

本件配布先: 産総研 → 筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、  
資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会  
琉球大学 → 沖縄県政記者クラブ

## セミの共生菌は冬虫夏草由来

### — 寄生関係から共生関係への進化を実証 —

平成30年6月8日

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

国立大学法人 琉球大学

#### ■ ポイント ■

- ・ 多くのセミ類で本来の共生細菌が共生真菌に置換していることを発見
- ・ これらの共生真菌はセミ寄生性冬虫夏草を起源として繰り返し進化してきたことを解明
- ・ 寄生と相利共生の間の生態的・進化的な連続性を実証

#### ■ 概要 ■

国立研究開発法人 産業技術総合研究所【理事長 中鉢 良治】(産総研)生物プロセス研究部門【研究部門長 田村 具博】深津 武馬 首席研究員、同部門 生物共生進化機構研究グループ 森山 実 主任研究員と、国立大学法人 琉球大学【学長 大城 肇】熱帯生物圏研究センター 松浦 優 助教(元産総研技術研修員)は共同で、米国モンタナ大学と協力して、日本産セミ類24種を調査し、うち15種が、冬虫夏草のセミタケ類にごく近縁の細胞内共生真菌と共生していることを明らかにした。

従来、セミ類には2種の細胞内共生細菌サルシアとホジキニアが共生していることが知られていたが、今回、日本産セミ類ではホジキニアが失われて冬虫夏草由来の細胞内共生真菌へ置き換わる共生体置換が少なくとも3回起こり、共生真菌から別系統の共生真菌への共生体置換も複数回起こったと推定された。ほとんどのセミ類の共生真菌は培養困難であったが、ツクツクボウシの共生真菌の単離、培養に成功した。概要ゲノム配列を決定して、この共生真菌が、本来の共生細菌ホジキニアが供給する必須アミノ酸やビタミンの合成能力を持つことを確認した。

今回、寄生関係から共生関係への進化が繰り返し起こったことが実証され、寄生微生物と共生微生物の間の予期せざる深い関係が明らかになった。冬虫夏草や近縁の菌類はしばしば漢方薬として利用され、免疫抑制剤など生理活性物質の産生菌としても知られており、主に亜熱帯地域に生息する多様なセミ類の共生真菌も新たな生物遺伝子資源として利用できる可能性がある。

この成果は2018年6月11日(米国東部夏時間)に米国の学術誌「*Proceedings of the National Academy of Sciences USA*」(米国科学アカデミー紀要)にオンライン掲載される。

\_\_\_\_\_は別紙【用語の説明】参照



アブラゼミ (左) オオセミタケ (右) セミタケ (下)

本件配布先: 産総研 → 筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、  
資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会  
琉球大学 → 沖縄県政記者クラブ

## ■ 研究の社会的背景 ■

微生物を利用した物質生産や発酵などをはじめ、バイオテクノロジーは人間社会のさまざまな局面で役立っている。近年では、農業害虫や衛生害虫の生存や病害に体内微生物が重要な役割を果たしていることや、ヒトの健康や疾病に腸内細菌が無視できない影響を与えていることも判明し、生物の体内に存在する微生物の多彩な生物機能が注目されている。一方で、熱帯・亜熱帯地域に特有の生物多様性は、現在、人間の活動や気候変動の影響を受けてさまざまな危機に直面している。このような生物群においても、未知の高度な機能を有する微生物が共生していることは間違いなく、亜熱帯地域における多様な動植物と微生物の相互作用の解明や、共生微生物を含む生物資源の探索が今まさに求められている。

## ■ 研究の経緯 ■

アブラゼミ、ミンミンゼミ、クマゼミ、ツクツクボウシ、ヒグラシなどのセミ類は、特徴的な大きな鳴き声から夏の風物詩としてなじみがあるが、体内に複数の共生細菌との内部共生系を保有している。近年、主に米国のセミ類についての研究から、セミ類の体内には菌細胞塊という共生器官があり、その細胞内にサルシアとホジキニアという 2 種の細胞内共生細菌が局在することがわかってきた。セミ類は数年間の長い幼虫期にわたり、2 種の共生細菌の助けにより、植物の汁（道管液）という栄養的に貧弱な食物から大きな体を作り上げると考えられてきた。今回、日本産セミ類の大半を網羅する 24 種について内部共生系を調べたところ、従来知られていなかった共生真菌を発見し、その微生物学的実体を解明するために詳細な研究を実施した。

