

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：82401
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2011～2012
課題番号：23650102
研究課題名（和文） 昆虫と移動ロボットの能動的相互作用による行動発現メカニズムの理解
研究課題名（英文） Understanding of Behavior Selection Mechanism utilizing Active interaction between Insect and Micro-mobile Robot
研究代表者 川端 邦明（KAWABATA KUNIAKI） 独立行政法人理化学研究所・理研-XJTU連携研究チーム・チームリーダー 研究者番号：90301754

研究成果の概要（和文）：

能動的相互作用のために実時間行動計測・小型移動ロボット無線制御を実現するシステムの構築を行った。コオロギ行動から着想を得た制御方策を実装した相互作用実験を行い、ロボットを使ったコオロギの適応的な行動切換えの誘発が可能であることが実証された。一方、コオロギの交尾行動では、雄が雌を呼び寄せ交尾に達するまでに一連の行動の遷移が見られる。雌の交尾行動の動機付けや雄の攻撃性の変化には脳内アミン類の働きが重要であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

For active interaction with the cricket, we constructed a system with real-time recording of the behavior and on-line control of micro-mobile robot. We also implemented control algorithm inspired by the interaction behavior of the cricket and confirmed that adaptive behavior switching was emerged by the interactions utilizing the robot. In order to elucidate how crickets change motivation for mating and aggression, we investigated change in the level of brain amines and found that change in dopamine level links with mating behavior and that change in octopamine level links with aggression.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：昆虫，相互作用，適応メカニズム，移動ロボット

1. 研究開始当初の背景

申請者らはこれまでに、コオロギにみられる交尾行動を題材に、適応的な行動が動機付けられ、決定し発現する際の神経生理機構について、神経伝達・修飾機構の側面から研究を行ってきた。また、闘争経験が個体の内部

状態を変化させ表出する行動を変容させることや、その変化には一酸化窒素や生体アミン等の神経修飾物質の働きが関与することを突き止めている。

個体間相互作用に代表される、社会経験にもとづく行動発現の神経機構を理解することは、ロボット等の人工物のための適応・協

調制御の設計に大きな知見をもたらすと期待できるため、前述の知見に基づいてコオロギの闘争行動について動的モデルの構築および計算機シミュレーションを行い、その妥当性を確認している。さらに、フェロモンを塗布した移動ロボットを操縦してコオロギに接触させることにより、行動誘引の可能性を示している。

本研究の関連研究として、Halloy らの研究報告 (Science 2007, 318: 1155-1158)があるが、ロボットでゴキブリを集合させ社会行動の進化を理解する目的が強く、社会行動の神経生理機構の理解には至っていない。

個体間相互作用により発現する適応行動の理解という意味において、前述の操縦型移動ロボットを用いたアプローチを発展させ、行動、神経修飾物質の観点から総合的に行動発現機構を理解していくことが重要となっている。この点は、Krause ら (Trends in Ecology & Evolution 2011, 26: 369-375)によっても指摘されている先駆的な試みである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、生物が無限定環境下において状況に応じて実時間で行動を選択するために働く神経機構に基づいた行動発現の理解である。

昆虫は、脊椎動物の脳と比べ極めて小規模な脳をもち、神経活動と表出する行動とを関連付けて研究を進められることのできる実験動物である。そこで本研究では、コオロギを対象に、適応行動発現に関わる神経生理学的な調査・分析を試みるとともに、動的な相互作用を能動的に調節可能とする小型移動ロボットを導入した相互実験系により研究を行うアプローチをとることで、適応行動発現機構について理解を深める。

また、これらの研究を通じて得られた結果に基づいて、コオロギの行動を引き出すシンプルな行動パターンを設計し、小型移動ロボットに実装して相互作用実験を行い、適応的な行動スイッチングが誘引されることを実験的に示す。

3. 研究の方法

コオロギと同程度のサイズの人工物が共存する環境を構築し、コオロギが未知の状況で適応的に行動を決定し発現する神経機構について行動生理学実験を行う中で、小型移動ロボットを活用してコオロギが発現する行動を予測し、表出した行動と脳の神経活動を計測し解析する。行動の動機付けには脳内アミン類の働きが重要であるため、自由行動個体の脳内アミン類を実時間で計測し、関連

