

## ポスト化石を拓くバイオマス利活用の動向と将来展望

誌名	木材工業 = Wood industry
ISSN	00268917
巻/号	595
掲載ページ	p. 200-205
発行年月	2004年5月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# ポスト化石を拓くバイオマス利活用の動向と将来展望 バイオ燃料の税制優遇措置を求めて

坂 志朗\*

## 1. はじめに

1997年12月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）を契機に、わが国におけるバイオマスに対する関心は高まりを見せている。

1997年4月に「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」（いわゆる新エネルギー法）が施行され、その後2002年1月にこの政令が改正され、バイオマスが新エネルギーの仲間入りをした。新エネルギー利用等とは「技術的に実用化段階に達しつつあるが、経済性の面での制約から普及が十分でないもので、石油代替エネルギーの導入を図るためとくに必要なもの」と定義されている。さらに、2002年5月には「電力事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」（いわゆるRPS法）が成立し、電力会社はバイオマスを含む一定量の新エネルギーの導入が義務付けられた。

研究開発においては、2000年より農林水産省によるミレニアム・プロジェクト（新しい千年紀プロジェクト）事業が立ち上がり、「21世紀を目指した農山漁村におけるエコシステム創出に関する技術開発」が進められ、のちの「バイオマス・ニッポン総合戦略」の基となっている。さらに、新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）でも、年間20億円の予算による「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」が2001年度にスタートした。さらに、新エネルギーの普及を意図したNEDO地域新エネルギービジョン策定等事業が立ち上がり、全国各地で地域に合った新エネルギーの見極めが始まった。さらに「バイオマス・ニッポン総合戦略」が2002年7月、農林水産省、文部科学省、

経済産業省、国土交通省、環境省の5省により共同公表され、バイオマス利用に対する総合戦略が示された。

このように、バイオマスの有効利活用に関する種々の政策が出揃い、今後その実用化での政策整備が重要な段階に差し掛かっている。このような状況を踏まえ、本稿では、ポスト化石を拓くバイオマス利活用に関し、その動向と将来展望について述べる。

## 2. バイオマスとは

バイオマス（Biomass）とは本来、生態学で使われる用語であり、「生物現存量」または単に「生物量」と訳される。ここではバイオマス由来のエネルギー源を意味する言葉として、バイオエネルギーもしくはバイオマスエネルギーを同義語として用い、バイオマスを「化石資源のようにエネルギーとしても材料や化学物質としても活用できる生物由来の有機物資源」と定義する。

## 3. わが国におけるバイオマス資源

バイオマスは生産系の資源と、未利用および廃棄物系の資源に分けられるが、わが国における生産資源の年間生長量は約1.3億トン、そのうち利用可能量は約1,200万トンである。一方、未利用・廃資源の発生量は約2.4億トン、利用可能量は約6,500万トンと推定されている<sup>1)</sup>。ここで、利用可能量とは、現在有効に利用されずに廃棄されているものを意味しており、経済的視点は考慮していない。

これより、わが国におけるバイオマス資源の年間発生量は約3.7億トン（＝1.3億トン＋2.4億トン）、利用可能量は約7,700万トン（＝1,200万トン＋6,500万トン）と推定される。この数値から明らかなように、日本においては未利用・廃資源を有

\* 京都大学大学院エネルギー科学研究科

効に利用することが重要である。しかしながら、利用可能な約7,700万トンのバイオマスは、現実には廃棄、放置あるいは焼却され約1.27億トンものCO<sub>2</sub>に化している。これは1990年におけるわが国のCO<sub>2</sub>排出量11.24億トンの約11%に相当している。

一方、1997年12月に京都市で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）での京都議定書では、2008年から2012年の5年間に平均して1990年レベルでの温室効果ガス排出量の少なくとも5%を工業先進国で削減するとしており、わが国では6%の削減、欧州連合（EU）では8%の削減が義務付けられた<sup>2)</sup>。わが国に課せられた6%の削減量は、実は上述の利用可能であるにもかかわらず廃棄、焼却されているバイオマス（7,700万トン）から発生するCO<sub>2</sub>排出量の約半分である。したがって、バイオマスの有効利用は京都議定書での温室効果ガス削減に極めて重要である。

