

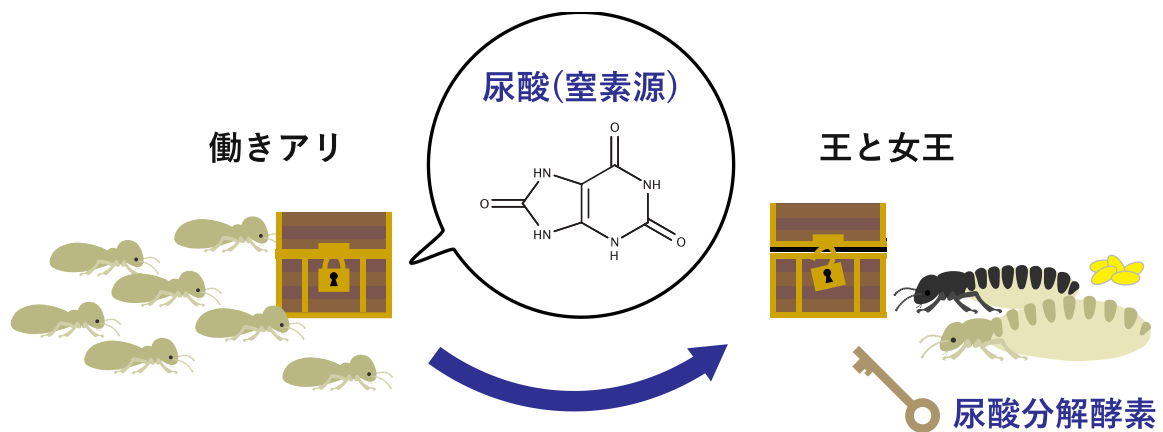
シロアリの社会における分業システムの鍵を発見

—王と女王だけが持つことを許された酵素を特定—

概要

京都大学大学院農学研究科の小西堯生 博士課程学生、田崎英祐 日本学術振興会特別研究員（研究当時、現：新潟大学助教）、高田守 同助教、松浦健二 同教授らの研究グループは、シロアリの社会において、王と女王だけが貴重な窒素源である尿酸を分解する酵素を発現することにより、繁殖に必要な栄養を得ていることを世界で初めて発見しました。今回の研究成果は、限られた資源を特定の個体に集中させることが求められる分業システムにおいて、その制御に関わる分子基盤の一端を明らかにするものであり、生物の社会維持メカニズムを理解する上で極めて重要な意味を持ちます。

本成果は、2023年1月4日に英国王立協会紀要「Proceedings of the Royal Society B」にオンライン掲載されました。



王と女王だけが繁殖に必要な栄養を自分で利用できる“鍵”を持つ

1. 背景

アリやハチ、シロアリなど社会生活を営む昆虫では、血縁者で構成されるコロニー内の分業によって社会が成り立っています。ごく一部の個体だけが王・女王（生殖カースト）として繁殖を行う一方で、働きアリや兵隊アリなど繁殖以外の労働に従事する個体（非生殖カースト）が圧倒的多数を占めます。このような社会システムの根底には資源配分の偏りがあり、実際に多くの社会性昆虫において、栄養を王や女王に集中させることが知られています。例えば、ミツバチでは女王蜂になる幼虫だけが栄養豊富な“ローヤルゼリー”を大量に与えられて育ちます。しかしながら、特定の個体への資源の集中が、どのようなメカニズムによって制御されているのかについては長年の謎でした。本研究では、繁殖に不可欠となるタンパク質の材料、すなわち**窒素源**に着目し、その利用能力が王や女王とそれ以外のカーストで異なるのではないかという仮説を検証しました。

この仮説を検証するのに適した材料が、木を食べるシロアリです。木材は炭素を多く含む一方、窒素に乏しいことから、シロアリでは不足しがちな窒素源を獲得・節約するための様々な戦略が進化してきました。例えば、土壌食や共生細菌による窒素固定、脱皮殻や糞のリサイクルなどです。このようにして得られた貴重な窒素化合物は、その代謝産物である**尿酸**の形で脂肪体という組織に蓄えられます。実際に様々な昆虫において、貯蓄された尿酸を分解してタンパク質の合成に利用する代謝経路が知られています。私たちは、日本のヤマトシロアリ（図1）を用いて、この尿酸の利用に関わる酵素の有無を王・女王とそれ以外のカーストで比較しました。

2. 研究手法・成果

はじめに、ヤマトシロアリの各カーストについて、尿酸の代謝に関わる酵素の遺伝子発現を RNA-seq^{注1}を用いて調べました。驚くべきことに、尿酸を利用する上で最初に必要な酵素である**尿酸分解酵素**（尿酸オキシダーゼ）の遺伝子が成熟した王と女王のみで高発現していることが明らかになりました（図2A）。さらに、王と女王がいない状況下で人為的に働きアリを生殖カーストに分化させると、やはり尿酸分解酵素の遺伝子発現が上昇し、それに伴って体内の尿酸量が低下することがわかりました。つまり、生殖カーストである王と女王だけが自らの酵素を使って尿酸を分解することができるといえます。

次に、この酵素による尿酸の分解が繁殖の役に立っているのか調べました。RNA 干渉^{注2}と呼ばれる手法を用いて、尿酸分解酵素の遺伝子発現を抑制して尿酸の分解を阻害した場合と、阻害しなかった場合で女王が産む卵の数を比較しました。その結果、尿酸の分解を阻害した処理区では女王の産卵数が減少することが明らかになりました（図2B）。また、尿酸分解酵素の働きを阻害する機能を持つオキソソロン酸カリウムという化学物質を投与することにより、別の方法で尿酸の分解を阻害しても同様の結果が得られました。したがって、尿酸の分解が繁殖において重要な役割を果たしていることがわかりました。

