

バイオマスが拓く持続的社會*

渡辺 隆司**

1. はじめに

地球の総人口は爆発的に増大しており 2050 年には 90 億を超えると推定されている。爆発的な人口増加に加えて、発展途上国の生活スタイルがエネルギー多消費型に移行すると、化石資源の燃焼による二酸化炭素の排出量が加速度的に増大し、その結果、我々をとりまく地球生存圏の炭素平衡は破綻すると予想されている。一方で、容易に採掘できる化石資源の枯渇が社会経済活動に深刻な打撃を与えることも指摘されている。我々が直面するこうした資源・環境問題を解決するためには、社会の基盤を石油などの化石資源の大量消費から自然エネルギーの直接利用や再生可能なバイオマスの循環利用に転換することが何よりも必要である。バイオマスは、二酸化炭素の固定化により生産されるため、その生産と消費のバランスを保った形での変換利用は、化石資源の急速な消費に伴う資源枯渇問題と地球温暖化問題解決の切り札となると期待されている。バイオマスは有機質資源であり、太陽光や風力などと異なりエネルギー以外に様々な化学品に変換できる。このため、石油化学にかわってバイオマスから化学品を体系的に生産する産業を作り出すこの重要性は極めて高い。バイオマスから化学品、燃料、エネルギーを体系的に生産することを「バイオリファイナリー」とよび、近年研究開発が活発に行われている。

地球上のバイオマスの量はホイッタカーとライケンスによると 1.8 兆トンにおよぶ。そのうち、90% 以上が森林バイオマスであると推定されている。また、陸地のバイオマスの年間の生産量は、ホイッタカーとライケンスによると 1,173 億トンに達する。膨大な炭素固定可能をもつ森林からエネルギー・機能性物質を生産できれば、得られた経済的価値を植林、間伐など森林の育成に還元することが可能となる。森林を放置せず循環利用することにより、炭素固定化速度が上昇する。このように、環境に対する貢献が大きく、食料との競合もない木質系バイオマスを森林の育成とリンクしたかたちで、エネルギーや化学品へ変換することは人類が持続的活動を行うために必須な課題である¹⁾。

2. バイオマス産業の創成

バイオマスを活用するために革新的なバイオマス変換技術を開発することは、(1) 地球温暖化問題と資源枯渇問題解決の国際的イニシアティブをとること、(2) 石油産業からバイオマス産業に移行した後の国際社会において産業競争力をもつこと、(3) 農山村を中心とした地域経済を活性化すること、(4) エネルギー安全保障を得ること、(5) 太陽エネルギーに依存する循環型社会を構築すること、等につながる。

石油リファイナリーでは、産油国、原油を運搬する海運会社、石油コンビナートをもつ大企業や臨海工業地帯に投資が集中する。これに対し、廃棄物系バイオマスを別とすると、バイオマスは一般に都市部ではなく農村部に広く分散して存在することから、農業や林業とリンクした小規模なバイオマス変換工場が農村部に建設されることになる。このため、バイオリファイナリーでは、投資が地方に

*2011 年 12 月 24 日作成 本稿は第 7 回生存圏研究所公開講演会（2010 年 10 月 24 日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所バイオマス変換分野

E-mail: twatanab@rishi.kyoto-u.ac.jp

分散し、地方の経済と雇用を活性化するメリットを生む。離島など中央からの電力やガスの供給が難しい地域においては、バイオマスからの地産地消によって電力や熱エネルギーを供給することができる。

バイオリファイナリーは、エネルギー安全保障に貢献する。原油産出国の多くは中東にあり、政情が不安定な国も多い。これらの国が非友好国である場合には、安定的に原油を輸入するために、外交や軍事力によって一定の影響力を保持することが必要となる。日本の一次エネルギーの化石資源への依存度は 84.6% (2008 年)、エネルギー自給率 7.1% (2008 年；ただし、原子力を含めると 17.5%) であり、エネルギー安全保障は日本にとっても大きな問題である。また、インドネシアでは、原油のストックが 15 年から 20 年後には不足すると予測されており、発展途上国においても、新エネルギーの創出はエネルギー安全保障にかかわる大きな問題である。このように、バイオマスは、軍事や世界経済のバランスに大きな変化をもたらす。

