

## &lt;菌学講座&gt;

## 文化財分野におけるカビの被害について

大沼雅明

## 1. はじめに

日本の気候は四季折々変化に富んでおり、梅雨から夏季の時期にかけては温暖で多湿な環境となるためカビが特に繁殖しやすくなる。文化財の収蔵保存の現場においてはカビによる被害を防ぐための様々な管理対策がとられており、温度や湿度管理が適切になされればその被害を未然に防ぐことが可能である。

本稿では文化財分野におけるカビの被害を防いだり対処したりするにあたって理解しておきたいカビの生物学的な特徴についていくつかの例を通して述べていきたい。

## 2. カビとはどのような生物か

## ～分類学的な位置づけとカビの定義

「菌」と名をつく生物は大きく2つに分類される。もともと「菌」とはキノコやカビなどをあらわす言葉であった。菌類または真菌類ともよばれるこれらの生物は、分類学的には菌界に属する生物であり、より大きな分類区分では動物や植物と同じ真核生物ドメインに属している。一方、顕微鏡を使用することで発見された肉眼では認識できない大きさの一群の微生物は細菌類と呼ばれているが、これらの生物は原核生物の中の真正細菌ド

メインに属している。同じ「菌」という文字が含まれているためにカビと似た生物のように考えられがちであるが、原核生物と真核生物では細胞の構造や生理活性など様々な点で大きく異なるため、除菌や殺菌を行うときには全く異なる方法が採ることに留意する必要がある。

さてカビとはどのような生物なのだろうか？菌類が増殖する際には、出芽や分裂によって単細胞の状態が増える場合と細胞がー列に並んでできた菌糸とよばれる構造を形成して増える場合があるが、カビとは多数の菌糸が塊状に増殖して肉眼で見えるまでに大きくなったものを指す。また菌糸によって体が構成されている菌類は糸状菌とも呼ばれ、単細胞で増える菌類のことは酵母と呼ばれる。このようにカビ、糸状菌および酵母といった呼称は菌類の形状による分類に基づくものであり、生物種をもとにした系統学的な分類方法によるものではないのである。本稿では菌糸を形成する菌類を総称してカビと呼ぶこととする。

## 3. 菌糸の速やかな伸長を支える細胞の構造とは

ついこの前までは気が付かなかったのに、数日間でカビが目に見えるまで大きく成長していることがある。至適条件下ではカビの菌糸の先端部分は1日当たり数mmから1cmの速度で伸長するためである。カビの細胞内の構造を理解しながら、カビが急速に伸長する際に菌糸の先端部分でどのようなことが起こっているのか見ていこう。

原核生物、真核生物を問わず生物の体は細胞が基本単位となっており、それは菌類も例外ではない。細胞はその周囲を細胞膜と呼ばれる膜で囲まれてできている。生体を構成する膜は主にリン脂質でできた二重膜にタンパク質が埋め込まれた構造をしている。物質の種類によって細胞膜を通過する際の透過性には違いがある。脂溶性の

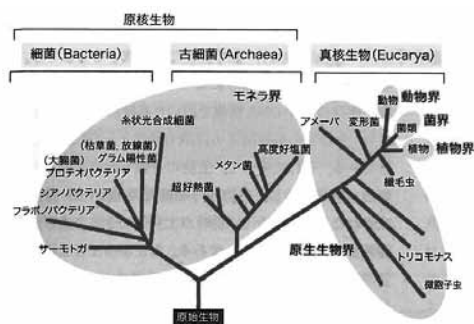


図1 生物の系統分類図

物質や気体分子は細胞膜を容易に通過することができるが、多くの水溶性の物質は細胞膜を自由に通過できず細胞膜に埋め込まれたタンパク質のはたらきによって細胞の内外へと輸送が行われる。