#### 4. バイオマスの利活用

バイオマスの利活用について、その目的を2つに分けて整理すると理解しやすい。原油の場合、15%が工業用原料に、85%がガソリン、軽油などの化石燃料に変換されているように、バイオマスも工業用原料・素材やバイオ燃料としての利活用が可能である。そこで以下にこれらについて述べる。

##### 4.1 工業用原料・素材としてのバイオマス

本誌<sup>3)</sup>で以前に述べたように、化石資源由来の化学物質の大部分がバイオマス資源より得られる<sup>4)</sup>。バイオマスの主要成分はセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンであるが、Goldstein<sup>5)</sup>は、セルロースを加水分解してグルコースを得、アルコール発酵によりエタノールに転換、さらに脱水してエチレンなどに転換することで、化石資源由来の合成高分子の95%がバイオマスから得られることを示している。ナフサから得られるエチレンが石油化学工業の出発原料であることを考えると、これは当然である。リグニンについては、地球上の再生可能資源としてセルロースに次ぐ豊富な高分子物質であるが、現時点で有効に利用されていない。しかし、そのポテンシャルは高く、多くの

有用な化学物質を誘導することが可能である<sup>6)</sup>。

これらの化学物質としての利用以外に、木質系素材を直接利用した製材品、集成材、単板積層材、合板、パーティクルボード、ファイバーボードの他、木材と合成高分子との複合材料（WPC；Wood-Polymer Composite）などがあり、これらを素材形状の大きなものから小さなものへと多段階で利用し、最終的に炭や燃料として利用するカスケード利用が、温室効果ガス削減に有効である。さらに、バイオマスの生分解性を生かした生分解性プラスチックはバイオマテリアルとして重要であり、化石資源からは得難い環境に適合した材料を作り出すことが可能である。

##### 4.2 エネルギー源としてのバイオマス

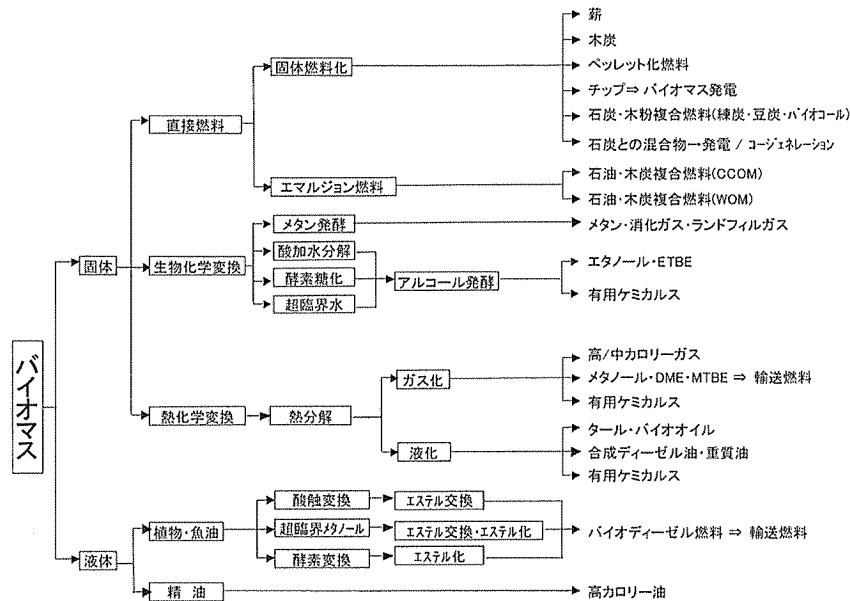
バイオマスは大気中のCO<sub>2</sub>と水から太陽エネルギーによって植物体に固定されたものであり、その過程で太陽のエネルギーを蓄積している。すなわち、酸化還元反応のサイクルの中で植物体に太陽エネルギーが蓄えられた還元度の高い化合物がバイオマスであり、これをエネルギーとして利用しようとするのが、第1図に示すバイオマスからのエネルギー変換である<sup>7)</sup>。