バイオリファイナリーの導入は、多段階のフェーズを経て進行すると予想される (図 1)。第一フェーズは、既存の農業体系で発生するバイオマスをバイオ燃料用原料として転用することから始まった。トウモロコシやサトウキビの巨大なプランテーションをもつ米国とブラジルが、バイオエタノール生産の 90% 以上を占め、バイオ燃料産業をリードしてきた。こうしたバイオ燃料ブームは、食糧用農地の転用や投機に起因する食糧価格の高騰、天然林の破壊など、様々な負の影響も及ぼした。このため、バイオリファイナリーの第二フェーズとして、食糧と直接競合しない木や草からバイオ燃料を生産する技術開発に注目がシフトしている。木や草の利用においても、持続的なバイオマスの生産と環境保全、均衡ある富の分配のための、法制度の整備は必須である。バイオリファイナリーの第三フェーズは、バイオマスの構造上の特徴を活かした新しい機能性材料の生産、バイオマスからの石油代替え化学品の生産である。付加価値の高いバイオ化学品の生産は、生産に関わる全体のコスト効率を向上させるとともに、個別の技術に立脚した多様性を生み出す。こうした動きには、バイオマスを原料とする様々な産業の統合が同調する。従来、紙パルプと建材の生産工場に化学品や食品、機能性材料、エネルギー供給の工場が合体し、コンビナート化するであろう。実際、スウェーデンやオーストリアなどには、こうしたバイオマスコンビナートが誕生している。一方、石油化学とバイオマスの融合もすでに始まっている。石油化学品製造プロセスの一部にバイオマス由来の化学品が使えれば、石油化学で培った技術や設備がそのまま活かせる。実際、基幹石油化学品であるエチレン、プロピレンをバイオエタノール、バイオプロパノール、バイオブタノールから作る研究開発が世界各国で行われている。すでに、ブラジルの大手石油会社である Braskem 社はバイオエタノールからポリエチレンの生産を開始するとともに、ポリプロピレン生産の研究開発を進めている。また、Dow Chemical 社と三井物産が出資する

ブラジルの Santa Vitória Açúcar e Alcool Ltda (SVAA) 社もポリエチレンの生産を行う計画を発表している。さらに、ベルギーの最大手化学会社 Solvay 社は、バイオエタノールから製造したエチレンを原料とし、ポリ塩化ビニル (PVC) を生産する計画である。日本の経済産業省と

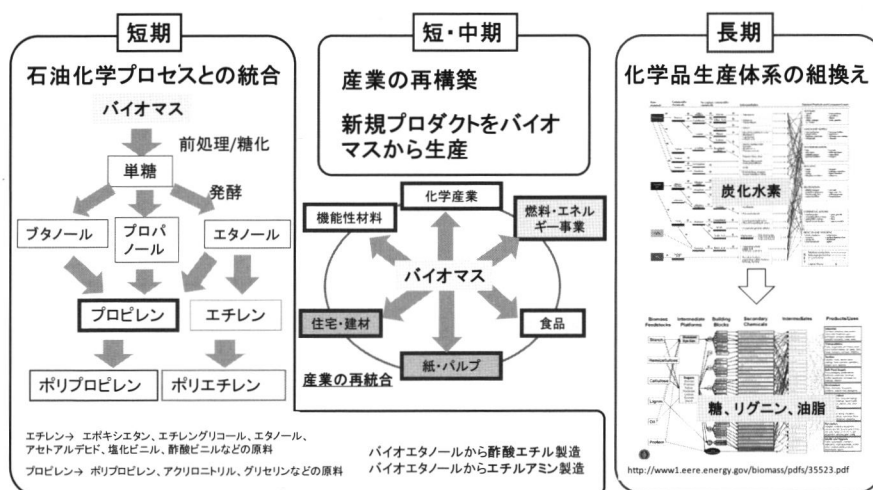


図 1：石油リファイナリーからバイオリファイナリーへの展開

農林水産省が中心になって設立したバイオ燃料技術革新協議会でも、バイオエタノールをプロピレンへ変換する技術開発のロードマップが示されており、現在 NEDO のプロジェクトでバイオプロピレン製造の研究開発を実施中である。

