

令和5年 7月14日

シロアリの王と女王の特別食を世界初解明 —王と女王の繁殖と長寿を支えるロイヤルフード—

<研究成果のポイント>

- ヤマトシロアリの王と女王への給餌物の採取と分析に成功し、世界で初めてシロアリのロイヤルフードの成分を特定しました。
- 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。
- ロイヤルフードには、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。
- 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。
- 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。

※本研究成果は、PNAS Nexus 誌（米国国立科学アカデミー）において日本時間 2023 年 7 月 4 日に発表されました。

<概要>

シロアリが木を食べ、それを腸内微生物の働きによって栄養に変えて生活していることはよく知られています。しかし、木を食べるのは専ら働きアリの仕事で、王や女王は働きアリから特殊な食べ物を与えられて、繁殖に専念しています。そして、その特別食（本研究でロイヤルフードと命名）によって王や女王は何十年も活発な繁殖を続けることが出来ます。このロイヤルフードが一体どのような成分なのか、これまで謎に包まれていました。

浜松医科大学国際マスメージングセンター（瀬藤光利センター長）と京都大学大学院農学研究科（松浦健二教授）らの研究グループは、ヤマトシロアリを用いて王と女王の給餌物の採取と分析に成功し、世界で初めてシロアリのロイヤルフードの成分を特定しました（図1）。

本成果は、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。

<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壤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。

<研究の成果>

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サンプリング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ワーカー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1）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。安定同位体（¹³C）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2）により¹³C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）。マイクロCT（注3）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。

<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、食品や化粧品にも応用されています。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。私たち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。

<用語解説>

（注1）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（HPLC）と三連四重極型質量分析計（MS/MS）を組合わせた装置です。LC-MS/MSでは、連結したMS部により、断片化した分子のマスペクトルを得ることで詳細な分子同定解析が可能です。

（注2）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で、マトリックスを必要とせず脂質などの化合物の空間分布を可視化する手法。

（注3）マイクロCT：試料にX線を色々な角度から照射し、透過像を連続的に撮影して得られた画像をコンピュータで再構成して3Dイメージングする技術。病院のCTスキャンで使用されるものと原理は同じで、大幅に解像度を上げたもの。

<発表雑誌>

PNAS Nexus

DOI : 10. 1093/pnasnexus/pgad222

<論文タイトル>

The royal food of termites shows king and queen specificity

<著者>

田崎 英祐、三高 雄希、高橋 豊、エ-エスエム ワリウラ、ザイナット タマンナ、坂本 匠、アリフル イスラム、神谷 正貴、佐藤 智仁、荒牧 修平、菊島 健児、堀川 誠、中村 和正、華表 友暁、高田 守、瀬藤 光利、松浦 健二

