空気、酸素、水蒸気、それらの混合気体、 二酸化炭素
加熱方式	直接ガス化法：ガス化原料の一部を酸素 と反応させて発熱させる 間接ガス化法：原料とガス化剤を外部より 加熱する
ガス化炉形式	固定床、流動床、移動床、噴流床、ロー タリーキルン、溶融炉など

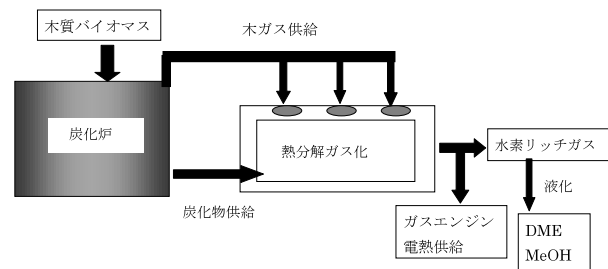


図1 2段階ガス化システム概要

4) 水熱ガス化

この方法はいわゆる超臨界水で木質原料を分解する方法で、水の臨界点 (22.1 MPa, 373°C) 以上の条件下で行われる。このような条件下では、高温・高圧の水自身が反応性が高く、有機物のガス化も容易に起こる。利点は反応後に反応物を冷却するだけでガス成分が水から分離し回収が容易であること、含水率の高い資源を対象にすることができることであり、原料に合わせた反応条件も圧力制御で容易に行えることである。またガス組成が単純でタール分が無く、二酸化炭素は吸収除去されているのでガス発熱量は 20MJ / m³ 程度に見積られている。問題は反応容器の耐性やシステムの低コスト化が課題であるが、各分野で精力的に研究されてきており、将来性の高い技術である。反応には活性炭やニッケルが用いられる場合が多いが、最近では複成分超臨界 (水やメタノール、二酸化炭素などの混合物で臨界を形成させる) も検討されてきている。

3.3 微生物学的変換と利用

1) メタン発酵

この技術は、農産廃棄物や家畜糞尿を対象に実用化されてきたバイオガス化法で、木質バイオマスを対象に検討されているものではない。一般的に木質バイオマスの発酵というとエタノール発酵であり、メタン発酵を想像することはないであろうが、塩素系化合物やカドミウムが付着し熱処理できない木質資源のエネルギー利用を考えれば将来的に重要な技術である。実験的にはこれまでに木質バイオマスなども扱われてきたが、現在はリグノセルロース資源の一種であるコーヒー滓 (ホロセルロースとリグニンで 80% を占める) のメタン発酵が検討されている。最近の缶コーヒーの需要増に伴いコーヒー滓の排出量が増加してその処理が問題になってきているのである。コーヒー滓を用いた事例を簡単に説明する。発酵の手順は、液化 (単糖化) - 酢酸・水素生成 - メタンガス化の工程になるが、通常は 1 段目の液化槽でコーヒー滓を 20% 濃度のスラリー状にして単糖化、酢酸・水素化を行い、2 段目の発酵槽でガス化を行う二相式発酵システムで行われる。このとき、液化槽で生成する有機酸が pH の低下をもたらし発酵阻害を引起すため、pH 緩衝剤で pH を 6 以上に保持することが重要である。条件の最適化によりコーヒー滓の約 30% がガス化し、生成ガス中のメタン濃度は 65% (V/V) まで向上する。木質バイオマスを用いたメタン発酵では、必ずしもコーヒー滓と同じ条件とはいえないが、最近、高濃度発酵の技術も検討されてきており、その研究成果を応用して新たな条件設定を行うことで効率的なバイオガス化法を確立していかなければならない。

2) エタノール発酵

表 6 に世界各国の年間エタノール生産量を示した。2007 年度は燃料用エタノールだけの数字を示してある。日本では工業用アルコールが生産されているものの、燃料用エタノールとなるとほとんど生産していないような数字である。世界ではブラジルと米国が飛び抜けて多量を生産している。多量の余剰農産物を有している両国において、ブラジルではサトウキビ、米国ではトウモロコシがエタノール生産の主原料になっている。また両国でのエタノール利用の多くが車両の燃料であることが特徴である。ブラジルではガソリンに 23% のエタノールを混合させた燃料 (E23) で、また米国では 10% のエタノールをガソリンに混合させた燃料 (E10) で車を走らせている。欧州でもエタノールを車の燃料に用いているところが多い。こうしたエタノールの燃料利用は、大気汚染抑制から各国とも強く推進

表 6 世界のエタノール生産

	2007	2006	2004	2002	2000
米国	246.0	191.5	143.2	96.0	76.0
ブラジル	190.0	167.4	146.6	126.2	106.1
EU	21.6	31.4	25.0	25.4	24.1
中国	18.4	38.5	36.5	31.5	29.7
カナダ	8.0	2.5	2.3	2.3	2.2
タイ	3.0	4.4	2.8	1.8	0.6
コロンビア	2.8	2.8	0.2	0.2	0.3
インド	2.0	2.0	1.7	1.8	1.7
日本	0.0004	2.8	3.0	2.7	2.9
その他	32.9	55.6	51.9	52.5	50.8
世界	495.9	497.9	411.5	339.3	293.0

