

木材の微生物的利用

東京農工大学教授
原 口 隆 英

本文は、林産試験場の職場研修会で行われた講演の要旨である。

木質を利用した堆肥や土改材の製造がかなり以前から行われている。これは木材の有効利用に微生物の働きが生かされた一例である。ここでいう木材の微生物的利用というのは、そのような形で木材と微生物がかかわりを持つことである。たとえば、セルロース、リグニン、ヘミセルロースなど木材の化学成分の利用に、微生物の作用を取り入れた「微生物によるパルプ化」「木材の酵素糖化」などが考えられる。その結果、太陽エネルギーを固定したすばらしい材料～木材が 100%活用されるようになることを期待したいと結ばれた。

はじめに

最近、バイオマス利用技術と関連して木材と微生物とのかかわりが注目されるようになってきた。もちろん、植物資源である木材が微生物によって分解代謝されることは、100年以上も前に明らかにされたことであるが、その全体のすがたは必ずしも明らかではない。生態的にみると、細菌接合菌類、子のう菌類、担子菌という順で、木材への侵入機序があるらしいことや、分解の主役は担子菌であるということなどは明らかにされてきたが、利用をする上での詳細は未だ不明といえる。そこで、現状ではどこまで微生物による分解の様子が明らかにされているのか、そして将来どのくらいまで利用が可能かということなどについて概観してみることにした。

木材は限りない資源か

木材はよく再生可能な資源であるといわれるが、果たして人類の利用を賄えるのだろうか。化石資源などとの対比で探してみる。

現在、地球上で埋蔵が確認されている化石資源の総量は、それらの主成分である炭素量に換算して約 500 億トン（石炭：石油：天然ガス = 5：2：1）であるといわれている（以下、資源・エネ

ルギー量は炭素換算で表す）。これに対して全世界の年間エネルギー消費は 5 億トンであるから、化石資源をエネルギーのみに使用するとしても、せいぜい 100 年しかもたない。したがってエネルギー以外の使用量を考え合わせれば、これらの化石資源はさらに早い時期に尽きてしまうものと思われる。

一方、全世界の年間の光合成による炭素固定量は 84 億トンと推定されている。これだけでも消費エネルギーの 20 倍ほどの量になるのであるが、さらにバイオマス貯蔵量は 810 億トンと確認されている。これをうまく使えば、全世界のエネルギーはもちろん、もろもろの製品原料を満足することが可能になる。こうしたことを考えれば、バイオマス資源の 9 割を占める木材を、無尽蔵な資源と考えるのはごく妥当なことといえよう。

木材と微生物のかかわり

さて、微生物的利用を検討する前に、まず基本的なことからについて簡単に触れておこう。

周知のように、木材の化学成分はセルロース、リグニン、ヘミセルロース、抽出成分などで、これらの構成比率はおおよそ図 1 に示すようになっており、針、広葉樹間でも大差ないと考えて良い。

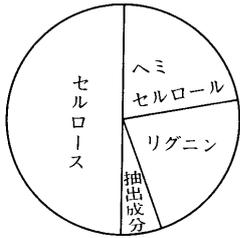


図1 木材の化学成分の構成比

ただし、ヘミセルロースやリグニンの構造には相違があるので、利用上はこの点を考慮しておく必要があるように思われる。

一方、微生物を一般的な分類表で示すと表

1のようになるが、こ

のうち木材の分解に何らかの形で関与するのは、細菌、放線菌、接合菌、子のう菌、不完全菌、担子菌などである。なお最大の寄与者である担子菌の分類を示すと表2のようになるが、木材に主としてかわりを持つのは帽菌類と考えて良い。

このような微生物が木材のマイナス要因として働くと、木材の腐朽、変色、汚染、悪臭などが認められるようになるわけである。こうした現象を防止する手だてはほぼ確立されつつあるが、ここではこれらの現象を積極的に利用するという観点からみていきたいと思う。

