

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K08148

研究課題名(和文)血縁のない創設女王どうしの協力行動に見られる囚人のジレンマ・ゲーム

研究課題名(英文)Prisoner's dilemma game found in a multiple queen founding ant species

研究代表者

佐藤 俊幸 (Sato, Toshiyuki)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：80242238

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：チクシトゲアリは、しばしば血縁のない創設女王どうし共同でコロニーを創設する。創設期の女王より成熟巣の女王の方が脳内オクトパミン濃度が有意に高い。創設女王ペア実験で、両者にオクトパミンを経口摂取させると栄養交換などの協力行動の頻度が低下し、敵対的な行動を誘導できることが明らかになった。創設女王3個体を使用した実験でも、栄養交換の回数と時間及びアログルーミングの回数と時間は、ペア実験と同様、対照群と比較してオクトパミンを経口摂取させた女王で低下し、協力行動を抑制する働きが確認された。また、成熟巣の女王の頭部で、幼若ホルモン関連遺伝子や産卵女王の行動に関する遺伝子の高い発現が検出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトを含む霊長類では「囚人のジレンマモデル」による互惠的利他行動の進化的理解が進んでいるが、無脊椎動物における非血縁者間の協力行動、互惠的利他行動に関する研究は皆無に等しかった。本研究で、無脊椎動物における知能によらない本能的行動プログラムに基づく互惠的利他行動の進化の可能性が示された。互惠的利他行動に関する普遍的な原理、メカニズムが明らかになる可能性がある。創設女王どうしの「裏切り」、「搾取」、「協力」、「無視」の利得とコストが明らかになれば、協力行動の発現と消失にかかわる遺伝子発現、生理的メカニズムが解明されれば、協力行動を究極要因と至近要因の両面から理解することができる。

研究成果の概要(英文)：Polyrhachis moesta queens often found colonies with unrelated queens. Queens of mature colonies have significantly higher levels of octopamine in their brains than founding queens. In a paired experiment, the frequency of cooperative behaviors such as nutrient exchange decreased and hostile behavior was induced when both were orally administered octopamine. In an experiment using three founding queens, the frequency and duration of nutrient exchange and allo-grooming were also found to decrease in queens orally administered with octopamine compared to the control group, suppressing cooperative behavior. In addition, high expression of juvenile hormone-related genes and genes related to the behavior of egg-laying queens were detected in the heads of mature colony queens.

研究分野：行動生態学

キーワード：協力行動 非血縁 オクトパミン

1. 研究開始当初の背景

血縁のない個体どうしの協力行動に関しては、ヒトを含めた霊長類では多数の研究がなされている。しかしながら、無脊椎動物では非血縁者間の協力行動は報告例が少なく、ほとんど研究されていない。無脊椎動物における協力行動、利他行動の進化は、これまで血縁選択の文脈で説明されてきた。非血縁者間の協力は、互恵的利他行動の観点から、協力しないよりは協力した方が個体の適応度が高まるなら、進化しうると考えられる。本研究は、無脊椎動物では非常にまれな血縁のない個体どうしの協力行動の究極要因（適応的意義）と至近要因（生理的メカニズム）を明らかにする点で先駆的なものとなる。

2. 研究の目的

無脊椎動物における非血縁者間の協力行動の研究は、脊椎動物とは独立に進化した現象として、協力行動・社会性の進化の普遍的な原理を理解するうえで重要な示唆を与えるものと期待される。チクシトゲアリは血縁のない創設女王どうし同じ営巣場所で越冬し、栄養交換・共同育児しコロニーを創設するが、成熟したコロニーでは単女王となり、女王は攻撃的になる(Sasaki et al.1996, *Insectes Sociaux*; Sasaki et al.2005, *Insectes Sociaux*)。本研究では、血縁のない創設女王どうしの協力行動が維持される条件を生体アミン(オクトパミン)経口投与による行動操作(協力行動の消失)の手法を用い、ゲーム理論的観点から明らかにする。同時に、女王の行動が協力から敵対へとスイッチする遺伝子発現、生理学的機序も明らかにする。

3. 研究の方法

血縁のない創設女王どうしの協力行動にみられる反復囚人のジレンマ・ゲーム的状况を解析するため、越冬前の創設女王を採集し、複数(2 or 3 個体)の創設女王からなる実験コロニーを作成し、任意の女王にオクトパミンを経口投与し、行動を非協力へと操作し、個体間のインタラクションを観察する。野外の成熟コロニーは全て単女王制であるが、コロニーが単女王制となる過程も、飼育観察、野外調査により明らかにする。また、創設女王やオクトパミンを与えた女王、成熟コロニーの女王の脳内のオクトパミン濃度を比較するとともに、RNA-Seq 解析を導入し、オクトパミン関連遺伝子の発現の比較解析も行う。それにより、女王の行動が協力から敵対へと変化するメカニズムを明らかにする。

行動操作による女王どうしの反復囚人のジレンマ・ゲームの解析：

チクシトゲアリの結婚飛行は10月にみられる。11月に採集すれば越冬前、3月に採集すれば越冬後の創設女王が採集できる。創設女王どうし通常は血縁に関係なく協力してコロニーを創設するが、創設女王にオクトパミン入りのシヨ糖水を与えると、協力行動を低下させることができる。そこで、任意の女王にオクトパミンを経口投与し、創設女王どうしのインタラクションがどう変わるのか、明らかにする。29年度は以下に述べる越冬前の創設女王2個体の実験を中心にを行う。

