

令和 4 年 12 月 27 日

報道機関 各位

親しき仲にも礼儀あり ～共生細菌は、昆虫体内のたった1つの細胞内で棲み分ける～

■ ポイント

- ・ “棲み分け” は、自然界に広く見られる現象で、同一の資源（餌や住処など）を巡る競争を緩和し、近接空間での複数生物種の共存を可能にすると考えられている。
- ・ 農業害虫タバココナジラミでは、その体内に生息する2種類の共生細菌が、昆虫の同一細胞内で、別々の極小区画に棲み分けをしていることを発見した。
- ・ 細菌が同一細胞内で棲み分けするという現象は、これまでに全く報告されていない。本成果は、微生物の生態や、共生の進化の理解に新たな観点を提示するものである。

■ 概要

国立大学法人富山大学 学術研究部 理学系の土`田 努 准教授と国立大学法人群馬大学 食健康科学教育研究センターの藤原亜希子 講師（国立研究開発法人理化学研究所 環境資源科学研究センター 客員研究員を兼務）は、独立行政法人産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門の鎌形洋一研究部門長（現 生命工学領域長補佐）および孟憲英 専門技術員と共同で、農業害虫として知られるタバココナジラミとその近縁種では、虫の生存・繁殖に必須の役割を担う2種類の共生細菌が、コナジラミ体内の同一細胞内という極小空間で”棲み分け”を行っていることを発見した（[図1](#)）。

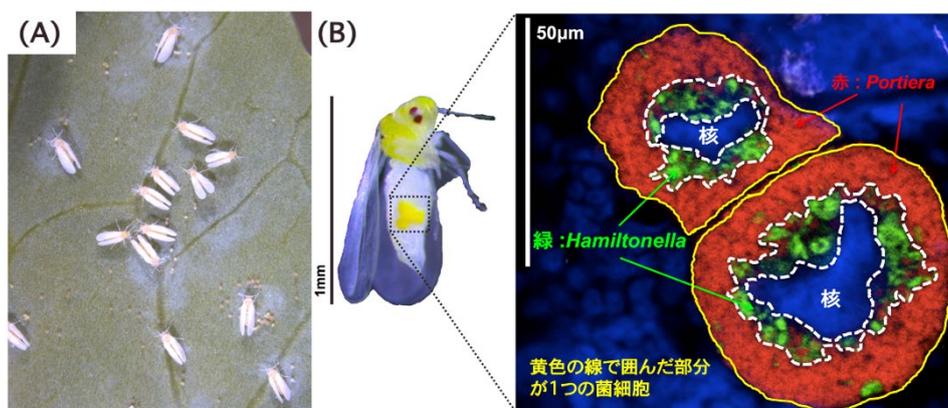


図1

- (A) キャベツに寄生する農業害虫タバココナジラミ（成虫と卵）
(B) タバココナジラミ腹部の菌細胞とその内部に存在する2種類の共生細菌

多くの昆虫では、その体内に、生存や繁殖の役割を担う必須の共生細菌を複数種棲まわせていることが知られている。しかし、これらの細菌は昆虫の別々の細胞や組織に収納されているのが一般的であり、同一細胞内での棲み分けという現象は従来まったく知られていなかった。**今回の発見は、微生物の生態や共生の進化の理解に新たな観点を提示するものである。**本研究成果は米国の学術誌「*Microbiology Spectrum*」に2022年12月22日（木）午後11時（日本時間）に掲載された。

■研究の背景

自然界において生物は単独で生きているのではなく、異なる生物ともお互いに影響を与え合いながら生きている。生息場所や栄養源などの同一の“資源”を利用している生物同士は、これらを巡って競争関係になることが多い。この現象は様々な生物において知られており、昆虫の体内に生息する“共生微生物”の場合も例外ではない。

多くの昆虫は、特殊な代謝系を持つ微生物と共生関係を結んでおり、その微生物がいないと生存や繁殖に支障をきたすような**必須の関係性**も知られている。アブラムシやカイガラムシなどでは、異なる役割を担う**複数種の細菌が、体内の異なる細胞や組織に“棲み分け”**しているのが一般的に観察される。別々の体内区画への**棲み分けは、共生細菌間の資源を巡る競争を緩和し、宿主との相互作用の強化につながる、共生進化に重要なプロセス**であると考えられている。

