

## 菌根から覗く地下の生態系

大阪市立自然史博物館 佐久間大輔

### 1. はじめに

3年ほど前に『きのこの教科書』（山と溪谷社）という本を書かせていただいた。この本は野山で見つけたきのこを図鑑で調べようと思ったときに、どんな特徴に目をつければよいのかを紹介したものだ。でも実はもう一つ、「わからないことを楽しもう」という裏のテーマがある。菌類は、図鑑をめくってもわからないことがしばしばだ。わからない人が悪いのでも調べ方が悪いのでもなく、まだ名前ついていないきのこが山ほどあるのだ。しっかりした名前で図鑑に載っていたきのこが、「実は複数の種類だった」ということもしばしばある。昨日無邪気に信じていたことが明日には覆されているかもしれない。

菌類は、問題に対して確とした「正解」のある世界とは異なり、まだよくわからない謎がある。それは楽しいことなのだ。科学は全てわかっている世界ではなく、謎があるから面白い。菌類学は、正しい問いを立て、その気になればアマチュアでも探究に足を踏み出せる、手軽な自然科学の入り口でもある。実際、日本の菌類研究はアマチュア研究者たちの活躍に負うところが多い。『きのこ図鑑』（保育社）を書いた上田俊穂さんは高校の教員だった。『京都のキノコ図鑑』（京都新聞社）の吉見昭一さん、『北陸のきのこ図鑑』（橋本確文堂）の池田良幸さんも教員だった。現代に至るまで地域の菌類研究の重要な担い手がアマチュアであり教員の皆さんなのだ。本記事では、教科書に載っている「菌根共生」を手がかりにして、高校生たちを、そして教員の皆様を身近な謎を楽しむ科学へと誘えればと考えている。

### 2. 菌根とは

「菌根」とは、植物の細根と菌類との間に成り立つ共生関係の総称である。細根に菌糸が入り込むが、菌糸は植物細胞を分解するなどの病徴を示さず、植物側も抵抗反応を示さない。菌根が成立することで、植物は菌糸を介して土壤中から吸収されるリンなどを得ることができ、特に貧栄養な状況では成長を改善することが実験的にわかっている。一方、菌は生

存に必要な炭素源を植物に依存しており、相利共生関係が成り立っていると言われる。

菌根は、菌糸の根への侵入の様子でいくつかのタイプに分けることができる。菌糸が根の皮層細胞を包み込むように細胞間にまで入り込むが、細胞内部には入らないものは「外生菌根」と呼ばれ、ブナ科やマツ科の樹木などに形成される（図1）。これは、さまざまな担子菌・子囊菌（きのこやかびを含む主要な菌）がつくる。一方で、細胞壁の中にまで菌糸が差し込まれ、樹枝状に分岐した器官がつけられるものは「アーバスキュラー菌根」と呼ばれ、シダや草を含む多様な植物の根に形成される。アーバスキュラー菌根は、菌と細胞質の間に細胞膜が複雑な樹枝状体に沿うように存在している。これは、物質交換のインターフェースとして接触面を増やすためだと言われている。この菌根を形成する菌はグロムス菌といわれる大きな胞子をつくる特殊な菌群だ。これらの菌根のほかに、ラン科、ギンリョウソウの仲間や、ツツジ科の植物の根には、それぞれ独特の形態と役割を持った菌根がつけられる。



図1 アカマツの根にできた外生菌根。真黒な菌糸に覆われ、表面からまわりの土壤中に伸びる菌糸が目立つ。

### 3. 菌根の思い込みを外してみよう

中学も高校も、生物学は個体ベースでの生命現象を学んだ後、群集や生態系の話に踏み入っていく。そのためか、菌根の形成は特殊な関係として語られがちである。カクレクマノミだけがイソギンチャクの防御の恩恵を得ているといった形に。しかし、菌根をこれらと同列にあげると、菌類の研究に関わる

者としてはやや違和感がある。というのは菌根がもっとありふれた、普遍的な現象だからだ。

(1) 菌根は多くの植物、菌類に広く広がる、ありふれた現象である

植物の側から言えば、日本の自然林を構成する優占種のほとんどは外生菌根を持つ。〇〇林と呼ばれる植物で外生菌根を持たないのはスギ、ヒノキ、ウメ、竹類ぐらいだろう。カシもブナもマツもシラカバも外生菌根と共生する。菌類から言っても、図鑑に載っているきのこの三分の二程度は外生菌根を作るきのこのなので、ちっとも特別という感じがしない。