2006 年まではすべてのエタノール、
2007 年は燃料用エタノール

してきている。同時にこれらの資源作物 (サトウキビ、トウモロコシ、ビートなど) の生産は農業政策、雇用対策とも連動して国家的事業になりつつある。日本では、2003 年 8 月に改正品格法 (揮発油等の品質の確保等に関わる法律) が施行され、上限 3% までのエタノール混入が認められた。現在のエタノール生産は主に作物を原料にしているが、食品価格の高騰を招き、また生態系の破壊が起きている事例も指摘されている事から、第 2 世代バイオマス資源としてセルロース系バイオマスからのエタノール生産技術も各国で開発が行われているところである。基本的には単糖化 - エタノール発酵という工程で行うが、各工程でそれぞれ多様な方法がある。単糖化ではセルラーゼなどの酵素糖化法も検討されてきたが生産コストで問題があり、現在は酸加水分解法が用いられている。この加水分解では濃硫酸、希硫酸、濃塩酸などが用いられ、ランニングコスト、腐食性、単糖回収率などでそれぞれに特徴がある。木質バイオマスはリグニン、セルロース、ヘミセルロースで構成され、この単糖化工程でリグニンは分離され専焼で熱回収を行う場合が多い。セルロースおよびヘミセルロースは単糖化されてグルコース、キシロース、マンノース、ガラクトース、アラビノースに変わるが、一部は不完全に分解されてオリゴ糖になっている。また広葉樹由来のバイオマスでは 5 単糖であるキシロースが針葉樹の倍の量が生成し、糖全体の約 30% に相当する。通常の発酵ではこの 5 単糖はエタノールに資化されずに残ってしまう。

こうした問題を解決するためにいくつかの方法が開発されている (近藤他, 2007)。NEDO との共同開発では 2 グループが技術開発を行なってきており、実証試験が進行している。ひとつは日揮グループで、特徴は濃硫酸法と呼ばれる酸加水分解で糖化を行ない、酸は回収する。酵母に加水分解性と C 5 発酵性を付与した細胞表層ディスプレイ酵母 (組換え酵母) を使用するもので、7 大学・2 公立研究機関・3 企業で構成されている。発酵方法は図 2 に示しているが、アーミング酵母とは、酵母の細胞表層で特異的に発現する遺伝子 (α -アグルチニン) と単糖をエタノールに資化する酵素を誘導する遺伝子を結合して酵母に組み込んで、酵母の細胞表層上で発現させる (細胞表層ディスプレイ) ようにしたものである。この方法により、アーミング酵母はオリゴ糖などを完全に単糖に変えると同時に、キシ

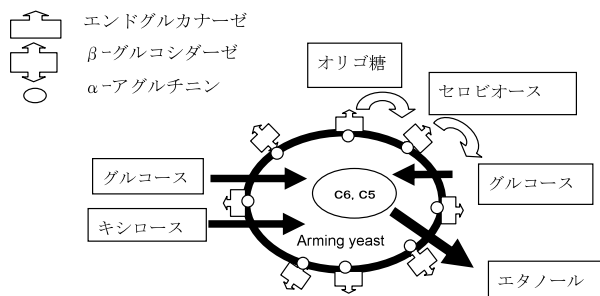


図2 日揮 G 発酵方法

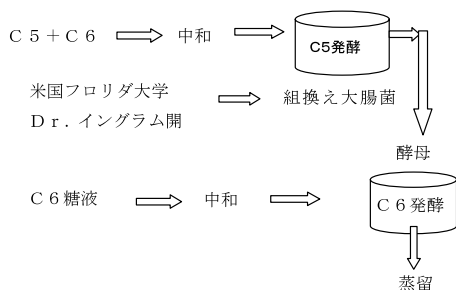


図3 月島 G 発酵方式

ロースをキシロースに変えてエタノールに資化させることが可能となる。

一方で、遺伝子組み換え大腸菌を用いたエタノール発酵法も研究されている。こちらは月島グループで、2段階方式を採用している。連続希硫酸法とも呼ばれ、最初に1%前後の希硫酸でペントース(C5)を単糖化し、次いで酸濃度を2%程度まで上げて、ヘキソース(C6)を単糖化する。C5単糖液はまず組換え大腸菌(KO11株)で発酵させ、C6糖化液は通常の酵母で発酵させるものもある。概要を図3に示した。この方式では酸は回収しない。