(1) セルロースの分解

セルロースは、簡単に言えばグルコース（ブドウ糖）が重合してできた繊維状物質で、その中にはもろもろの作用を受けにくい整列した結晶部分

と、比較的反応性に富む非結晶部分が含まれている。

こうした構造に対応して、微生物がセルロース分解酵素を作用させるのであるが、この一連の酵素をセルラーゼと呼んでいる。リーゼらは、当初天然セルロースを断片化する酵素（C₁成分）と、断片セルロースを加水分解してセロビオースを生ずる酵素（C_x成分）とによって、セルラーゼが構成されていると考えた。しかしその後の研究で、セルラーゼは天然セルロースの加水分解を担当する酵素（カルボキシメチルセルラーゼ＝CMCアーゼと略）と、CMCアーゼによって断片化したセルロースを末端から加水分解する酵素（アピセルラーゼ）の2成分によって構成され、それぞれの成分にC₁+C_xの働きがあることが明らかにされている。

いずれにせよ、セルロースは多成分系のセルラーゼによってセロビオースにまで分解された後、セロビアーゼによってグルコースとなり、微生物などに利用されるということになる。以上の分解様式を仮想模式図で示すと図2のようになる。

(2) ヘミセルロースの分解

次に、木材中のヘミセルロースは多種類の糖の重合体であるが、今日では広葉樹と針葉樹ではお

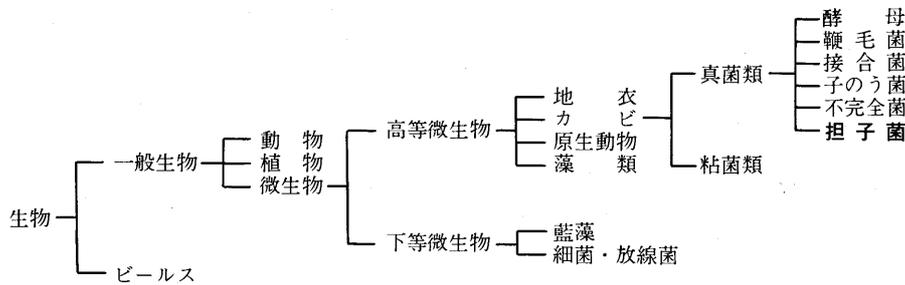


表1 微生物の分類

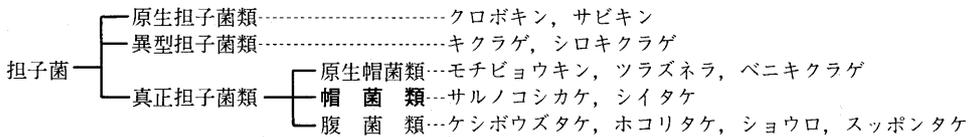


表2 担子菌の分類

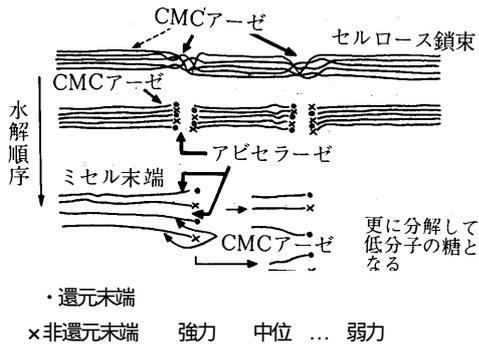


図2 綿セルロースの酵素による分解
(西沢一俊氏の仮想模式図から)

およそ次のような構成になっていることが明らかになっている。すなわち

グルクロノキシラン.....広葉樹の主成分
アラビノグルクロノキシラン

グルコマンナン.....針葉樹の主成分

となっており、針葉樹には前二者も含まれている。

これらの構造を模式的に描いたものが図3であるが、これらに作用する酵素のうち重要なものはキシラナーゼとマンナーゼである。キシラナーゼにはエキソ型とランダム型があり、前者はキシランを末端から切断してキシロースに、後者はランダムに切断してキシロースの重合体にする作用を持つことが明らかにされている。またマンナー