タバココナジラミは、植物病原ウイルスを媒介することで、様々な農業・園芸作物の害虫となっている吸汁性昆虫である。本種の腹部には“菌細胞^{※1}”と呼ばれる細菌を共生させるための細胞が存在しており、**タバココナジラミの生存や繁殖に必須の役割を担う、2種類の共生細菌が存在している。**興味深いことに2種の共生細菌は、異なる昆虫の細胞や組織に存在するのではなく、同一の菌細胞内に共存していることが以前から知られていた。2種の共生細菌はそれぞれが安定して常在しており、**同一菌細胞内で競争を避け、共存するための何らかのメカニズムが存在することが示唆された。**1つの可能性としては、“同一菌細胞内の2種共生細菌の棲み分け”が考えられるが、これまでにこのような棲み分け様式はまったく知られていなかった。

■研究の経緯

富山大学 土`田共生機能科学研究室および群馬大学 藤原研究室では、生物多様性の宝庫である昆虫を中心として、他種生物との間の高度な共生関係の理解や、その成立機構の解明、共生機構を標的とした新規防除資材開発等、様々なプロジェクトを推進している。

(例)

2012年5月28日「[生存に必須な共生細菌が子孫へ伝達される瞬間を捉えた!-昆虫が共生細菌を次世代へ伝える機構の解明](#)」

2014年9月25日「[農業害虫タバコナジラミの新系統をアジアで初検出-各系統の害虫としての危険度と保有共生細菌との関係性も明らかに-](#)」

2018年10月17日「[細胞内共生微生物が宿主の体内時計に及ぼす影響を解明](#)」

2021年6月18日「[働かない寄生植物が、働き者へと変化!?-新規モデル昆虫による“虫こぶ”形成で、寄生植物の光合成が活性化-](#)」

2022年2月1日「[シタバニハゴロモは、日本に二度侵入した-北陸の風雨・風雪が、外来昆虫の分布拡大を阻止?-](#)」

本研究成果の一部は、農業・食品産業技術総合研究機構 生物系特定産業技術研究支援センター イノベーション創出強化研究推進事業（体系的番号：JPJ007097）、文部科学省 科学研究費補助金 基盤研究（C）、理化学研究所基礎科学特別研究員制度、および日本学術振興会 卓越研究員事業の支援を受けて行われた。

■研究の内容・成果

タバコナジラミの Middle East Asia Minor 1（以下、MEAM1）と呼ばれる遺伝型を対象に、共焦点レーザー顕微鏡^{※2}を用いて、2種の共生細菌の菌細胞内での立体的な空間配置を解析した。その結果、2種類の共生細菌には、同一の菌細胞内で明確な棲み分けが存在していることが明らかになった。即ち、*Hamiltonella* は菌細胞核の周りを取り囲むように存在し、*Portiera*はその外側にある細胞質中に局在していた（[図2](#)）。この菌細胞内での2種共生細菌の棲み分けは、胚発生から成虫へと至るタバコナジラミの成長の間、安定して保たれていることが示された（[図2](#)）。

