

熱帯バイオマス資源のバイオリファイナリー*

渡邊 崇人**, 渡辺 隆司**

Biorefinery of tropical biomass

Takahito Watanabe and Takashi Watanabe

概要

世界のバイオマス資源の約 4 割が集中するアジア、特に熱帯アジア地域のバイオリファイナリーの現状、また、アカシアを始めとする熱帯早生樹利活用の可能性、さらに、熱帯バイオマス資源を取り巻く諸事情を概説する。

1. はじめに

20 世紀に発達した石油、石炭、天然ガスなどの化石資源を原料とするエネルギー・化学産業は、我々の生活を便利にしたが、その一方で、地球温暖化などの深刻な環境問題や資源枯渇問題を引き起こした。化石資源の大量消費による資源の枯渇と地球温暖化の加速という根本的な問題は、我々が直面する現実の問題として強く意識されるに至っている。今、人類が抱えているこうした諸問題を解決し持続的な社会を構築するために、物質・エネルギーの基盤を化石資源からバイオマスなどの再生可能資源に転換することが求められている。植物バイオマスは、燃焼や分解によって大気中に二酸化炭素が放出されても、それに見合う量の二酸化炭素量が光合成によって固定化されているため、原理上は、炭素の収支はプラスマイナスゼロ（カーボンニュートラル）である。また、植物バイオマスと同様に動物や微生物のバイオマスも植物の光合成によって固定化された炭素源を複次的に利用しているため、カーボンニュートラルな特性を有している。実際には、バイオマスの変換には化石資源を使用する場合が多く、二酸化炭素の収支はゼロではないが、化石資源のみを原料としてエネルギーや化学品（ケミカル）を製造した場合に比べ、炭素の放出量は少ないと考えられている。

バイオマス由来のエタノールが化石燃料の消費を抑え二酸化炭素の排出抑制につながるか否かについては活発な議論がなされた。エタノールのエネルギー効率・二酸化炭素削減効果に関して、2005 年 3 月にコーネル大学の Pimentel とカリフォルニア大学バークレー校の Patzek は共著で LCA 解析（ライフ・サイクル・アセスメント解析：製品のライフサイクル全体に渡って環境への負荷を分析する手法）を行い、トウモロコシの穀物からのエタノール生産の正味エネルギーバランスはマイナス 29% であると発表した¹⁾。その後、LCA 解析が数多くなされ、最近では Pimentel らの使用したデータは古い農業技術やエタノール変換技術をベースとしたものであり、最新の技術を基にシミュレーションするならば、バイオエタノールは、二酸化炭素の排出抑制につながるとの結論がほぼ定着している²⁾。米国アルゴン研究所の Wang は、セルロースを原料とするエタノールとデンブンを原料とするエタノールの温室効果ガスの排出抑制効果を比較し、E85（エタノールを 85% 含むガソリン）で比較した場合、セルロース系エタノールが温室効果ガスの排出を 64% 抑制するのに対し、

* 2007 年 7 月 22 日受理

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス変換分野
E-mail: takahito@rish.kyoto-u.ac.jp

デンプン系エタノールの抑制効果は 17-23% にとどまると報告している³⁾。すなわち、バイオエタノールの二酸化炭素排出量は、穀物のデンプンを原料とした場合に比べ、リグノセルロースを原料とした場合は、その排出量が大きく低下する。リグノセルロースにおいては、管理栽培されていない未利用資源や廃棄物系資源を利用すれば、植物の育成管理に必要な化石資源が必要となくなるため、その排出量はさらに下がる。このように、温室効果ガスの排出量には、栽培、収穫、肥料の供給、灌漑、土地管理、運搬、加工産業など様々な要因が関係している。