(2) 菌類にとって、他の生き物の中に入り込むのはごく普通の生き方である

菌類は動物同様に従属栄養生物でありながら口や消化管を持たない。細い体(菌糸)を餌とするものの中にねじ込み、菌糸表面から酵素を出して溶かして吸収する。その相手は枯れ木でもいいし、土の中の有機物でもいい、あるいは生きていてもいい。他の生物同様、栄養価が高く、防御がない資源は激しい競争になりがちだ。競争相手も細菌や土壤動物など様々だ。生体など防御がある資源ならば、そこを突破出来る者は少なくなる。その中で、菌類はごく初期から他の生物の表面や内部に進出してきた。陸上に進出した最初期の化石植物として知られるライニー植物群の中にすら初期の菌類は見つかる。しかも、アーバスキュラー菌根とよく似た構造も形成されている。進化史を通じて、生死を問わず他の生き物の表面や内部、それが菌類の生きる場所だったとわかる。その中でアーバスキュラー菌根菌そして外生菌根菌は植物の繁栄とともに広がりを見せ、全世界の森に広がったのである。

(3) 菌根は、1対1の関係ではない

共生関係、というと1個体と1個体、1種と1種という関係を思い描くかもしれない。1本のアカマツの周りには年間を通して様々なきのこが生える。そのうちの何割かは外生菌根菌だ。きのこを作らない菌もいることを考えれば、1本のアカマツが共生する菌は数十種をくだらない。1個体のアカマツがそれだけの菌と多角的な共生関係を結んでいるのだ。逆にきのこの側から考えてみよう。例えばマツタケは「シロ」といわれる菌糸のマットから輪になってきのこを出す。シロの中にアカマツは数本、大きなシロであれば十数本が根を伸ばす。つまり、シロと

いう生理的に統合された個体のようなもの(遺伝的には個体と言にくい)と多数のアカマツの個体とが共生関係を結んでいることになる。たとえ1本や2本のマツが枯れても、マツタケは大丈夫だろう。シヤカシの仲間が複数種混ざる照葉樹林であれば1種のきのこに複数の植物種が共生する状況も生じる。個体レベルでも種レベルでも多対多の関係だ。

#### 4. 菌糸のネットワーク

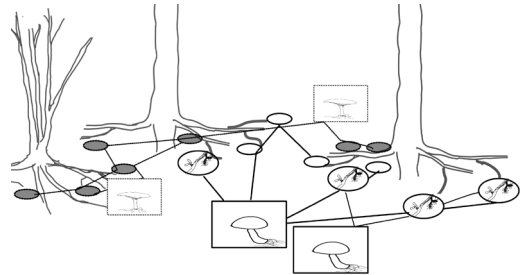


図2 菌糸ネットワークの概念図

図2は菌糸ときのこ、樹木、菌根の関係の概念図である。いくつもの植物の菌根から伸び出した菌糸ネットワークに十分に養分がたまると、きのこが作られる。1つのきのこからのびるネットワークは1本の木に限られないし、いくつもの(同種の)きのこが同じネットワークに属する。1本の木は1種のきのこだけと共生するだけでなく、複数の菌と共生している。1つのきのこのネットワークが植物の種をまたいでいることすらある。

ここまででお気づきだろう、ある個体が菌根を形成することで隣の植物より有利になることは期待できない。なぜなら、となりの植物もほぼ確実に菌根を形成しているし、もしかしたら、同じ菌とつながっているかもしれない。前述した、菌根共生をすることで植物の成長が改善されるという実験結果は間違いない。しかし、菌根が広範に広がっており、個体や種を越えて共有されているという野外の状態では、実験のような競争条件は想定しづらい。むしろ菌根があることで、地下の競争のルールは全く変わってしまっているというべきだろう。より高く大きく伸びれば光を独占出来る地上部と異なり、根がより大きく広がれば占有出来るという単純なものではない。地下に菌糸を広げる菌のネットワークは植物にどのように栄養塩を分配しているのか。地上部から地下へ転送された糖はどのようなルールで様々な菌に分

配されているのだろうか。また、菌根菌にはたくさんきのこを出してくる種も、ごく少量のきのこしか出さない種もあるが、どんなところに差があるのだろうか。たくさんきのこが出てくるからといって、菌根もたくさんできているのだろうか。謎だらけだ。ただ、大きな樹木から菌糸に大量の光合成産物が流れ込んでいることは間違いない。この光合成産物が支えるのは、菌糸やきのこだけではない。幼植物やネットワークの末端に寄生しているギンリョウソウなどの菌従属栄養性植物すら含まれる。