真核生物と原核生物の細胞では、細胞膜で囲まれた細胞内部の空間に膜でできた構造物（細胞小器官）が豊富に存在しているか否かという点で大きな違いがある。カビをはじめとする真核生物の細胞は核とよばれる構造を有しているが、原核生物は核を持っておらずDNAが細胞の中に分散した形で存在している。真核生物の細胞は核以外にもさまざまな細胞小器官を持っている。ミトコンドリアと呼ばれる細胞小器官の内部では酸素を利用した酸化反応を行うことで有機物から効果的にエネルギーを産生する化学反応が進行する。粗面小胞体ではタンパク質の合成が行われる。菌糸の外部へカビが分泌する各種の消化酵素もここで合成され、小胞体からゴルジ体を経て輸送小胞の内部に入る。輸送小胞はタンパク質が繊維状に集

まってできた微小管やアクチンフィラメントとよばれる構造物の上をたどって先端部の方へと運ばれていく。細胞の先端部に集まった輸送小胞は、細胞膜と融合して小胞内のタンパク質を外部へ分泌する。カビが合成する消化酵素の多くはこのようにして菌糸の先端部から外部へと分泌される。菌糸の成長に必要な栄養分も細胞質とともに次々と先端部へ供給され、菌糸の先端部の急速な伸長を支えている。

カビは細胞膜の外側に多糖類からなる細胞壁を持っている。細胞壁は細胞の強度を増加させるはたらきを担っているが、カビの細胞壁は菌糸の先端部でもっとも薄くなっており、菌糸から分泌された物質が透過しやすくなっている。先端部から離れるにつれて壁厚が増し細胞壁の構成分子が互いに結合することで細胞壁の強度が増加する。細胞壁を構成している主要成分は生物ごとに大きく異なり、菌類の細胞壁ではキチンや $\beta$ -グルカンが含まれるのに対して、植物の細胞壁では主にセルロースが含まれているという違いがある。また細菌類も細胞壁をもつがその主な構成成分はペプチドグリカンであり、真核生物の細胞壁とは異なる構造を持つ。

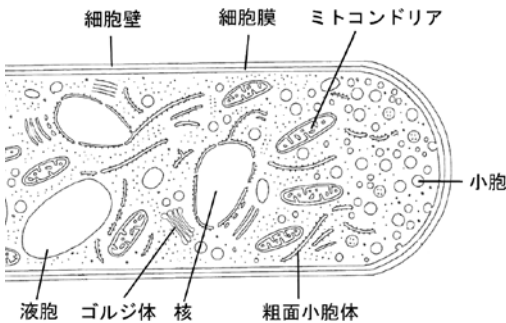


図2 菌糸先端部の細胞の模式図

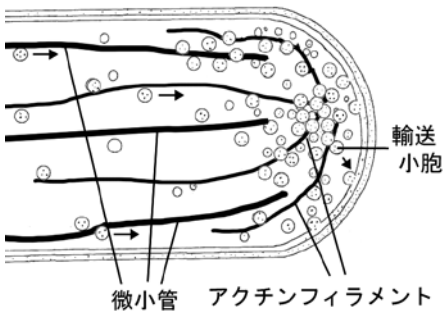


図3 菌糸先端部への小胞輸送

#### 4. カビはどのようにして栄養分を摂取するのか

カビは動物と同様に無機物から有機物を産生することができない従属栄養生物である。同じ従属栄養生物であっても、動物は口から摂取した食物を体内にある消化器官で消化して栄養分を得るが、カビの体は菌糸からできていて栄養を摂取するための特別な消化器官を持たない。ではカビはどのようにして栄養分を獲得するのだろうか。

独立栄養生物である植物は光エネルギーを利用して無機物である二酸化炭素と水から有機物であるグルコースを光合成することができる。しかし動物やカビなどの従属栄養生物が生育するためには必ず外部から有機物を栄養分として摂取する必要がある。自ら動くための手段を持たないカビの場合は酵素タンパク質を体外へ分泌し、体の周囲にある有機物を基質として消化分解して得られる栄養分を体内に吸収することで生育する。すなわちカビが生育している場所にはカビが栄養分と

して利用できる有機物が必ず存在するのである。

カビは多糖類やタンパク質をそのままの形で細胞内へ吸収することができず、酵素によって単糖類やアミノ酸に分解してはじめて細胞膜を通して栄養分として吸収することができるようになる。カビの種類によって分泌される消化酵素の種類が異なるために、基質を分解する能力はカビの種間で差が生じる。