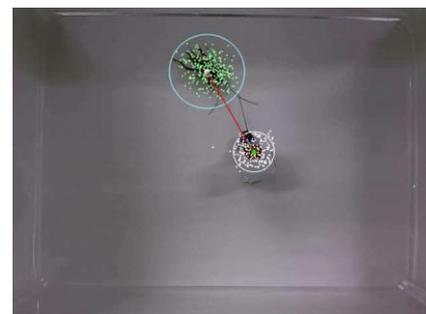
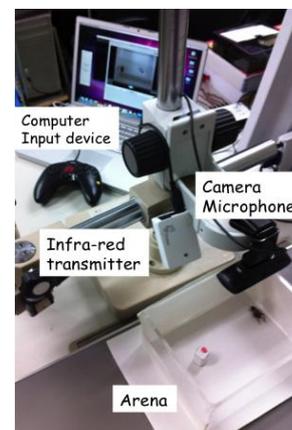
アミンについてその役割を行動薬理的な手法で調べる。

さらに、小型移動ロボットを用いた昆虫との能動的な相互作用についてロボットを操縦することで実験を行い、行動誘引の動機付けとなる行動パターンを分析、抽出する。小型移動ロボットにその行動パターンを制御プログラムとして記述し、カメラからの計測情報を基に制御コマンドを自動的に送信するシステムとして実現する。これを用いた自動制御実験により、相互作用による行動が誘引可能であることを実証する。

(23年度)

昆虫にとって音感覚情報や化学感覚情報は、種や性の識別、天敵からの回避など本能行動の発現に重要であることから、コオロギが特定の化学物質を感受し、行動を誘発する際に、その動機付けにかかわる生体アミン類について HPLC-ECD 法で計測し解析する。また、マイクロダイアリシス法を確立し自由行動個体の体内アミン類の時間変化を計測する。さらに、行動薬理的な方法により脳内で働く生体アミン類の機能的な役割を調べる。これの実験から、行動を予測可能にしたコオロギの行動が動機付けられ発現するときの神経機構を明らかにする。

また、赤外線通信デバイスにより制御コマンドを送信し、小型移動ロボットを操作することで相互作用を実現する実験システムの開発を行う。コオロギは遭遇対象の形状に関係



図：相互作用実験システムおよび
実験・計測の様子

なく、対象物に付着する化学物質に対して定型的な行動を示す。このことを参考に、この小型移動ロボットに体表フェロモンを筐体表面に塗布し、オペレータの操縦に基づいてコオロギとの能動的な相互作用実験を実施する。この際にコオロギの表出する行動をカメラで記録し、行動分析を行う。

(24年度)

昆虫-ロボット共存環境において、コオロギが操作された環境の中で、リアルタイムで適応行動を発現する基盤となる神経機構を明らかにする。攻撃行動の発現には神経修飾物質である生体アミンの働きが重要で、オクトパミン、セロトニン、ドーパミンなどが候補物質である。HPLC-ECD法で脳内アミン類の計測を行い、交尾行動の開始にかかわる脳内アミン類の定性定量的計測を行う。

交尾行動には、雄は calling song 発し、雌を引きつける一連行動のスイッチングが見られる。行動の動機づけメカニズムを理解するために個体の内部状態の変化について生体アミン類の働きを中心に生理学的な知見を積み上げる。

最終的には、行動観察から得られた相互作用行動の行動パターンをシンプルなアルゴリズムとして小型移動ロボットに実装し、昆虫との共存環境下で実験を行う。これにより、フェロモンの活用と行動パターンを組み合わせることで人工物によってもコオロギのフェロモン行動を引き出すことが可能であることを示す。

無限定環境下での適応行動が動機づけられ発現するメカニズムについて考察できる新たな実験モデル系を確立し、新たな制御理論を提唱する。

4. 研究成果

コオロギの雄は1時間おきに交尾が可能で、雌は雄と何回でも交尾が可能である。雄コオロギは calling song を発して雌を引き寄せ、雌を交尾に誘う。雌と交尾すると雄は他の雄から雌を守るためのガーディング行動に移行し、闘争性を増す。一連の交尾行動のなかで雌雄のコオロギはそれぞれ状況に合わせて行動を切替えている。そこで、行動の動機付け、行動の開始、行動のスイッチングにかかわる脳のメカニズムについて脳内アミン類の働きに着目して調べた。