なお、本研究の一部は、文部科学省 科学研究費補助金および公益財団法人 発酵研究所 一般研究助成の支援を受けて実施した。

## ■ 研究の内容 ■

セミの成虫は樹木から、セミの幼虫は根から、植物の道管液を吸って生きているが、道管液はわずかなアミノ酸や糖を含むのみで栄養的にきわめて乏しい。一方、セミ類の細胞内共生細菌サルシアとホジキニアは共生進化の過程でゲノムが著しく縮小し、セミの体外では生存できない。サルシアは多くの必須アミノ酸、ホジキニアはいくつかの必須アミノ酸とビタミンの合成に特化しており、これらの共生細菌の助けにより、セミは道管液という栄養的に貧弱な食物でも生存できると考えられてきた。

今回、沖縄などの南西諸島を含む日本各地から採集したセミ類 24 種を調べたところ、ニイニイゼミ、エゾゼミ、エゾチッチゼミ、クロイワゼミ、ツマグロゼミなど 9 種は従来の報告の通り、サルシアとホジキニアの 2 種の細胞内共生細菌を保有していた（図 1）。ところがアブラゼミ、ミンミンゼミ、クマゼミ、ヒグラシ、ツクツクボウシ、オオシマゼミ、オキナワヒメハルゼミ、イワサキクサゼミなど他の 15 種では、サルシアは持っていたがホジキニアは検出されず、代わりに酵母のような形の細胞内共生真菌を保有していた（図 2）。

本件配布先: 産総研 → 筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、  
資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会  
琉球大学 → 沖縄県政記者クラブ

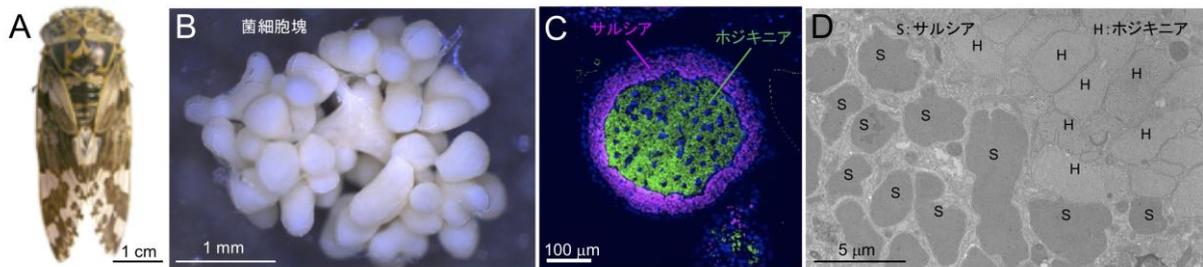


図1 ニイニゼミの内部共生系

(A) 成虫。(B) 解剖摘出した菌細胞塊。(C) 蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション法による菌細胞塊におけるサルシア（マゼンタ）とホジキニア（緑）の局在の可視化。(D) サルシアとホジキニアの透過電子顕微鏡像。

