

害虫カメムシが共生細菌を体内に取り込む特異な仕組みを解明

－ カメムシは腸内で共生細菌を選別する －

平成 27 年 9 月 1 日

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

国立大学法人 北海道大学

■ ポイント ■

- ・ カメムシ類の消化管には細菌を選別する特殊な器官があることを発見
- ・ カメムシ類の消化管は狭窄部を境に機能が分化
- ・ 腸内共生を阻害することで害虫を防除する新たな方法の開発に貢献

■ 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】（以下「産総研」という）生物プロセス研究部門【研究部門長 田村 具博】環境生物機能開発研究グループ 菊池 義智 主任研究員（兼）国立大学法人 北海道大学 大学院農学研究院 客員准教授、深津 武馬 生物プロセス研究部門 首席研究員（兼）生物共生進化機構研究グループ 研究グループ長、環境管理研究部門【研究部門長 田中 幹也】環境微生物研究グループ 堀 知行 主任研究員らは、国立大学法人 北海道大学【総長 山口 佳三】（以下「北大」という）大学院農学研究院 浅野 行蔵 特任教授、大学院農学院博士課程 2 年 大林 翼らと共同で、放送大学、国立研究開発法人 農業環境技術研究所、釜山大学校（韓国）と協力して、農作物の害虫として知られるカメムシ類が、消化管に発達した狭窄部によって、餌とともに取り込まれた雑多な細菌の中から特定の共生細菌だけを選別して共生器官に取り込むことを明らかにした。

今回の成果は、害虫であるカメムシ類が共通して持つ、共生細菌の獲得に関わる特異な仕組みを初めて解明したもので、腸内共生の成立を阻害して害虫の防除を行う新たな方法の開発につながる事が期待される。

この研究成果は 2015 年 9 月 1 日（日本時間）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



ホソヘリカメムシ（左）と食用色素を吸わせたカメムシの消化管（右）

消化管中央にある狭窄部（黄色矢印）で色素は止まるが共生細菌は通り抜け共生器官に感染する。

■ 開発の社会的背景 ■

作物に害を与える農業害虫や、病原性微生物を媒介する衛生害虫、シロアリのように木造住宅を食害する家屋害虫など、いわゆる「害虫」と呼ばれる昆虫のほとんどが体内に共生細菌を持っている。共生細菌は、成長・生存・繁殖に必要な栄養供給や消化の補助などの役割を担っている。このような共生細菌は害虫防除のための新たなターゲットになると考えられており、その共生機構の解明を目指し研究が進められている。

カメムシ類（半翅目：異翅亜目）は世界では 40,000 種以上、日本では 1,500 種余りが知られ、その多くは農作物の重要害虫である。多くの種についてその生態が十分には解明されておらず、稲やダイズといったさまざまな農作物にとって難防除害虫であるため、その防除法の開発が求められている。植物の汁を吸うカメムシ類の多くはその腸内に共生細菌を保持しており、共生細菌が栄養供給や植物適応、殺虫剤抵抗性の保持など重要な役割を担っている。共生細菌の機能や進化に関する知見が蓄積する一方、カメムシ類の腸内共生がどのような仕組みで成立しているのかは、ほとんど分かっていなかった。

■ 研究の経緯 ■

産総研ではこれまでに、ダイズの重要害虫であるホソヘリカメムシが独特な腸内共生のシステムを持つことを発見した。ほとんどの昆虫では、共生細菌は母から子へと直接伝えられるが、ホソヘリカメムシは、環境土壌中に生息するバークホルデリアという共生細菌を幼虫が経口で取り込むことによって、世代ごとに新たに共生関係が成立する。バークホルデリアは培養が容易で、遺伝子操作も可能であることから、共生の成立に関わる遺伝的基盤を解明するために有用な研究対象として注目されている。

産総研ではこれまでにホソヘリカメムシの腸内共生系に関して「害虫に殺虫剤抵抗性を持たせる共生細菌を発見」（2012 年 4 月 24 日産総研プレス発表）、「昆虫と細菌との共生におけるポリエステルの新たな機能」（2013 年 6 月 11 日産総研プレス発表）などの研究成果をあげてきた。