バイオリファイナリーの第四フェーズは、化学品の製造体系を、石油原料からバイオマス原料に根本的に変えていく化学産業の変革である。これは、前述の通り、プラットフォーム化合物の生産と変換の技術開発が鍵となる。バイオ燃料は、一定の品質をクリアすればどこの国で製造したバイオエタノールも区別がつかない。そうすると、遠隔地など地産地消のエネルギー供給を別とすれば、資本や技術開発でリードする国が国際的な優位性をもつことが予想される。こうした理由から、バイオマスからエネルギー、化学品を製造する基本特許を取得することは、今世紀後半以降の世界経済の主導権を握ることに直結するであろう。米国では、こうした認識が石油ショック以前から浸透しており、多面的なバイオマス変換法の開発が継続的に行われている。例えば、遺伝子組換え技術を用いて大腸菌にアルコール発酵能を付与する基本特許は、すでに 1991 年に米国で登録されており、1990 年代前半のアルコール発酵菌の分子育種に関する広範な国際特許が、日本や欧州におけるバイオマスからのアルコール生産の戦略に大きく影響したことは広く知られている。米国のバイオマス政策の大きな特徴は、1999 年 8 月のクリントン大統領による「バイオマス利用の声明」、2002 年 10 月のブッシュ大統領による「米国におけるバイオエネルギーとバイオ製品のビジョン」に見られるように、経済戦略とエネルギー安全保障の面から、バイオマス変換が“国益”と一致することが明確に謳われている点である。こうした国家戦略は、米国の民間企業にも浸透しており、一部の化学系有力企業では、石油化学品からバイオマス由来の化学品への移行が進んでいる。例えば、DuPont 社では、2004 年に合成ポリエステルの原料である 1,3-プロパンジオールの生産を石油からの化学合成からトウモロコシデンプンの発酵プロセスに切り替えた。バイオマス産業へ転換する動きは今後益々加速するであろう。

米国のバイオマス政策に対し、わが国では、21 世紀初頭まで、政令（新エネルギー利用などの促進に関する特別措置法施行令、第 1 条）で規定される新エネルギーの項目に「バイオマス」が含まれていないという低い認識であったが、2002 年 1 月 25 日に政令で定める新エネルギーのひとつとして「バイオマス」が新たに盛り込まれ、以降バイオマス利用への関心が高まってきた。平成 14 年 12 月には、「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定され、バイオマス利用を促進する様々な補助事業が行われてきた。以降、バイオ燃料を中心とした研究開発が行われてきたが、近年では、バイオマスを含めて変換するバイオリファイナリーに注目が集まっている。

3. アジアにおけるバイオマスの活用

バイオリファイナリーは、熱帯雨林をもつ東南アジア地域に有利な産業であり、産油国が原油産出によって大きな富を得てきたように、バイオマスの生産と高度利用によってとくに東南アジア地域に新たな産業を興し、国際間および国内の地域格差の是正につなげるべきである。東南アジア地域は、植物の炭素固定量が大きいのみでなく、豊富な微生物資源をもつことから、生物資源をベースとした産業の地盤として最適である。こうした新しい産業を東南アジア地域に育成して、均衡ある発展を達成するためには、先端的なバイオマス利用の技術開発を行っている先進国と東南アジア諸国との国際協調が必須である。この国際協調は、技術供与や投資のみならず、バイオマスとバイオ製品の流通、二酸化炭素の国家間取引、環境や地域社会への影響評価、人材育成、およびそれらを統制する法制度の整備を含めるべきである。東南アジア地域を資源の供給基地としてのみ捉えるのではなく、アジアのパートナーとして、また宇宙船地球号に乗る運命共同体として、環境保全や地域社会への影響を評価しながら、技術や制度面を含めて支援していくことが必要である。