最後に、王と女王が尿酸をどこから手に入れているのか調べました。王と女王は自分では木を食べず、働きアリによる給餌に頼って生活しています。そこで、働きアリから受け取った物質で満たされている女王の中腸の内容物を分析したところ、予想通り尿酸が検出されました。さらに、尿酸の受け取り手である王や女王を取り除いたコロニーでは、働きアリの体内にこの尿酸が蓄積していくことが確認されました。

これらの結果から、シロアリのコロニーにおいて、栄養を特定の個体に集中させるメカニズムが示されました。本研究は、社会を維持する上で根本となる、資源配分システムの一端を明らかにするものです。

3. 波及効果、今後の予定

私たちは、シロアリのコロニーにおける資源配分の偏りに着目して、繁殖に必要な栄養を王と女王に集める仕組みを発見しました。本研究は、生物の社会維持メカニズムを理解する上で極めて重要な知見といえます。また、貯蔵された尿酸が分解されてから産卵という形でアウトプットされるまでの具体的な代謝経路を明らかにすることにより、シロアリを時に害虫たらしめる高い繁殖能力に関わるメカニズムの理解も進むと期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は科研費 20J20278（研究代表者：小西堯生）、22K14830（研究代表者：田崎英祐）、21K14863（研究代表者：高田守）、18H05268・18H05372（研究代表者：松浦健二）の助成を受けたものです。

<用語解説>

注1 RNA-seq

近年開発された次世代シーケンサーと呼ばれる装置を用いて、細胞や組織における遺伝子の発現状態を網羅的かつ定量的に解析する手法。

注2 RNA 干渉

細胞内に導入した二本鎖 RNA により、遺伝情報からタンパク質が合成される過程が阻害される現象。この原理を利用して標的遺伝子の発現を抑制し、機能を調べることができる。

<研究者のコメント>

アリやハチ、シロアリなどの社会性昆虫は、生態系におけるバイオマス（現存量）の大きさから、地球上で最も繁栄している生物の一群といわれています。その繁栄をもたらした高度な分業システムが、どのような原理によって進化し、維持されているのか。この基本的な問いには多くの謎が残されています。本研究は、昆虫の社会システムの巧妙さを示すとともに、木造建築物を食い荒らす害虫であるシロアリの防除手法への応用の可能性も拓くものです。今後もあらゆる角度から生物と向き合い、人類の知の領域を拡げることには貢献できれば幸いです。

<論文タイトルと著者>

論文タイトル：King- and queen-specific degradation of uric acid contributes to reproduction in termites

著者：Takao Konishi*, Eisuke Tasaki, Mamoru Takata, Kenji Matsuura (*責任著者)

掲載誌： *Proceedings of the Royal Society B* DOI：10.1098/rspb.2022.1942.

< 参考図表 >



図1. ヤマトシロアリのコロニー。ごく一部の個体だけが王・女王（生殖カースト）として繁殖を行う一方で、働きアリや兵隊アリなど繁殖以外の労働に従事する個体（非生殖カースト）が圧倒的多数を占める。

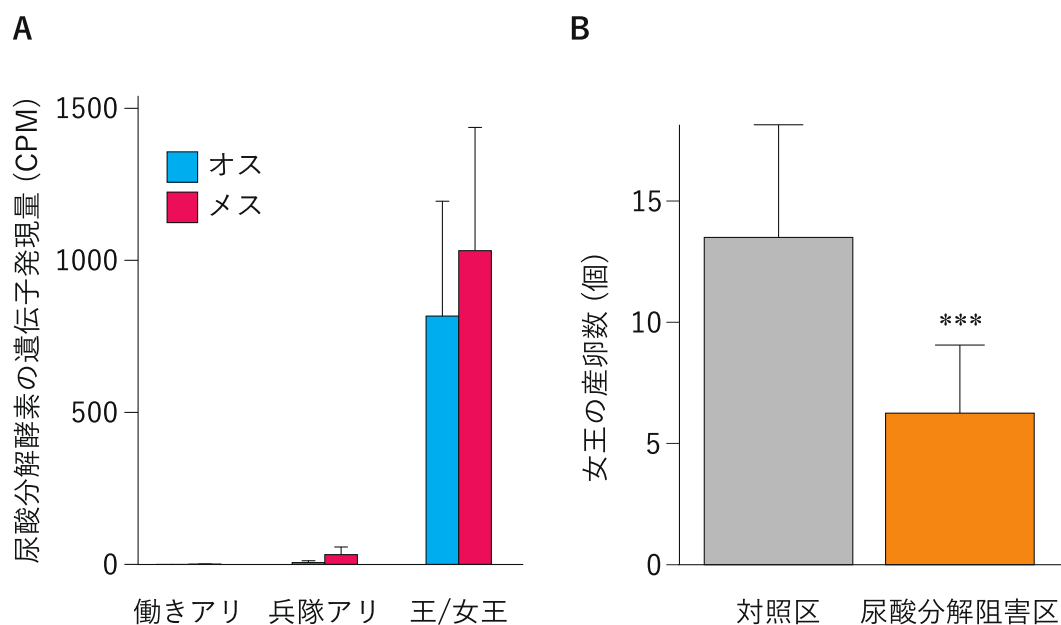


図2. (A) RNA-seqにより得られたデータを用いて尿酸分解酵素（尿酸オキシダーゼ）の遺伝子発現をカースト間で比較した結果。王と女王でのみ尿酸分解酵素の遺伝子が高発現していた。(B) RNA干渉を用いて尿酸分解酵素の遺伝子発現を抑制し、人為的に尿酸の分解を阻害した結果。対照区では、改変型緑色蛍光タンパク質遺伝子を標的とした同様の処理を行った。尿酸の分解を阻害された女王では産卵数が減少した。