今後の経済発展及び人口増加に伴い、再生可能なバイオマス資源の利活用だけでなく、原料をいかに多く生産し、或いは、確保するかが世界各国のエネルギー戦略となる。資源問題が深刻化するにつれ、食糧とエネルギー・化学品の生産が競合する事例が増えている。このため、食糧と競合しないリグノセルロース系バイオマスからエタノールなどの有用化学品を生産することが求められている。リグノセルロース系バイオマスの利用法には、樹木などの非食糧系バイオマスを生産・利用する場合と、穀物を収穫して残った茎や葉などのリグノセルロースを利用する場合がある。後者の例では、トウモロコシを収穫して残った残滓であるコーンストーバーの例が代表的であり、米国を中心にエタノールへの変換方法が活発に研究されている⁴⁾。リグノセルロースは原料としては食糧と競合しないが、土地利用に関しては、食糧と競合する場合がある。アマゾンの熱帯雨林を切り開いて、食糧やエネルギーの原料となるサトウキビや大豆が栽培されている例が社会問題化されている。企業や個人レベルの利益追求のみでバイオマス利用が進むと環境破壊を招くことがある。有用性ばかりに目を奪われて、「とにかくバイオマスを使えさえすれば良い」という段階から、環境保全という本来の目的により適した持続可能なバイオマスの生産と利用を行う新しい段階へ軌道修正する必要があるといえる。

バイオマスは、再生可能な唯一の炭素資源であることから、エネルギーのみでなく化学品の原料としても期待されている。バイオマスから、エネルギー、燃料、ケミカルスを産業として体系的に生産することをバイオリファイナリー (biorefinery) と呼び、近年、石油リファイナリー (oil refinery) からバイオリファイナリーへ転換する動きが加速している。バイオリファイナリーでは、木の幹に枝葉がつくように、基幹となる骨格物質 (プラットフォーム化合物) とそれから派生する誘導体により体系的な生産がなされる。石油リファイナリーがエチレンやプロピレンなど炭化水素の変換を基本とするのに対し、バイオリファイナリーでは、糖、リグニン、油脂など、炭素、水素、酸素からなる原料を変換する。このため、バイオリファイナリーと石油リファイナリーでは、誘導体化の体系が根本的に異なる。すなわち、バイオリファイナリーにおいてプラットフォーム化合物が決まると、化学品生産体系全体が大きな影響を受ける。このため、プラットフォーム化合物の生産技術を握る企業や国家は化学産業の主導権を握ると予想され、米国企業を中心に開発競争が激化している⁴⁻⁵⁾。

2. バイオリファイナリーの中核：バイオ燃料

バイオリファイナリーの中核物質の一つであるバイオ燃料について熱帯アジア、特にインドネシアを例に紹介する。バイオ燃料とはバイオマスを原料として生産される燃料で、固体、液体、気体があり、その中でもバイオエタノールやバイオディーゼルはその代表的な液体燃料である。バイオエタノールはサトウキビやトウモロコシといった植物資源を糖化発酵させ、蒸留などにより精製して作られる。バイオディーゼルは植物や動物油脂を原料につくられたディーゼルエンジン用の軽油代替燃料である。構成成分は脂肪酸メチルエステルである。バイオエタノールは、直接、或いは、ETBE (エチル・ターシャリー・ブチル・エーテルの略でエタノールとイソブテンから合成される) に変換してガソリンに混ぜることができる。一方、バイオディーゼルはそのままディーゼルエンジン用の液体燃料として、或いは、軽油に混合して使用できる。

世界各国はすでにバイオ燃料の有用性を認識し、国家戦略としてその普及に努めている。主な目的としては、以下のことが挙げられる。(1) 石油依存度の低減 (エネルギー供給の安全保障対策)、(2) 温室効果ガスの排出削減 (京都議定書への対応)、(3) 大気汚染対策 (バイオエタノールやバイオディー

ゼルは構成元素に酸素原子を含むことから、燃料時の一酸化炭素などの発生を抑える。その他、窒素酸化物、揮発性有機化合物、粒子状物質の排出も削減する)、(4) 雇用確保・新規産業創出(地域内の資源を有効利用した再生可能エネルギーを生産することで、地域内の需要及び雇用が増大)、(5) 農業振興(バイオ燃料用の作物、いわゆる、エネルギー作物の栽培、プランテーション栽培が盛んになる)。

