

カマドウマの腸内から新種の菌類を発見 ～進化の鍵を握る「腸内外両生菌類」～

カビやキノコ、コウボなど、菌類の仲間は現在、地球上のあらゆる環境に生息していますが、その祖先は水中生活をしており、進化の過程で、動物や植物とともに陸に上がってきたと考えられています。しかしながら、菌類の陸上進出の具体的な過程は未だ明らかになっていません。

本研究では、菌類の中でも初期に陸上進出したと考えられる分類群の一つであるキクセラ亜門に属す、新属新種の菌類ウングイスポラ・ラフィドフォリダルム (*Unguispora raphidophoridarum*: ラテン語で「カマドウマの鉤爪を持つ孢子」) を発見し、記載報告をしました。この菌類は、カマドウマという昆虫の糞からカビとして見つかりましたが、後にカマドウマの腸内で、コウボの形で生活することが分かりました。このように、動物の腸の内と外とで著しく異なる二つの姿で生活する菌類は今まで知られていなかったため、新たに「腸内外両生菌類」という呼び名を付けました。

従来、キクセラ亜門としては、節足動物の腸内菌と、土壌や動物の糞に生息する腐生菌が知られており、この分類群は、動物でいうと、水中と陸上の双方で生活をする両生類のような進化段階にあると考えられます。今回発見した *Unguispora raphidophoridarum* が、腸内菌と腐生菌の両方の性質を併せ持つことは、キクセラ亜門が動物の腸内環境と関わりながら進化したというシナリオを示唆しています。本研究成果は、菌類の陸上進出の進化過程の解明につながると期待されます。

研究代表者

筑波大学生命環境系

出川 洋介 准教授

研究の背景

菌類は、一般にはカビ、キノコ、コウボとして知られている生物であり、動物や植物、藻類、原生生物などさまざまな生物に対する寄生・共生者として、あるいは、他の生物の死骸や排泄物の分解に関わる腐生菌として、重要な働きを担っています。現在、菌類は地球上のあらゆる環境に広く分布していますが、その祖先は水中で生活しており、後に、進化に伴って陸上に進出してきたと考えられています。これまでに記録されている菌類は約 15 万種に及び、その約 9 割が陸上進出以降に生じたと考えられていることから、陸上進出は、現在の菌類の多様性の成立過程を理解する上で重要な出来事です。

しかしながら、菌類において初期に陸上進出したと考えられる分類群の多様性や生態に関する研究は十分ではなく、陸上進出の進化過程については未だに多くが謎に包まれています。初期に陸上進出した菌群にはさまざまな生活様式が認められますが、これらの生活様式の進化的変遷はほとんど分かっていません。例えば、初期に陸上進出した菌群の一つであるトリモチカビ門キクセラ亜門（従来の接合菌類）では、節足動物の腸内菌と土壌や糞に生息する腐生菌、そして他の菌類への寄生菌という 3 つの生活様式が知られています。これらの生活様式を持つグループは単系統でなく、系統樹から生活様式の進化過程を推定するのは困難です。生活様式の進化的変遷の解明には、進化の過渡期にあるような中間的な性質を持つ菌類が研究材料として適していますが、キクセラ亜門においてそのような菌類は今まで報告がありませんでした。

研究内容と成果

本研究ではキクセラ亜門の多様性調査を行うにあたり、土壌に生息する動物に着目しました。というのも、キクセラ亜門の腐生菌の一部の稀産種は、動物の糞や節足動物の死骸からのみ検出され、未知の菌類の存在が期待されるからです。調査の結果、カマドウマ科昆虫の糞から未記載種の菌類が分離されました。この菌類の形態的特徴を観察し、分子系統解析を行ったところ、キクセラ目に所属する新属新種であることを確認し、ウングイスポラ・ラフィドフォリダラム (*Unguispora raphidophoridarum*) として記載しました。属名 *Unguispora* はラテン語で爪をもつ胞子という意味で、小孢子囊^{注1)}の表面にある鉤爪様の修飾構造に由来し (図 1)、種小名 *raphidophoridarum* は分離源であるカマドウマ科の学名 *Rhaphidophoridae* に由来します。