両研究グループとも生産コストでは未だ大きな問題を残しており、採算ベース(リッター当たり100円以下)を実現するにはかなり困難である。原料を逆有償で入手し、その処理コストを生産コストに組み込む事で採算性が生まれると考えられている。CCA(銅、クロム、ヒ素)や塩素系化合物などが付着している廃棄系木質資源のエネルギー利用の場合、カドミウムの揮散やダイオキシンなどの生成が問題になる熱化学変換は好ましくない。そうはいつてもそのまま埋立てすることは資源の無駄である。したがって、ここで述べてきたメタン発酵やエタノール発酵で有用なエネルギーを低温下で生成・回収し、有用成分を抜き取った後に毒物の分離処理を行うことが望ましい。また発酵処理以外で安全に有害物付着バイオマスを扱う方法は現在のところ見当たらないのである。

木質バイオマスからのアルコール生産実証プラントが国内2地域で立ち上がっている。ひとつは大成建設が主体となって、大阪府堺市の湾岸部に年間1,300キロリットルの製造能力を持つエタノールプラントを建設した。建設廃材を利用し、石油元売り会社に自動車燃料として販売するもので07年から量産を

行うとしている。もうひとつは、三井造船株式会社が主体となって進めているもので、NEDOとの共同研究で岡山県北部(真庭地区)に未利用の林産資源を主原料とするエタノール生産実証設備試験を開始した。木質系バイオマスを糖に変換後、VTT(フィンランド)が開発した酵母を用いて発酵、精製しエタノールを製造する。精製したエタノールはゼオライトの膜により無水化、利活用される。試験生産されたエタノールは真庭市の公用車などで試験使用されている。

4. 今後の展開

日本政府は農林漁業有機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(平成20年度45号)を制定し、これを受けて法令整備が行われ、10月1日に農林漁業バイオ燃料法が施行された。これはバイオマス利活用において各種の税制、金融、予算上の支援を行なう事を規定したもので、事業者にとっては有効であるが、具体的な利用技術や収穫技術などは民間任せであり、技術支援などについては十分ではない。バイオマスのエネルギー利用における発展には集約技術、利用技術のさらなる発展とコスト改革が不可欠である。そのためには産官学の緊密な協調と取組みが重要であり、この分野における研究機関の責任も大きくなってきていると感じている次第である。日本は環境技術で国際的に先頭を走っている。資源を有効に活かさきれていないアジア各国との協調関係を強めて、資源と技術を双方が持ち寄ることで新たなアジアのバイオマス利活用連携が可能となる。金融危機は生産物輸出を弱体化させているために経済学者などが内需拡大を進めるよう提言しているが、内向な経済施策ではなく、日本が得意としている環境関連の技術輸出を進めることで環境産業の発展とともにアジアにおける日本の存在意義を示すことができる。こうした事業展開は広く世界に発信していける日本の数少ない分野であろう。

参考文献

BP 統計 2007 (石油、天然ガス、石炭)
 FAO 世界森林資源調査 2004
 Kojima Y. and Y. Umemura. 2005. CGS method for Fuel Gas Production from Wood Materials. Proceedings of Expo World Conference on Wind energy, Renewable energy, Fuel cell and Exhibition, Biomass section, No3001in CD
 近藤昭彦他. 2007. バイオエタノール. pp.77 - pp.203. バイオ液体燃料. エヌ・ティー・エヌ社. 東京
 伏見千尋. 堤敦司. 2007. バイオマスガス化における生成タームとAAEMの同時除去. pp. 48 - pp.61. バイオマスからの気体燃料製造とそのエネルギー利用. エヌ・ティー・エヌ社. 東京
 横山伸哉他. 2002. バイオマス利用システム. pp. 200-pp. 235. 日本エネルギー学会編. バイオマスハンドブック. オーム社. 東京
 横山伸哉他. 2002. バイオマス変換技術-熱化学的変換. pp. 91-pp. 149. 日本エネルギー学会編. バイオマスハンドブック. オーム社. 東京
 林業試験場. 1983. 北方系大型ササ資源の収穫・搬送に関する事前調査. 林業科学技術振興所昭和58年調査報告書

Overview about utilization of woody biomass for energy source

Yasuo KOJIMA

(Received January 13, 2009)

Summary

Forests and woody biomass are becoming attractive sources of energy through the conversion of woody biomass into convenient solid, liquid or gaseous fuels to provide energy for industrial use. Bioenergy systems often use the waste woody biomass and the conversion of the biomass may involve biochemical, thermochemical, or physical/chemical processes. Enhanced environmental concerns and increasing the oil price are encouraging the use of renewable energy sources. Woody biomass can be a sustainable source of energy, a valuable renewable alternative to finite fossil fuels. In this paper, the development of utilization methods of woody biomass and their problems to use in Japan are reviewed.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 61(2):119-126, 2009

Key words : Woody biomass, Carbone-neutral, Bio-ethanol, Wood pellet, Thermal gasification