

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22457

研究課題名(和文) 宿主操作の分子・神経メカニズムから解き明かす生態系のエネルギー流

研究課題名(英文) Cascading effects of the proximate mechanisms of host manipulation on the ecosystem energy flow

研究代表者

佐藤 拓哉 (Sato, Takuya)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30456743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：ハリガネムシ類と宿主の相互作用系をモデルシステムとして、「宿主の行動抑制と活性化の強度」と「行動抑制から活性化への切替タイミング」を規定する仕組みを詳細な行動実験と神経生理学的解析・遺伝子発現解析を統合するアプローチで解析した。行動実験からは、ハリガネムシに感染したカマキリで、行動抑制化と活性化を示唆するデータを得た。そのような行動変化の原因となりうるいくつかの生体アミンを宿主脳内で確認し、それらと遺伝子発現量の対応関係を解析した。

また、寄生生物であるハリガネムシ類が、宿主の水平偏光感受性を高めることで、通常では考えられない陸生昆虫の入水行動を生起している可能性を世界で初めて発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生物が有する多様な光受容システムは、採餌・逃避・繁殖・移住等の多岐に亘る行動制御に関わっている。しかし、寄生生物が光の強度・波長・偏光のいずれに関する光受容システムを標的にしているかを特定した研究は皆無であり、光走性の改変による行動制御の分子・神経機構は未解明であった。本研究では、寄生生物が宿主の偏光感受性を改変している可能性を世界で初めて見出した。この発見により、光受容システムの操作機構と行動の因果関係から、生態系レベルの高次生物機能であるエネルギー流を予測・制御できる可能性が見出された。

研究成果の概要(英文)：We recently proposed the “switcher paradigm”, a framework to understand the trophic consequences of the varying degree of host-manipulation strategies used by trophically transmitted parasites. In this framework, we shed light on the sequential developmental stages of parasites switching from predation suppression to enhancement over their life histories. In this study, we tried to elucidate the proximate mechanisms of the switching strategy by examining behavior, biogenic amine and gene expressions.

Furthermore, we found that arboreal mantids (*Hierodula patellifera*) infected by nematomorph parasites (*Chordodes* sp.) are attracted to horizontally polarized light, which could induce the mantids to enter the water, where the parasites must emerge to reproduce. To the best of our knowledge, this is the first study demonstrating that a manipulative parasite can take advantage of its hosts' ability to perceive polarized light stimuli to alter host behaviour.

研究分野：生態学

キーワード：宿主操作 ハリガネムシ トランスクリプトーム解析 水平偏光 生体アミン

1. 研究開始当初の背景

今日地球上に生息する生物種の約 40%は寄生者であり、バイオマスでも既知の高次捕食者を超えることがある。しかし、寄生者が宿主との相互作用を通して生態系に及ぼす影響を体系的に理解する枠組みは整備されていない。

ハリガネムシ類の例に加えて、寄生者が宿主操作を介して捕食 - 被食 (宿主) 関係を強化することを示した実証研究は多数ある。しかし既存の理論予測によると、寄生者が捕食 - 被食関係を強化しすぎると、中間宿主は過度の被食による絶滅率が高まり、寄生者は絶滅する。

申請者らは、寄生者が成長段階に応じて、宿主の行動を抑制から活性化に切り替えることを考慮する新たなパラダイム (switcher paradigm) を提案した。このパラダイムに基づく数理モデルでは、抑制期に宿主が食べられにくくなる効果が、活性期に食べられやすくなる効果を緩和する。この仕組みが、強い活性化を引き起す寄生者の存続を可能にする。すなわち、Switcher paradigm は、活性化のみに着目した従来の宿主操作研究の視点を大きく転換することで、宿主操作のパラドックスを解消し、PMEF を体系的に理解する理論 - 実証の枠組み構築の根幹となった。