また、分離源のカマドウマ科昆虫の腸内を解剖したところ、*U. raphidophoridarum* の小孢子囊が腸内に付着しながらコウボ様増殖^{注2)}を行うことが分かりました。付着部位は前腸の前胃と呼ばれる器官であり、表面に密に生えている微小な毛を小孢子囊表面の鉤爪様構造が挟むことによって付着しているのが観察されました (図 2)。カマドウマ科を含むキリギリス亜目の昆虫の「前胃」には、鳥類の「砂肝」のように、食物をすり潰して咀嚼する機能が発達しています。そのため、この前胃の咀嚼運動によって小孢子囊の鉤爪の隙間に毛が挟まるものと考えられ、たくさんの鉤爪を持つ不思議な小孢子囊の形は腸内に留まる機能を有することが明らかになりました。

さらに培養検討を行った結果、胞子は酸素が少ない嫌気条件にさらされると発芽しないことが分かりました。嫌気条件下で培養した胞子は、腸内にある場合と同じようにコウボ様増殖を行いました。このことから、おそらく *U. raphidophoridarum* は、カマドウマの腸内で発芽するために嫌気条件でのみ胞子が発芽するように制御しており、カマドウマの腸内で生活するために非常に巧妙な適応をしていると考えられます。

こうした観察から、*U. raphidophoridarum* の生活環は、カマドウマの腸内でコウボ様増殖するステージとカマドウマの糞上で菌糸成長するステージという、全く異なる二つの姿での生活から成ることが判明しました (図 3)。これは *U. raphidophoridarum* は節足動物の腸内菌と土壌や動物の糞に生息する腐

生菌の両方の性質を併せ持つことを示しています。このように腸内菌と腐生菌の中間的な生活様式を示す菌類は世界でも初めての例であり、新たな生態群の概念として「腸内外両生菌類」と呼称することを提唱しました。既知の腸内菌のほとんどは宿主が水生昆虫であり、腸内は水中と近い環境です。そのため、腸内外両生菌類を含むキクセラ亜門は、動物でいうと、水中と陸上の両方で生活をする両生類のような進化段階にあると考えられます。

U. raphidophoridarum が所属しているキクセラ目の主な種は腐生菌であり、本研究により、腐生菌が節足動物の腸内菌としての側面を併せ持つ可能性が示されました。キクセラ目の一部の種は節足動物の糞を含む土壌や死骸から分離されており、以前から腐生菌と節足動物との関連性が疑われていました。他にもキクセラ目には、土壌ではなく、動物の糞から検出される種も存在しています。これらのことから、従来、腐生とされてきた菌類の少なくない種が、腸内菌や糞生菌としての側面を持つ可能性が考えられ、キクセラ亜門には一般的に、動物の腸内環境との関わりを持つ傾向があることを読み解くことができます。従って、新たな仮説として、キクセラ亜門が動物の腸内環境を利用しながら進化してきたという道筋が示唆されました。

今後の展開

本研究で発見された *U. raphidophoridarum* を含め「腸内外両生菌類」は、キクセラ亜門における腸内菌と腐生菌の進化過程の解明に適した研究材料になると考えられます。本研究チームは、説得力のある菌類の陸上進出のシナリオの構築を目指して、*U. raphidophoridarum* の生態、微細形態、ゲノム、発現遺伝子などの解析だけでなく、新たな「腸内外両生菌類」の探索を行っています。

また、*U. raphidophoridarum* の宿主の腸内への付着方法は、既知の腸内菌とは全く異なり、他に類を見ないものです。本研究チームでは本種の鉤爪様構造の微細構造の解析を進めており、腸内菌の進化の解明だけでなく生物学への展開につながることも期待できます。

