



第3回東京大学農学部 オンライン公開セミナー

「『共生』:地球上で生きていくための知恵」

講演要旨集

~~~~~ プログラム ~~~~~

【 開会の挨拶 】

挨拶 研究科長 堤 伸浩

13:35 ~ 14:25

### 樹木と微生物の多様な関係—共生・寄生・腐生

森林科学専攻

教授 福田 健二

【 休憩（10分） 】

14:35 ~ 15:25

### 昆虫と微生物の共生関係（事前収録映像）

生産・環境生物学専攻

教授 勝間 進

【 休憩（10分） 】

15:35 ~ 16:25

### 自然界にみられる多様な共生関係:細胞から地球まで

生圏システム学専攻

教授 宮下 直

【 閉会の挨拶 】

司会 教授 加藤 洋一郎

日時 2021年6月26日（土）13:30~16:30

場所 オンライン開催

主催 東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部

共催 (公財) 農学会

# 樹木と微生物の多様な関係

## —共生・寄生・腐生—

森林科学専攻 教授 福田 健二

### 1. 生態系の中の分解者：腐生菌

生態系では、光合成を行う「生産者」としての植物、植物を食べる「消費者」としての動物、動物を食べる二次、三次の消費者、そしてそれらすべての生物遺体を還元して、再び植物の養分にする「分解者」としての微生物の働きによって、物質循環が行われています。

微生物の生活様式には、腐生、寄生、共生の3種類があります。腐生とは、落葉落枝（リター）や動植物の遺体を分解して栄養を摂る生き方です。森林に生息する菌類（カビやキノコ）の多くは腐生菌です。腐生菌は木を枯らすことはありませんが、街路樹などの幹、枝や根を腐らせて、倒木や落枝事故の原因になることがありますので、都市樹木の管理の上では重要です。

### 2. 生態系の調節者：寄生菌

寄生は、生きている生物を殺して栄養を摂ったり、生きたままの細胞から栄養を吸い取ったりする生き方です。落葉や枯死木をめぐる腐生菌間の陣取り合戦を「フライング」して先に栄養を得てしまう戦略で、寄生された側からみると「病原菌」ということになります。病原菌は、弱った木や老木を枯らして林を明るくしたり、古い葉を早く落葉させて栄養循環を速めたりして、生態系を健全に保つ働きがあります。元気な樹木に寄生して、こぶや「てんぐ巣」（枝の密生）などの異常組織を作る菌や昆虫もいますが、これらは特定の樹種にしか感染できないので、多様な樹種からなる天然林では大きな被害になりません。一方、北海道のエゾマツ天然林では、病原菌のいない倒木上でしかエゾマツの稚樹が育たないため、木が1列に並んだ独特の森林構造を作ります。このほか、昆虫に寄生する「冬虫夏草」などの菌もいます。東北地方のブナ林では、周期的に大発生して葉を丸坊主にするブナアオシャチホコという蛾の幼虫に寄生して、大発生を終息させて生態系のバランスを保つサナギタケという菌の働きが知られています。

### 3. 生態系内の相互扶助：共生菌

共生は、他の生物に利益を与えながら栄養を摂る生き方です。マメ科植物の根に共生する根粒細菌が有名ですが、ほかにも多様な共生菌がいます。菌根菌は、土壤中に張り巡らされた菌糸が樹木の根に感染し、土壌の養分を根に与えて樹木の成長を助けています。一方、樹木は光合成によって作った糖を菌根菌に与えて菌糸を養っています。菌根菌には、マツタケ

どが含まれますが、これらは、シイタケやエノキタケのような腐生菌とは異なり、人工培養ができないため高価なのです。菌根菌は、複数の樹木個体の根に感染して菌糸のネットワークを作っており、成木の根から栄養を得た菌根菌が、芽生えの定着や成長を助けることも知られています。

一方、ランの一部やギンリョウソウなどの林床性の草本植物の中には、光合成をせず、菌根菌に寄生することで、周りの樹木の根から菌根菌が得た糖分を横取りする「菌従属栄養植物」も知られています。