しかし、寄生者が宿主の行動抑制・活性化を誘導する分子・神経メカニズムについては、神経伝達物質や遺伝子発現を個別に評価したもののみであり、行動変化の成立機序は未だ未解明である。この知見的ギャップは、行動抑制と活性化を生じる寄生者と宿主の相互作用 (個体内の動態) を定式化して群集動態モデルに統合し、PMEF の強度や時間変化 (生態系動態への帰結) を予測する一般理論を構築する上での障壁である。寄生者による行動抑制と活性化のメカニズム解明において、特にその強度と切替タイミングの明示化は、PMEF の強度と時間変化に直接的に関わるため、注目すべき要素である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、ハリガネムシ類と宿主の相互作用系をモデルシステムとして、「宿主の行動抑制と活性化の強度」と「行動抑制から活性化への切替タイミング」を規定する仕組みを詳細な行動実験と神経生理学的解析・遺伝子発現解析を統合するアプローチで評価する。この実証データに基づいて、行動抑制・活性化因子の動態を定式化して、Switcher paradigm の根幹とした群集動態モデルに統合する。それにより、生物学的階層をまたいで、生態系の成立に重要な PMEF の強度と時間変化を体系的に理解する理論 - 実証の枠組みを構築することが、本研究の大きな目的である。

3. 研究の方法

行動実験 (STEP-1): ハリガネムシ (*Chordodes* sp.) に感染したハラビロカマキリ (*Hierodula patellifera*) と非感染のハラビロカマキリの行動を時系列に評価して比較した。

神経生理学的分析 (STEP-2): 先行研究より、宿主脳内の生体アミン類の発現量変化が、ハリガネムシによる宿主操作に関与することが強く疑われる。そこで、行動実験で活動量の変化が認められる時間に合わせて、追加の分析を行った。

遺伝子発現解析 (STEP-3): 宿主の行動抑制期 (ハリガネムシが体内で幼虫) と活性期 (ハリガネムシが体内で成虫) のチョウセンカマキリ (*Tenodera angustipennis*) とハリガネムシ (*Chordodes fukuii*) それぞれの遺伝子発現解析を行った。抑制と活性に対応して、特異的に発現量を変化させる遺伝子 (ホルモン受容体や生体アミンの代謝合成系に関わる遺伝子等) を網羅的に探索した。

数理モデル解析 (STEP-4): Switcher paradigm で提案した宿主 - 寄生者の群集動態モデル (Iritani & Sato 2018) を基本モデルとして、行動抑制・活性のコスト・ベネフィットを定式化して組み込む発展モデルを構築し、行動抑制・活性がそれぞれ有利になる条件を詳細に検討した。

宿主の入水行動における偏光走性操作の検証

本研究プロジェクトの過程で、行動活性期のハラビロカマキリに入水行動を生起する要因として、水面から特異的に反射される水平偏光への正の走性が高まっているという仮説を着想した。この仮説・検証については、当初計画には入っていなかった新たな仮説であるが、宿主操作の仕組み解明として前例のない、斬新な仮説であったため、追加で行動解析を行った。具体的には、室内実験において、偏光走性に関する選択実験を実施した。また、野外に設置したビニールハウス内に、水平偏光を強く反射する池とあまり反射しない池を配置し、いずれの池にハリガネムシ感染カマキリが多く入水するかを検証した。

4. 研究成果

行動実験の結果、ハリガネムシが体内で幼虫の時期には、感染カマキリの活動量が非感染カマキリに比べて低い傾向が認められた。これは、ハリガネムシによる行動抑制化を示唆する。一方、ハリガネムシが体内で成虫になっている時期には、感染カマキリの活動量は非感染カマキリに比べて大きく高まっていた。これは、行動活性化を強く支持する。また、非感染カマキリと感染カマキリでは、活動量の日変動にも差がみられ、感染カマキリでは特に、正午前後と深夜前後に活動量が大きく高まっていた。

