

〔報 告〕

## 再生可能なエネルギー資源としての木質バイオマスと 木材腐朽菌によるバイオマス変換

### Woody Biomass as a Renewable Energy Resource and Biomass Conversion by Wood Rotting Fungi

佐藤 伸

SATO Shin

和文要旨：近年二酸化炭素や温室効果ガスによる地球温暖化と石資源枯渇の危機から、化石資源に代わり再生可能なバイオマスからのバイオ燃料の生産が世界各国の注目を浴びている。わが国においてもコメやサトウキビに加えて、木材や稲わらといったリグノセルロース系バイオマスからのバイオ燃料生産技術の開発が行われ、実用化に向けた基盤の整備も進んでいる。筆者の現在の研究では木質バイオマスをエタノールなどの有用物質に変換するプロセスの中で微生物の作用を取り入れ、環境にやさしい変換プロセスを構築することを目的とし、鳥取県東部の智頭町芦津のスギ人工林、及び近隣の天然の広葉樹林においてスギのバイオマス変換に役立つ新規木材腐朽菌の探索を行っている。

【キーワード】 木質バイオマス、資源変換、木材腐朽菌

**Abstract** : Under circumstances such as global warming caused by carbon dioxide and other greenhouse gas and crisis of depletion of fossil resources, in recent years, biofuels such as bioethanol and biodiesel from biomass have captured the world's attention as reproducible energy alternative to petroleum. In Japan, techniques for biofuel production from lignocellulosic biomass such as woody materials and rice straws as well as rice and sugar cane have been developed, and preparation of the foundation for practical use is now in progress. Current study is to create conversion processes from biomass to valuable materials by environmentally-benign method with microbial behavior. We are investigating novel wood rotting fungi useful for biomass conversion in artificial cedar forest and natural hardwood forest in Ashizu, Chizu, Tottori.

【Keywords】 Woody biomass, resource conversion, wood rotting fungi

#### 1. はじめに

日本の食料自給率の低下が危惧されている。農林水産省発表のデータによると、2008年のわが国の食料自給率は供給熱量ベースで41%である。この傾向は少子高齢化や第一次産業従事人口減少が進む日本にとってさらに拍車がかかることが予想される。最近フードアクションニッポンと称して国産、県産食材を食べようという動きが出てきた。タレントが有機農業に取り組み、採れたての野菜を頬張る様子や、全国のその土地ならではの旬の味覚を扱ったグルメ番組が連日連夜テレビを賑わせる。

国民の食の安心・安全に対する関心は高い。

我々が毎日口にする食料と同様に今の生活に欠かすことができないエネルギーについて、日本の自給率の低さはあまり話題に上ることがない。日本のエネルギー自給率は食料自給率よりもはるかに低い。資源エネルギー庁発行の2009年エネルギー白書によると、2007年の日本のエネルギー自給率は4%であり、原子力発電を合わせても19%である。政治に不安のある中東諸国から主に輸入される石油の依存度は、日本は46%と先進国の中で最も高い。また2008年の石炭の生産量世界一は中国であるが、

その石炭を現在世界で最も多く輸入しているのが日本である。エネルギー資源に乏しい日本と言われて久しいが、エネルギー自給率の実態は、1980年ですでに5%にまで低下してから原子力発電の導入以外に自給率の向上が図られないまま、現在まで横ばいで推移している。21世紀の世界的な脱化石資源の風潮の中で、国内のエネルギー自給率向上なしには国力の維持、発展は難しい。国内の再生可能な資源、未利用資源のエネルギー転換は今後ますます重要な意味をもつ。

## 2. 再生可能な自然エネルギー

今、再生可能な自然エネルギーに注目が集まっている。主に太陽光、水力、風力、地熱、バイオマスがこれにあたる。わが国に存在するこれらの一次エネルギーは1990年で1.7%、2006年で1.8%と16年間ほとんど導入が進んでいない。社会の変化に伴った国内の電力需要の急激な拡大に対しては、主に原子力と海外からの安価な天然資源を利用することで対処してきたものと思われる。2009年9月、日本は政権が交代した。民主党を軸とする新政府の環境政策の一つに、再生可能エネルギーの利用推進が挙げられている。民主党のエネルギー対策では2020年までに再生可能エネルギーの一次エネルギー総供給に占める割合を10%に押し上げ、将来の日本のエネルギー自給率を2050年に30%、2100年には50%にすることを目標に掲げている。これまで長きに渡って利用されてきた水力に加えて、太陽光、風力、バイオマスを含めたエネルギー安定供給体制の確立と、経済と環境との両立を可能にする政策策定が今後どう進むか注目したい。