これらのバイオ燃料<sup>7), 8)</sup>は、ガソリンなどの炭化水素系燃料とは異なり、分子内に酸素を含有するため単位当たりの発熱量は小さいが、燃焼時にススがでにくく、NO<sub>x</sub>、COなどの排出量も少ない。さらに、バイオマス由来であるため地球上の炭素バランスを崩さず、CO<sub>2</sub>排出量の削減に寄与するものである。

以下に高品位なバイオ燃料4種を取り上げ、バイオ燃料の動向と今後の展望について述べる。

###### 4.2.1 メタノール

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その原料となり得る。すなわち、その大部分を占めるリグノセルロース系資源が対象となり、次に述べるエタノール生産に比べ原料の範囲が広い。すなわち、生産資源では糖質、でんぷん、炭化水素および森林資源が利用でき、未利用・廃資源では、林産、農産資源の他、産業、生活資源の中のパルプや紙等が対象となる。しかし、糖質やでんぷん資源は食糧問題との関連で、これらをエネルギー源として用いることは好まし



第1図 バイオマスの変換法と得られる各種ケミカルおよびバイオ燃料<sup>7)</sup>

くない。わが国における、これらエタノール生産に適する資源の年間利用可能量は約4,500万トン(生産資源; 約1,200万トン+未利用・廃資源; 3,300万トン)である<sup>1), 9)</sup>。

リグノセルロース系の資源を用いてメタノールを製造する場合、直接燃焼で見られるように、ガス化の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。この問題解決のため、原料を微粉碎し、酸素と水蒸気の混合ガスをガス化剤とし浮遊させて分解し、タールの生成を押さえ効率よくCOとH<sub>2</sub>に転換する噴流床方式が提案されている<sup>10)</sup>。

このメタノール合成プロセスに廃棄物を用いる場合、防腐剤として世界的に広く使用されてきたCCA薬剤\*を含む建築廃材からは燃焼によってAs<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などの有毒ガスが発生する。したがって、これらの除去機能を持つガス化プロセスの開発が不可欠である。また、ダイオキシン類についてもガス化プロセスで分解し、その発生を抑制し得る処理条件の設定が不可欠である。

メタノールは現在経済性の理由から天然ガスを用いて製造されているが、二酸化炭素排出の観点

からすれば、石油と同様、その利用は好ましくない。メタノールの自動車燃料のみならず、燃料電池をも視野に入れると、このガス化によるバイオマスからのメタノール製造は化石燃料の代替として有望である。

#### 4.2.2 エタノール

エタノールには、バイオマスからの発酵エタノールと石油由来のエチレンを原料とする合成エタノールがあるが、地球の温暖化の観点から二酸化炭素削減に寄与しうるものは前者の発酵エタノールである<sup>8)</sup>。

バイオマスからのエタノール生産には、現在3つの方法が挙げられる。それらは酵素糖化法、酸加水分解法および、研究段階にある超臨界水法<sup>3), 11), 12)</sup>である。いずれの場合も、バイオマスの主要成分であるセルロースや糖蜜、デンプンなどの構成糖であるD-グルコースへの分解を意図したものである。これまでは、糖質やサトウキビの絞りかす(バガス)からの廃糖蜜やでんぷんを用いてグルコースを得ていたが、食糧問題との関連から、リグノセルロース系資源を対象とした研究開発が進められている。

上記のどの方法を用いるかによって対象となるバイオマス種が異なるが、酵素糖化法には脱リグニンの前処理が不可欠である。一方、濃硫酸による酸加水分解法ではリグニン共存下でセルロース

\* CCA薬剤は、銅(Cu)、クロム(Cr)、ヒ素(As)からなり優れた防腐性能を有するものの、水溶性であるため溶出しその毒性が問題となる。

およびヘミセルロースの加水分解が可能であるため、リグノセルロース系資源を原料とすることができる。しかし同時に、20~30%を占めるリグニンの有効利用法も検討しておく必要があるが、現時点では燃料としてのエネルギー回収に留まっている。