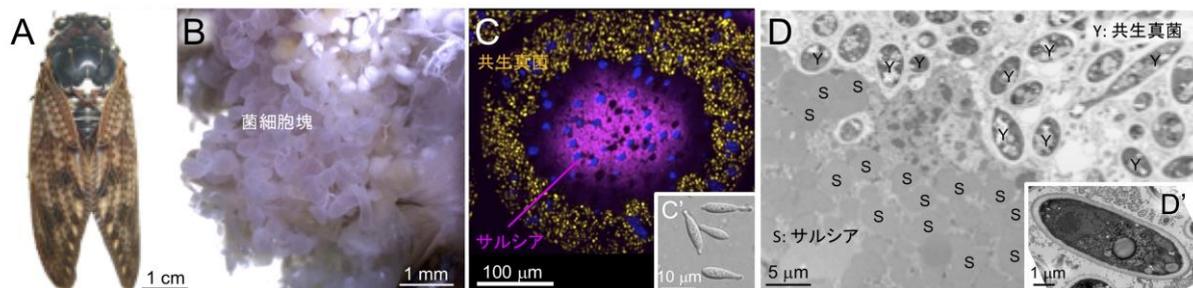


図2 アブラゼミの内部共生系

(A) 成虫。(B) 解剖摘出した菌細胞塊。(C) 蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション法による菌細胞塊におけるサルシア（マゼンタ）と細胞内共生真菌（黄）の局在の可視化。枠内は共生真菌細胞の光学顕微鏡像。(D) サルシアと共生真菌の透過電子顕微鏡像。枠内は共生真菌細胞の拡大像。

次に、セミ類の系統樹を作成し、サルシア/ホジキニア/共生真菌の有無を解析したところ、日本産セミ類の進化過程においてホジキニアから共生真菌への共生体置換は少なくとも 3 回独立に起こったと推定された（図 3）。

共生真菌が見つかったセミ類から DNA を抽出して、真菌類の遺伝子を増幅し、塩基配列決定、分子系統解析をおこなったところ、セミ類の共生真菌はエゾハルゼミタケ、ヤクシマセミタケ、セミタケなどのセミ寄生性の冬虫夏草類ときわめて近縁であることがわかった。宿主セミ類と共生真菌の系統樹を比較したところ、両者の系統関係はほとんど一致せず、しかもさまざまなセミ類の共生真菌の間にセミ寄生性の冬虫夏草類が位置する複雑なパターンを示し、セミ類の進化過程で冬虫夏草から共生真菌への進化が繰り返し起こってきたこと、そして共生真菌がさらに別の共生真菌に繰り返し置き換わってきたらしいことが強く示唆された（図 4）。

本件配布先: 産総研 → 筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、  
資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会  
琉球大学 → 沖縄県政記者クラブ

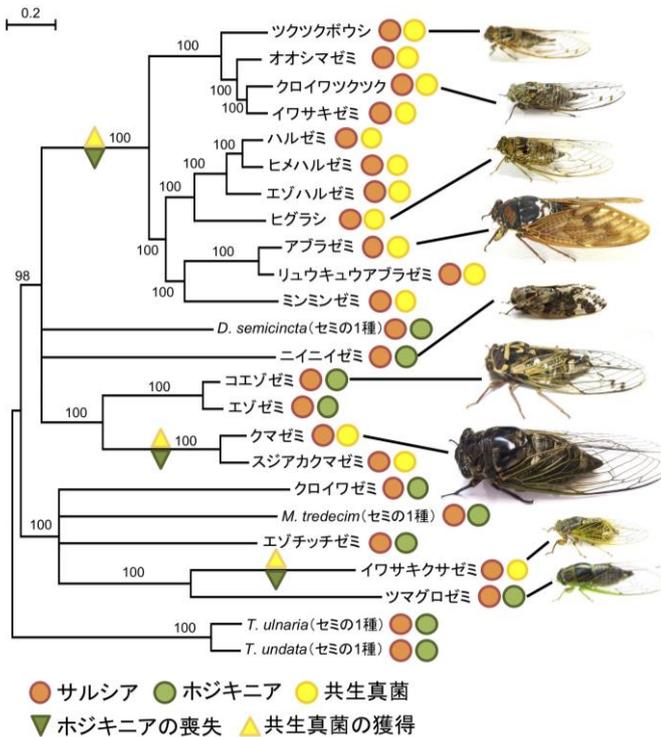


図3 セミ類の系統関係と共生微生物の進化過程

ミトコンドリア遺伝子 14733 塩基座位に基づく分子系統樹。ミトコンドリア全遺伝子配列を決定した日本産セミ類 20 種に外国産セミ類 4 種のデータを加えて解析した結果を示す。数字はグルーピングの確からしさを表すブートストラップ値 (100 が最高値)。