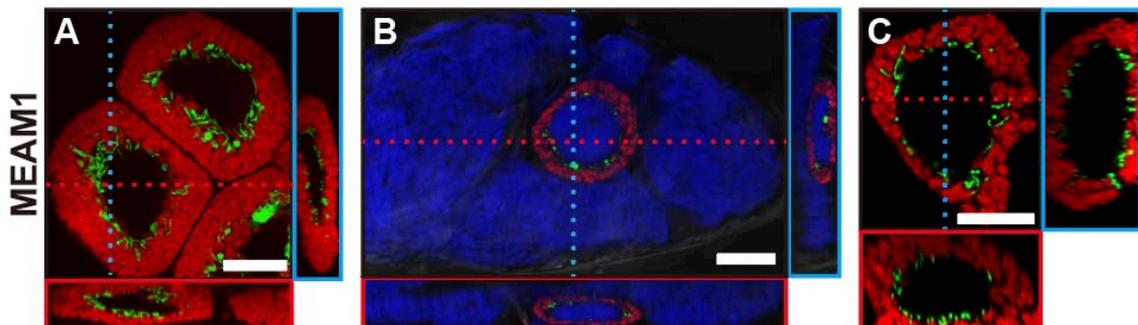


図2：タバコナジラミ MEAM1 の菌細胞における共生細菌 *Portiera* (赤) と *Hamiltonella* (緑) の立体的な空間配置。A：成虫メス、B：産卵3日後の卵、C：4齢幼虫。Z-stack画像(焦点を少しずつずらして撮影した連続画像を積み重ねて再構築したもの)も示す。図中の白いバーは 20 μm。

この棲み分けの機構を明らかにするため、電子顕微鏡^{※3}による菌細胞内の微細構造の観察を行った。その結果、小胞体^{※4}様の膜構造が、2種共生細菌をお互いに隔てていることが示された(図3)。そこで、免疫組織化学と蛍光 *in situ*ハイブリダイゼーション^{※5}を組み合わせた観察等を行った結果、膜構造は確かに小胞体であり、*Hamiltonella*を取り囲むことで、*Portiera*と生息域を隔てていることが示された(図4)。

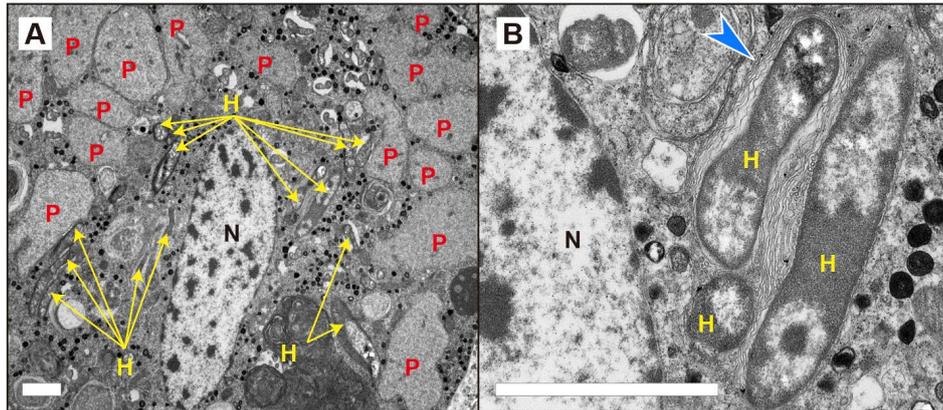


図3: タバココナジラミ菌細胞内の微細構造。P: *Portiera*、H: *Hamiltonella*、N: 宿主の核、青い矢尻が小胞体様膜構造を示す。図中の白いバーは 20 μm 。

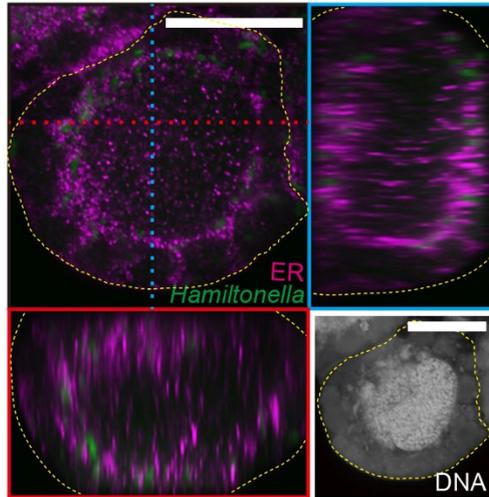


図4: 菌細胞内の小胞体(ER)と *Hamiltonella* の分布の三次元解析結果。黄色い点線が1つの菌細胞を示す。右下の図はDNAを検出した像。図中の白いバーは 20 μm 。