エネルギーや化学品の製造には原料が必要だが、バイオエタノールを例にとると、世界中で使用されている原料はサトウキビ抽出液などのショ糖系原料(スクロースの他、フルクトース、グルコースを含む)が 6 割、トウモロコシなどのデンプン質原料は 4 割となっている⁶⁾。ただし、デンプン質原料の場合、デンプンを糖化する工程が必要で、糖化が不要なショ糖系原料による生産の方がこの分だけエネルギー収支上有利である。その他の原料としては、小麦、テンサイ、廃ワイン、キャッサバ(タピオカ)などそれぞれの国の風土に適したものが用いられている。熱帯のアジア、例としてインドネシアでは、サトウキビのプランテーション栽培から砂糖及びエタノールの生産までを一通り行っている企業や石油会社が多い。原材料については、廃糖蜜(砂糖を精製する時に発生する糖分以外の成分も含んだ粘性の黒褐色の液体)やデンプン質系のキャッサバが主として使われている。なお、ショ糖系原料の場合、すべてをエタノール生産に使う場合と砂糖を作りながら副生する糖蜜をエタノールの原料にする場合がある。サトウキビの抽出液から砂糖を結晶化により得るには、通常 3 回の結晶化を行う。3 回結晶化を行った残液の廃糖蜜には、発酵原料となる糖質が少ないため、エタノール生産と砂糖の生産を同時に行う場合には、結晶化を 1 回のみに抑える方法が試験されている。サトウキビを原料とする製糖工場では、廃糖蜜はエタノールの原料として使用されるが、その一方で、サトウキビの搾りかすであるバガスが大量に副生する。バガスの 9 割程度は製糖工場の熱源および発電の燃料として使用することができるが、残りは未利用のまま廃棄されるか、肥料など低付加価値物に変換されて利用される。また、パルプやパーティクルボードへの利用も報告されている⁷⁾。近年、ボイラーの性能が向上することにより未利用バガスの量は増大する傾向にある。我々はバガスに白色腐朽菌処理を施すことでバイオエタノールの生産性が向上することを報告している⁸⁻⁹⁾。

インドネシアでは、2010 年までに国内におけるバイオ燃料の割合を 10% まで引き上げることを目標にしている。廃糖蜜やキャッサバからバイオエタノールを、アブラヤシ(ギニアアブラヤシ: *Elaeis guineensis*) のパームオイル及びヤトロファオイルからバイオディーゼルの生産を行う¹⁰⁾。ヤトロファ(ナンヨウアブラギリ: *Jatropha curcas*) については、国営の石油会社 Pertamina が 2005 年に *Jatropha Curcas* バイオディーゼルプロジェクトを結成し、ヤトロファ栽培とヤトロファからのバイオディーゼル製造に着手している¹¹⁻¹²⁾。ヤトロファは成長が早く、容易に定着する多年生植物である。干ばつや害虫に強く、年間降水量 400 ミリメートル以下でも生き延び、砂漠などの痩せた土地にも植樹可能で農薬や肥料の投入量も少なく済む。種子から採取できる原料油量は同量のパームの 35% 程度であるが、大豆と比べると 5 倍、菜種では 3 倍搾り取れる。食用油と競合することなく、安価で安定供給可能なのが特徴である¹³⁾。

3. バイオマス資源としての熱帯早生樹利活用の可能性

インドネシアなどの熱帯アジアでは自身の窒素固定能力により旺盛な成長が可能なマメ科のアカシアが広範に導入されている。インドネシアだけでもアカシアの植栽面積は 100 万ヘクタールにも及ぶ。一方、我が国の製紙会社は森林再生と木質バイオマス資源の確保を目的とし、1970 年代から熱帯早生樹の木質系バイオマスプランテーションの造成を鋭意に進めている¹⁴⁾。プランテーション栽培においては短期間に伐採・収穫を繰り返すことから林地からの養分の収奪が大きく、結果として地力の低下を招くと指摘されている。しかしながら、「成長が早い」「大量の炭素固定が短期間に行われる」

「貧栄養土壌でも生育可能」さらに「食糧と競合しない」セルロース系バイオマスであるアカシアなどの熱帯早生樹は大変有望なバイオマス資源と言える。アカシアは、「紙・パルプ」「材料」「燃料」「肥料」「ケミカルス」などの原材料として利用されている。

