学術変革領域研究 (A)
共進化表現型創発：延長された表現型の分子機構解明
Co-evolutionary Emergence of Extended Phenotypes

CEEP Newsletter

Vol. 1 No. S1 (2024)

号外

昆虫の細胞内に生息する細菌が宿主の野外性比を急速にメスに偏らせる過程を世界初観測

表紙　交尾中のミナミキチョウ *Eurema hecabe*（写真：福井大学 宮田真衣）

Rapid spread of a vertically transmitted symbiont induces drastic shifts in butterfly sex ratio

Mai Miyata, Masashi Nomura, Daisuke Kageyama

***Current Biology* (2024) 34, PR490-R492**
https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.04.027

The causes and consequences of sex-ratio dynamics constitutes a pivotal subject in evolutionary biology. Under conditions of evolutionary equilibrium, the male-to-female ratio tends to be approximately 1:1; however, this equilibrium is susceptible to distortion by selfish genetic elements exemplified by driving sex chromosomes and cytoplasmic elements. Although previous studies have documented instances of these genetic elements distorting the sex ratio, studies specifically tracking the process with which these distorters spread within populations, leading to a transition from balanced parity to a skewed, female-biased state, are notably lacking. Herein, we present compelling evidence documenting the rapid spread of the cytoplasmic endosymbiont *Wolbachia* within a localized population of the pierid butterfly *Eurema hecabe*. This spread resulted in a shift in the sex ratio from near parity to an exceedingly skewed state overwhelmingly biased toward females, reaching 93.1% within a remarkably brief period of 4 years.

島中がメスばかり －昆虫の細胞内に生息する細菌が宿主の野外性比を急速にメスに偏らせる過程を世界初観測－

2024 年 5 月 21 日　福井大学・千葉大学・農研機構プレス発表
https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nias/163271.html

■ ポイント ■

- 昆虫の細胞内でしか生きられず母から子に伝播する細菌には、宿主である昆虫の生殖を操作し、子をメスのみにしてしまうものがいることが様々な昆虫で知られています。
- そのような細菌が自然界で急速に広まり、4 年という短期間で野外の性比が極端にメスに偏っていく過程を、チョウの 1 種であるミナミキチョウにおいて、世界で初めてリアルタイムで観測しました。
- 細菌によって引き起こされた性比の劇的な変化は、進化、生態、行動、ゲノムなど、宿主の様々な側面に大きなインパクトを与えると考えられます。

■ 概　要 ■

昆虫の細胞内に生息する細菌のなかには、宿主の生殖を操作するものがいることが知られています。このような細菌は、ほとんど感染性がなく、母親から子に世代を越えて伝播しながら生き延びています。ところが、オスに伝播した場合はそれ以降の世代に伝播することができません。このような背景から、宿主昆虫の生殖を操作することによって自身の繁栄をより確実にする細菌が現れたと考えられています。

福井大学学術研究院工学系部門の宮田真衣助教と千葉大学大学院園芸学研究院の野村昌史教授、農業・食品産業技術総合研究機構の陰山大輔グループ長補佐らは、宿主をメスのみにする細菌ボルバキアが、石垣島のミナミキチョウにおいて急速に広まる過程を観測しました。その結果、オスとメスがほぼ 1:1 で存在していた状態から、93.1%がメスといった著しくメスに偏った状態に、4 年間で変化したことを明らかにしました。ボルバキア等の細菌が引き起こす生殖操作によって子がメスのみになる現象はいくつかの昆虫で報告されていましたが、今回、このような細菌が野外の宿主集団内で急速に広まり、短期間で宿主の集団性比を極端に歪めるまでに至ったことを世界で初めて示しました。集団性比の劇的な変化は、進化、生態、行動、ゲノムなど、宿主の様々な側面に大きなインパクトを与えると考えられます。

交尾中のミナミキチョウ

〈研究の背景と経緯〉

昆虫の細胞内には細菌が生息している場合があり、その一部は、宿主の生殖を様々な方法で操作することから、注目を集めています。昆虫のおよそ40%の種が保有していると推測されているボルバキア等の細菌が起こす生殖操作には、子のうちオスのみを殺す「オス殺し」や、子を全てメスにする「メス化」などの劇的な現象が知られています。このような細菌は、基本的に感染性は持たず、宿主の細胞外では生きられず、宿主の母から子に世代を越えて伝播しながら生き延びています。また、母からのみ子に伝播し、父から子には伝わらないため、オスに伝播した場合はそれ以降の世代に伝播することができず、オス宿主が死ぬのを待つのみとなります。そのため、ボルバキア等の細菌の一部は、宿主の生殖を操作することで子をメスのみにするようになったのではないかと考えられています。

日本の奄美大島以南に分布するミナミキチョウ(図 1)では、wFem と呼ばれる系統のボルバキアによってメス化が起きていることが知られていました。2008 年に行った調査によると、石垣島のミナミキチョウは8%という低頻度で wFem を保有していること、wFem を保有したメスを実験室に持ち帰って飼育すると子が全てメスになったことが報告されていました(Narita et al., 2011)。

これまでもオス殺しを起こすボルバキア等の細菌によって昆虫の野外性比（雌雄の比率）がメスに偏っている例は報告されていました(例：Dyson et al., 2004)。ところが、それらの報告例は、すでに細菌が広まった後の状況の記述のみであり、いつ・どこで・どの昆虫種で・どのくらいのスピードでそれが起こるのかは予測ができないため、実際にその過程を捉えることは難しいと考えられていました。そこで、研究チームは、低頻度の wFem 保有率がやがて上昇していくのではないかという仮説のもと、2015 年から石垣島のミナミキチョウにおける wFem 保有率と性比（雌雄の比率）の観測を開始しました。

〈研究の内容〉

2015 年から 2022 年にかけて、石垣島で合計 1392 匹のミナミキチョウを採集し、性比を記録しました。その結果、2015-18 年にかけてほぼ 1:1 であった性比が 2019 年からメスに偏り始め、2022 年には 93.1%がメスとなりました(図 2)。また、採集した個体を持ち帰り全ての個体の wFem 保有の有無を PCR 法によって調査した結果、2017 年以降 wFem 保有率が上昇し、2022 年にはメスの 87%が wFem を保有していました(図 3)。また、石垣島における野外の性比がメスに偏り始めた 2019 年に、野外で採集したメスを実験室内に持ち帰り、次世代を飼育し、その性比を確認しました。その結果、wFem を保有していた個体では、たしかにメス化が起きており、野外において wFem が広がることによって性比がメスに偏ったことが明らかとなりました。

〈今後の展開〉

4 年間という短期間で、メス化を引き起こすボルバキアにより島中がメスばかりになったミナミキチョウですが、今後どの程度この性比異常が維持されるのかを継続して調査する予定です。リュウキュウムラサキというチョウでは、オス殺しを引き起こすボルバキアが蔓延することによって著しくメスに偏っていた性比が、数年で雌雄 1:1 に回復したことが報告されており（Charlat et al., 2007）、ボルバキアが引き起こす生殖操作への抵抗性を宿主側が獲得することで、やられっぱなしだったミナミキチョウの性比が回復に向かうかもしれません。あるいは、ボルバキアが引き起こす生殖操作によってオスがいなくなると、石垣島のミナミキチョウは絶滅へ向かうかもしれません。本研究は、野外における細菌と宿主昆虫の攻防の一端を捉えた貴重な研究であります。

〈参考図〉

図 1：交尾中のミナミキチョウ.

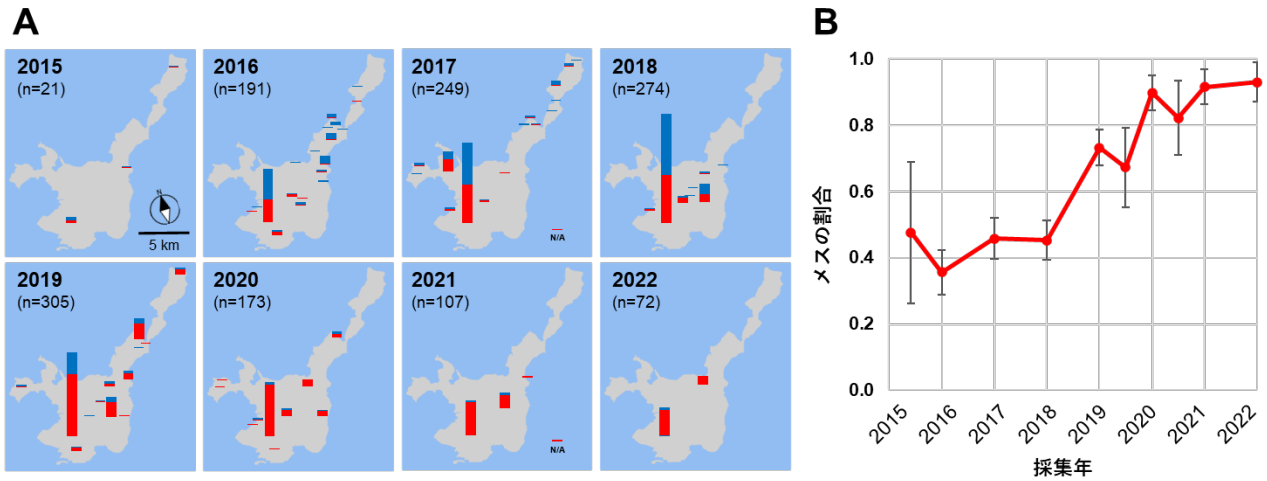

図 2：採集年ごとの性比.

(A) 各年の採集地点ごとの性比.　(B) 各年に採集した全個体に占めるメスの割合.

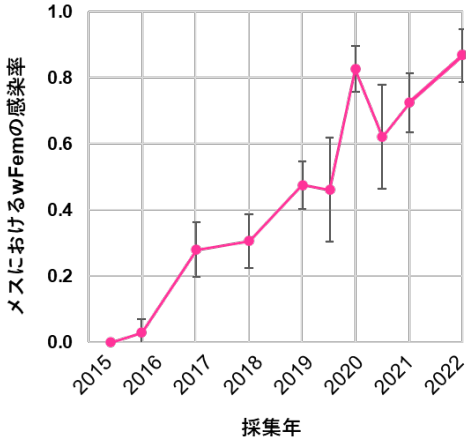

図 3：採集したメスに占める wFem を保有したメスの割合.

〈用語解説〉

（注1）

wFem…ミナミキチョウに感染し、メス化を引き起こすボルバキアの系統の名前。

（注 2）

PCR 法…Polymerase Chain Reaction の略称。目的の DNA の一部を増幅させる方法を指す。

〈参考文献〉

・Narita, S., Kageyama, D., Hiroki, M., Sanpei, T., Hashimoto, S., Kamitoh, T., and Kato, Y. (2011). Wolbachia-induced feminisation newly found in Eurema hecabe, a sibling species of Eurema mandarina (Lepidoptera: Pieridae). Ecol. Entomol. 36, 309–317.

・Dyson, E.A., and Hurst, G.D.D. (2004). Persistence of an extreme sex-ratio bias in a natural population. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 101, 6520–6523.

・Charlat, S., Hornett, E.A., Fullard, J.H., Davies, N., Roderick, G.K., Wedell, N., and Hurst, G.D.D. (2007). Extraordinary flux in sex ratio. Science 317, 305–318.

〈論文タイトル〉

"Rapid spread of a vertically transmitted symbiont induces drastic shifts in butterfly sex ratio"

（日本語タイトル：「垂直伝播する共生微生物の急速な広まりがチョウの劇的な性比の変化を引き起こす」）

〈著者〉

Mai Miyata, Masashi Nomura, Daisuke Kageyama

宮田 真衣（福井大学 学術研究院工学系部門工学領域 生物応用化学講座 助教）

野村 昌史（千葉大学大学院 園芸学研究院 教授）

陰山 大輔（農業・食品産業技術総合研究機構 グループ長補佐）

〈発表雑誌〉

「Current Biology」（カレントバイオロジー）

（2024 年 5 月 20 日に掲載）

URL：https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(24)00467-6

DOI 番号：10.1016/j.cub.2024.04.027

CEEP Newsletter Vol. 1 No. S1
発　行：2024 年 6 月 14 日
発行者：学術変革領域（A）「共進化表現型創発：延長された表現型の分子機構解明」
（領域代表者　勝間　進）
編　集：CEEP Newsletter 編集委員会（編集責任者　深津　武馬）
領域 URL: https://www.extended-phenotype.org/