参考図

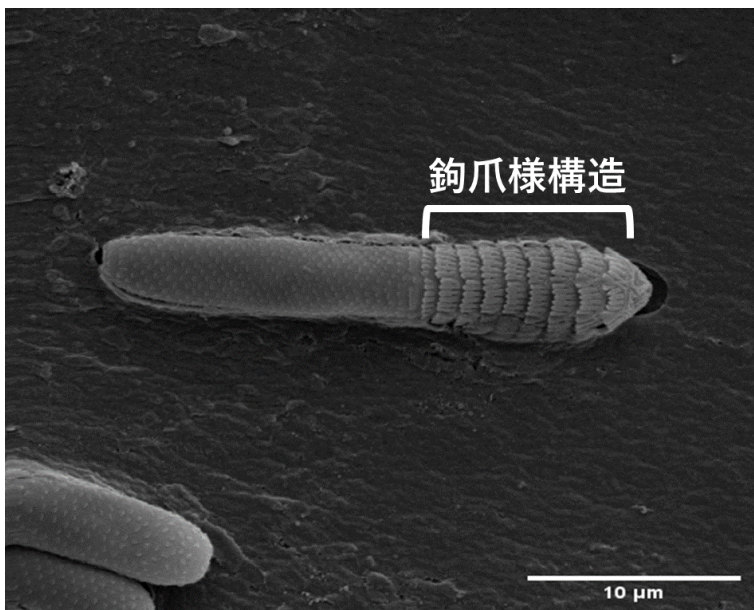


図1 ウングイスポラ・ラフィドフォリダルム (*Unguispora raphidophoridarum*) の小孢子囊 (孢子)。小孢子囊の上半分の表面に鉤爪様の構造がみられる。小孢子囊は上半分が六角柱状になっており、鉤爪が各面において縦に9列、個々の列において横に6個ずつ並んでいる。合計6面×9列×6個=324個の鉤爪を伴う複雑な構造をしている。

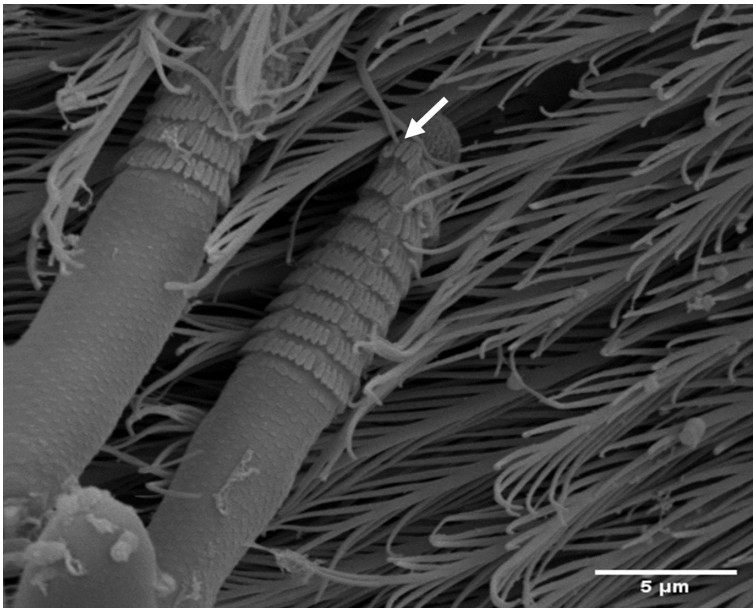


図2 ウングイスポラ・ラフィドフォリダルム (*Unguispora raphidophoridarum*) の小孢子嚢 (孢子) がマダラカマドウマの前胃に付着する様子。前胃の内側表面には微小な毛 (個々の毛がまた枝分かれして羽毛状) が密生している。小孢子嚢の上半分にある鉤爪のうち、隣り合った二つの鉤爪が、羽毛状に枝分かれした毛の先端を複数個所で挟むことにより、前胃に付着している (矢印)。