<研究グループ>

本研究は科研費基盤研究 (S) JP18H05268 (研究代表者: 松浦健二) の助成を受けたものです。

<本件に関するお問い合わせ先>

国立大学法人 浜松医科大学国際マスイメージングセンター・細胞分子解剖学講座
センター長・教授 瀬藤 光利

Tel: 053-435-2086、Fax: 053-435-2468

E-mail: setou@hama-med.ac.jp

<参考図>

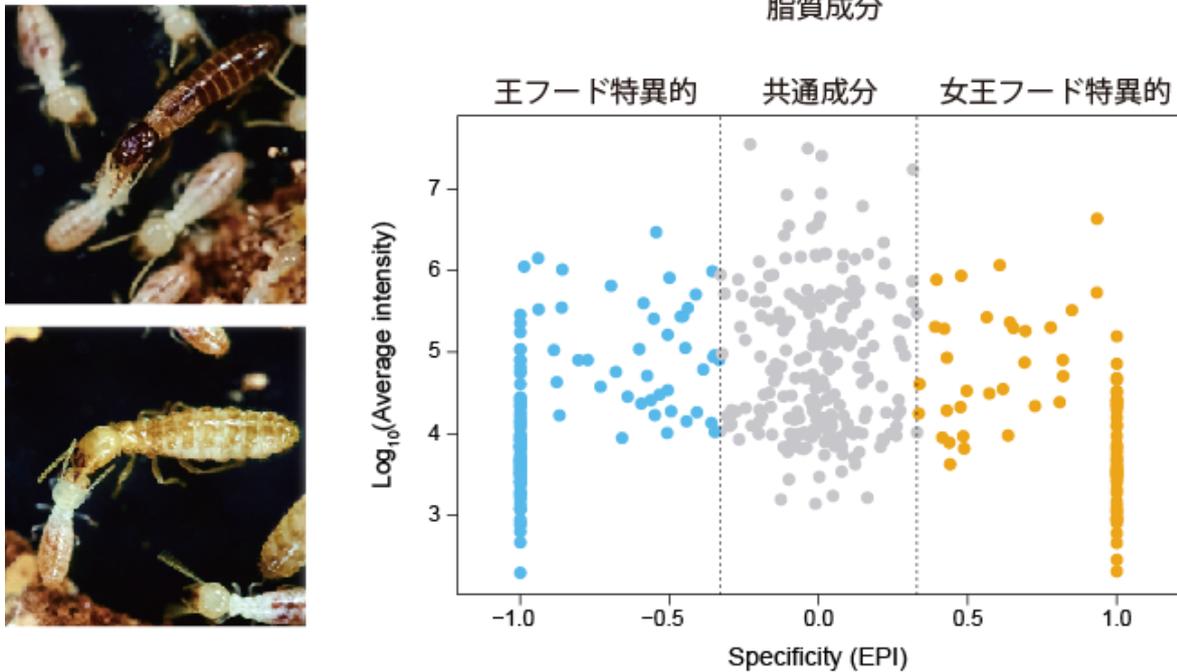


図1. (左) 働きアリが王 (上)・女王 (下) シロアリに経口給餌している写真。(右) 経口給餌物を直接回収し、質量分析により成分分析した結果。縦軸は検出強度値、横軸は王 (左側) と女王 (右側) に対する特異度。

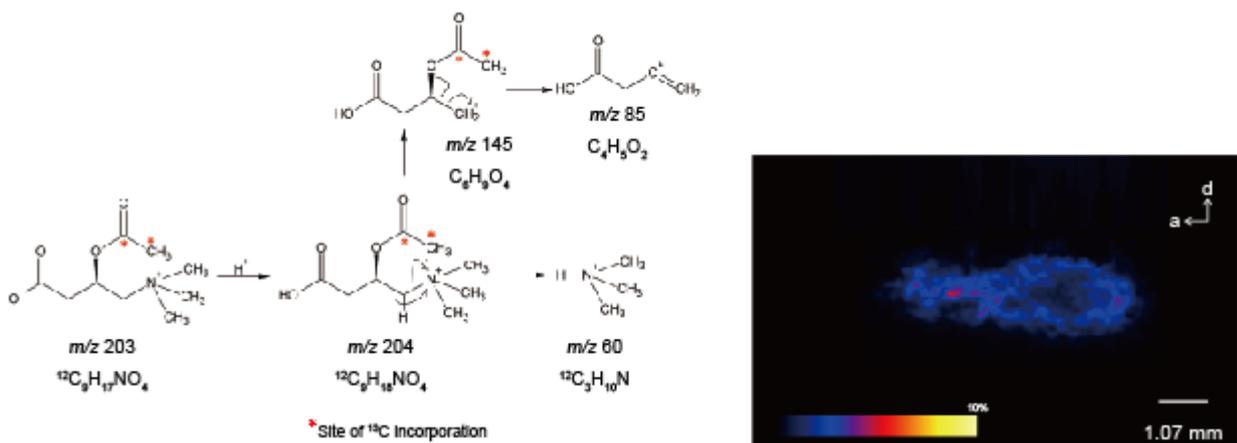


図2. (左) 働きアリが食べた安定同位体標識セルロースの ^{13}C がロイヤルフード成分の一つアセチル-L-カルニチンに取り込まれる過程。(右) 経口給餌によって与えられた ^{13}C をもつアセチル-L-カルニチンの女王体内における局在。