こうした活動量の時間変化と対応させるべく、カマキリ脳内の生体アミン類を分析し、現在解析中である。また、宿主の行動抑制期 (ハリガネムシが体内で幼虫) と活性期 (ハリガネムシが体内で成虫) のチョウセンカマキリ (*Tenodera angustipennis*) とハリガネムシ (*Chordodes fukuii*) それぞれの遺伝子発現解析を行った結果、抑制期と活性樹にそれぞれ対応する時期に、感染カマキリと非感染カマキリで発現量の大きく異なる遺伝子を多数抽出することができた。現在、それらの遺伝子の機能について、公共データベースを用いて解析を進めている。

宿主の入水行動における偏光走性操作

偏光と非偏光の選択実験を行った結果、ハリガネムシ (*Chordodes* sp.) が体内で成虫になっているハラビロカマキリでは、非感染カマキリに対して、水平偏光 (自然の水面から特異的に出る) を有意に高い頻度で選択することが明らかになった。一方、そのような感染カマキリに偏った選択性は、垂直偏光と非偏光の選択実験では認められな

った。

野外に設置したビニールハウスにハリガネムシ感染カマキリを放逐して、入水行動をとる池を評価したところ、入水行動を確認した 16 個体のうち、14 個体が、水平偏光を強く反射する池に入水していた。以上の室内・野外実験の結果は、寄生生物であるハリガネムシ類が、宿主の水平偏光感受性を高めることで、通常では考えられない陸生昆虫の入水行動を生起している可能性を世界で初めて発見した成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Nasono Obayashia, Yasushi Iwatani, Midori Sakura, Satoshi Tamotsu, Ming-Chung Chiu, Takuya Sato	4. 巻 in press
2. 論文標題 Enhanced polarotaxis can explain entering water of mantids infected by nematomorph parasites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Current Biology	6. 最初と最後の頁 in press
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 該当する

1. 著者名 Takuya Sato, Ryosuke Iritani, Midori Sakura	4. 巻 33
2. 論文標題 Host manipulation by parasites as a cryptic driver of energy flow through food webs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Current Opinion in Insect Science	6. 最初と最後の頁 69 - 76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cois.2019.02.010	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大林 奈園、岩谷靖、佐倉緑、佐藤拓哉
2. 発表標題 緻密な行動操作？：ハリガネムシ感染コオロギにおける活動パターンの状況依存性。
3. 学会等名 第67 回日本生態学会、名古屋
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大林奈園、岩谷靖、佐倉緑、保智己、佐藤拓哉
2. 発表標題 ハリガネムシ感染カマキリの入水行動に寄与する活動量と水平偏光走性の影響評価
3. 学会等名 第68回日本生態学会、岡山
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木淳成, Chiu M-C, 相樂理嘉, 大石紗友美, 佐藤拓哉, 佐倉緑
2. 発表標題 ハリガネムシ寄生によるカマキリ宿主の走光性変化とその分子基盤
3. 学会等名 第65回日本応用動物昆虫学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasushi Iwatani
2. 発表標題 High-speed servosphere
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩谷靖
2. 発表標題 サーボスフィアの並進制御における最適モータ配置
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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	岩谷 靖 (Iwatani Yasushi) (10400300)	弘前大学・理工学研究科・准教授 (11101)	

6. 研究組織（つづき）

	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	武島 弘彦 (Takeshima Hirohiko) (50573086)	総合地球環境学研究所・研究部・外来研究員 (64303)	
研究分担者	佐倉 緑 (Sakura Midori) (60421989)	神戸大学・理学研究科・准教授 (14501)	
研究分担者	橋口 康之 (Hashiguchi Yasuyuki) (70436517)	大阪医科大学・医学部・講師 (34401)	
研究分担者	入谷 亮介 (Iritani Ryosuke) (10843980)	国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・研究員 (82401)	

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		
その他の国・地域（台湾）	National Changhua University		
米国	University of Oklahoma	University of New Mexico	