4. キノコに学ぶ木質バイオマスの生物学的変換

樹木や多くの草本植物の細胞壁では、セルロースなどの多糖類がリグニンにより被覆されているため、細胞壁多糖をセルラーゼなどの酵素で加水分解するためには、リグニンによって固められた細胞壁をほぐして細胞壁多糖を露出させる前処理が必要となる。リグニンを剥がす前処理と酵素による細胞壁多糖の分解のための技術開発が、木や草から効率よくバイオエタノールを生産する大きな鍵となる。リグニンの分解は、バイオエタノールのみでなく、糖やリグニンそのものから様々な化学品を作る鍵ともなる。リグニンとは、ベンゼン環に炭素が3つつながったユニットが多数手をつないでできた

不規則な高分子である。樹種によって異なるが、重量比では、針葉樹木材のおよそ 3 割、広葉樹では 2 割ほどがリグニンで占められている。このリグニンによる被覆を壊すために、これまで、様々な物理的、生物的、および化学的前処理法が検討されてきた。

一方自然界に目を移すならば、リグニンを室温で分解するキノコ（白色腐朽菌）の利用が注目される。ほとんどの白色腐朽菌は、リグニンばかりでなくセルロースも同時に分解する。リグニンも多糖も失われるこのタイプの菌処理は、バイオマス変換の前処理としては利用価値が低い。これに対し、選択的白色腐朽菌と呼ばれるキノコは、セルロースを残して、リグニンを高選択的に分解するため、バイオマス変換に有用である（図2）²⁻¹¹⁾。筆者らは、この種のキノコの木材分解機構に興味をもち、その機構解明に向けた研究を行っている。これまでに、セルロースの分解を抑える新規な代謝物を発見し、その機能解明を行った。また、選択的白色腐朽菌は、酵素から遠く離れた場所でリグニンを分解する。そこでは、低分子代謝物を介したラジカル反応が、リグニンを分解する。リグニン分解に関わるラジカル種を解析し、その反応性を明らかにするとともに¹⁰⁾、ラジカル生成を人工的に制御することで、室温、水溶液中で木材中のリグニンが分解されてセルロースが露出することを見出した。

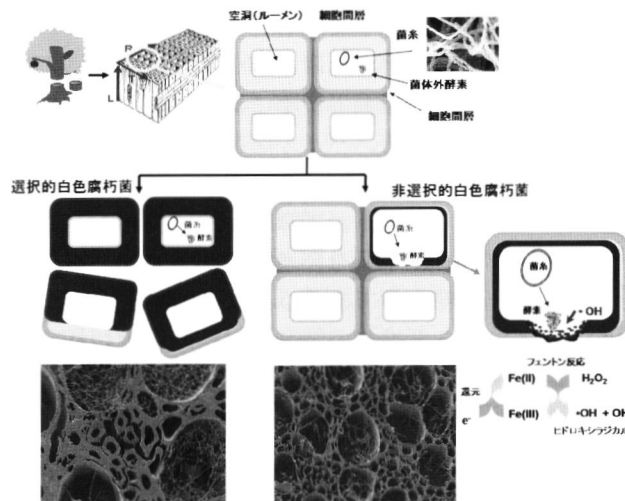


図2：リグニンを分解するキノコの異なる木材腐朽様式

5. マイクロ波を利用した木質バイオマスの生物学的変換

木材の成分を分離する方法として、マイクロ波を利用する方法がある。様々な溶媒や触媒を含む液に木材を浸して、マイクロ波を照射するとリグニンが分解してセルロースが露出する^{8, 11-15)}。筆者らは、このプロセスを利用してエタノールを製造するプロセスの共同開発に取り組み、ベンチプラントを建設した（図3）¹¹⁾。また、マイクロ波増感作用を利用して木材から紫外線吸収剤などの高付加価値物をつくる研究も同時に進めている。こうした処理では、木材細胞壁の破壊により糖鎖が露出するとともに、リグニンの構造が変化する。酵素分解の効率化や有用物質の生産のため、これらの微細構造の変化を、糖鎖に特異的に吸着するタンパク質や超高感度 NMR、高分解能質量分析機などを用いて解析している¹⁶⁻¹⁷⁾。