「紙・パルプ」においては、熱帯早生樹の各種 (*Paraserianthes falcata*, *Gmelina arborea*, *Acacia mangium*, *Acacia auriculiformis*, *Eucalyptus deglupta*) について化学成分の解析、パルプの物理的性質、紙の機能性について研究がなされている。*Acacia mangium* はホロセルロース（セルロースとヘミセルロース）含量が他の熱帯早生樹より高く、一方、パルプ残留リグニン量の指標になるカップ値（Kappa number）については、*A. mangium* は他の早生樹よりも低い¹⁵⁾。すなわち、パルプ化による脱リグニンが進んでおり、化学漂白剤の使用量が少なく済み、環境への負荷が低くなる。上述の熱帯早生樹のクラフトパルプの収量については、*Eucalyptus deglupta* が最も低く、*Acacia auriculiformis* が最も高い¹⁶⁾。

「材料」については、ケナフボードや MDF (Medium-Density Fiberboard: 中密度繊維板、主に木材などの植物繊維を成型した繊維板のうち、密度が 0.35g/cm^3 以上でドライプロセスによるもの) の生産に利用されている。特に、*Acacia* 樹皮粉末を混合することでパーティクルボードの強度・機能性を向上させることが可能である。樹皮粉末については、褐色腐朽菌 *Daedalea quercina* を用いてホロセルロースを処理し、高タンニン及び高リグニンの樹皮粉末の生産が可能という報告がある¹⁷⁾。*Acacia mangium* については、樹皮に豊富に含まれるタンニンを利用してアミノ樹脂やフェノール樹脂系の接着剤に取って代わる接着剤の開発がなされている。なお、これらの接着剤の生産過程ではホルムアルデヒドの発生がなく環境負荷が低い。

「燃料」及び「肥料」については、まずインドネシアの都市部を除く一部の田園地域において、熱帯早生樹が燃料材として普通に利用されている。アカシアの発熱量 (calorific value) が比較的高いことが理由の一つのようだ。また、アカシアは灰分 (ash)、すなわち、無機物 (Ca, K, P, Mg, Si, Al, Ba, Fe, Ti, Na, Mn, Sr) 含量が高いことから、燃焼後に残る灰分を肥料として土地に散布することか可能である。化学肥料が化石燃料から製造されることを踏まえれば、アカシア由来の肥料は循環型バイオマス生産サイクルに有用である¹⁸⁾。一方、パルプ生産の際に出る *A. mangium* の樹皮の炭 (charred bark) を土壌に肥料として散布し、トウモロコシやピーナッツなどの農作物の収穫量が増加したという報告もある¹⁹⁾。その他、土壌の化学成分の改善として、pH、総窒素、可吸態リンの増加など降水量が多く、土地が痩せやすい熱帯土壌に効果的である。また、高 Al 飽和度であるアルティソル土壌で適応できる樹種として *Acacia mangium* は貴重な樹種である²⁰⁾。

「ケミカルス」の点では、アカシアは微生物酵素（リグニン分解酵素やセルラーゼ系酵素）生産の誘導基質となり²¹⁾、また、微生物による廃材やチップからのアルコール発酵やメタン発酵が可能である。さらに、タンニンや *A. auriculiformis* に多く存在する抗真菌性及び抗酸化性抽出物についてはバイオリファイナリーの利用価値が強く期待される²²⁻²³⁾。

以上、アカシアの利用についていくつか列挙してきたが、アカシアを用いたバイオリファイナリーとなると現段階では実用的なところまではまだ到達していない。アカシアに限らず、リグノセルロース系バイオマスからエタノールを生産するとしても、セルロースなどの細胞壁多糖がリグニンにより被覆されていることから、これらを酵素糖化するには、まず、このリグニンのネットワークを事前に破壊する、すなわち、前処理が必要となる。細胞壁多糖を取り出す前処理については様々な方法があるが、例えば、熱化学的処理をした場合、必要なエネルギーはどれくらいか？処理によっては、その後の糖化・発酵などのプロセスに影響を及ぼす発酵阻害物質などが発生するのではないか？一方、白色腐朽菌を用いた温和な前処理をするにしても、タンニンや抗真菌性の物質が豊富なアカシアで良好に生育するのか？生育可能な場合でも十分に前処理ができるのか？さらには、そもそも既存の微生物を利用した前処理、糖化・発酵プロセスをアカシア用に最適化させるのか？それとも、アカシアを品種改良して既存のプロセスに適用させるのか、どちらが良いか見極める必要がある。アカシアが群生している地域での微生物コンソーシアムの生態学的研究やアカシアと微生物（木材腐朽菌など）を用いたバイオマス変換に関する知見などがほとんどないためその辺りの基礎データをまずは集める必要があるだろう。なお、我々は、タイで単離した白色腐朽菌のラッカーゼ（リグニン分解酵素の一種）がエタノール生産の障害となる発酵阻害物質を著しく軽減することを発見している²⁴⁻²⁶⁾。そのような事