#### 4. 外来微生物による生態系への攪乱：樹木の流行病

森林生態系では、樹木、下草、菌類の間に、腐生、寄生、共生という多様な相互作用の網が張り巡らされており、特定の生物種だけが繁栄することなく生態系のバランスが保たれています。ところが、外来の微生物はこのバランスを崩してしまうことがあります。そのひとつが樹木の流行病です。

ニレ立枯病、クリ胴枯病、ゴヨウマツ類発疹さび病は、20世紀初頭に欧米で壊滅的な被害を引き起こし、「世界三大樹病」と呼ばれています。いずれも、東アジア原産の病原菌がヨーロッパや北米に持ち込まれて、大流行しました。

一方、日本のマツ枯れは、北米原産のマツノザイセンチュウという微生物が明治期に長崎に持ち込まれて広がりました。日本で大流行し、ユーラシア各地に被害が拡大しています。日本のマツ枯れ被害の歴史を見ると、1960-70年代の高度経済成長によって、里山マツ林の経済的価値が低下したことが被害の拡大を招いたことがわかります。社会の変化によるマツ林の放棄がマツ枯れの拡大をもたらした結果、アカマツの根と共生するマツタケの生産量が激減し、マツタケは世界でもっとも高価な食用キノコになったのです。

経済成長やグローバル化は、地球温暖化だけでなく、森林生態系における樹木と微生物の相互作用にも様々な変化を引き起こしており、それが私たちの食卓にまで影響を及ぼしているのです。



**腐生(腐朽菌類)**  
 ・遺体の分解  
 ・リサイクル

**寄生(病原菌類、昆虫類)**  
 ・生きている間に分解を開始  
 ・リサイクルの加速

**共生(菌根菌類と植物)**  
 ・養分の吸収促進  
 ・リサイクルのバイパス

外来微生物の生態系影響  
 マツノザイセンチュウによる  
 アカマツの集団枯損

# 昆虫と微生物の共生関係

生産・環境生物学専攻 教授 勝間 進

## 1. 共生とは

共生 (Symbiosis) とは、異なる種の生物が同所的に存在することである。双方に利益がある相利共生、片方が利益を得て相手が害を被る寄生がよく知られている。ただ、共生の種類には明確な境界はなく、環境や時期によって関係性が変化する場合もある。さらに、人間が観察できる利害関係は限定されているため、実際の関係性を正確に捉えられていない場合もある。

## 2. 昆虫に感染する微生物

昆虫と同所的に存在したり感染している微生物は、その利害関係にかかわらず共生していると捉えることができる。例えば、感染虫が漢方薬などに使われる冬虫夏草菌や遺伝子組換え作物にその毒素が利用されている *Bacillus thuringiensis* (通称 BT 菌) は馴染みがあるのではないだろうか。また、アブラムシとブフネラの関係 (細胞内共生) やシロアリに共生して木片の分解に貢献している原生生物や細菌 (腸内共生) もよく知られている。



図1. 糸状菌に感染したキボシカミキリ  
©東大生態調和農学機構 (西東京市)

## 3. 昆虫とウイルスとの共生

昆虫には様々なウイルスが感染する。大きさとしては、直径が数十ナノメートルの小型球状ウイルスから 1 マイクロメートル近い巨大なウイルスも存在する。数種の昆虫ウイルスは、タンパク質の結晶構造 (封入体と呼ぶ) を形成し、その中にウイルス粒子を保護する特徴をもつ。封入体に保護されたウイルスは自然界において数十年間は安定である。系統的に距離が離れた DNA ウイルスと RNA ウイルスがともに封入体を作ることから、封入体形成によるウイルスの生存戦略は収斂進化の結果であると言える。昆虫ウイルスの中には、感染によって最終的に致死に至る場合もあれば、昆虫と win-win な関係を築いていたり、昆虫の中で何をしているのかわからないウイルスもいる。致死性の昆虫ウイルスとして一番有名なものはバキュロウイルスである。バキュロウイルスは遺伝子を 100 個以上持つ大型の DNA ウイルスであり、宿主昆虫の行動を操作することでも有名である。この行動操作は、寄生者の遺伝子の影響が宿主の行動 (表現型) に現れるリチャード・ドーキンスの「延長された表現型」の例として頻繁に取り上げられる。バキュロウイルスはイ