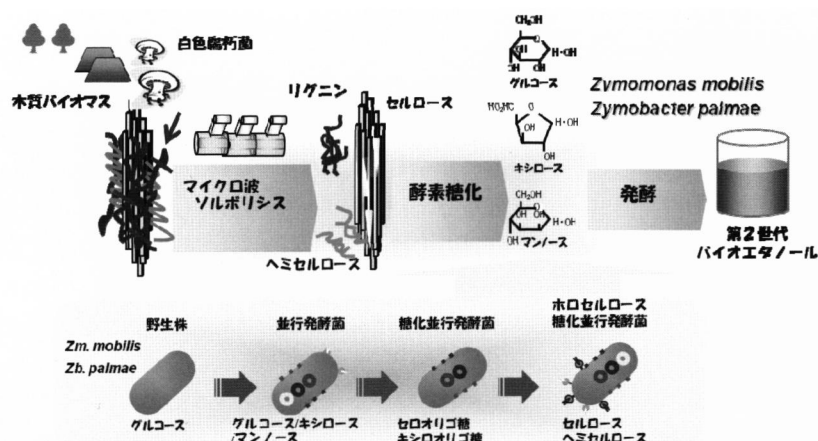


図3：キノコ、マイクロ波、高速発酵細菌を用いる木質バイオマスからのエタノールの生産プロセス¹¹⁾

6. おわりに

バイオマスにおいて森林の育成は、動植物の生態系は言うまでもなく、海洋生態系を含む地球環境全体に計り知れない恩恵を与える。例えば、沿海部の森林を伐採したために近海漁業が壊滅的なダメージを受けた例は良く知られている。また、森林を伐採したために、大規模な土石流が発生して多くの被害者を出した例は多い。バイオマスの化学資源化においても、エネルギー供給効率のみに注目した経済活動をするならば、将来大きな代償を払うことになるであろう。木質バイオマスの活用においては、森林の持続的育成、地域の生態系の維持、健全な雇用、森林文化の継承、災害や気候変動への影響など、経済性とそれ以外の要素を多面的に解析し、長期的な視点から政策を主導する枠組みが必要である。

バイオマスは、再生可能な唯一の有機物であるために、エネルギー以外への有機物質生産への貢献が大きい。一方、エネルギーへの利用では、地上や宇宙での太陽光発電やの役割も大きく、これらのベストミックスが必要である。宇宙太陽光発電は、将来の大規模エネルギー供給システムとして期待される。

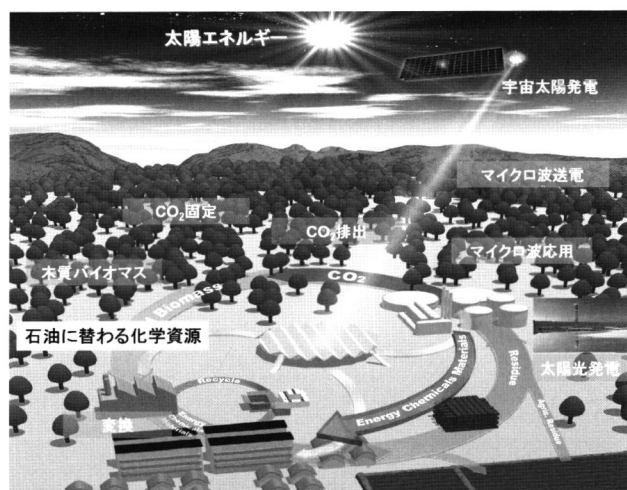


図4：化石資源から太陽エネルギーを利用した社会への変革

参考文献

- 1) 渡辺隆司, 産業構造の大転換—バイオリファイナリーの衝撃—, 地球圏・生命圏・人間圏 持続的な生存基盤を求めて, 京都大学学術出版会, 281-300, 2010.
- 2) 渡辺隆司, リグノセルロースバイオリファイナリーのための担子菌特異的リグニン分解能の解析と応用, グリーンスピリッツ, 5, 3-11, 2010.