北大は産総研との連携大学院を設けており、この制度によるホソヘリカメムシの研究によって同大学の大学院生が国際学会のポスター最優秀賞を受賞する（2014 年 9 月 25 日北大発表）など、人材育成において大きな成果をあげてきた。今回の研究は、産総研の菊池 義智 主任研究員の指導のもと北大の大学院生である大林 翼らが共同で進めたものである。

なお、本研究は、農林水産省 農林水産技術会議「農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業」、と公益財団法人 発酵研究所「寄付講座助成」による支援を受けて行った。

■ 研究の内容 ■

ホソヘリカメムシの消化管の後半部分には多数の袋状組織が発達しており（図 1）、その中にバークホルデリアが共生している。この袋状組織が多数発達した消化管の部位を、以下「共生器官」と呼ぶ。また、消化管の中央付近（共生器官の手前に当たる部位）は極端に狭まっており、本研究ではこの部位を「狭窄部」（図 1）と名付けた。この狭窄部は、古い文献に記載がみられるが、その機能については不明であった。

消化管全体像

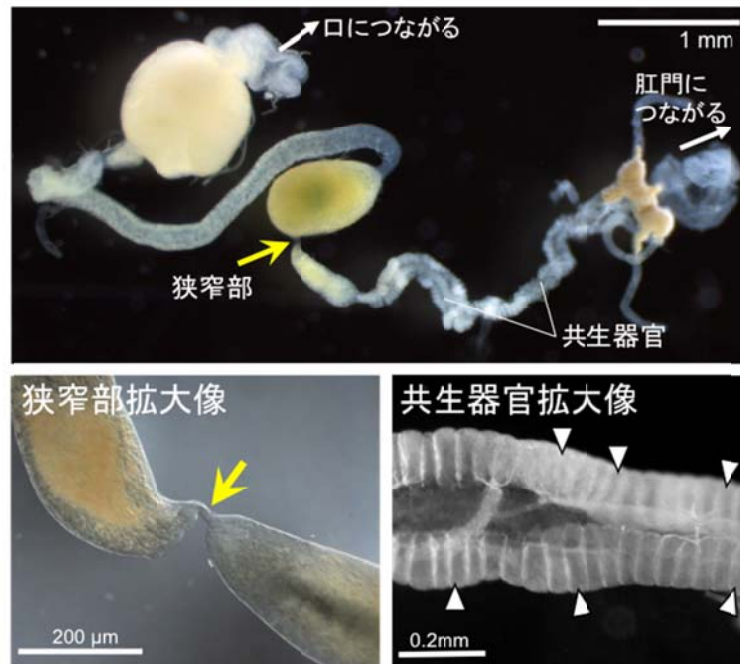


図1 ホソヘリカメムシの消化管全体像と、狭窄部と共生器官の拡大像

まず、ホソヘリカメムシの消化管における食物の流れを観察するために、さまざまな食用色素を吸わせ消化管内容物の流路を観察したところ、色素は狭窄部までは到達するものの、以降の共生器官にはまったく流入せず（図2）、ホソヘリカメムシの消化管ではこの狭窄部によって食物の流入が極端に制限されていることが明らかとなった。

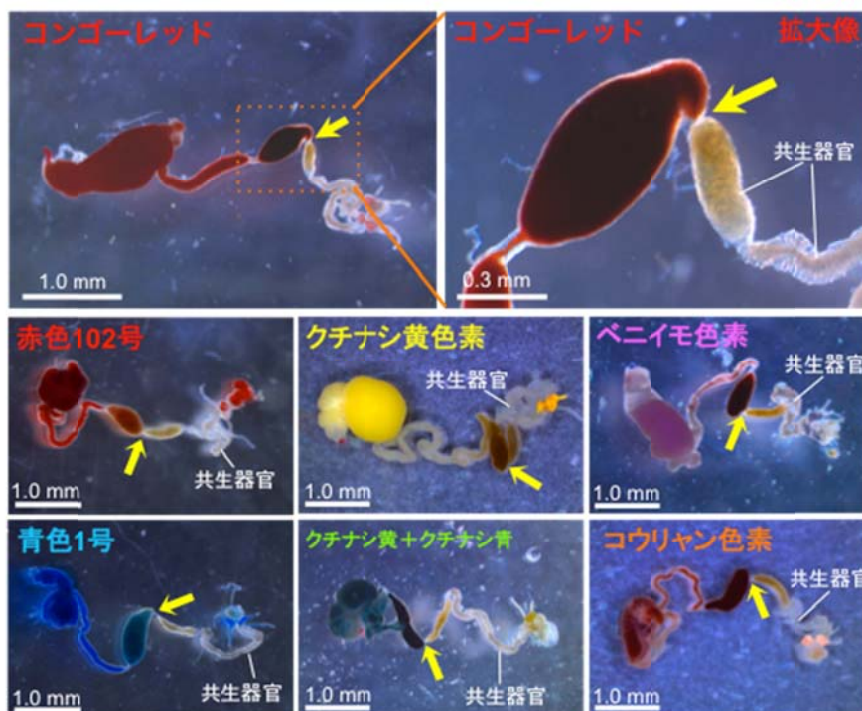
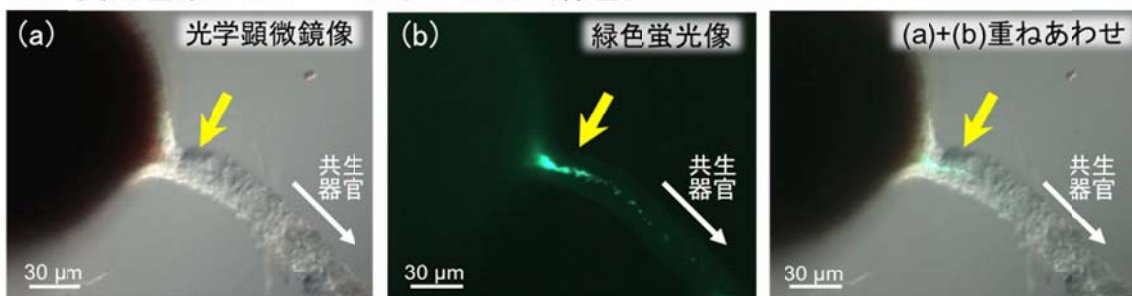


図2 さまざまな色素を吸わせたホソヘリカメムシの消化管（黄色矢印は狭窄部）

次に、バークホルデリアを持たないカメムシの幼虫に、食用色素と緑色蛍光タンパク質（GFP）で緑に発光させたバークホルデリアを同時に吸わせたところ、色素は狭窄部で止まり、バークホルデリアだけが共生器官に感染することが分かった（図 3A）。さらに、GFP で緑に発光させたバークホルデリアと赤色蛍光タンパク質（RFP）で赤く発光させた大腸菌を同時に吸わせたところ、大腸菌は狭窄部で止まるが、バークホルデリアだけが狭窄部を通過して共生器官に到達していた（図 3B）。大腸菌以外にも土壌細菌として一般的なシュードモナス・プチダや枯草菌も、同様に吸わせたが、いずれも共生器官には感染しなかった。これらの結果から、ホソヘリカメムシの消化管には物質の流入を制限しつつ共生細菌だけを特異的に通過させる、極めて高度な細菌選別機構が発達していると結論できる。

食用色素がマルピーギ管や糞から検出されたことから、餌の消化吸収は全て狭窄部の手前までには完了し、体液中に吸収された色素がマルピーギ管に集められ排泄されると考えられる。つまり、ホソヘリカメムシの消化管は、狭窄部を中心に「食物を消化吸収する前部」と「共生細菌を住まわせる後部」に高度に機能分化しているといえる。このように餌の流入が消化管の途中でストップすることは通常の動物では報告がないが、ホソヘリカメムシが消化吸収しやすい植物の汁液を餌にすることと関連がある可能性は高い。

(A) 食用色素+GFPバークホルデリア(緑色)



(B) GFPバークホルデリア(緑色)+RFP大腸菌(赤色)

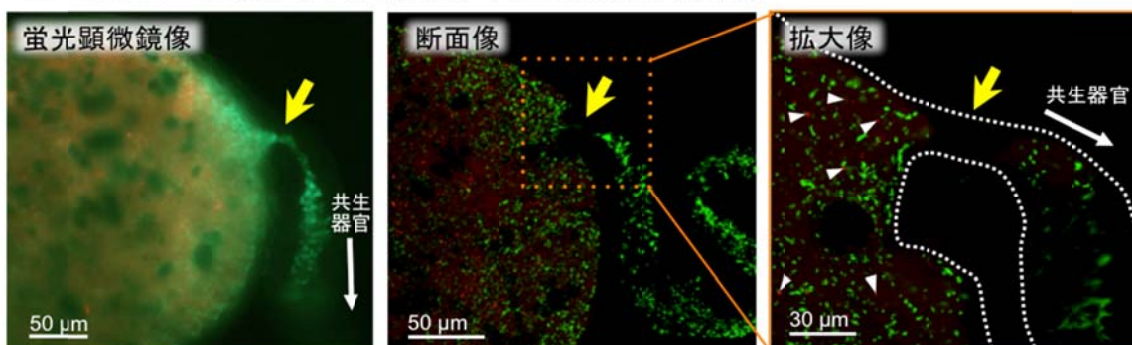


図 3 狭窄部における共生細菌の選別

(A) 色素と GFP で発光させたバークホルデリアを同時に吸わせたときの狭窄部拡大像。
(B) GFP で発光させたバークホルデリアと RFP で発光させた大腸菌を同時に吸わせた時の狭窄部拡大像。B の右 2 枚は共焦点顕微鏡による断面観察像。黄色矢印は狭窄部を示す。

次に、バークホルデリアが狭窄部を通過する機構を解明するため、トランスポゾンを挿入したバ

ークホルデリアの変異株を作成し、どのような変異株がカメムシに共生できないかを調べた。その結果、べん毛形成に変異を持つ運動不全株が狭窄部を通過できないことが分かった。これは、バークホルデリアはべん毛を使って泳いで狭窄部を通り抜けていることを示唆している。

農作物の害虫カメムシ類の多くは、ホソヘリカメムシ同様に腸内共生細菌を持つ。代表的な分類群のカメムシ類について消化管を観察したところ、ホソヘリカメムシ同様に消化管の中央付近に狭窄部があった。食用色素を吸わせてその流路を確認したところ、調査をした全ての種で、色素は狭窄部以降の共生器官には流入していなかった（図 4）。この結果から、多くのカメムシ類に共通して、消化管は「食物を消化吸収する前部」と「共生細菌を住まわせる後部」に高度に機能分化しており、狭窄部によって共生細菌が選別されていると考えられる。

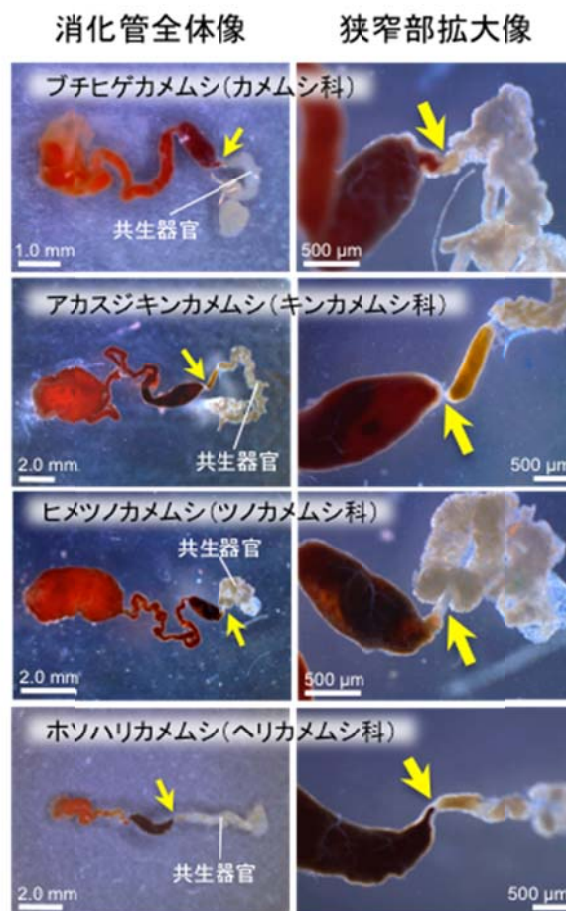


図 4 色素を吸わせたカメムシ類の消化管（黄色矢印は狭窄部）

■ 今後の予定 ■

今後は、ホソヘリカメムシを中心に細菌選別器官である狭窄部における発現遺伝子やタンパク質を網羅的に解析し、共生細菌の腸内選別が起きている遺伝的基盤を明らかにしていく。

狭窄部による細菌選別は多くの害虫であるカメムシ類にみられる共通の機構であり、その遺伝的基盤の解明は、共生細菌の感染・定着を阻害する新しい害虫制御技術の開発につながる可能性が期待され、そのような観点から研究に取り組んでいく。

■ 本件問い合わせ先 ■

国立大学法人 北海道大学

大学院農学研究院 基盤研究部門 生物機能化学分野

特任教授 浅野 行蔵 〒060-8589 北海道札幌市北区北9条西9丁目

TEL : 011-706-2493 FAX : 011-706-2888

E-mail : asanok@chem.agr.hokudai.ac.jp

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 北海道センター 産学官連携センター

〒062-8517 北海道札幌市豊平区月寒東2条17-2-1

TEL : 011-857-8406 FAX : 011-857-8901

E-mail : hokkaido-counselors-ml@aist.go.jp

【用語の説明】

◆共生細菌

昆虫の体内に生息し、宿主昆虫の成長と繁殖に寄与する細菌。真菌や原生生物などを含める場合には共生細菌と総称する。多くの共生細菌は宿主の栄養代謝にとってきわめて重要な役割を果たし、不足栄養素の補償や食物（難分解性の木質など）の分解消化などが知られている。農業害虫（植食性昆虫）、衛生害虫（吸血性昆虫）、家屋害虫（木材食性昆虫）の多くが共生細菌を保有している。ホソヘリカメムシなどの一部のカメムシ類を除く多くの昆虫は、母子間伝達によって共生細菌を次世代へ受け渡す。

◆共生器官

宿主生物の体内の特定の組織や器官が微生物を共生させるのに特殊化したもの。例えばアブラムシでは、腹部体腔内に共生細菌が充満した菌細胞と呼ばれる巨大細胞が集まって、菌細胞塊という共生器官を構築する。多くのカメムシ類では消化管の後端部に多数の盲嚢（盲腸のような袋状の突起）が配列した共生器官が発達し、その内腔に共生細菌を保有する。

◆バークホルデリア

プロテオバクテリア門に属するグラム陰性細菌の一種。土壤に普通に見られる細菌グループで、多くは植物根圏に生息している。バークホルデリアの中でも一部の系統がカメムシに共生する。

◆遺伝的基盤

生物が持つある構造や機能、性質を決めている遺伝子のこと。その構造や機能が複数の遺伝子によって決まっているのであれば、その総体を遺伝的基盤と呼ぶ。ある構造や機能を決める遺伝子を特定するには、特定の遺伝子のみを破壊するなど、遺伝子組み換え技術が有用となる。

◆マルピーギ管

昆虫やその他の節足動物で腎臓のような役割を果たす老廃物の排出器官。消化管の後端から複数本が体腔中に伸びており、血リンパ液中の老廃物を集める。集積された老廃物は後腸を経由して体外に排出される。

◆トランスポゾン

転移因子とも呼ばれ、ゲノム上の位置を転移できる特定の塩基配列。トランスポゾンが転移し遺伝子に挿入されると、多くの場合その遺伝子是不活化する。トランスポゾンには、ゲノム上の特定の塩基配列を認識して転移するものや、ランダムに転移するものなどいくつかの種類が知られている。本研究ではランダムに転移するトランスポゾンを用いて遺伝子破壊株の作成を行った。

◆べん毛

細菌が細胞表面に持つ繊維状の運動装置で、遊泳に必要な推進力を生み出す。べん毛が生える場所や本数は細菌の種類によって異なる。