インフルエンザワクチンなどを生産する「バキュロウイルスベクター」としてもよく知られているが、最近、宿主である昆虫の培養細胞に様々なウイルスが共生していることが判明し、その取り扱いが問題となっている。昆虫とウイルスの相利共生の例としてよく知られているのは、寄生蜂とポリドナウイルスの組み合わせである。寄生蜂はチョウ目昆虫の幼虫や卵などに卵を産み付けるが、その際にポリドナウイルスの粒子も注入する。それによって卵は寄主の免疫系から逃れ、体内で成長することができる。一方、ポリドナウイルスの遺伝子は寄生蜂のゲノム内にあたかも寄生蜂の遺伝子のように挿入されており（ゲノム内共生）、卵巣でウイルス粒子が組み立てられる。ウイルスにとっても垂直伝播できるため、ともに利益がある共生であると言える。

#### 4. 共生細菌ボルバキア：最も成功している寄生者

ボルバキアは昆虫の 6 割以上に感染していると推定されている細胞内共生細菌である。感染範囲の広さと巧みな宿主操作から「最も成功している寄生者」として知られる。ボルバキアは、宿主昆虫の性や生殖プロセスを操作して、集団内における感染個体の割合を増やす。性操作の一つに「オス殺し」がある。これはボルバキアに感染したメスと非感染オスが交配した場合、次世代のオスだけが胚子期か幼虫期に致死する現象である（図 2）。トウモロコシの害虫であるアワノメイガにおいてもオス殺しボルバキアの感染が知られている。私たちの研究によって、ボルバキアがアワノメイガの遺伝子量補償を担う Masc タンパク質に作用し、遺伝子量補償を破綻させることでオスだけを致死させることがわかってきた。ボルバキアは様々な目の昆虫にオス殺しを引き起こすことから、それぞれの昆虫に対して独自にオス殺しを行えるように進化してきたと考えられる。今後、様々なボルバキアから「オス殺し」因子が同定されることで、ボルバキアの宿主操作の進化過程が垣間見れるであろう。

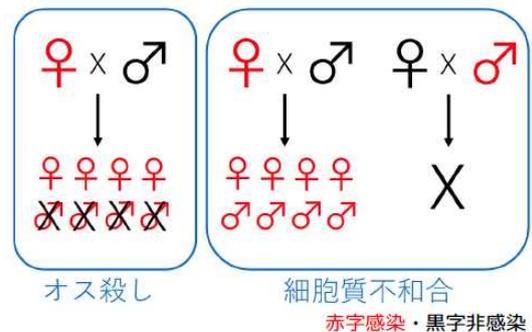


図2. ボルバキアによる性・生殖操作

近年、ボルバキアに感染した蚊において、ウイルス等の病原体を媒介する能力が低下することも明らかになってきた。ボルバキア感染蚊の割合が環境中で増加することによって、蚊がベクターとなり広まる疫病の出現低下が期待できる。現在、世界中でフィールド試験が行われている。

このように昆虫と微生物は色々な形で共生しており、私たちの生活(生態系)の中においても両者は色々な役割を果たしていると言える。昆虫と共に暮らす微生物について少しでも知っていただけると幸いです。

# 自然界にみられる多様な共生関係：

## 細胞から地球まで

生圏システム学専攻 教授 宮 下 直

### 1. 共生とは何かだろうか

最近、様々な場面で「共生」という用語を目にする。地域共生や自然共生など、経済至上主義や効率第一主義から生じた画一化に対する弊害を解消し、持続可能な新たな社会像を目標にかかげたものである。だが、共生はもともと生物学の用語に端を発する。

共生に似た用語に「共存」がある。この2つは同義に使われることもあるが、厳密には似て非なるものである。共存は、単にある場所ある時点でともに存在するというだけの、いわばニュートラルな意味にすぎない。一方、共生は少なくとも一方が他方と何らかの関係性を持ちながら共存している様子をいう。共生は共存の部分集合であり、より限定的な状況で使うべき用語である。ただ、関係性と言っても、相手に悪影響（負の影響）を与える場合は共生とは言わない。よりよい関係（プラスの影響）を内包しているのが共生である。

### 2. 生物にみられる多様な共生関係

生物学でいう共生は、捕食・被食（食う食われる）のような単一の過程を指しているわけではなく、様々なタイプが存在する。エネルギーや養分の授受、天敵からの防衛、種子や花粉などの運搬、住み場所の提供、に大別できる。また、共生の舞台の空間スケールは非常に幅が広い。細胞内では、葉緑体やミトコンドリアが共生している。動物の腸内には多様な微生物が共生していて宿主を支えている。一方、野外に目を向ければ、アリとアブラムシや顕花植物とミツバチのような自由生活者同士の関係が見られる。また生物そのものではないが、陸と海も物質や生物の行き来を介して繋がっており、地球共生系という文脈で語るができる。