上述のエタノール生産に適したバイオマス種に対し、実用化プロセスとして米国 ARKENOL 社で開発の濃硫酸による酸加水分解プロセスを第2図に示す<sup>9), 13), 14)</sup>。すなわち、第一糖化槽では40℃にて70%濃硫酸でバイオマスのセルロースおよびヘミセルロースを処理する。この段階でヘミセルロースは単糖に、セルロースは結晶構造が破壊され低分子化される。ここからペントース（炭素数5の単糖、キシロースなど）とヘキソース（炭素数6の単糖、グルコースが主）の混合物が分離回収される。次に、第二糖化槽で濃硫酸を30%まで希釈し95~100℃で処理することで、残渣のセルロースをグルコースまで加水分解する。この時、糖化槽には不溶のリグニンが残存する。いわゆる Klason リグニンとして分離される。

回収された糖と濃硫酸は、陰イオン交換樹脂分離塔により糖が分離される。すなわち、陰イオン交換樹脂と相互作用のない糖がまず溶出され、弱い相互作用のある硫酸がその後溶出してくる。回収された硫酸は回収硫酸濃縮塔に回され、再利用される。

回収された14~15%濃度の糖水溶液は、石灰(Ca(OH)<sub>2</sub>)で残存硫酸を完全に石こう(CaSO<sub>4</sub>)にして除去し、発酵槽で約30時間かけてエタノールに変換される。ここで回収した糖にはペント

ースとヘキソースが混合しており、これらいずれもエタノールに変換し得ることが必須となる。DNA組み換え技術による *Zymomonas mobilis* を用いることで、それらとともにアルコール発酵することが可能である。また、遺伝子組み換えにより改変した *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli* も利用可能であることが報告されている<sup>8)</sup>。得られたエタノールは蒸留塔により精製される。

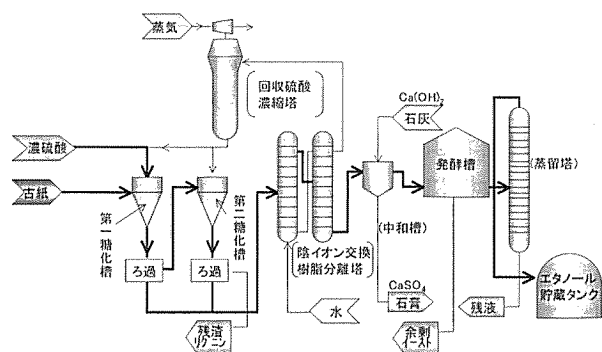
本プロセスはわが国に技術導入され、現在 NEDO「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」により実用化研究が進められている。また、エタノールの蒸留法を膜分離法に切り替え、エネルギー回収率の向上を図っているが、燃料として用いているリグニンをどのように利用するかが新たな課題である。

わが国における利用可能なバイオマス資源の中からエタノール生産に適するバイオマス種を選び出し、それを用いたエタノール生産の可能量を推定すると年間約3,000万トンであり、得られるエタノールは約840万klとなる<sup>9)</sup>。現在わが国でのエタノール需要は約50万kl/年であることから、利用可能なバイオマス資源は十分に存在すると結論できる。

さて、日本政府は2003年6月にバイオマス起源のエタノールを3%混合したガソリンの使用を解禁した。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。将来的には、2010年までに10%に延びることが期待され、これによってわが国で年間利用される約6,000万klのガソリンのうち600万klがバイオエタノールで代替されるため、京都議定書での温室効果ガス削減目標6%のうち1%の削減が実現する。

#### 4.2.3 バイオディーゼル燃料

植物油およびその廃油のバイオディーゼル燃料への変換研究は、欧州、米国、日本など世界各地で行われ、すでに実用化されている。植物油は粘度が約50mm<sup>2</sup>/s、引火点が300℃と高く、このままではディーゼル燃料として用いることはできない。そこで、植物油のトリグリセリドにメタノールと塩基触媒を加えて、エステル交換することにより、粘度と引火点を低くしてバイオディーゼル



第2図 バイオマスの酸加水分解・発酵エタノール製造プロセス (Arkenol 社法)<sup>14)</sup>

燃料（脂肪酸メチルエステル）とする。工業的には、常圧下、50～60℃で行われる。また近年筆者の研究室で超臨界メタノール法による無触媒法が開発され、さらに、NEDO「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」プロジェクト（平成15～17年度；総額8.4億円）として採択され、工業化に向けて動き出している<sup>15-17)</sup>。