## 3. バイオマス

「バイオマス：biomass=[bio]+[mass]」とは元来生態学の分野で生物量、若しくは生物現存量を表す用語である<sup>1</sup>。この“biomass”という学術用語が初めて使われたのは1934年、Bogorov（ロシア）が海洋生物協会誌にプランクトンの季節ごとの変化の調査結果を報告した論文といわれている。生態学の用語の枠を超えてエネルギー源としての生物資源の意味を含むようになったのは石油ショック以降であり、代替エネルギーの推進が契機になったといわれる。

バイオマスは大別して生産系と未利用資源系に分けられる。生産系は陸域系と水域系からなり、陸域系は地上で栽培する糖質系のサトウキビやデンプン系トウモロコシなどがあり、水域系では淡水のホテイアオイ、海洋系のマコンブなどがある。また未利用資源系は農林水産系と廃棄物系に分けられ、農林水産系には稲わらなどの農

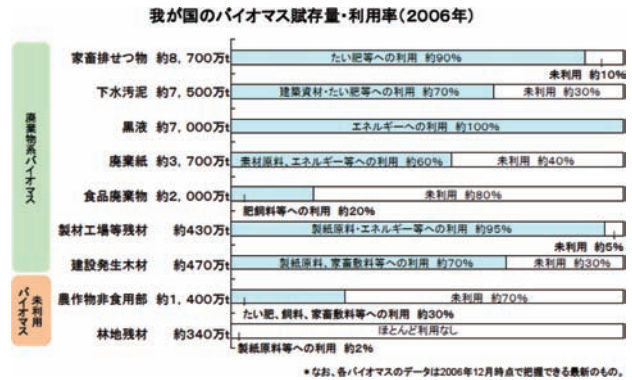


図1 2006年農林水産省発行のわが国のバイオマス賦存量に関する資料

産系、家畜糞尿などの畜産系、間伐材などの林産系、投棄魚などの水産系がある。廃棄物系は下水汚泥などの産業系、家庭ごみなどの生活系からなる。このようにバイオマスの種類は多岐にわたり、その賦存量は膨大である。その中で「恒常的に一定量供給できる」エネルギー資源として候補になるのは「有機性廃棄物」と「エネルギー作物」である。木質系バイオマスや、サトウキビ、トウモロコシ、アブラナ、ミスキャンサスなどの草本系バイオマスがエネルギー作物にあたる。わが国の賦存量の多いバイオマスのうち、稲わらなどの農作物非食用部980万トン、林地残材333万トンが未利用となっている(図1)。現在、国家戦略として食料と競合しないこれらのセルロース系バイオマスエネルギー資源に変換し利用する事業が日本各地で展開されている。

## 4. 鳥取のバイオマス

鳥取には森林や海産物などの天然資源が豊富にある。中でも木質系バイオマスの賦存量は特徴的である。鳥取県庁ホームページによると鳥取県全体の森林率は74%であり、全国平均の67%よりもかなり高い。鳥取県が推進する「とっとり発グリーンニューディール」政策でも、新エネルギー技術開発・導入として、木質バイオマスエネルギーの導入促進が挙げられている。豊かな森林と近年急激な増加で問題になっている竹を有用な資源と考え、鳥取の風土に合わせた地産地消のエネルギー施策を考えていく必要がある。未利用量が多くある一方で、現在の変換技術では木質系バイオマスの利用はボイラーやペレットストーブの燃料などに限定され、バイオエタノールへの変換実用化はまだハードルが高い。鳥取県内の間伐材の利用率は平成20年で43%あり、半分以上は未利用のままである。木材を固形物としてではなく有機物の集合体として見ると、木材の成分には現在の化石資源から作られる化学製品の代替原料となる物質が多く