植物の細胞壁を構成する結晶性セルロースは生物による分解を受けにくい構造をしているが *Trichoderma* 属、*Chaetomium* 属、*Stachybotrys* 属などのカビが産生するセルロース分解酵素は結晶性セルロースを効率よく消化分解することができる。このような種類のカビは条件が整うと紙や植物繊維でできた布などを消化することができる。

キチンはカビ類の細胞壁の主成分の一つであるとともに、節足動物である昆虫類や甲殻類の外骨格の構成成分でもある。カビは自らの細胞壁の修復を行うためにキチン分解酵素を有しており、一部のカビはそれを体外に分泌することで節足動物の外側の殻を消化分解して栄養分として利用することができる。

またカビは様々なタンパク質分解酵素を分泌するが、中には皮膚や毛髪に含まれるケラチンを分解する酵素を分泌するカビも存在する。このような性質を持つカビの中には生きている動物の皮膚に感染して水虫などの白癬の原因となる病原性をもつものも含まれている。

通常文化財が保管されているような屋内環境ではカビが栄養分として用いることが可能な有機物は比較的限られている。しかし文化財を形作る素材や、文化財の修復に用いられる素材はその多くが生体由来の有機物であるため、ある種のカビではそれを栄養分として利用できるものが存在する。また人間の手から出る皮脂成分なども文化財の表面に付着するとそれらを栄養分として用いてカビが生育するおそれがあるので、文化財の扱う際にはなるべく素手で触れないように配慮をする必要がある。

また環境中に存在する埃は衣服などに由来する繊維、人間の体に由来する皮膚(垢)や毛髪、

ダニなどの動物の死骸、植物の破片などを含んでおり、これらはセルロース、キチンなどの多糖類、ケラチンなどのタンパク質からできているため、カビにとって栄養分となりうる。すなわち埃がたまる場所にはカビの生育が起こりやすくなるため、清掃を行って埃をこまめに取り除くことはカビの発生リスクを下げることにつながる。

## 5. カビの胞子は空気に浮遊して移動する

カビの体は菌糸でできており運動性を持たないが、成長の過程で胞子とよばれる様々な形状をもつ細胞を形成することで移動性を獲得する。胞子の内部の水分量は菌糸と比べて少なく、脂質やグリコーゲンなどのエネルギー蓄積物質を多く含んでいる。胞子の直径はカビの種類によって2~100  $\mu\text{m}$  までさまざまであり、直径の小さな胞子は一旦空中に浮遊すると空気の流れに乗って広範囲に拡がることのできる。空中を浮遊している真菌の胞子数は空気1 $\text{m}^3$ の中に多いときには10000個近くに達することもある。

空中を浮遊した胞子はやがて重力によって地上に落下するが、その際に胞子が着地した場所が生育に適した環境であった場合には胞子は発芽して菌糸を伸ばして成長をはじめめる。菌糸は付着した基質の表面に沿って分岐を繰り返しながら成長し平面的な広がりを持った菌糸体を形成する。ある種のカビでは基質の中にもぐり込むようにして菌糸を伸長させるものもある。ある程度の大きさの菌糸体が形成されると、その一部は空中へ菌糸を伸ばしていき、その先端部の細胞が分化して多数の胞子を形成する。その際に減数分裂を行わずに胞子をつくって次世代の子孫をつくることを無性生殖といい、無性生殖によってつくられた菌類の胞子のことを分生子という。分生子の形状や色はカビの種類によって大きく異なるので、カビを分類・同定する際の大きな手掛かりとなる。カビの種類によっては減数分裂によって有性胞子をつくり有性生殖を行う。真菌類の分類では有性生殖を行う際に形成される生殖器官の種類や形態が重要なポイントとなる。生殖器官として接合器を形成するものを接合菌類、子嚢果を形成し内部に子嚢胞子を形成するものを子嚢菌類、担子器(いわ