共生は基本的に2者間で生じるプラスの関係に注目している。だが、最近では3者以上の関係性から生じる間接的なプラスの関係も共生に含められている。例えば、害虫を捕食するクモは作物にとって間接的にプラスの影響をあたえるので、広義には共生関係にある。こうしてみると、自然界は共生関係に満ち溢れた世界であることが分かるだろう。

### 3. ソバは昆虫による送粉共生の賜物

共生は人間の日常生活とも関係が深い。世界の農作物の7割以上が昆虫や動物による送粉（花粉媒介）により支えられている。日本人の好物であるソバはその典型である。ソバには2つのタイプの花があり、昆虫によって2つのタイプ間で花粉が運ばれないと実がつかない。

長野県飯島町での調査によれば、ソバの花には9目100種以上の昆虫が訪れ、訪花昆虫が多いほど畑ほど結実率が高まることがわかった。しかし、それでも実際に結実する花は2-3割ほどである（図1）。

昆虫のなかで注目されるのがアリの役割である（図2）。我々の調査により、アリはソバの結実を3割以上アップさせていることが判明した。アリはアブラムシなど特定の昆虫に対する防衛共生がもたら注目されてきたが、送粉共生についてはほぼノーマークだった。私たちが美味しいソバにありつけるのも、アリのありがたいご利益のお陰というわけだ。

ソバの結実は、さらにソバ畑周辺に生育する野生植物から間接的に恩恵を受けている。訪花昆虫は、ソバが咲いていない時期には、農地以外の草地や林縁で暮らしているからである。ソバの実りは昆虫に加え、野生植物との共生関係の上に成り立っているのである。



図1. ソバの花は一部しか結実しない。  
左：結実した花、右：しおれて結実しなかった花



図2. ソバの花のクロオオアリ。

### 4. 自然と共生する社会に向けて

自然共生社会の実現は、21世紀の人類に課せられた最大の課題である。もう一つの重要課題である低炭素社会とも相性が良い。生物多様性や生態系の恵みが劣化するなか、2050年までに持続可能な社会づくりが求められている。それは、生態系にみられる多様な「生物の共生」と、人類と生態系が長年にわたって築いてきた「自然との共生」の仕組みを理解し、それらを活用することがカギになるに違いない。20世紀以降急速に顕在化した様々なトレードオフの関係を、win-win関係にもっていく知恵と努力が今こそ求められている。

## プロフィール

ふくだ けんじ  
**福田 健二**

森林科学専攻 森林植物学研究室

### 主な研究活動

森林生態系や樹木個体を健全に保全管理するための基礎として、樹木の環境ストレスに対する応答や、森林生態系内での植物と微生物の相互作用を研究しています。温暖化による乾燥ストレスによる樹木の衰退、グローバル化に伴う外来微生物による樹木病害の流行、都市化による森林の断片化と微生物相の単純化などの現象を明らかにするとともに、都市の緑を守る樹木医学の確立を目指しています。

かつま すすむ  
**勝間 進**

生産・環境生物学専攻 昆虫遺伝学研究室

### 主な研究活動

チョウ目昆虫やそれらに感染する微生物を材料として、遺伝学的、病理学的視点から研究を行なっています。特に宿主の行動を操作するウイルスや宿主の性を操作する共生細菌に注目しています。基礎研究から見出された結果を農学や産業に利用できる技術にすべく日々努力しています。

みやした ただし  
**宮下 直**

生圏システム学専攻 生物多様性科学研究室

### 主な研究活動

1985年東京大学大学院修士課程修了。博士（農学）。  
生物間相互作用や個体群動態の基礎理論を武器に、外来種や野生動物の管理、絶滅危惧種の保全、送粉サービスの持続性など、生物多様性・生態系の課題解決に向けた野外研究に取り組んでいる。著書に、生物多様性や群集生態学の教科書および啓蒙書、高等学校の「生物」教科書などがある。2020年より日本生態学会副会長、文京区生物多様性地域戦略協議会会長を務める。