例を踏まえると、熱帯地域の豊富な植物資源だけに目を向けるのではなく、微生物資源も豊富であると考えられることから、アカシアのバイオマス変換に力を発揮する微生物のスクリーニングも有用であるのではないだろうか。

4. 熱帯バイオマス資源を取り巻く諸事情と日本

2007 年 3 月上旬に欧州連合 (EU) が 2020 年までに温室効果 20% 削減を承認し、バイオ燃料に関しても自動車燃料比率 1 割を目標にした²⁷⁻²⁸⁾。バイオディーゼル世界最大の生産を誇る EU だが、最近、菜種油よりも安価なパーム油を原料としたバイオディーゼルが魅力ということから、パーム油及びパーム油由来のバイオディーゼルの輸入する動きが出始めた。そのような先進国のバイオ燃料市場の拡大を受け、世界最大のパーム生産国であるマレーシアやインドネシアなどでは熱帯雨林を伐採して、先進国に輸出するパームを栽培する動きもあり、パーム油から作ったバイオディーゼルは石油よりも熱帯雨林を破壊していると批判されている。また、単一のエネルギー作物の栽培は果たして環境に良いのかという問題、さらには、東南アジアから EU などの先進国まで輸送することへの批判が出ている^{11, 29)}。ただ単に「バイオマス資源からバイオ燃料を生産して使えば良い」というコンセプトから、「原料の種から燃料タンクまで」という全体における環境負荷を考慮した持続可能なバイオ燃料のみを推奨するコンセプトが極めて重要になってきている。

日本の温室効果ガス総排出量 (2005 年度) は 13 億 6,000 万トンで、京都議定書の規定による基準年 (原則 1990 年) と比べ 7.8% 増である。京都議定書の削減目標は 6% であることから、単純計算で約 14% もオーバーしている。なお、温室効果ガス総排出量の中で 95% 以上を占め、最も温暖化への寄与が高い二酸化炭素は、2005 年度の排出量が 12 億 9,300 万トンで、基準年と比べて 13.1% も増加し、6% の削減目標を考慮すると 20% 近くもオーバーしている³⁰⁾。一方、日本の中東への原油依存度は 88.4% (2005 年)、エネルギー自給率 4% (2004 年;ただし、原子力を含めると 18%) である³¹⁻³²⁾。2002 年に「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定され、未回収の資源の資源化について調査が進められた³³⁾。しかしながら、国土に占める農地の割合が少ない、大規模な生産、効率的回収・資源化は容易でないことが判明した。一方、世界の 4 割以上のバイオマス資源を保有し、輸送などのコストの優位性のあるアジア諸国は資源の乏しい日本にとっては魅力的である。ところが、バイオマスを生産できる土地は「有限」で、しかも、EU、アメリカ、中国、韓国は、東南アジアにおいてすでにバイオマス資源確保で先行している。日本が海外のバイオマスを必要としているときに、日本が関わられる資源がないという状況は絶対避けなくてはならない。

その後、2006 年 3 月に「バイオマス・ニッポン総合戦略」の見直しが閣議決定された。その中では、「バイオマス由来燃料の本格的導入」「アジア諸国におけるバイオマスエネルギー導入への積極的関与・関連技術移転推進」と表現されている。バイオマス利用の面では、食糧と競合しないセルロース系バイオマスのバイオリファイナリーはかなり重要な位置を占めるのは必然で、アカシアなどの熱帯早生樹などはバイオマス資源として有望視されると思われる。一方、バイオマス以外においては、日本が誇る高い技術、例えば、太陽光発電や燃料電池などの非化石燃料のさらなる普及と技術力の向上³⁴⁾、さらには、原子力の積極的な利用も重要と思われる³⁵⁾。一極集中型のエネルギーへの依存はせずに、小規模に分散させる再生可能なエネルギー資源の確保及び分散型エネルギーネットワークの構築が日本のエネルギー供給の安全保障上不可欠なのではないだろうか。