含まれている。木材の成分分離と加工・変換技術の進歩がきっかけとなり、鳥取県内の木材の利用が促進されることを筆者は期待している。

## 5. 木材の成分利用

木材は主成分と副成分からなり、主成分はセルロース、ヘミセルロース、リグニンからなる。スギでは95%、ナラなどの広葉樹ではほぼ100%がこの主成分から構成されている。セルロースはグルコース同士が $\beta$ -1, 4-結合した規則正しい構造からなる。ヘミセルロースはグルコース、マンノース、ガラクトース、キシロース、アラビノースなどの糖とウロン酸、酢酸からなる。セルロース、ヘミセルロース由来の糖は食品や医薬品、エタノール発酵の原料としてだけでなく、フラン誘導体やジカルボン酸などの合成ポリマーの石油代替原料にもなることから有用物質としての価値が高い。リグニンはフェニルプロパンがランダムに結合した構造からなり、木材中ではセルロースとヘミセルロースを接着固定し、木材の防腐剤としての役目を果たしている。一方でリグニンはバイオマス変換においては難分解性の高分子であるためにスムーズな木材の成分利用の妨げにもなる。近年の木材からのバイオエタノール生産では効率のよい脱リグニン処理が大きな開発テーマの一つである。これまでに知られている前処理の方法は、粉碎・微粉碎、蒸煮・爆砕、マイクロ波、アルカリクラフトパルプ化、超・亜臨界水、有機溶媒（ソルボリシス）、酸、担子菌などがある。どの脱リグニン処理にもそれぞれ一長一短があり、実用化の面でコストに見合った効果を得ることは難しく、今後の技術革新が待たれる。

## 6. 木材腐朽菌の役割

自然界では木材は昆虫や微生物によって分解され、最終的に二酸化炭素となって大気中に放出される。木材の炭素循環において最も重要な役目を果たすのが、我々の食卓にも馴染みのあるきのこの仲間である。木材を生育基質とするきのこにはシイタケ、ヒラタケ、マイタケ、ナメコなど食味のよいきのこも多い。これらの木材腐朽菌は単独で木材中のセルロースやヘミセルロースだけでなくリグニンも同時に分解できる。木材腐朽菌の中でも特にリグニンに対して高い分解力を持つものを白色腐朽菌と呼び、白色腐朽菌によって分解を受けた木材は中が白色化し、もろく崩れやすい。この白色化はすなわちリグニンが分解されて漂白化されたことを意味し、残ったセルロースは他の多くの昆虫、微生物の栄養源となる。白色腐朽菌は地球上で唯一高分子のリグニン分解機能を

持つ生物であるが、その分解メカニズムは極めて複雑である。リグニン分解酵素として2種類のペルオキシダーゼであるリグニンペルオキシダーゼ、マンガンペルオキシダーゼ、フェノールオキシダーゼであるラッカーゼがそれぞれ単離、クローニング、及び機能解析されておよそ30年が経過している。それらの酵素が触媒する非フェノール性リグニンモデル化合物の分解についてはこれまでに証明がなされているが、実際の白色腐朽菌による三次元に絡み合った木材中のリグニンの分解は酸化酵素に加えて菌自身が分泌する種々の有機酸や不飽和脂質などの低分子代謝物から発生するフリーラジカルが協調的に反応を繰り返して引き起こされるものであり、リグニンの生分解メカニズムは完全に解明されていない。白色腐朽菌そのものはむしろ食用きのことして一般に知られており、きのこ産業の中で品質や生産性向上のための人工培養技術が進歩している。これまでの栽培技術を応用し、木材の成分利用という目的で白色腐朽菌による脱リグニンプロセスを構築・最適化できれば木材の利用促進にもつながる。これまでに木質成分利用のための白色腐朽菌処理では、白色腐朽菌処理に加えてマイクロ波—ソルボリシスを組み合わせることで化学的、物理的処理と同等の糖化収率が得られた研究例がある。この白色腐朽菌は *Ceriporiopsis subvermispora* という菌で国内では報告がない。実際の屋外実験では海外の菌では利用に制限があることから、日本の環境に合った研究を行うためには *C. subvermispora* に匹敵する国産の白色腐朽菌を自然界から単離し、利用方法を確立していくことが重要である。