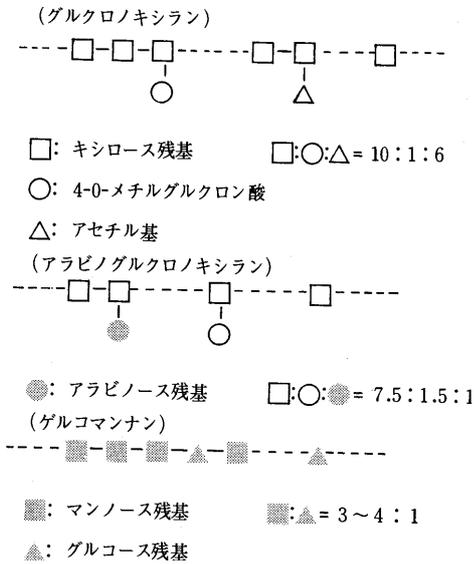


図3 木材中のヘミセルロース構造模式図

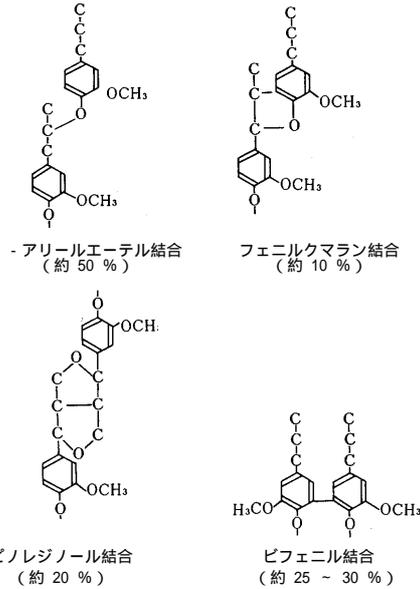


図4 フェニルプロパン間の結合様式

ぜはマンノース同志の結合だけでなく、マンノースとグルコースとの結合も切ることが知られている。

(3) リグニンの分解

木材の成分のうち最も複雑で、利用上も問題となっているリグニンの構造には、おおよそ図4で示す4つの結合様式が知られている。このような構造のリグニンを分解できるとされる白色腐朽菌、すなわちリグニン分解性担子菌には表3に示すようなものが知られているが、これらの酵素作用については未だ不明な点が多い。しかし木材を100%有効に活用するということを考えれば、現在までの到達点を明らかにすることは無意味ではないと思われる。

リグニンの結合様式のうち半分近くを占める - アリルエーテル結合に作用する酵素(- アリルエーテラーゼ)は残念ながら未確認である。しかしラッカーゼという酵素に関しては研究が進められ、現在のところ図5に示すような反応が起こると推定されている。すなわちラッカーゼは、一方ではリグニンの低分子化に寄与し、他方では重合に寄与していることを示している。この図の2

表3 リグニン分解性担子菌

科	属	科	属	科	属
(ヒダナシタケ目)		タバコウロコタケ	<i>Porodaedarea</i>	サルノコシカケ	<i>Hirschioporus</i>
ミヤマトンビマイタケ	<i>Bondarzewia</i>	〃	<i>Hymenochaete</i>	〃	<i>Incrustoporia</i>
コウヤクタケ	<i>Corticium</i>	サルノコシカケ	<i>Abortiporus</i>	〃	<i>Irpex</i>
〃	<i>Peniophora</i>	〃	<i>Bjerkandera</i>	〃	<i>Ischnoderma</i>
〃	<i>Asterostroma</i>	〃	<i>Ceriporia</i>	〃	<i>Lenzites</i>
〃	<i>Vararia</i>	〃	<i>Coriolus</i>	〃	<i>Oxyporus</i>
マンネンハリタケ	<i>Echinodontium</i>	〃	<i>Daedaleopsis</i>	スエヒロタケ	<i>Schizophyllum</i>
カンゾウタケ	<i>Fistulina</i>	〃	<i>Datonia</i>	ウロコタケ	<i>Stereum</i>
マンネンタケ	<i>Ganoderma</i>	〃	<i>Dichomitus</i>	(マツタケ目)	
〃	<i>Amauroderma</i>	〃	<i>Fomes</i>	シメジタケ	<i>Hohenbuehelia</i>
サンゴハリタケ	<i>Hericum</i>	〃	<i>Glocoporus</i>	〃	<i>Pleurocybella</i>
タバコウロコタケ	<i>Fuscoporia</i>	〃	<i>Grifola</i>	モエギタケ	<i>Pholiota</i>
〃	<i>Inonotus</i>	〃	<i>Hapalopilus</i>		
〃	<i>Phellinus</i>	〃	<i>Heterobasidion</i>		