得られたバイオディーゼル燃料は、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が、炭素、水素以外に酸素が含まれ、軽油と比較して発熱量が低下する。しかし、走行にはそれ程の性能低下は見られず、環境・安全の観点から法律的にも軽油の強制規格基準をほぼ満足している<sup>18)</sup>。

このバイオディーゼル燃料に対し欧州では、ディーゼル燃料に5.30%添加して利用しており、2003年時点でEU-25で358万トンの生産量に達している<sup>19)</sup>。さらに、ディーゼル燃料には環境税が課せられているが、バイオディーゼル燃料はこれが免除されるなど、税制上の優遇措置が取られている。

京都市では、1997年度よりごみとして排出していた廃食用油をバイオディーゼル燃料に転換し、約220台のごみ収集車全車に活用してきた。また、2000年4月からは81台の市バスにも軽油に20%添加して使用しており、年間約1,450トン（162万kl）の使用量に達している<sup>15), 18)</sup>。

なお、ガソリンでのエタノールのように、バイオディーゼル燃料の軽油への添加により、CO<sub>2</sub>排出量の削減がヨーロッパを中心に進められている。仮に軽油に10%添加が実現すれば、現在日本で利用されている軽油約4,300万kl（1995年度）に対し<sup>20)</sup>、430万klのバイオディーゼル燃料を用いることになるが、これによって京都議定書での1990年比6%削減のうち0.7%削減が可能となり、エタノール10%添加ガソリンでの1%削減と合わせて1.7%のCO<sub>2</sub>削減が実現する。日本における年間の廃油量は42～56万トンであるため<sup>1), 9)</sup>、今後の課題は、いかに原料油脂類を収集するかにある。

## 5. バイオ燃料の普及、促進のための税制優遇措置

海外諸国ではバイオ燃料を導入、普及、促進させるため、様々な工夫がなされている。たとえば、スウェーデンでは、1991年に炭素税を導入、2001年にはグリーン税制改革の一環として炭素税を増税した。一方、1997年には「エネルギー変換プログラム」を作成し、バイオマス資源からの熱電併給システムの増強をはかり、バイオマスエネルギーに対する諸課税を免除するなど<sup>21)</sup>、積極的な取り組みがなされており、2010年までに市民1人当たりの二酸化炭素排出量を1993年比で50%削減することを掲げている。また、フィンランドでは、国と自治体がそれぞれ12%を補助することで、バイオマス利用による熱電併給システムを普及させ、一次エネルギーに占めるバイオマスの割合を24%にまで延ばしている<sup>22)</sup>。

フランスでは、バイオマス由来のエタノールからETBE（エチルターシャリーブチルエーテル）を生産し、ガソリンに15%添加して利用しているが、導入促進を図るため税制面での優遇措置がとられ、ガソリンにかかる関係諸税の20%のみがETBEに課税されている。また、米国でも、ETBEにガロン当たり54セントの連邦補助金が適用され、ガソリンに対して競争力をつけている。この背景には、1999年8月のクリントン前大統領による農務省での大統領令がある。すなわち、バイオマス由来のエネルギーおよび製品の開発・利用を2010年までに現在の3倍に増大、促進させるというものである。これを受けて、「バイオマスの研究開発法2000」が制定され、農務省、エネルギー省などの関連省からなる「バイオマス研究開発委員会」および専門家による「諮問委員会」を設置し、バイオマス由来のエネルギーおよび製品の研究開発および有効利用の促進を諮ってきた。ブッシュ政権に移ってからは、京都議定書から離脱、イラク戦争勃発など、一見、バイオマス軽視の動きが見られるが、農業政策、関連予算措置に関する2002年の「農業法2002」において、バイオマスエネルギーの原料生産者に対する助成措置や、バイオディーゼル燃料の普及、バイオマス変換技

