



特集1

森の「きのこ」の特殊能力で環境問題に挑む ～森林微生物の機能開発～



かめ い いち ろう
農学部 森林緑地環境学科 亀井 一郎 教授

森林微生物の特殊な機能を分子レベルで解明し、その機能を生かすことで環境汚染やエネルギー問題に取り組んでおられる亀井先生にお聞きしました。

※1 菌類

菌界を構成する生物群で、一般にキノコ、カビ、酵母と呼ばれる真核生物。従属栄養生物で、細胞外に酵素を分泌して有機物を分解し、細胞表面から吸収します。生態系における分解者として、物質循環において重要な役割を担っています。

※2 きのこと

菌類のうちで比較的大型の子実体を形成するもの。私たちが「きのこ」と呼んでいるものは、胞子を飛ばすための器官（子実体）で、本体はカビのような菌糸になっています。

※2 白色腐朽菌

木材中のリグニンを分解する能力を持ち、分解された木材は残留したセルロースの色である白色に変色します。

※3 褐色腐朽菌

木材中のセルロースやヘミセルロースを分解する能力を持ち、分解された木材は残留したリグニンの色である褐色に変色します。

※4 セルロース

グルコース（ $C_6H_{10}O_6$ 、ブドウ糖）が直鎖状に結合した多糖類（炭水化物）で、植物細胞壁の主成分です。植物繊維として、綿や麻、紙などに利用されます。

※5 ヘミセルロース

植物細胞壁にセルロースと共に含まれる多糖類の総称。主成分のキシラン（ $(C_5H_8O_4)_n$ ）はキシロースを構成糖とする多糖類です。キシロースを還元したキシリトールは、食品添加物として利用されます。

※6 芳香族化合物

ベンゼン（ C_6H_6 ）を代表とする環状不飽和有機化合物。安定性が高いのが特徴です。



▲ベンゼン

■白色腐朽菌とは

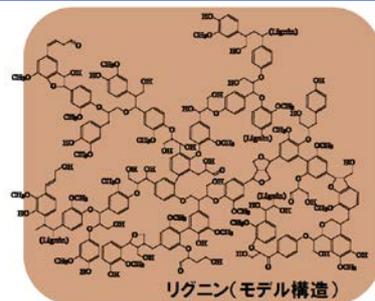
木材とその建造物は 1,000 年を超える年月にも耐える「腐りにくい」材料です。しかし、私たちの周りには木材であふれていません。これは、木材を分解してしまう菌^{※1}が森林に生息しているためです。

木材腐朽菌は「きのこ^{※2}」の仲間、大きく分けて2つのグループがあります。分解された木材が白く変色する白色腐朽菌^{※2}と、褐色に変色する褐色腐朽菌^{※3}です。

木材の細胞壁は、主に、①セルロース^{※4}、②ヘミセルロース^{※5}、③リグニンの3つで構成されています。白色腐朽菌は、木材中のリグニンを分解する能力を持っています。木材の茶色はリグニンの色なので、白色腐朽菌に分解された木材は白く変色します。スーパーでよく見かけるシイタケ、マイタケ、エリンギも白色腐朽菌に分類されます。

■リグニンを分解できる唯一の微生物

リグニンは、巨大な芳香族^{※6}高分子で、立体的な網目状でとても複雑な構造をしています。化学的にとても安定な物質なので、なかなか分解されることはありません。リグニンは、糖であるセルロースを被覆し、カビなどの分解者から植物の身を守る鎧として機能しています。



リグニン(モデル構造)

この高分子のリグニンを単体で分解できるのは、白色腐朽菌だけだと言われています。白色腐朽菌が出現する前、石炭紀までは、枯れて倒れた植物は分解されずに石炭として堆積していました。しかし、白色腐朽菌が登場してからは、倒れた植物は分解されるようになり、新たな石炭の堆積はなくなったと言われています。

白色腐朽菌は、自分の体の外に特異な酵素（リグニンペルオキシダーゼ、マンガンペルオキシダーゼ、ラッカーゼ）を放出して、リグニンの構造を破壊して、低分子の断片にすることができます。この反応機構には不明な点が多く、例えば木材に酵素だけを添加しても反応はうまく進みません。

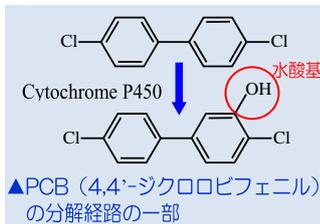
■木材腐朽菌を助ける微生物

森林環境では多くの微生物が多様な相互関係を形成し生息しています。これまでは微生物を純粋に培養して研究していましたが、自然から採取した白色腐朽菌とそこにいる細菌と一緒に培養して調べてみたところ、白色腐朽菌の成長を助ける共存細菌がいることを確認しました。倒れた木材の主な分解者は木材腐朽菌ですが、それを助ける微生物が周りにいて、コミュニティを作っていると考えられます。木材腐朽菌と複合微生物と一緒に培養することで、新たな能力を発揮させる研究も進めています。