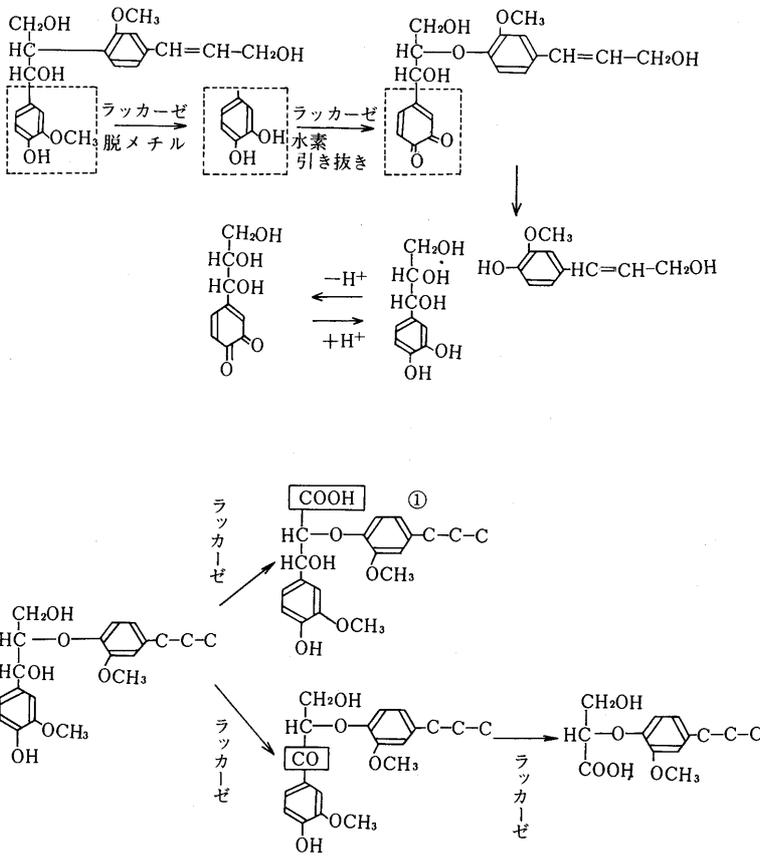


図5 リグニンのラッカーゼによる反応

番目に示した反応では、できた生成物が菌体内にとり込まれ、オキシゲナーゼという酵素によって酸化され、糖にまで分解されているものと推定されている。このほかに、セロピオース・キノン酸化還元酵素の存在も、スウェーデンの若い女性研究者によって提示されたが、この酵素は他の酵素系の働きがあれば、リグニンとセルロースを同時に分解利用すると考えられるので、木材成分の利用上はきわめて有利なものとなる。

以上、簡単にリグニン分解について触れた。リグニンだけでなく他の2成分についても、微生物による分解機構が100%明らかになったわけではない。ただしこれらの分解機構がさらに明らかになれば、これから述べる木材の微生物的利用にも広く道が開けることになることは間違いなし。