次に、菌細胞内棲み分けの一般性を確認するために、タバココナジラミの異なる遺伝型や、別属のコナジラミ類を対象として解析を行った。地中海に起源をもつ遺伝型 Mediterranean Q1 (以降、MED Q1) にも、菌細胞内に *Portiera* と *Hamiltonella* の小胞体を介した、細胞内棲み分けが存在していることが確認された。アジアに分布する遺伝型 Asia II 6 においては、*Hamiltonella* が存在せず、代わりに *Arsenophonus* という別種の共生細菌が存在している。Asia II 6 でも、共生細菌の種類が異なっているものの、*Portiera* と *Arsenophonus* の細胞内棲み分けが観察され、両者の間は小胞体によって隔てられていた。タバココナジラミとは別属で、8,000 万年以上前に分岐したと考えられているオンシツコナジラミにも、

*Portiera*と*Arsenophonus*を収納した小型の菌細胞が存在しており、やはり小胞体によって別区画に分けられる形で、両共生細菌の細胞内棲み分けが検出された(図5)。このように、系統的に離れた様々なコナジラミ類において菌細胞内棲み分けが観察されたことから、これらの共通祖先で本機構が確立され、現在まで受け継がれてきたものと考えられる(図6)。

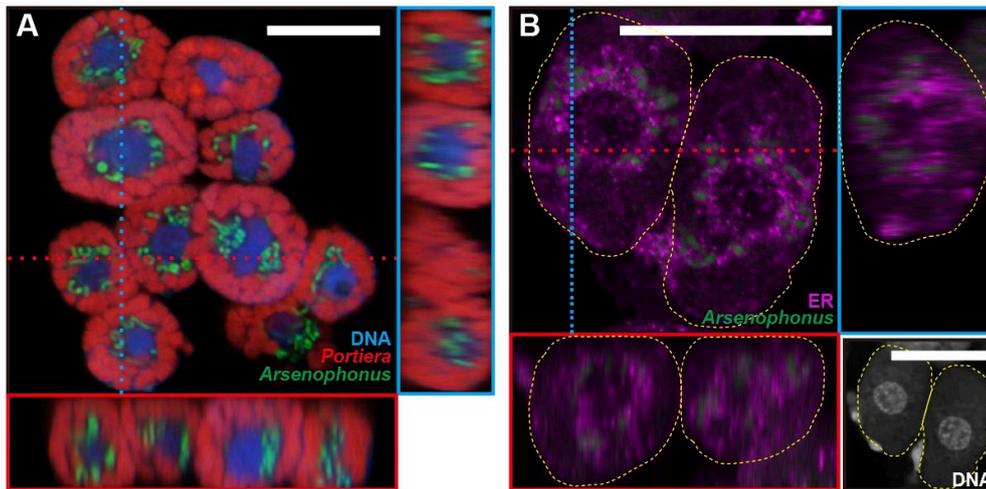


図5 : (A) オンシツコナジラミ菌細胞における2種の共生細菌(*Portiera*と*Arsenophonus*)の局在、(B)菌細胞内の小胞体(ER)と*Arsenophonus*の分布の三次元解析結果。黄色い点線が1つの菌細胞を示す。右下の図はDNAを検出した像。図中の白いバーは20 μm。