■リグニン分解能の応用① ～汚染土壌の浄化

環境汚染物質の**ダイオキシン類**^{※7}や**PCB**^{※8}は、リグニンに似た分子構造を持っています。そのため、白色腐朽菌の中には、これらを分解無毒化できるものが存在します。多くの有害物質を分解できる菌の選抜とその分解経路を解明し、実際の汚染土壌浄化に役立てる研究を行っています。



白色腐朽菌はダイオキシンなどを細胞の中に取り込んで分解します。その分解の最初に、**シトクロム P450**^{※9} という酵素が関わっています。この酵素は、ベンゼン環に水酸基を1つ導入してフェノールに変え、水に溶けやすくする働きをします。

白色腐朽菌は、木材腐朽の際にも、細胞の外でリグニンを低分子の断片にした後、細胞の中に入れて、シトクロム P450 の作用で水溶性を高め、さらに分解を進めていくと考えられます。リグニンの分解経路には不明な点が多いのですが、その一端を明らかにすることができました。

ダイオキシン類による環境汚染は、日本では最近あまり注目されませんが、東南アジアやアフリカでは大きな問題となっています。広大な土地で、土を集めて化学的に浄化して戻すことは難しいので、微生物を用いた浄化法は有効な技術の1つだと考えています。

■リグニン分解能の応用② ～木質資源からエタノール生成



従来のバイオエタノール生成は、①**脱リグニン**、②**セルロース糖化**、③**エタノール発酵**の3ステップが必要です。ここで課題となるのが**脱リグニン**で、化学的に分解しようとすると薬品や熱などのコストがかかります。また、各地で遺伝子組み換えにより酵母

にリグニン分解能を付与する研究も行われましたが、うまくいきませんでした。そこで、すでにリグニン分解能を持った白色腐朽菌の中から、糖化・発酵能を持つものを探してみようと考え、研究室にある数百株をスクリーニングし見つけ出しました。

この菌は沖縄のマングローブ林で採取したもので、満潮になると海水に浸るような高塩濃度条件下でもリグニンを分解することができます。好気固相条件下での脱リグニンと、嫌気液体条件下での糖化・発酵を組み合わせることで、ワンポットでの木質バイオマス発酵が可能となりました。

また、遺伝子組み換えにより、この菌のエタノール発酵を遮断することに成功しました。脱リグニン・糖化までをこの菌が行い、以降の過程に別の微生物を組み合わせる研究も行っています。木材から微生物反応のみで様々な有価物を生成できるセルフファクトリーの構築を目指しています。

■木材腐朽菌に夢中になっています

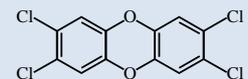
菌類は多様性が広く、まだまだ分からないことがたくさんあります。例えば、宮崎県ではしいたけの栽培が盛んですが、しいたけの菌糸から「きのこ」（子実体）が形成されるメカニズムは、まだよく分かっていません。子実体形成に必要な刺激の1つに光がありますが、それは何故なのか、どのような遺伝子が働いて、何故あの形になるのか、ということも研究しています。

宮崎県は林業県なので、研究材料には事欠かきません。学生たちと共に好奇心や知的欲求を追究しながら、農学者の使命である「**実際生活に役立つ**」技術を目指したいと考えています。

これらの業績が評価され、亀井教授は平成27年度日本農学進歩賞を受賞しました。詳しくは、P.19をご覧ください。

※7 ダイオキシン類

ごみの焼却など、炭素・酸素・水素・塩素が熱せられるような過程で自然にできてしまう物質で、ポリ塩化ジベンゾパラジオキシン(PCDD)、ポリ塩化ジベンゾフラン(PCDF)、ダイオキシン様ポリ塩化ビフェニル(Co-PCB)を合わせてダイオキシン類と呼んでいます。これらは、塩素で置換された2つのベンゼン環という共通の構造を持ち、類似した毒性を示します。水に溶けにくく、他の化学物質にも簡単に反応せず、環境の中に長期間残留する可能性があります。



▲代表的なPCDD (2,3,7,8-テトラクロロジベンゾパラジオキシン) の構造式

※8 PCB (ポリ塩化ビフェニル)

ビフェニルの水素原子が塩素原子で置換された化合物の総称。塩素の数やその位置の違いにより理論的に209種類の異性体が存在します。不燃性、絶縁性など化学的に安定な性質を有することから、電気機器の絶縁油など様々な用途で利用されてきました。脂肪に溶けやすいという性質から、慢性的な摂取により体内に徐々に蓄積し、様々な症状を引き起こすことが報告されており、現在は製造・輸入ともに禁止されています。

※9 シトクロムP450

一原子酸素添加酵素の1つ。人間の肝臓でも分泌され、毒物を水に溶けやすい構造に変えることで、尿や汗として体外に放出する解毒・排出作用を助けています。