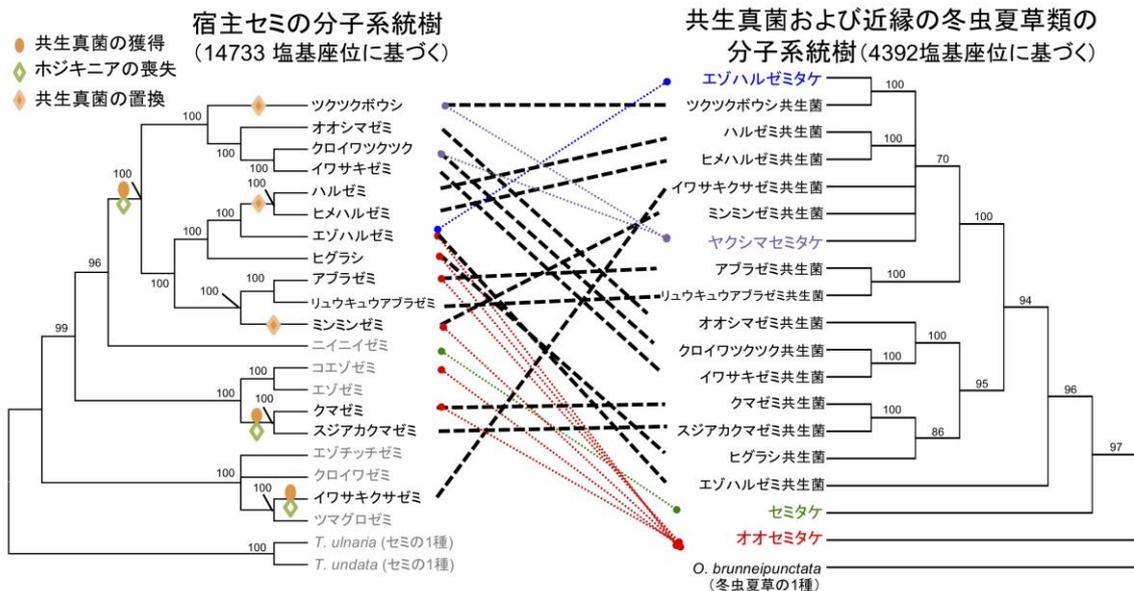


図4 日本産セミ類と共生真菌/冬虫夏草類の系統関係の比較

左側が宿主セミの系統関係。右側がセミ類の共生真菌および近縁の冬虫夏草類の系統関係。推定される共生真菌の獲得、ホジキニアの喪失、共生真菌の置換の過程をセミ系統樹上に示す。宿主セミと共生真菌の対応は黒い点線で示す。共生真菌のいないセミは灰色で、冬虫夏草は色付けで示す。冬虫夏草と寄主セミの対応は色付き点線で示す。数字はグルーピングの確からしさを表すブートストラップ値 (100 が最高値)。

本件配布先: 産総研 → 筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会  
琉球大学 → 沖縄県政記者クラブ

これらセミ類の共生真菌の単離培養を試みたところ、大部分は培養困難であったが、ツクツクボウシの共生真菌だけは、生育は非常に遅いものの寒天培地上で単離培養することができた(図5)。この共生真菌の培養株について概要ゲノム配列を決定したところ、ホジキニアの機能と考えられている必須アミノ酸合成系やビタミン合成系を保持していた。

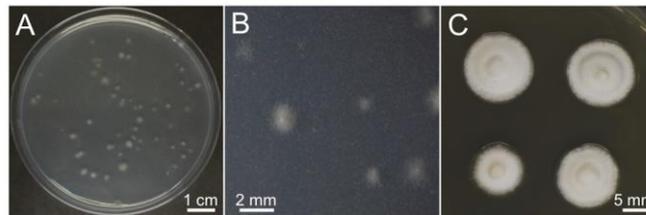


図5 ツクツクボウシ共生真菌の単離培養

- (A) 培養約1ヶ月後の寒天培地上の小さなコロニー。生育は遅い。(B) コロニーの拡大像。  
(C) 長期(3ヶ月以上)培養したコロニー。菌糸をあまり伸ばさず塊状に成長する。