菌根がネットワークになっていることの面白さはそれだけではない。植物が他の生き物にかじられた、なにかに触れた、などの刺激を他の部分に伝えるためには、植物ホルモンといわれる化学物質や、細胞内の急速なカルシウムイオンの濃度変化、細胞膜表面の電位変化など様々なシグナルで個体内での「コミュニケーション」を取っていることが知られている。化学物質は他の個体にもフェロモン同様に作用するのだが、実はこのカルシウム濃度や膜電位は、植物細胞から菌根の菌糸にも伝わっているという。菌糸ネットワークが栄養だけでなく情報のネットワークにもなっているのでは？そんな研究も世界で始まっている。そして想像してみしてほしい。人類が森を切り開く前はカムチャッカ半島からスペインまで、あるいはアフリカ大陸の喜望峰に至るまで、植物と菌類の織りなすネットワークが広がり、この星の半球を覆っていたことを。

## 5. 実際に菌根を掘ってみよう

菌根の観察はそれほど難しくない。実際に手を動かすことで見えてくることもある。実は、今回掲載している写真は全て、スマホで撮影したものである。処理についても、あえて自宅にあった小型実体顕微鏡とルーペ、2万円台の生物顕微鏡と片刃カミソリで行った。これなら学校でも十分に用意できるだろう。ここでは、外生菌根の観察について解説する。

### (1) マツの根を掘りとりて観察する

山でなくても公園や社寺でも(許可が得られるなら)OK。盆栽のような鉢植えのマツでも、マツの苗木を育てたものでもよい。通販で送料別500～1000円ぐらいで入手出来るようだ。買った苗木そのままでも菌根はたいていついているが、山土で植え直して維持すればより多様な菌根が見られるだろ

う。公園などでは、菌根がつくような細い根は落ち葉のすぐ下の表面近くにある。かるく移植ごてで表面をおこして、出てきた長い根を、無理に引っ張らず、ついてきた落ち葉や土ごと採集する。アカマツの根は2～3mmぐらいの太さの根が長く伸び、根の表皮が樹皮同様に赤い(図3)。この赤い部分は水中などでしばしば細かく剥がれる。採取したら、乾かないようにチャック袋やアルミホイルに包むなどして、蒸れないようにして持ち帰る。遠出してとるのでなく、近場で素早く採るのが望ましい。コナラやクスギ、カシなどの根を採取しても菌根は観察出来るが、根の見分けに自信がなければ、どんぐりからの芽生えを見つけて掘り取るのもおすすめだ。



図3 公園でマツの根元から採取し、水の中で落ち葉や土壌を粗く落としたアカマツの細根。短く分枝した短根の先端はほぼ全て菌根化している(矢印)。

根を持ち帰ったら浅く水を張ったバケツや洗面器に放ち、ゆっくりとほぐし、シャーレに入れられる分ぐらいを切り取って、実体顕微鏡で観察しながら根に絡んだ落ち葉や土をほぐしてみるとよい。菌糸が土を抱え込む様子や、根の先から菌糸が伸び出ている様子が観察できると思う。また、真っ黒な菌根、白くぷっくりした菌根など見た目から違うタイプとわかる菌根が共存するのも目に出来るだろう。菌根を眺め、前述のようなきのこの関係に思いをめぐらせてみるのもよい。

次に、短根の先端の、ふくらんだり菌糸が伸び出している部分を、安全カミソリのできる限りうすく輪切りに刻み、生物顕微鏡で観察しよう。カミソリは一度切るとに切れ味が落ちるので惜しまず新品を使おう。図4は、図1の外生菌根を輪切りにして水で封入し、100倍で観察したものである。丸く見える断面にブロック状に見えるのは植物細胞。外側に黒い層が包んでいるのが菌糸。根の外側二層の細胞間にも菌糸が入っている。植物の細胞は完全に菌