ゆるキノコの子実体)を形成するものを担子菌類と呼ぶ。有性生殖を行うことが確認されたカビのことを完全菌類とよぶ。一方、有性生殖の過程が観察されておらず無性生殖による分生子形成だけが知られている菌類は不完全菌類としてまとめて分類されることがある。

## 6. 全てのカビが暖かい環境を好むとは限らない

一般的なカビ(中温性カビ)の生育に最も適した温度は20～30℃の範囲内にあり、細菌類の生育に適した温度(～37℃)よりも若干低めである。ただし発育可能な温度はそれよりも少し広く10～40℃である。生育至適温度がこれより高温側や低温側にずれているカビの存在も知られている。高温性のカビである *Thermomyces lanuginosus* や *Chaetomium thermophilum* などの至適温度は40～50℃に達し、ヒトの肺疾患の病原菌となる *Aspergillus fumigatus* はヒトの体温に近い37℃の条件でもっとも良く発育することが知られている。一方、20℃以下の生育至適温度をもつカビを低温性カビとよび、特に *Sclerotinia borealis* や *Typhula idahoensis* のように生育至適温度が10℃以下であるカビも知られている。カビの繁殖を抑制するために冷蔵保存を行う場合、このような低温性カビは徐々にではあるが生育することがあるので、温度管理には十分な注意をはらう必要がある。

## 7. 乾燥に強いカビはどこが違うのか

多くのカビは好湿性であり、じめじめした場所を好む。これはカビの生育に必要な栄養分の消化吸収を行う際に水分が必要である一方で、カビは自ら水分を求めて移動することができないため、少しでも水分を利用しやすい環境の方が生育に有利になるからである。しかし一見すると湿り気が少なく思えるような場所にカビが生えることができるカビは乾燥に強い好乾性カビであることが多い。好乾性のカビは一体どのようにして生育に必要な水分を得ているのであろうか。

生物は細胞膜を介して水分子を細胞内外でやりとりしながら生育する。細胞が気相と接してい

る場合には、その界面では細胞内の水が水蒸気となって外気中へ出ていく反応と細胞外部の気相中の水蒸気が水となって細胞内に入ってくる反応の両方が起こり、どちらの反応の速度が速いかによって細胞内の水分量の増減の度合いが決まる。細胞内に含まれている水分子には二種類の挙動の異なるものが存在する。細胞質のタンパク質や糖類などの溶質分子の表面に束縛されている結合水と、そのような束縛がない自由水である。界面から水蒸気となって気相中へ出ていく反応に関わるのは自由水のみであるため、細胞内の全水分のうちの自由水が占める割合を細胞内の水分活性( $A_w$ : water activity)と定義すると、ある温度での飽和水蒸気圧を $P_0$ 、細胞から水分が蒸発して平衡状態に達したときの水蒸気圧を $P_E$ とすると、これらの値の間には $A_w = P_E / P_0$ という関係が成立する。またこの温度での気相に含まれる水蒸気圧が $P$ であるとき、相対湿度(RH: relative humidity)は $RH = P / P_0 \times 100$ で表される。

もし細胞外の気相の相対湿度が下がって、 $RH < A_w \times 100$ という状況になると細胞内の自由水は平衡状態の水蒸気圧に達するまで気相へと蒸発していく。すなわち細胞内から水分が失われていくためにカビの増殖はいずれ停止する。細胞内の水分活性の値は細胞内のタンパク質や糖質の濃度に左右されるため生物の種類によってまちまちである。好乾性のカビでは細胞質中に高濃度のグリセロールなどが蓄えられているために細胞内の水分活性が0.65程度となっている。多くの好湿性カビでは0.80、高浸透圧に耐性を持つ酵母などでは0.61であり、乾燥に強いカビほど水分活性の値が小さくなっている(ちなみに多くの細菌では0.90～0.95、好塩菌では0.75程度である)。

細胞外の気相の相対湿度が上昇して $RH > A_w \times 100$ という状況になると細胞外の水蒸気が細胞内に水分として入ってくるようになるため、生育に必要な水分を気相から得ることができるようになる。上で述べたように好乾性カビの水分活性は0.65であるので外気の相対湿度が65%以上の条件になると外気から水分を得ることができるようになり温度、栄養分など湿度以外の生育条件が