参考文献

- 1) Pimentel, D. and Patzek, T. W., Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; Biodiesel production using soybean and sunflower, *Nat. Resour. Res.*, **14**, 65-76, 2005.
- 2) Elbehri, A., Cellulosic biomass for bioenergy: Economic and analytical issues, *Economic Research*

- Service and Farm Foundation Workshop on Biofuels, Washington, D. C., Feb. 27, 2007:
<http://www.farmfoundation.org/projects/documents/ElbehriCellulosic.pdf>
- 3) Wang, M., Energy and greenhouse gas emissions impacts of fuel ethanol, NGCA Renewable Fuels Forum, the National Press Club, Aug. 23, 2005: <http://www.oregon.gov/ENERGY/RENEW/Biomass/forum.shtml>
 - 4) 渡辺隆司, バイオフィナリーの最近の展開と白色腐朽菌によるリグノセルロース前処理, 木材学会誌, 53, 1-13, 2007.
 - 5) <http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/35523.pdf>
 - 6) 大聖泰弘, 三井物産株式会社, 図解バイオエタノール最前線, 工業調査会, 東京, pp. 12-17, 2004.
 - 7) 社団法人日本エネルギー学会, バイオマス用語辞典, オーム社, 東京, pp. 180-183, pp. 356-357, 2002.
 - 8) Samsuri, M., Prasetya, B., Hermiati, E., Idiyanti, T., Okano, K., Syafwina, Honda, Y. and Watanabe, T., Effects of fungal treatments on ethanol production from bagasse by simultaneous saccharification and fermentation, *Proceedings of the 5th International Wood Science Symposium*, Sep. 17-19, 2004, Kyoto, Japan, 317-323.
 - 9) Watanabe, T., Samsuri, M., Amirta, R., Rahmawati, N., Syafwina, Prasetya, B., Tanabe, T., Ohashi, Y., Watanabe, T., Honda, Y., Kuwahara, M. and Okano, K., Lignin-degrading fungi as a biotechnological tool for biomass conversion, Sustainable Development and Utilization of Tropical Forest Resources (Imamura, Y., Umezawa, T. and Hata, T. eds), Universe Printing, Kyoto, Japan, pp. 167-173, 2006.
 - 10) Wirawan, S. S., Current and future usage of biofuels in Indonesia, *Conference proceedings in Australia-Indonesia Joint Symposium in Science and Technology*, Sep. 13-14, 2006, Jakarta, Indonesia: <http://www.science.org.au/events/indonesia/wirawan.htm>
 - 11) 松村正利, サンケアフェューエルズ株式会社, 図解バイオディーゼル最前線, 工業調査会, 東京, pp. 70-73, 2006.
 - 12) The Jatropha network worldwide: <http://www.jatropha.net/network.htm>
 - 13) 日本植物燃料株式会社 Jatropha Project: <http://www.nbf-web.com/japanese/jatropha.html>
 - 14) 社団法人日本エネルギー学会, バイオマスハンドブック, オーム社, 東京, pp. 259-263, 2002.
 - 15) Muladi, S., Kusuma, I. W., Amirta, R., Kordsachia, O. and Patt, R., Elementary chlorine free bleaching in Kraft pulping process for several timber species in East Kalimantan, Tropical woods, properties and utilizations (Muladi, S. and Arifin, Z. eds), Gadjah Mada University Press, Indonesia, pp. 215-222, 2005.
 - 16) Muladi, S., Arifin, Z., Arung, E. T., Yuliansyah, Amirta, R. and Patt, R., The prospect of *Acacia mangium* Willd. as a raw material of pulp and paper in Indonesia, Tropical woods, properties and utilizations (Muladi, S. and Arifin, Z. eds), Gadjah Mada University Press, Indonesia, pp. 174-184, 2005.
 - 17) Prasetya, B., Subyakto, Sudijono and Idiyanti, T., Utilization of *Acacia mangium* bark as binder for production of kenaf-fiber board and possibilities to increase its lignin and tannin content by degradation of holocellulose using brown rot fungi, *Proceedings of the 3rd International Wood Science Symposium*, Nov. 1-2, 2000, Kyoto, Japan, p. 347.
 - 18) Kuspradini, H., Yusuf, S., Meshitsuka, G., Suprptono, B. and Sardjono, M. A., An analysis of caloric values and characteristics of wood fuel quality preferred by some forest communities of Malinau in East Kalimantan, Tropical woods, properties and utilizations (Muladi, S. and Arifin, Z. eds), Gadjah Mada University Press, Indonesia, pp. 318-326, 2005.
 - 19) Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I. F., Anshori, S. and Ogawa, M., Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in south Sumatra, Indonesia, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 52, 489-495, 2006.
 - 20) 富田健太郎, *Acacia mangium* によるアルティソル土壌の理化学性改善に関する事例研究, 2000 年度帰国隊員支援プロジェクト報告書「パナマのアルティソル地帯におけるアグロフォレストリー・システムの確立に関する事例研究」, 2001: <http://www.tuat.ac.jp/~tropical/agroforestry/report20.htm>