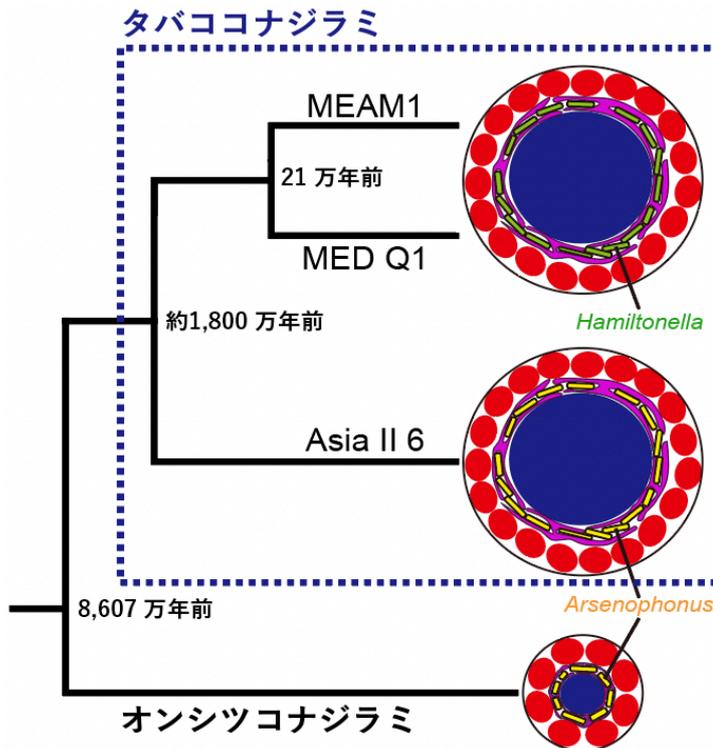


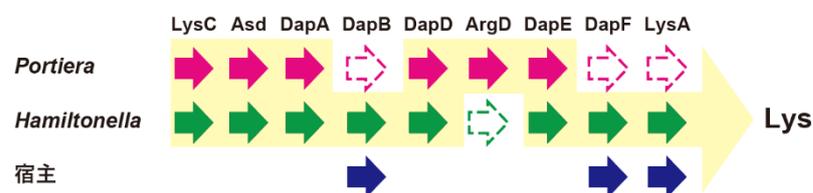
図6 : コナジラミ類の系統関係とそれぞれの菌細胞サイズおよび共生細菌。

菌細胞内棲み分けの機構は、これらの共通祖先で獲得され、その後、共生細菌の置換や菌細胞の形態変化が生じながらも維持されてきたと推定された。

本発見は、生物界に広く見られる“棲み分け”が、たった1つの細胞という極小空間内においても生じうることを示した初めてのものである。細胞内棲み分けが、なぜコナジラミ類でのみ進化したのかは興味深い問題である。これには、本種における共生細菌の次世代への伝播様式が大きく関与していると考えられる。昆虫の生存や繁殖に重要な共生細菌は、次世代の胚へと安定して伝播される。タバココナジラミやオンシツコナジラミでは、2種の必須共生細菌の入った菌細胞の1つが、まるごと次世代の胚の中へと取り込まれていくという、極めて特殊な方法で伝播される^{※6}ことが報告されている。このような伝播様式では、2種の共生細菌が別々の菌細胞に存在した場合、どちらか片方の細菌は次世代に伝えられないことになってしまう。それ故、コナジラミ類の特殊な共生細菌伝播様式が、2種共生細菌の同一細胞での共存機構の進化を促進する要因になったと考えられる。

タバココナジラミおよびオンシツコナジラミの2種の必須共生細菌は、単独では餌に不足する必須アミノ酸などの栄養素を合成することができず、両細菌間を中間代謝産物が複数回授受されることによってようやく合成が可能となる、特殊な代謝経路をもっている(図7)。このような相互乗り入れ型の代謝経路が効率的に機能するためには、共生細菌同士の距離が近くに維持されていることが重要である。2種細菌が同一細胞内という最近接空間に共存してきたことで、このように特殊な代謝系が進化した可能性が考えられる。

(A) タバココナジラミ MEAM1 および MED Q1



(B)

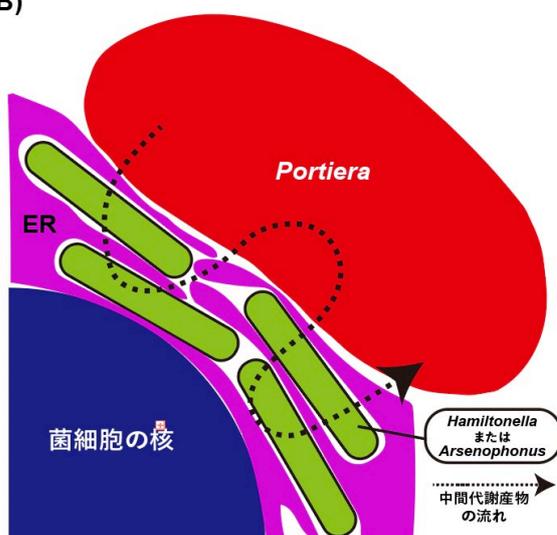


図7:

(A) タバココナジラミにおける2種の共生細菌による必須アミノ酸(例: リジン)の生合成。各細菌が持たない酵素遺伝子を点線矢印で示す。

(B) コナジラミ共生系における、小胞体(ER)を介した共生細菌の棲み分けと、栄養素の中間代謝産物の流れについて推定される模式図を示す。

■今後の展開

タバコナジラミ近縁種における細胞内棲み分けの一般性や多様性を詳細に明らかにし、本現象の進化の道筋を明らかにする研究に取り組む。また本研究から、小胞体などの細胞小器官が共生細菌と密接にかかわっていることが示された。小胞体で働き、細胞内棲み分けに関与する分子機構をゲノム編集等のツールを用いて解析するとともに、近縁種との比較により、本機構が祖先系統からのどのような進化によって生じたのかを明らかにする研究に取り組んでいく。

【用語解説】

※1 菌細胞

昆虫等の体内に存在する、微生物を内部に収納するための特殊化した細胞。多くの場合、菌細胞の細胞質内には、昆虫にとって必須な栄養素を供給する共生微生物が生息する。菌細胞をもつ種は多く、昆虫全体のおよそ 10%にのぼるとされている。

※2 共焦点レーザー顕微鏡

レーザー光を用いて、試料の特定の範囲に焦点を合わせて像を検出できる顕微鏡。厚い試料でも焦点を合わせた面だけの画像を取得できるため、焦点を少しずつ移動しながら撮影した画像をパソコン上で再構築することで、三次元イメージを作成することができる。

※3 電子顕微鏡

電子線をあてて拡大像を得る顕微鏡。分解能が高く、光学顕微鏡では見ることの出来ない微細な構造を観察することが可能。

※4 小胞体

細胞質中にある膜構造をもつ小器官。一般的には、細胞内で合成されたタンパク質の輸送や、ステロイド合成や脂質・糖などの代謝等を司る。

※5 免疫組織化学・蛍光 *in situ*ハイブリダイゼーション

免疫組織化学は、蛍光物質などの標識をつけた特異的抗体を用いて、標的とするタンパク質の組織中での局在を可視化する手法。本研究では、小胞体に特異的に局在するタンパク質を標的として検出した。蛍光 *in situ*ハイブリダイゼーションは、蛍光物質の標識をつけたプローブ(標的の核酸配列に相補的な塩基配列)を用いて、細胞内に存在する標的核酸配列を、蛍光顕微鏡を用いて可視化する手法。本研究では、共生細菌を検出するのに用いた。

※6 共生細菌の次世代への伝播

多くの昆虫では、生存や繁殖に必須の共生細菌を安定して次世代に伝える機構が発達している。アブラムシ等の昆虫では、親の菌細胞から放出された共生細菌が、メス親体内で発生する卵や胚に取り込まれることで、次世代へ伝播される。一方、コナジラミ類のいくつかの種では、メス親の菌細胞がまるごと卵の中に移動して取り込まれるという、きわめて特殊な伝播機構が観察される。

【論文詳細】

論文名：

Subcellular niche segregation of co-obligate symbionts in whiteflies
(コナジラミ類に見られる、共必須共生細菌の細胞内棲み分け)

著者：

Akiko Fujiwara, Xian-Ying Meng, Yoichi Kamagata, Tsutomu Tsuchida

掲載誌：

Microbiology Spectrum

DOI：

<https://doi.org/10.1128/spectrum.04684-22>

【関連画像の提供】ダウンロード期限 ～2023年1月5日まで。



本プレスリリースに関する画像を提供いたします。

※パスワードは西暦をふくむリリース月（YYYYMM）です。

注意事項をご確認の上、ご使用ください。

<https://onl.tw/gddEuif>

【本発表資料のお問い合わせ先】

富山大学 学術研究部 理学系

准教授 土`田 努 (ツチダ ツトム)

〒930-8555 富山県富山市五福 3190 富山大学 学術研究部 理学系

TEL：076-445-6553 Email：tsuchida@sci.u-toyama.ac.jp

群馬大学 食健康科学教育研究センター

講師 藤原 亜希子 (フジワラ アキコ)

〒371-8510 群馬県前橋市荒牧町 4-2 群馬大学 食健康科学教育研究センター

TEL：027-220-7642 Email：akiko_fujiwara@gunma-u.ac.jp