術の開発など405百万ドル(約500億円)の政策支援を行っている。

このように、海外諸国ではCO<sub>2</sub>排出量削減とバイオマス由来エネルギーおよび製品の有効利用に向けて様々な工夫がなされている。一方上述のように、わが国では2000年4月よりスタートした京都市バスの20%添加バイオディーゼル燃料に対し、1970年改正の地方税法に触れるとの総務省の判断により、2001年2月、軽油と同様、課税されることとなった。その結果、京都市交通局はバイオディーゼル燃料の使用断念をやむなしに至った。その後京都府の支援による課税額の50%補助が実現し、2001年3月からバイオディーゼル燃料の再利用が実現した。

このように、海外諸国に比べ、日本でのバイオマスエネルギーの利用は立ち遅れており、京都議定書の発行国でありながらバイオディーゼル燃料が課税の対象となっている。一日も早くわが国においても税制上の優遇措置が検討され、バイオ燃料の利用が促進されねばならない。京都議定書の批准に向けて、今後上述のバイオエタノールとバイオディーゼル燃料の重要性はさらに高まってくるものと思われる。バイオ燃料混合のガソリンおよび軽油に対する燃料規格と品質規格の設定により、近い将来バイオ燃料に市民権が与えられ、わが国において広く利用されることを期待している。

## 謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(平成12~14年度 基盤研究(B)(2)一般)および、同(平成13~15年度 基盤研究(B)(2)展開)京都大学21世紀COEプログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」などの活動の中で行われたもので感謝の意を表す。

## 文 献

- 1) 南英治, 坂志朗: 日本でのバイオマス資源量, バイオマス・エネルギー・環境, 坂志朗編, アイピーシー出版, 53-103 (2001)
- 2) 環境総覧1999, 通商産業省環境立地局監修, 通産資料調査会, 104-107 (1999)
- 3) 坂志朗: 木材工業 56(3), 105-110 (2001)
- 4) Danner, H., Braun, R.: Chem. Soc. Rev. 28, 395-405 (1999)
- 5) Goldstein, I. S.: C. &EN. Apr. 21, 13 (1975)
- 6) 榊原彰: 木材の化学, 文永堂出版, 262 (1985)
- 7) 坂志朗: バイオマスエネルギー燃料, バイオマス・エネルギー・環境, アイピーシー出版(坂志朗編), 323 (2001)
- 8) 斎木隆: エタノール, バイオマス・エネルギー・環境, アイピーシー出版(坂志朗編), 東京, 380-399 (2001)
- 9) 坂志朗: エンジンテクノロジー 3(3), 29-34 (2001)
- 10) 坂井正康: バイオマスが拓く21世紀エネルギー, 森北出版, 48-53 (1998)
- 11) 坂志朗: APAST 35(4), 5-10 (2000)
- 12) 坂志朗: バイオマス・エネルギー・環境, アイピーシー出版(坂志朗編), 291-313 (2001)
- 13) 斎木隆: バイオサイエンスとインダストリー 58(5), 362-365 (2000)
- 14) 斎木隆: アルコールバイオマス研究会講演要旨集, 10-28 (1999)
- 15) 坂志朗: 超臨界最新技術特集第3号, Jasco Report, 日本分光(株), 東京, 28-31 (1999)
- 16) 坂志朗, Dadan Kusdiana: 超臨界最新技術特集 第7号, Jasco Report, 日本分光(株), 東京, 10-14 (2003)
- 17) 坂志朗, Dadan Kusdiana: バイオエネルギー技術と応用展開, シーエムシー出版, 89-98 (2003)
- 18) 中村一夫, 若林完明, 小林純一郎: エネルギー・資源学会 第17回研究発表会講演論文集, 大阪, 265-268 (1998)
- 19) M. Worgetter et al.: Proc. of Kyoto Univ. 21COE 2<sup>nd</sup> Symp. on Bioenergy, Kyoto, Oct. 22, p.32 (2003)
- 20) 世良力: 資源・エネルギー工学要論, 東京化学同人, 東京, 57 (1999)
- 21) 久保田啓介: 日経サイエンス, 4月号, 94 (2001)
- 22) 横山伸也: RITE NOW 36, 13 (2000) (2004.1.23受理)