整うと生育を始めることになる。細胞内の水分活性が低いカビは、高濃度の塩や糖を含むような粘稠性の高いゲル状の基質の上に接している場合であっても上と同様のしくみによって基質内に含まれている自由水を細胞内へ取り込んで生育することが可能な性質を持つために好稠性カビと呼ばれることもある。好乾性カビの代表的なものとしてはアスペルギルス、ペニシリウム、ユーロチウム、ワレミアなどがあげられ、室内環境中で検出されることが比較的多い菌種である。

### 8. なぜカビは酸素を必要とするのか

カビの生育を抑制する目的で密閉状態の容器中に脱酸素剤を入れたり、アルゴンや窒素などの不活性ガスで置換して酸素を除去することでカビ

の生育を防ぐことができる。

カビは細胞内のミトコンドリアにおいて酸素を使って有機物を水と二酸化炭素まで酸化分解して得られるエネルギーを利用して生育している。この過程を好気呼吸とよび、このような呼吸を行う生物を好気性生物とよぶ。大気中の酸素濃度は21%であるが、外気の酸素濃度を0.2%まで下げると細胞内の酸素が不足して好気呼吸ができなくなり多くのカビは生命活動を維持するために必要な量のエネルギーを得ることができず生育を停止する。この酸素濃度は密閉状態の容器中に脱酸素剤を入れたり、アルゴンや窒素などの不活性ガスで置換することで比較的容易に実現できるためにカビの生育を抑制する方法としてよく用いられている。

表 代表的な好乾性カビ

属名	アスペルギルス属 Aspergillus	ペニシリウム属 Penicillium	ユーロチウム属 Eurotium	ワレミア属 Wallemia
和名	コウジカビ	アオカビ	カワキコウジカビ カツオブシコウジカビ	アズキイロカビ
分類	糸状不完全菌類	糸状不完全菌類	子囊菌類	糸状不完全菌類
主要種	A. flavus A. fumigates A. niger A. ochraceus A. restrictus	P. citrinum P. expansum P. islandicum	E. amstelodami E. chevalieri E. herbariorum	W. sebi
菌糸	有隔壁・無色	有隔壁・無色	有隔壁・無色	有隔壁・無色
コロニー	種によってさまざま	種によってさまざま	中～大(6～8cm) ピロード状、粉状 黄色、橙色、緑色	小(1～2cm) 平坦 小豆色
カビ毒	アフラトキシン (A. flavus) フミトレモルジン (A. fumigates) オクラトキシン (A. ochraceus, A. niger)	シトリニン (P. citrinum) パツリン (P. expansum) ルテオスカイリン (P. islandicum)	産生しない	産生しない
特徴	特徴的な形状の分生子産生構造	箒状の分生子産生構造(ペニシリ)	ハウスダストなどでも多く見つかる	小さなコロニーをつくる

ただしカビの種類によっては生命活動の維持に必要なエネルギーを得るために必ずしも好気呼吸が必要でないものも存在しており、大気よりも酸素濃度が低い環境下でも生育可能な種（微好気性カビ）や、酸素が利用できない場合には酸素を利用せずに生育することが可能な種（通性嫌気性カビ）の存在が知られている。例えば出芽酵母は嫌気性条件下ではアルコール発酵の過程で得られるエネルギーを利用することで生育が可能である。このような種類のカビでは脱酸素による生育防止が有効ではない場合があることに注意が必要である。

#### 9. カビが生育するために必要な4つの条件

カビの胞子が発芽して菌糸を伸ばして生育するために必要な条件は、(1) 適度な温度、(2) 十分な湿度(水分)、(3) 栄養分の存在、(4) 酸素の存在である。カビはこれらの条件のうちのどれか一つでも欠けると生育することができなくなる。本稿で見えてきたようにカビの種類によってこの4つの条件は少しずつ異なり一律に論じることができないが、文化財を扱う環境下におけるカビの生育を防ぐためにはこれらの条件を適切に制御することが重要である。

(おおぬま・まさあき

久留米大学医学部自然科学教室)