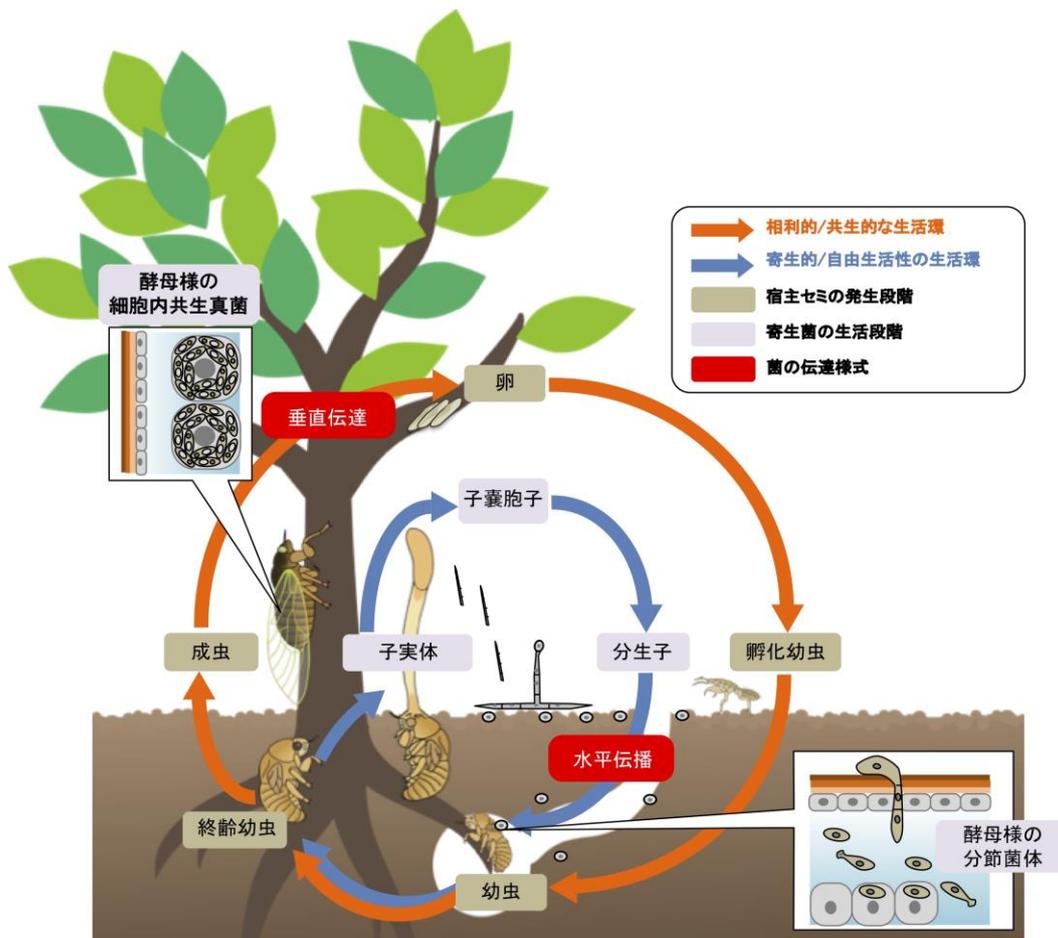


図6 セミ共生真菌と冬虫夏草の進化生態的關係

本件配布先: 産総研 → 筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、  
資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会  
琉球大学 → 沖縄県政記者クラブ

これらの結果から、セミ類の生存に必須な細胞内共生細菌ホジキニアを置換してその機能を代替している細胞内共生真菌と、セミタケ類として知られるセミ寄生性の冬虫夏草は、生態的、進化的に密接な関係にあることが示された(図6)。セミの幼虫は樹木の根から吸汁しながら、土壤中で何年もかけて成長する。このように、多湿で微生物だらけの土壤中で長い期間を過ごすため、セミの幼虫は冬虫夏草類の寄生を受けやすいのではないかと考えられる。実際、日本で記録されている約240種の冬虫夏草類のうち、セミ寄生性のものが20種余りを占める。