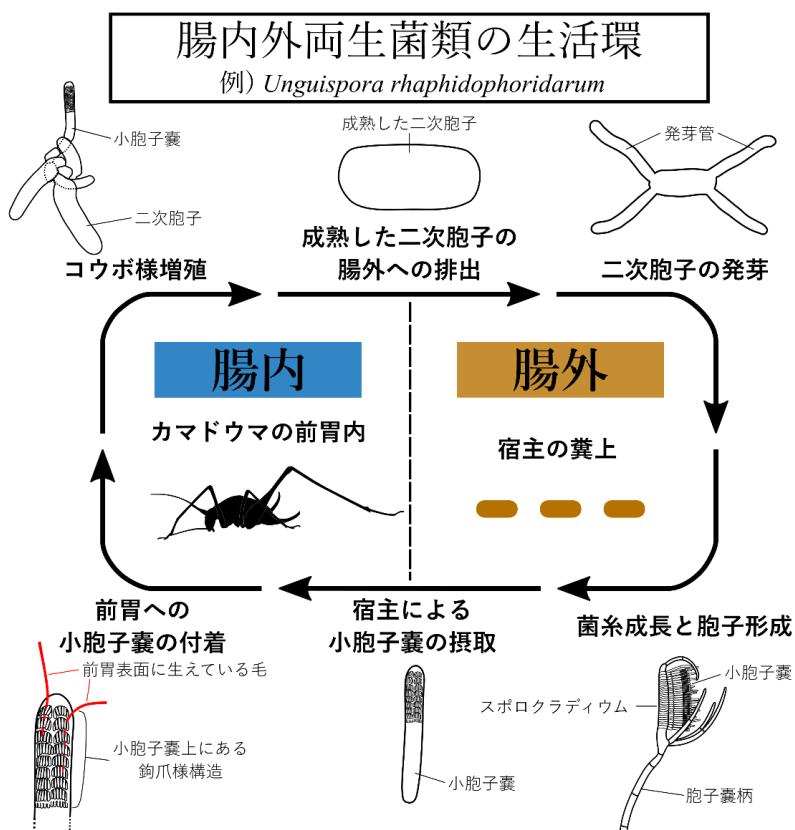


図3 ウングイスポラ・ラフィドフォリダルム (*Unguispora raphidophoridarum*) にみられる「腸内外両生菌類」の生活環。ウングイスポラ・ラフィドフォリダルムは、カマドウマの腸内の前胃に付着したままコウボ様増殖を行う腸内生のステージと、カマドウマの糞上で菌糸成長を行う腐生のステージという全く異なる姿をした2つのステージを併せ持つ。

用語解説

注1) 小孢子嚢

少数の胞子を包んでいる細胞。今回発見したウングイスポラ・ラフィドフォリダルム (*Unguispora raphidophoridarum*) を含むキクセラ亜門では小孢子嚢の内部に1つの胞子を形成する。

注2) コウボ様増殖

単細胞で栄養増殖すること。コウボ様増殖を行う菌類は丸みを帯びたあるいは球形の細胞の形をしており、それに対して、菌糸成長を行う菌類は多くの場合多細胞であり、糸状の形をしている。

研究資金

本研究は科研費、発酵研究所、長野県科学振興会の研究プロジェクトの一環として実施されました。

掲載論文

【題名】 A new genus *Unguispora* in Kickxellales shows an intermediate lifestyle between saprobic and gut-inhabiting fungi.

(キクセラ目の新属 *Unguispora* は腐生菌と腸内菌の中間的な生活様式を示す)

【著者名】 Tomohiko Ri^a, Mai Suyama^a, Yusuke Takashima^a, Kensuke Seto^b, Yosuke Degawa^a

^a Sugadaira Research Station, Mountain Science Center, University of Tsukuba, 1278-294 Sugadaira-Kogen, Ueda, Nagano 386-2204, Japan

^b Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, 79-7 Tokiwadai, Hodogaya, Yokohama 240-8051, Japan

【掲載誌】 Mycologia

【掲載日】 2022年9月27日

【DOI】 10.1080/00275514.2022.2111052

問い合わせ先

【研究に関すること】

出川 洋介 (でがわ ようすけ)

筑波大学生命環境系／山岳科学センター菅平高原実験所 准教授

URL: <https://dgv-sugadaira.jimdofree.com/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp