

世界初、シロアリの「ロイヤルフード」の採取と その成分分析に成功

－王と女王の長寿を支える食と代謝の理解に光明－

新潟大学自然科学系（理学部）の田崎英祐助教は、テキサス A&M 大学の三高雄希博士研究員（日本学術振興会海外特別研究員）、浜松医科大学国際マスイメージングセンターの瀬藤光利教授、京都大学大学院農学研究科の松浦健二教授らの研究グループと共同で、シロアリの王と女王の特別な食べ物「ロイヤルフード」の採取とその分析に世界で初めて成功し、アセチル-L-カルニチンなど複数の機能性候補分子の存在を明らかにしました。これは、シロアリの王と女王が実現する活動的長寿（注 1）の背後にある複雑な長寿代謝機構の解明への道を拓いたものです。本研究の成果は、生物の老化・寿命を制御する代謝機構の理解を深めるだけでなく、我々ヒトの健康寿命の延伸に関する医学・健康科学分野の研究開発においても端緒となることが期待できます。

本研究成果は、2023年7月4日に国際学術誌「PNAS Nexus」にオンライン掲載されました。

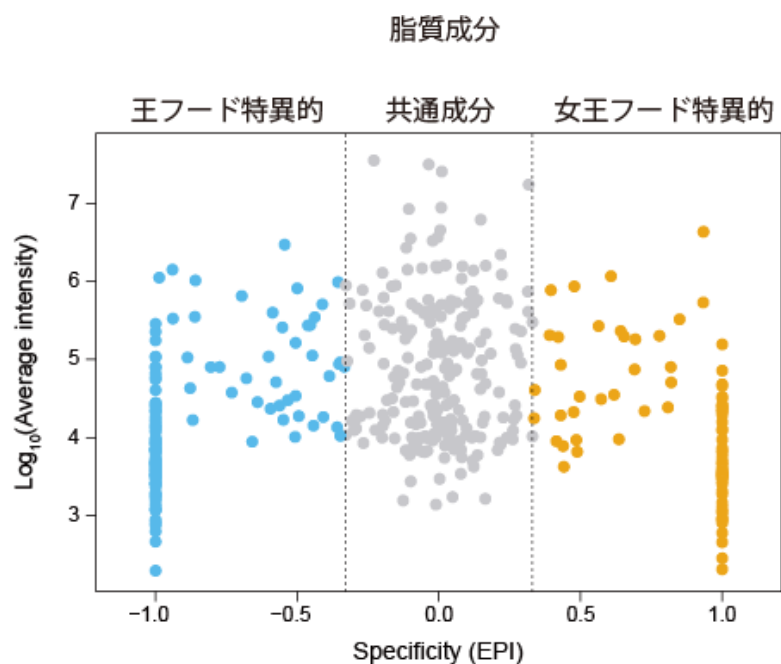
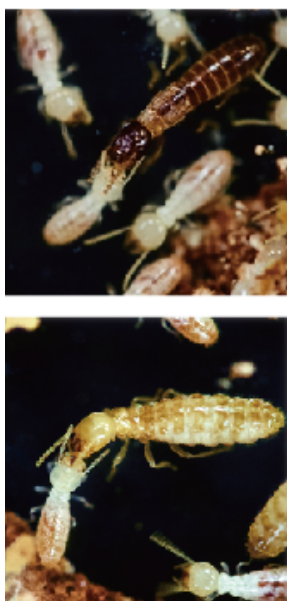


図 1. 左上) 王への給餌、左下) 女王への給餌。右) ロイヤルフードの脂質成分の王・女王特異性

【本研究成果のポイント】

- シロアリの王と女王は、働きアリから口移しでロイヤルフードを受け取っていることを明らかにした。
- 微量なロイヤルフードの採取と分析に成功し、複数の機能性候補分子を同定した。
- 働きアリの採餌したセルロースからロイヤルフードが作られ、王と女王へ移動するというコロニー（巣）内の個体間代謝経路の存在を明らかにした。

I. 研究の背景

社会性昆虫であるアリやハチ、シロアリは洗練された分業システムを確立することで繁栄してきました。彼らは繁殖する個体と労働する個体で分業し、それぞれの役割に特化することで効率的な社会生活を営んでいます。異なる役割の個体は、形態、行動、生理的特徴だけでなく、遺伝子発現パターン、代謝、化学受容、寿命、抗酸化物質、免疫システムなども異なります。生物は一般的に、活発に活動するほど寿命は短くなるというトレードオフを抱えています。しかし、社会性昆虫では、巣の中で最も活発に繁殖する個体（繁殖虫）が最も長寿であり、このトレードオフを打破しています。それを根底で支えているのが繁殖虫の特別な食べ物です。例えば、ミツバチでは、女王になる幼虫に与えられる「ロイヤルゼリー」が良く知られており、盛んに研究されています。

シロアリは、アリ・ハチとは全く独立に社会性を進化させてきた昆虫です。彼らは高度な社会性とセルロースの効率的な消化能力を有しており、著しい進化的成功を収めています。特に熱帯地域では土壌中の昆虫バイオマスの95%をシロアリが占めています。アリ・ハチとは異なり、シロアリのコロニーには王と女王の両方が存在し、彼らは完全に働きアリからの給餌によって高い繁殖力を維持しています。しかし、シロアリの王と女王の特別食「ロイヤルフード」については全く未解明でした。シロアリの王や女王をたくさん採集することの難しさや、給餌物の採取、微量サンプルの分析の困難さが大きなハードルとなっていました。

II. 研究手法と成果

本研究では、まず、シロアリの王と女王を効率的に採集する技術を確立し、化学分析のために十分な量のロイヤルフードを直接採取する方法を開発しました。野外のヤマトシロアリのコロニー（巣）から王と女王を採集し、行動観察とロイヤルフードの採取のために開発したガラス製の容器で飼育しました。働きアリによる王・女王への給餌過程の行動分析により、働きアリが王と女王を識別し、食べ物を選択的に与えていることが分かりました。王・女王それぞれに給餌中の働きアリから直接ロイヤルフードを採取することに成功し、この直接給餌物と中腸内容物のLC-MS/MS分析（注2）により、シロアリの王と女王の食べ物が異なる成分組成であ

ることを突き止めました。ロイヤルフードの成分にはスフィンゴ脂質、ジアシルグリセロール、短鎖ペプチド、タンパク質などが含まれていました。

次に、安定同位体 (^{13}C) 標識したセルロースを働きアリに食べさせ、脱離エレクトロスプレーイオン化-質量分析イメージング (DESI-MSI) (注 3) により ^{13}C 標識物質を追跡したところ、セルロースからロイヤルフード成分であるホスファチジルイノシトールとアセチル-L-カルニチンが作られ、働きアリの経口給餌によって女王の体内に移行することが確認されました (図 2)。つまり、シロアリの個体間に存在する代謝経路を介して、ロイヤルフードが作られ、渡されていることが分かりました。

最後に、マイクロ CT (注 4) を用いた消化管の構造の比較では、王・女王と働きアリの間で中腸と後腸の体積比に顕著な違いがあり、働きアリは共生微生物を保有して木の分解を行う場である後腸が大きな割合を占め、一方、王・女王は栄養吸収器官である中腸が大きいことが分かりました (図 3)。採餌と消化の役割分担が基盤となり、労働と繁殖の分業システムを支えていることが明らかになりました。

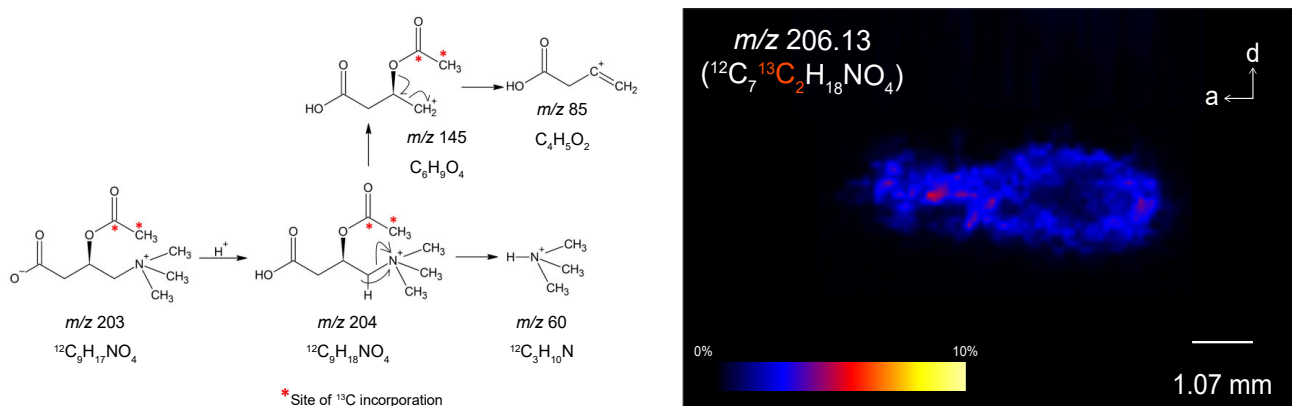


図 2. (左) 働きアリが食べた安定同位体標識セルロースの ^{13}C がロイヤルフード成分の一つであるアセチル-L-カルニチンに取り込まれる過程。赤い印が ^{13}C 標識を示す。(右) DESI-MSI 画像。経口給餌によって与えられた ^{13}C をもつアセチル-L-カルニチンの女王体内における局在を示す。

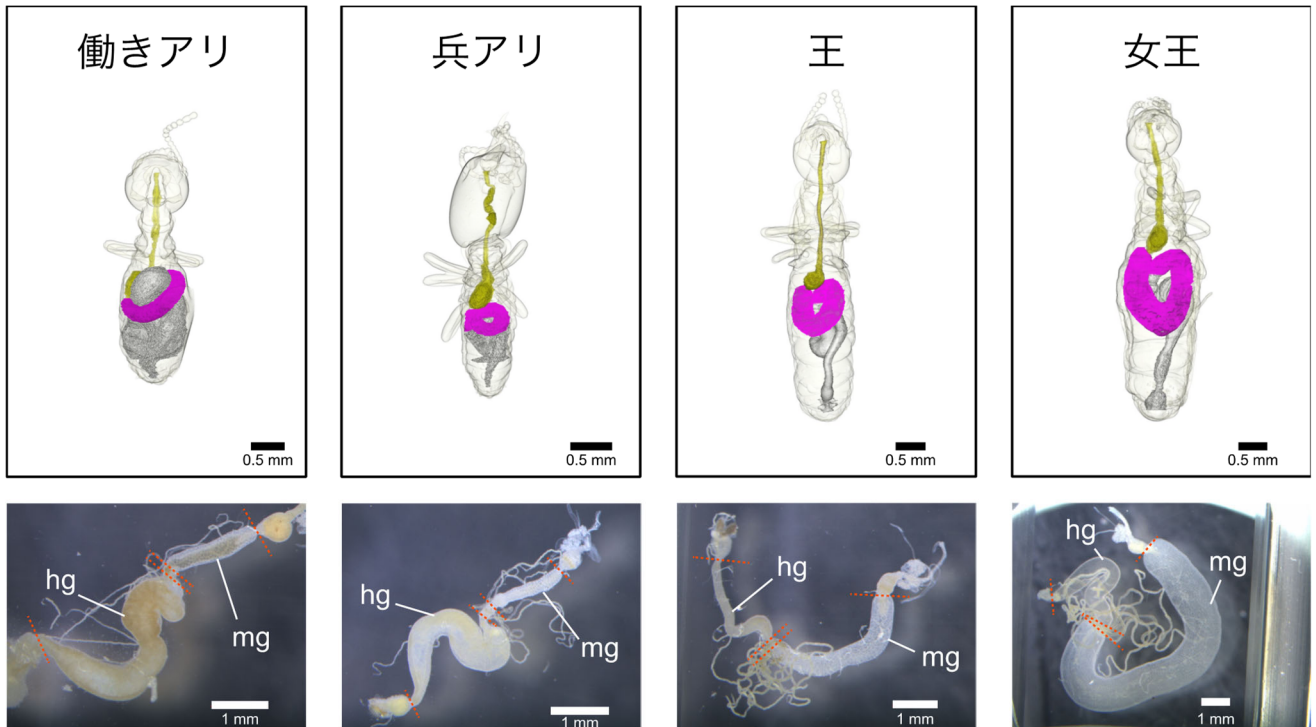


図 3. (上段) 腸の構造のマイクロ CT 画像。前腸 (黄)、中腸 (赤)、後腸 (灰)。(下段) 腸の解剖写真。mg：中腸、hg：後腸。王・女王は栄養の吸収器官である中腸が大きく、働きアリは共生微生物を保有する後腸が大きい。

III. 今後の展開

高い活動性と長寿を実現している社会性昆虫の繁殖虫の食べ物は、機能性成分の宝庫です。ミツバチでは女王になる幼虫に与えられるロイヤルゼリーがよく知られており、盛んに研究されてきました。これらの研究はミツバチの生物学だけでなく、人間の医学や健康科学にも重要な知見を提供し、今では食品や化粧品にも幅広く応用されています。本研究によって、シロアリのロイヤルフードという新たな研究領域の扉を開くことが出来ました。本研究グループが構築したロイヤルフードの採取・分析技術や化学成分データベースを用いてさらに研究を進めることにより、ヒトの健康長寿にも貢献する新たな機能性成分や情報を得ることが期待されます。

IV. 研究成果の公表

本研究成果は、2023年7月4日、科学誌「PNAS Nexus」に掲載されました。

論文タイトル：The royal food of termites shows king and queen specificity

著者：Eisuke Tasaki, Yuki Mitaka, Yutaka Takahashi, A. S. M. Waliullah, Zinat Tamannaa, Takumi Sakamoto, Ariful Islam, Masaki Kamiya, Tomohito Sato, Shuhei Aramaki, Kenji Kikushima, Makoto Horikawa, Katsumasa Nakamura, Tomoaki Kahyo, Mamoru Takata, Mitsutoshi Setou, Kenji Matsuura

doi: 10.1093/pnasnexus/pgad222

V. 謝辞

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科研費 若手研究 (22K14830)、基盤研究 S (18H05268) などの支援を受けて行われました。

【用語解説】

(注 1) **活動的長寿**：高い活動性と長寿命を両立すること。

(注 2) **LC-MS/MS 分析**：液体クロマトグラフ質量分析 (Liquid Chromatograph-Mass Spectrometry/Mass Spectrometry) の略で、高速液体クロマトグラフと 2 つの質量分析部 (MS/MS) を組み合わせた装置。LC-MS/MS では、2 つ連結した MS 部により、LC-MS よりもさらに高感度な分析が可能。

(注 3) **脱離エレクトロスプレーイオン化-質量分析イメージング (DESI-MSI)**：イメージング質量分析の手法の一つで、試料表面に存在する特定の化合物の空間分布を可視化する手法。

(注 4) **マイクロ CT**：昆虫など小さな生物の内部構造を非破壊的に三次元的に可視化することができる装置。

本件に関するお問い合わせ先

新潟大学自然科学系 (理学部)

助教 田崎 英祐 (たさき えいすけ)

E-mail : etasaki@bio.sc.niigata-u.ac.jp