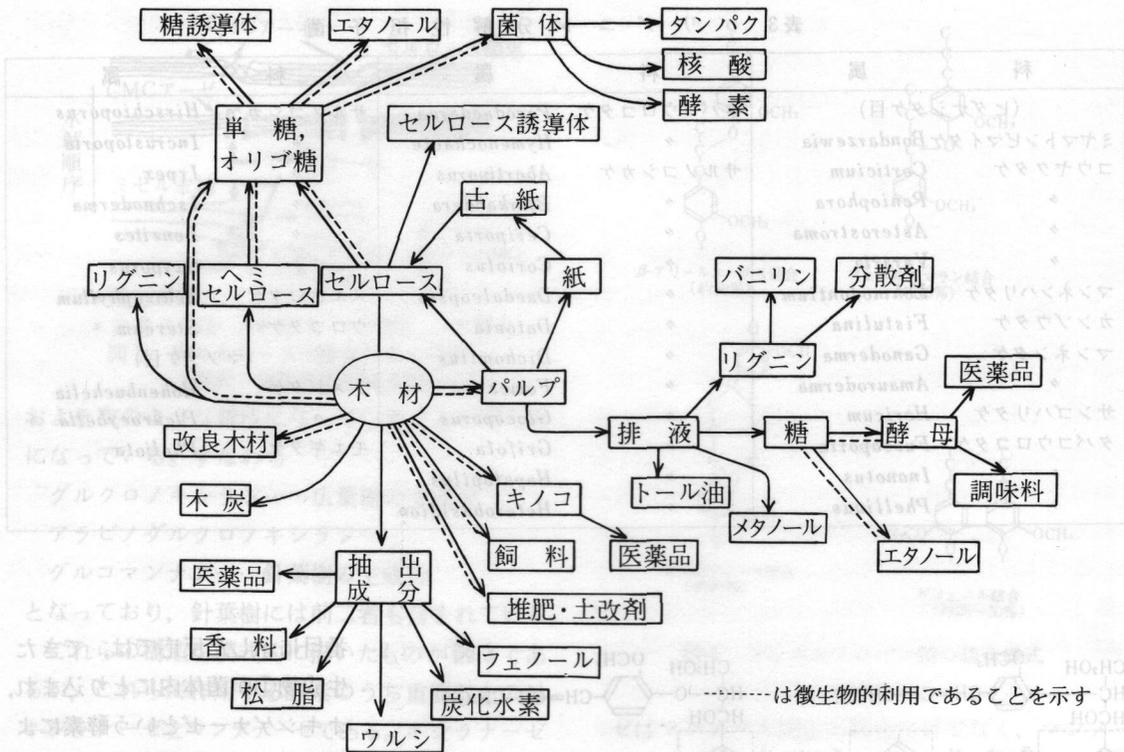


図6 木材の化学的利用

ウッドケミカルス

木材成分を化学的に利用する面から現状及び将来を見ると、おおよそ図6のようになろう。

この図で微生物反応がかかわりを持っているもの、若しくは持つことが研究されているものは……で示しているが、もっともなじみ深いものはキノコであろう。ただしキノコは木材成分を養分として採り入れ、生長してきたキノコを食するのであるから、他のものとは違って木材の間接的利用ということになる。これに対して、パルプ、飼料、堆肥、糖の生成などは、木材そのものの利用である。

(1) 微生物によるパルプ化

パルプ化は、クラフト法などのように化学薬品によって木材を蒸解するのが主流であるが、10数年前に公害問題が顕在化するとともに、微生物の利用が注目されるようになった。これは自然界に多数存在するリグニン分解菌のうち、セルロースへの作用力の弱いものを使ってパルプを作ろうと

いう発想であった。近年になって、この方法がにわかには現実味を帯びてきたのは、スウェーデンのエリクソンらが、セルロースをほとんど分解しない白色腐朽菌の突然変異株を得てからであろう。ただ酵素による反応は常温常圧で行われるだけあってきわめて速度が遅く、この点を克服することが実現のカギとなろう。たとえば、耐熱性のリグニン分解性細菌の発見などが発展へのステップとなる。