- 3) 渡辺隆司, 白色腐朽菌によるリグニン分解, バイオマスハンドブック (第二版), オーム社, 189-196, 2010.
- 4) Nishimura, H., Tsuda, S., Shimizu, H., Ohashi, Y., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., *De novo* synthesis of (*Z*)- and (*E*)-7-hexadecenylitaconic acids by a selective lignin-degrading fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*, *Phytochemistry*, **69**, 2593-2602, 2008.
- 5) Nishimura, H., Murayama, K., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Diverse rare lipid-related metabolites including ω -7 and ω -9 alkenylitaconic acids (ceriporic acids) secreted by a selective white rot fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*, *Chem. Phys. Lipids*, **165**, 97-104, 2012.
- 6) Nishimura, H., Setogawa, Y., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Epoxy ceriporic acid produced by selective lignin-degrading fungus *Ceriporiopsis subvermispora*, *Chem. Phys. Lipids*, **164**, 707-712, 2011.
- 7) Ohashi, Y., Kan Y., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Redox silencing of the Fenton reaction system by an alkylitaconic acid, ceriporic acid B produced by a selective lignin-degrading fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*. *Org. Biomol. Chem.*, **5**, 840-847, 2007.
- 8) Sasaki, C., Takada, R., Watanabe, T., Honda, Y., Karita, S., Nakamura, Y. and Watanabe, T., Surface carbohydrate analysis and bioethanol production of sugarcane bagasse pretreated with the white rot fungus, *Ceriporiopsis subvermispora* and microwave hydrothermolysis, *Biores. Technol.*, **102**, 9942-9946, 2011.
- 9) Yamagishi, K., Kimura, T. and Watanabe, T., Treatment of rice straw with selected *Cyathus stercoreus* strains to improve enzymatic saccharification, *Biores. Technol.* **102**, 6937-6943, 2011.
- 10) Ohashi, Y., Uno, Y., Amirta, R., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Alkoxy and carbon-centered radicals are primary agents to degrade non-phenolic lignin substructure model compounds, *Org. Biomol. Chem.*, **9**, 2481-2491, 2011.
- 11) 渡辺隆司, 築瀬英司, 担子菌・マイクロ波照射前処理と高速発酵細菌を用いる高効率バイオエタノール生産システム, 次世代バイオエタノール燃料製造の最新技術と事業化, フロンティア出版, 287-294, 2010.
- 12) Mitani, T., Oyadomari, M., Suzuki, H., Yano, K., Shinohara, N., Tsumiya, T., Sego, H. and Watanabe, T., A Feasibility Study on a Continuous-flow-type Microwave Pretreatment System for Bioethanol Production from Woody Biomass, *J. Japan Inst. Energy*, **90**, 881-885, 2011.
- 13) Liu, J., Takada, R., Karita, S., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Microwave-assisted pretreatment of recalcitrant softwood in aqueous glycerol, *Bioresour. Technol.*, **101**, 9355-9360, 2010.
- 14) Verma, P., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Microwave-assisted pretreatment of woody biomass with ammonium molybdate activated by H_2O_2 , *Biores. Technol.*, **102**, 3941-3945, 2011.
- 15) Baba, Y., Tanabe, T., Shirai, N., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Pretreatment of Japanese cedar wood by white rot fungi and ethanolysis for bioethanol production, *Biomass Bioenergy*, **35**, 320-324, 2011.
- 16) Kawakubo, T., Karita, S., Araki, Y., Watanabe, S., Oyadomari, M., Takada, R., Tanaka, F., Abe, K., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Analysis of exposed cellulose surfaces in pretreated wood biomass using carbohydrate-binding module (CBM)-cyan fluorescent protein (CFP), *Biotechnol. Bioeng.*, **105**, 499-508, 2010.
- 17) Yoshioka, K., Ando, D. and Watanabe, T., A comparative study of matrix- and nano-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry of isolated and synthetic lignin, *Phytochem. Anal.*, in press, DOI 10.1002/pca.1350, 2011.