- 21) Khanongnuch, C., Saowapark, T., Lumyong, S., Honda, Y. and Watanabe, T., Lignocellulolytic enzymes from thermotolerant white rot fungus *Coriolus versicolor* cultured on tropical fast-growing tree wood meal, *Abstracts of International Symposium on Sustainable Utilization of Acacia mangium*, Oct. 21-22, 2003, Kyoto, Japan, 155-158.
- 22) Mihara, R., Barry, K. M., Mohammed, C. L. and Mitsunaga, T., Comparison of antifungal and antioxidant activities of *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis*, *J. Chem. Ecol.*, **31**, 789-804, 2005.
- 23) Singh, R., Singh, S., Kumar, S. and Arora, S., Studies on antioxidant potential of methanol extract/fractions of *Acacia auriculiformis* A. Cunn, *Food Chem.*, **103**, 505-511, 2007.
- 24) Chawachart, N., Watanabe, T., Khanongnuch, C. and Lumyong, S., Rice bran as an efficient substrate for laccase production from thermotolerant basidiomycete *Coriolus versicolor* strain RC3, *Fungal Divers.*, **15**, 23-32, 2004.
- 25) Khanongnuch, C., Wanphrut, N., Lumyong, S. and Watanabe, T., Thermotolerant wood rotting fungi isolated from northern Thailand and their potential uses in lignin degrading applications, *Fungal Divers.*, **15**, 187-196, 2004.
- 26) Nishi, K., Treatment of the fermentation inhibitors from wood by *Trametes versicolor* RC3 laccase, *Sustainable Humanosphere*, **2**, p. 32, 2006.
- 27) 温室効果ガス EU, 20% 削減 首脳会議「20 年までに」承認, 産経新聞社記事, 2007 年 3 月 10 日.
- 28) バイオ燃料:自動車燃料比率, EU は 1 割目標—20 年までに, 毎日新聞社東京朝刊記事, 2007 年 2 月 25 日.
- 29) 松村正利, サンケイフューエルズ株式会社, 図解バイオディーゼル最前線, 工業調査会, 東京, pp. 42-44, 2006.
- 30) 環境省 日本の温室効果ガス排出量・排出係数: <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/index.html>
- 31) 外務省 主要各国における原油輸入の中東依存度・OPEC 依存度の推移:
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/energy/pdfs/b-6.pdf>
- 32) 北海道電力株式会社 日本のエネルギー自給率はわずか 4%:
http://www.hepco.co.jp/ato_env_ene/atomic/pluthermal/02-02.html
- 33) 農林水産省 バイオマス・ニッポン: <http://www.maff.go.jp/biomass/>
- 34) 中谷巖, 日本は地球温暖化対策で指導力を, 正論, 産経新聞社, 2007 年 3 月 10 日:
<http://www.sankei.co.jp/ronsetsu/seiron/070310/srn070310000.htm>
- 35) International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2006:
<http://www.worldenergyoutlook.org/nuclear.asp>