これと関連して、パルプ廃液からは既にリグニン分散剤などが作られているが、この液からは微生物を利用して調味料が作られていることも付記しておく。

(2) 飼料、堆肥

木材の飼料化では、やはり担子菌などで多少低分子化し、かつ高たんぱく質のものにするという試みがなされている。木材は既に粗飼料として一部に活用されているが、家畜の血肉とはなっていないようである。これを少しでも改善しようとい

う志向である。

堆肥、土改剤に関しては、既に農林水産省林業試験場や林産試験場での実績がある。これらは自然界に存在する酵母などの作用が十分働くような環境下に木粉、樹皮などを放置し、熟成させて農作物の生長阻害因子を消去し、生長に必要な環境を作る上で大きな役割を果たしていると言える。

(3) 改良木材

この項は、最近の一つのトピックではあるが、詳しくは不明であるので簡単に触れておく。

木材をパルプ状にしてファイバーボードを作る際に、湿式法といって接着剤を使わず水素結合などの内部結合力だけで成型する方法がある。この方法と見かけは似ているが、微生物によって木材チップに活性点を作り成型しようというわけである。この方法は既に実用化の段階に入っていて、日本国内のある企業はチップ状で海外から原料を運搬する時間を使って微生物処理を行い、企業ベースにのせることを計画している。

(4) 木材の酵素糖化

木材の酸加水分解による糖化は、既に1900年初頭に工業的規模での検討がなされてきた。その後、各国でいろいろな方法が確立されてきたが、製品が安い、コストが高い、収率が低いなどの理由で、現在では木材を対象とした糖化工業はソ連を除いて操業されていない。

一方、酵素による糖化は装置が簡単であり、酵素の回収、再使用も容易で、その上生成物がさらに分解する恐れがないなどの利点があり、セルロース資源の糖化に最適であるという認識が高まっている。ただし、糖化を容易にできるのは、現在のところバガス、わらなどの木質化度の低いセルロース資源であり、リグニンを多量に含む木材では、糖化は容易に進まない。

そこで、木材をスムーズに酵素糖化するために前処理が必要になる。現在までのところ、微粉碎、放射線照射、爆砕、酸、アルカリ処理などが検討されているが、いずれもエネルギーコストが高く、

たとえば、でんぶんの糖化とは競争にならない。そのため前処理をも微生物的に行おうとする試みも検討されている。これは微生物パルプ化と共通するものだが、反応時間を短くすることや、リグニン分解能が高く、かつセルロースの結晶部分の分解力の強力なセルラーゼを持つ微生物を、探さなければならぬという問題が山積みされている。

ただし、酵素反応そのものでは、固定化酵素と呼ばれるものを使って、酵素と糖液の分離を簡単にできるようにするなどの技術は進んでおり、残廃材の有効利用という面から考えれば、今後とも検討すべき課題であろう。かつ糖化が容易にできれば、エタノールの生成、微生物たんぱく（SCP）、核酸などの生産へと展開できるようになり、食料として重要なでんぶんを糖化するより、はるかに合理的なすがたになるのではなからうか。

理想的な酵素系を持つ菌を見つける努力だけでなく、遺伝子操作などによる変異株等の生産も夢ではないわけであって、そうしたことも、酵素糖化が現実的になる材料であろうと思われる。

おわりに

木材の微生物的利用について、あれこれ述べたが、木材そのものは何年もかかって光合成によって太陽エネルギーを固定したすばらしい材料である。したがって構造体として木材を使うことが最も理想的なことと思われるが、ここでは残廃材なども含めて、木材の100%活用という観点から述べたつもりである。

要するに、微生物的利用では地球上に生存する微生物の能力をどれだけ発揮させるか、ということが一つの大きなポイントになる。したがって各分野の研究者、技術者が微生物学者などと、より密接な連絡をとり研究開発にとりくまねばならなくなるであろう。 （文責：土居修一）