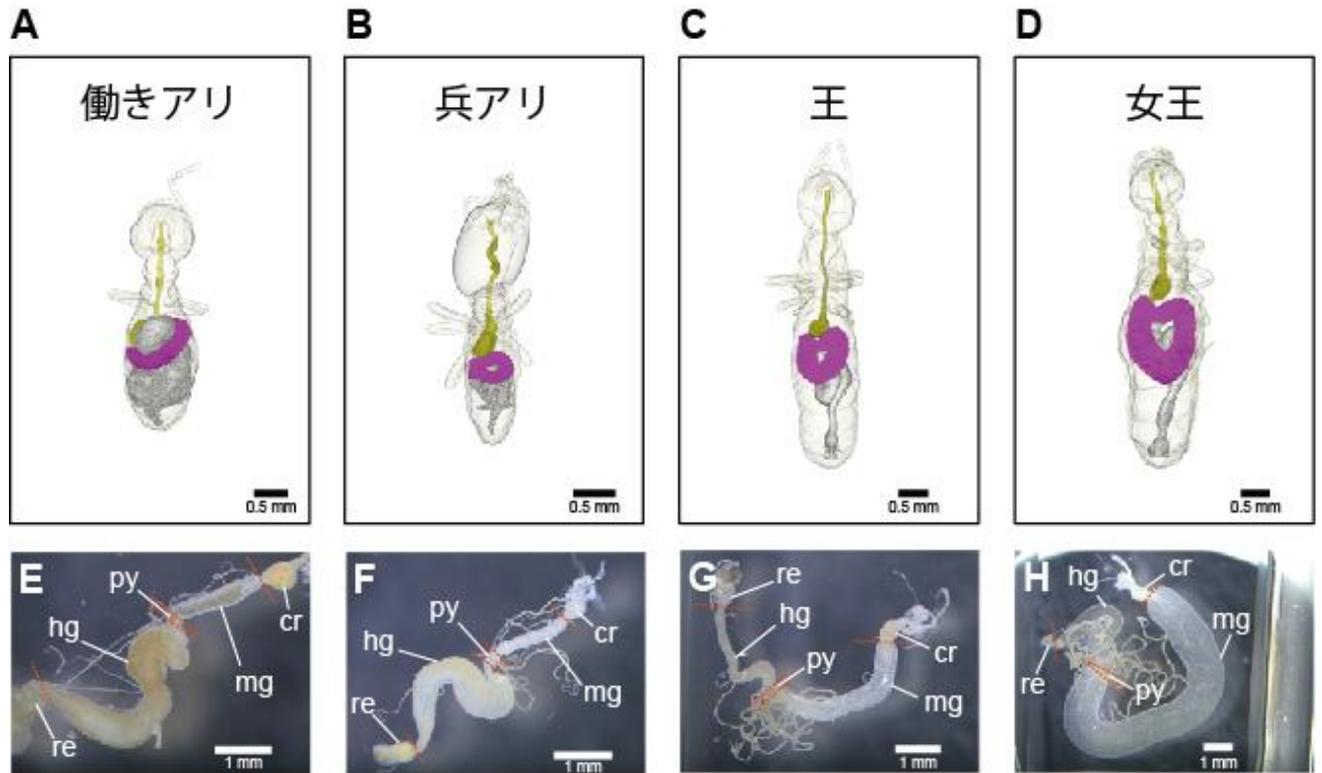


図 3. (上段) 腸の構造の比較。前腸 (黄)、中腸 (赤)、後腸 (灰色) の比率が大きく異なる。王・女王は栄養の吸収器官である中腸が大きく、働きアリは共生微生物を保有する後腸が大きい。