共生真菌の進化について、今回の論文では、セミ寄生性の冬虫夏草類のうち弱毒化したものが、慢性的な感染を確立し、宿主を殺して孢子形成して分散するかわりに、卵へ垂直伝達されるようになり、細胞内共生細菌を機能的に補うようになって、やがては取って代わって細胞内共生真菌になったのではないか、そのようなことがセミ類の進化の過程で繰り返し起こってきたのではないか、という仮説を提唱した。

## ■ 今後の予定 ■

今後は、セミ類の多様性がもっとも高いことで知られる南西諸島を中心に共生微生物の調査を継続する。そして、ツクツクボウシ以外のセミ類に見られる培養困難な細胞内共生真菌についてもゲノム解析を行い、より進化段階の進んだ共生真菌のゲノムがどのような特徴を示すようになるのか明らかにするとともに、共生真菌に近いセミタケ類との比較ゲノム解析を進め、寄生菌と共生菌の間のゲノムの違いを同定していく。

## ■ 論文情報 ■

論文名: Recurrent symbiont recruitment from fungal parasites in cicadas

著者: 松浦優<sup>1,2</sup>、森山実<sup>2</sup>、Lukasik Piotr<sup>3</sup>、Vanderpool Dan<sup>3</sup>、棚橋薫彦<sup>4</sup>、孟憲英<sup>2</sup>、McCutcheon John<sup>3</sup>、深津武馬<sup>2</sup>

所属: 1. 琉球大学 熱帯生物圏研究センター、2. 産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門、3. モンタナ大学、4. 台湾国立交通大学

雑誌名: Proceedings of the National Academy of Sciences USA

DOI: 10.1073/pnas.1803245115

論文 URL: [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1803245115](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1803245115)

本件配布先: 産総研 → 筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、  
資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会  
琉球大学 → 沖縄県政記者クラブ

■ 本件問い合わせ先 ■

国立大学法人 琉球大学

熱帯生物圏研究センター 分子生命科学研究施設

助教 松浦 優

〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地 COMB

TEL : 098-895-8970 FAX : 098-895-8944

E-mail : yumatsu@comb.u-ryukyu.ac.jp

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

生物プロセス研究部門 生物共生進化機構研究グループ

主任研究員 森山 実

〒305-8566 茨城県つくば市東1-1-1 中央第6

TEL & FAX : 029-861-6812

E-mail : m-moriyama@aist.go.jp

生物プロセス研究部門

首席研究員 深津 武馬

〒305-8566 茨城県つくば市東1-1-1 中央第6

TEL : 029-861-6087 FAX : 029-861-6812

E-mail : t-fukatsu@aist.go.jp

---

【プレス発表／取材に関する窓口】

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 企画本部 報道室

〒305-8560 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1

つくば本部・情報技術共同研究棟 8F

TEL : 029-862-6216 FAX : 029-862-6212 E-mail : press-ml@aist.go.jp

国立大学法人 琉球大学 熱帯生物圏研究センター

教授 徳田 岳 (分子生命科学研究施設 広報委員)

〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地

TEL : 098-895-8543 FAX : 098-895-8944

E-mail : tokuda@comb.u-ryukyu.ac.jp

本件配布先: 産総研 → 筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、  
資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会  
琉球大学 → 沖縄県政記者クラブ

## 【用語の説明】

### ◆相利共生

生物間の共生関係のうち、双方が利益を得るような関係。片方が利益を得るがもう一方はさしたる利害がない関係は片利（偏利）共生、片方が利益を得てもう一方は損失をこうむる関係は寄生という。