2者系実験：巣仲間でも巣仲間でもなくても平等に協力する越冬前の創設女王2個体のペアを用意し、片方の創設女王にオクトパミン(2 mg/ml)入り10%シヨ糖水 or コントロールとして10%シヨ糖水を与え、餌を与えなかった方の創設女王が口移しの餌ねだりを行ったとき、何が起るのか明らかにする。通常はねだられれば口移しの栄養交換が見られるが、非協力的な個体は無視されるのか、攻撃を受けるのか明らかにする。次に立場を変え、先にシヨ糖水を与えなかった個体にオクトパミン入り or ただのシヨ糖水を与え、先に協力的だった個体には栄養交換(協力)するのか、非協力的だった個体には栄養交換を拒否、あるいは敵対するのか、明らかにする。

3者系実験：創設女王を3個体用意し、1個体だけにオクトパミンを投与すると、投与しなかった個体どうしは協力し、投与した個体を協力して排除するのか、2個体にオクトパミンを投与すると共同創設は崩壊するのかなど、3者系での協力行動を明らかにする。これも越冬前と越冬後に分けて実験する。

コロニーが単女王制となる過程の解明：

複数の女王で巣を創設した場合、女王同士いつまで協力するのか？最初のワーカーが羽化したのち、どのようなメカニズムで単女王となるのか、明らかにする。女王どうし敵対性が生じるのか、ワーカーが余分な女王を削除するのか、もうそうであるならば、どのような女王を残し、どのような女王を削除するのか、例えば卵巣の発達程度が低い方を削除するのか、明らかにする。平和的に巣分かれにより単女王化する可能性もある。野外で採集した多女王創設コロニー、及び現在飼育中の多女王創設コロニーを用い、飼育下で継続観察する。営巣場所は複数設置し、女王が選択できるようにする。

女王の行動変化のメカニズムの解明：

越冬前や越冬後の創設女王、オクトパミンを経口摂取させた創設女王、初期コロニーでまだ敵対性が見られない女王、敵対性を示す成熟したコロニーの女王を用い、脳内のオクトパミン濃度を

比較するとともに、RNA-Seq 解析も導入し、オクトパミン関連遺伝子発現の比較解析実験をスタートさせる。

4. 研究成果

チクシトゲアリは、しばしば血縁のない創設女王どうし共同でコロニーを創設する。創設期の女王より成熟巣の女王の方が脳内オクトパミン濃度が有意に高い。創設女王ペア実験で、両者にオクトパミンを経口摂取させると栄養交換などの協力行動の頻度が低下し、敵対的な行動を誘導できることが明らかになった。創設女王 3 個体を使用した実験でも、栄養交換の回数と時間及びアログルーミングの回数と時間は、ペア実験と同様、対照群と比較してオクトパミンを経口摂取させた女王で低下し、協力行動を抑制する働きが確認された。また、成熟巣の女王の頭部で、幼若ホルモン関連遺伝子や産卵女王の行動に関係する遺伝子の高い発現が検出された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nishisue K, Koyama S, Satoh T	4. 巻 55
2. 論文標題 Identification of the Argentine ant <i>Linepithema humile</i> (Hymenoptera: Formicidae) using an artificially synthesized trail pheromone and its effects on native Japanese ants	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Entomology and Zoology	6. 最初と最後の頁 141-147
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s13355-019-00663-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Shinya, Satoh Toshiyuki	4. 巻 34
2. 論文標題 Landscape Learning during Flight Ensures Homing in Honey Bee (<i>Apis mellifera</i>) Drones	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Insect Behavior	6. 最初と最後の頁 82-88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10905-021-09771-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Shinya, Satoh Toshiyuki	4. 巻 127
2. 論文標題 Landscape features causing the local congregation of honeybee males (<i>Apis mellifera</i> L.).	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ethology	6. 最初と最後の頁 582-591
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/eth.13165	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinya Hayashi, Toshiyuki Satoh	4. 巻 50
2. 論文標題 Sperm maturation process occurs in the seminal vesicle following sperm transition from testis in honey bee males	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Apidologie	6. 最初と最後の頁 369-378
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s13592-019-00652-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sayed Ibrahim Farkhary, Ken Sasaki, Shinya Hayashi, Ken-ichi Harano, Satoshi Koyama,	4. 巻 32
2. 論文標題 Suppression of flight activity by a dopamine receptor antagonist in honeybee (<i>Apis mellifera</i>) virgin queens and workers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Insect Behaviour	6. 最初と最後の頁 218-224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10905-019-09728-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Akiyoshi SHIROTO, Toshiyuki SATOH and Tadao HIROTA	4. 巻 40
2. 論文標題 The Effect of Queen Number on Queen Overwintering Survival in <i>Camponotus vitosus</i>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Myrmecological society of Japan	6. 最初と最後の頁 54-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐藤俊幸	4. 巻 52 (9)
2. 論文標題 血縁のないチクシトゲアリ創設女王どうしの協力行動	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 昆虫と自然	6. 最初と最後の頁 33-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計2件

1. 著者名 佐藤俊幸、島田拓	4. 発行年 2023年
2. 出版社 国土社	5. 総ページ数 88
3. 書名 アリのひみつ大図鑑	

1. 著者名 Ken Sasaki, Satoshi Koyama, Toshiyuki Satoh	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Nova Science Publishers, Inc.	5. 総ページ数 -
3. 書名 Advances in Animal Science and Zoology. Volume 12 (Chapter X MONOGYNY AND POLYGYNY: PLASTICITY IN THE NUMBER OF QUEENS IN COLONIES OF ARBOREAL ANT SPECIES)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小山 哲史 (Koyama Satoshi) (10549637)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授 (12605)	
研究分担者	佐々木 謙 (Sasaki Ken) (40387353)	玉川大学・農学部・教授 (32639)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------