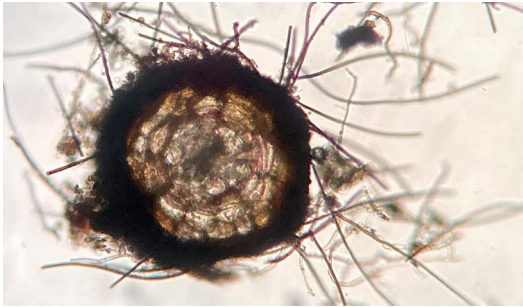


図4 アカマツの根にできた外生菌根の断面

糸に覆われ、外界に接していない。

他の菌根の観察も楽しい。アーバスキュラー菌根やツツジの菌根を観察する場合は、アルカリで柔らかくし、オキシドールで脱色し、菌糸を染色して観察というプロセスが必要になるが、検索すれば手法も見つかるだろう。ラン型菌根の例として、ネジバナ(ラン科)の太い根の断面を薄片にして観察した写真を載せておく(図5)。ラン科の植物は自らの光合成だけでは成長できず、菌糸からも炭水化物・栄養塩共に得ている菌従属栄養植物だという。ただし、ネジバナに共生する菌は樹木などの菌根ネットワークにはつながらないと考えられている。

## (2) きのこの根元を掘る

こちらは、季節(6月～10月の雨が多い時期)やタイミングを選ぶ。そして、きのこをある程度見分ける能力も必要になる。ベニタケ科やテングタケ科、フウセンタケ科、イグチ科など菌根を作るグループのきのこを見つける。背の高いきのこは作業中にもげやすいために、根元だけ残して茎から切り取り、上部は種名を調べるため標本にする。そして土の上に残ったきのこの根元10cm四方、深さ5～10cm程度をブロック状に掘り出す。このとき、根がブロック内に残るように、切断しながら掘り出す。剪定ばさみなどを用意しておくともよいだろう。掘り取ったブロックは形を崩さないようにアルミホイルで包んで持ち帰るといい。持ち帰ったら同じように浅いバットや洗面器の中で少しずつ外側から土や落ち葉をピンセットで取り除いていく。菌糸が絡んでいる場合は、無理せず外れるところから。0.3mm以下の草の根なども取り除いていく。このあたりの作業はホスト(マツやブナ科植物など)の根を認識できていれば効率的に他の根を外していけるだろう。シャーレなどに移し、実体顕微鏡下で作業を続ける。

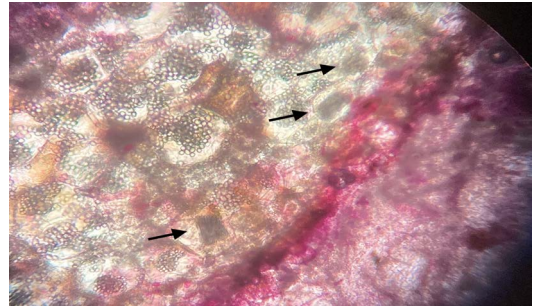


図5 ネジバナの根の断面に見えるラン型菌根。細胞の中に見える丸い粒はデンプン粒で、矢印の部分にコイル状の菌糸が見える。

最終的にきのこの根元から伸びる菌糸が根に絡んでいるところを残したい。うまく菌糸を切らずに菌根までたどることができれば、それがそのきのこがつくる菌根ということになる。きのこが種同定できれば菌根も種同定できるというのが、根だけ掘る手法と異なるところだ。何人かで違うきのこでチャレンジして比較してみるのもよいだろう。10cm四方のブロックの中に同じタイプの菌根がどれくらいあるか、など様々な調査展開もできる。

## 6. おわりに

菌類の研究は、こうした地道な調査にDNAを使った菌の同定を組み合わせるなど、様々な展開が考えられる。発展の余地は大きい。

「菌類は南極にも砂漠にもいるが、例外的にほとんど見られない場所がある、それは教科書の中だ」というフレーズを、かつてイギリスの菌学教育の本の中で目にした。残念ながらそれは我が国の生物学教育の中でも同様である。菌類という生き物への基本的な理解がないことは、日常生活の中での妖しげな健康食品・医薬品に惑わされたり、過剰なきのこやカビへの恐怖につながっている。研究者であっても、基礎的な菌類の知識がないと、菌根共生や菌類の分解過程をブラックボックス的に扱ってしまう。まずは手を動かして観察を。菌根を地下のブラックボックスにしないためにはそれがまず第一歩だ。

### 参考文献

- 1) 国立科学博物館 編, 細矢剛 責任編集(2014)『菌類のふしぎ - 形とはたらきの脅威の多様性』, 東海大学出版部
- 2) 佐久間大輔(2019)『きのこの教科書 観察と種同定の入門』, 山と溪谷社