### ◆セミ

半翅目に属する大型の昆虫で、オスが発音する。幼虫は植物の根から吸汁して地中で数年間をかけて成長するが、羽化後の成虫寿命は短く数週間程度である。日本には36種が分布しており（うち2種は移入種）、アブラゼミ、ミンミンゼミ、ニイニイゼミ、ツクツクボウシ、ヒグラシ、クマゼミなどがおなじみであるが、セミ類の分布の中心は熱帯から亜熱帯であり、南西諸島にしかない種も多い。

### ◆冬虫夏草

子囊菌門ボタタケ目に属する主に昆虫寄生性の真菌類の総称。生きた昆虫類やその他の節足動物に感染して殺し、キノコ（子実体、分生子束）を生やして孢子（子嚢孢子、分生子）を形成する。越冬している昆虫が夏になると植物に変化するように見えるため、古来このように呼ばれてきた。狭義には漢方薬として珍重されるシネンシストウチュウカソウ (*Ophiocordyceps sinensis*) を指す。

### ◆セミタケ類

セミタケ、オオセミタケなど、冬虫夏草のうちセミ類に寄生するもの。大部分は幼虫に寄生し、地中から独特な形状のキノコ（子実体）が現れる。

### ◆細胞内共生真菌

宿主生物の細胞の中に共生する真菌のこと。昆虫類ではカイガラムシ類、ウンカ類、一部のアブラムシ類などで見つかっており、多くは冬虫夏草に近縁である。

### ◆細胞内共生細菌

宿主生物の細胞の中に共生する細菌のこと。キノコ、カビ、酵母などの真菌とは全く異なるグループの微生物で、いわゆるバクテリアの仲間である。幅広い昆虫類に存在し、しばしば菌細胞という共生に特殊化した細胞内に局在している。

### ◆サルシア

ヨコバイ、アワフキムシ、セミなどの半翅目昆虫に広く見られる細胞内共生細菌。共生進化の起源は1億年をはるかに超えると考えられており、ゲノムが著しく縮小している。宿主昆虫の餌である植物汁液中に不足する必須アミノ酸を供給する機能を担う。

本件配布先: 産総研 → 筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、  
資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会  
琉球大学 → 沖縄県政記者クラブ

#### ◆ホジキニア

セミ類で見られる細胞内共生細菌。サルシアと共に必須アミノ酸やビタミン類を宿主に供給する機能を担うと考えられている。ゲノムの極度の縮小化や分断化が起こるなど、ゲノム崩壊が進んでいることが近年報告された。

#### ◆共生体置換

すでに存在していた共生者が、異なる共生者に置き換わること。

#### ◆概要ゲノム配列

ほぼ全容が解読されているが、一部、未完成な部分が残っているゲノム配列のこと。概要ゲノム配列でも、遺伝子探索などの目的には十分有用である。

#### ◆必須アミノ酸

アミノ酸のうち、動物が自ら合成できず食物や共生微生物からの供給を必要とするもの。

#### ◆ビタミン

動物が自ら合成できず、外部から摂取する必要がある微量栄養素。主に酵素の働きを助ける役目をする。

#### ◆免疫抑制剤

免疫機能を阻害するはたらきをする薬剤。アレルギー疾患や自己免疫疾患の治療や、臓器移植の際に拒絶反応を抑えるために用いられる。フィンゴリモドという免疫抑制剤は、セミタケの一種から見つかった物質を元に開発された薬剤である。

#### ◆生理活性物質

わずかな量で生物の生理状態や行動に効果をもたらす物質。

#### ◆道管液

植物の道管を通る液体で、主に根から吸い上げた水分や養分を運ぶ役割を担う。成分はほとんど水であるが、無機養分やごく微量のアミノ酸を含んでいる。

#### ◆in situ ハイブリダイゼーション法

蛍光色素などで標識したプローブと呼ばれる短い核酸配列を用い、特定の配列を持つ DNA や RNA の局在を組織上で可視化する方法。今回は細菌や真菌の遺伝子をターゲットにすることで、細菌や真菌の局在を可視化している。

#### ◆単離培養

人工的に合成した培地上で微生物を培養し、目的の微生物のみを単離して、培養下で維持すること。