## 7. 本学での取り組み

筆者は大学院と研究員時代を含めて10年以上木材腐朽菌に関する研究に取り組んできた。これまでに学んできた知識を基に、2009年4月に鳥取環境大学に赴任以降、木質バイオマスの成分利用を目的とした生物化学変換技術に有用な新規有用微生物の探索に取り組んでいる。2009年7月、鳥取環境大学と智頭町芦津財産区との間で森林の新たな価値の創造を目的に研究協力協定が交わされ、菌類採集地が確保できたこと、さらにその約1ヵ月後に外部研究資金の申請が採択されたことをきっかけとして、芦津のスギ人工林からの強力なリグニン分解菌の採集をスタートすることができた。

本研究についての概要を図2に示す。芦津奥地の三滝ダム周辺は間伐が行き届き、光が差し込む明るいスギ林が多く、菌類の生育環境としては比較的適した場所だった。菌類採集は大学の講義の一環として学生に協力してもらい、図3のオレンジ色のサークルで囲んだ場所で10



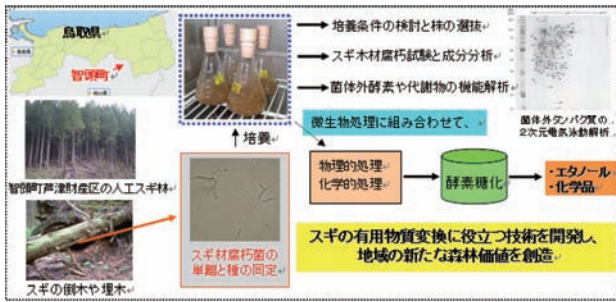


図2 研究の概要



図3 芦津財産区の菌類採集地：オレンジのサークルは採集地点を表す

月から11月後半まで行った。これまでの菌類調査の結果、スギ人工林から *Hypholoma sublateritium* (クリタケモドキ)、*Hypholoma fasciculare* (ニガクリタケ)、*Inocybe umbtratica* (シロニセトマヤタケ)、*Laetiporus sulphruerus* (マスタケ)、*Oligoporus caesius* (アオゾメタケ)、*Oxyporus cuneatus* (ヒメシロカイメンタケ)、*Pholiota lubrica* (チャナメツムタケ)、*Pleurocybella porrigens* (スギヒラタケ)、*Psathyrella gracilis* (ナヨタケ)、*Strobilurus oshimae* (スギエダタケ)、*Trametes orientalis* (クジラタケ)、*Trametes versicolor* (カワラタケ) の子実体を採取することができた。これらは広葉樹林内で採取した子実体30種以上に比べると極めて少ない。日本のスギ人工林における生物多様性の研究は動物のみならず菌類の観点から見ても興味深い。

スギはもともと一般的な落葉広葉樹に比べてリグニン含量が1.5倍高い。ヒノキやスギはヒノキチオールなどの抗菌作用のある物質を自ら作り出していることから微生物分解をそもそも受けにくい。その一方で自然のスギ林にはスギのリグニンを強力に分解して、スギ林の炭素循環を担う白色腐朽菌が存在することが十分考えられる。筆者は採集した菌がスギの木材にどのような影響を与えるのかを調べるため、寒天プレート上で分離、培養

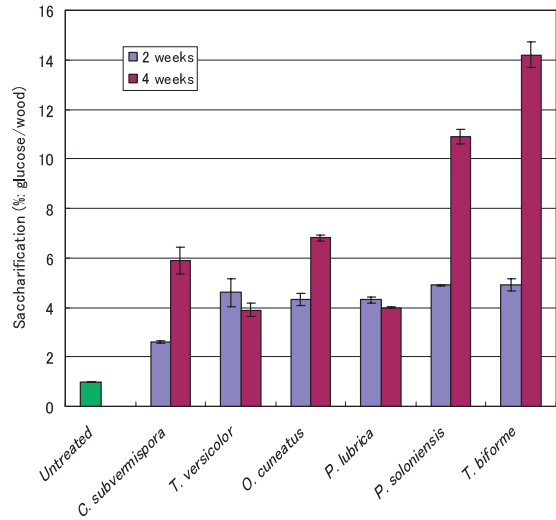


図4 芦津から単離した木材腐朽担子菌によるスギの酵素糖化試験

した *H. sublateritium*、*O. caesius*、*O. cuneatus*、*P. lubrica*、*P. porrigens*、*S. oshimae*、*T. orientalis*、*T. versicolor* についてスギ木粉の腐朽試験とともに菌処理スギの酵素糖化実験を行った。この結果、最も重量減少が大きいものは *S. oshimae* であり、2週間の培養で17%であったものの、糖化率は2%とかなり低い値であった。これとは対照的に重量減少が少なく糖化率の高いものは *O. cuneatus* と *P. lubrica* であった。重量減少率はどちらも10%程度であり、糖化率は5%であった。これは比較対象としたモデル白色腐朽菌 *Ceriporiopsis subvermispora* の約2倍である。*C. subvermispora* は木材中のリグニンを選択的に分解する菌として世界中で研究され、昔から紙のバイオブリーチングに利用されている。これまでの研究結果から2週間の培養で針葉樹から採取した *O. cuneatus*、*P. lubrica* に加えて、広葉樹林から採取した *Piptoporus soloniensis* (シロカイメンタケ)、*Trichaptum biforme* (ハカワラタケ) の2株は菌処理2週間と4週間ともに *C. subvermispora* に比べて2倍以上高い糖化率が得られている(図4)。この結果は菌処理によって木材中のリグニンが選択的に除去されたことを示唆し、セルラーゼのセルロース表面に対するアクセシビリティが高まったために糖化効率が上昇したことを意味する。今回高い糖化効果が得られた *O. cuneatus*、*P. lubrica*、*P. soloniensis*、*T. biforme* についてはほとんど研究が報告されていない。本研究によって木質バイオマス変換に役立つ可能性のある国産有用微生物が発見できた意義は大きい。現在、これらの菌を用いたスギ木材の前処理に加えて、乾式粉碎、湿式粉碎、マイクロ波処理といった物理的処理を組み合わせることによって更なる効率のよい糖化処理方法の検討を行っている。最近の結果では *T. biforme* で

4週間処理した木粉に200℃、12分間マイクロ波を照射することにより、スギ木粉1g当たり320mgのグルコースが生成することが明らかとなった。

これからの研究では、昨年秋に採取し選抜した木材腐朽菌は図鑑からの簡易同定であるために、正確な種を知る上で木材腐朽菌の分子生物学的な遺伝子解析による種の同定を検討している。種の同定と平行して、選抜した木材腐朽菌のリグニン分解メカニズムの詳細な解析を行う。生化学的研究分野において、現在ポストゲノム時代に突入している。木材腐朽菌がリグニンの分解過程で代謝する菌体外タンパク質のプロテオーム解析、オリゴペプチド、有機酸などの水溶性低分子代謝物のメタボローム解析を進め、後々は遺伝子の転写レベルでのトランスクリプトーム解析についても取り組んでいきたいと考えている。これらの解析を通じて単離した有用菌がどのようにしてリグニン分解を引き起こすのか、そのメカニズムを明らかにし、その機能を取り入れた新しい木質バイオマスの生物化学変換技術を開発していきたいと考えている。

#### 8. おわりに

わが国のバイオマス賦存量の観点から木材からの有用物質生産は日本のエネルギー自給率向上や地方経済活性化の起爆剤となる可能性を秘めている。現在取り組んでいる産官学を総動員したバイオマス変換技術が今後飛躍に進展することによって、太陽光、水力、風力、地熱、バイオマスを含めた複数の再生可能な資源をエネルギー基盤とする社会が近い将来日本に築かれていくことを期待したい。

#### 参考図書など：

- ・バイオマスハンドブック 第2版（オーム社）2009
- ・農林水産省ホームページ
- ・鳥取県庁ホームページ
- ・2009年エネルギー白書（資源エネルギー庁発行）
- ・環境ビジネス2010年1月号（日本ビジネス出版）
- ・バイオマス技術入門（地域資源循環技術センター発行）2009

（受付日2010年3月18日 受理日2010年5月12日）