交尾行動の動機付けや攻撃行動の発現には脳内神経修飾物質である生体アミンのオクトパミン、セロトニン、ドーパミンなどの働きが重要である。HPLC-ECD法で脳内アミン類の計測を行ったところ、雌の交尾行動に先行して雄の鳴き声に対する音源定位行動の開始にドーパミンがかかわることが示唆され

た。

一方、自由行動個体の体内生体アミン類の時間変化を理解することは、行動の動機付けメカニズムを理解するためには重要である。昆虫に特化したマイクロダイアリス法を確立し、攻撃行動の発現と生体アミン類の変化について実時間で計測したところ、特にオクトパミンの働きが攻撃行動にかかわることが示唆された。また、開発したマイクロダイアリス法は、複数個体が存在する環境やロボットとの共存環境での計測にも有効である。

小型移動ロボットを用いたコオロギとの相互作用実験を実施するための基盤となる計測制御システムの開発および構築を行った。開発されたシステムは、計算機に接続されたマイク付きカメラによるビデオデータ、音声データの収集・記録機能、コオロギおよび移動ロボット移動軌跡トラッキング・データ記録機能、赤外線通信モジュールを通じた移動ロボットへの制御指令送信機能、等が実装されている。このシステムを用いて、小型移動ロボットにコオロギのフェロモンを用いて操縦型の相互作用実験を行った。雄、雌のフェロモンを移動ロボットに添付し、雄コオロギに相互作用を行ったところ、闘争行動、求愛行動がそれぞれ発現されることが観察された。また実験の際のビデオデータ、音声データ、移動軌跡データのオンライン記録も実現されたことを確認した。特に、開発したパーティクルフィルタを基礎とした複数対象物のトラッキング処理によって得られるオンラインの軌跡データは行動分析のために価値ある記録になるとともに、後述する小型移動ロボットの自動制御についても大変重要なものとなっている。

開発されたシステムの活用・応用として、コオロギ、ロボットのオンライン・トラッキングデータを基に移動ロボットを自動制御する手法を構築した。コオロギの位置、ロボットの位置および姿勢、ロボットとコオロギの相対位置関係、をそれぞれ検出し、このデータに基づいて制御パターンを実装できる枠組みを実現した。コオロギの行動実験の知見から、接近・離脱による相互作用パターンを例として制御プログラムに実装した。具体的には、ロボットの姿勢をコオロギの方向へ調整しつつ、ロボット正面領域にコオロギが入った場合には距離に応じて接近。離反の移動パターンを実行する、というものである。複数回の実験により、コオロギ間と同等のフェロモン行動の誘引が観察されることが確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Sakura M. and Aonuma H. (2013 *Advance online*) Aggressive behavior in the antennectomized male cricket *Gryllus bimaculatus*. *J. Exp. Biol.* doi: 10.1242/jeb.079400. 査読有り
- ② Kawabata K., Fujii T., Aonuma H., Suzuki T., Ashikaga M., Ota J. and Asama H. (2012) A neuro-modulation model of behavior selection in the fighting behavior of male crickets. *Robot. Auton. Syst.* 60: 707-713. 査読有り
- ③ Mizuno T., Sakura M., Ashikaga M., Aonuma H., Chiba R. and Ota J. (2012) Model of a sensory-behavioral relation mechanism for aggressive behavior of crickets. *Robot. Auton. Syst.* 60: 700-706. 査読有り
- ④ Watanabe T. and Aonuma H. (2012) Identification and expression analyses of a novel serotonin receptor gene, 5-HT₂ β , in the field cricket *Gryllus bimaculatus*. *Act. Biol. Hung.*, 63, suppl. 2, pp58-62. 査読有り
- ⑤ 川端邦明, 藤井喬, 鈴木剛, 青沼仁志, 太田順, 浅間一 (2012): "相互作用効果ダイナミクスを持つ行動切り替えモデルによるマルチ・エージェント掃引作業", 日本機械学会論文集, Vol. 78, No. 792, pp3028-3032. 査読有り
- ⑥ Yoritsune A. and Aonuma H. (2012) The anatomical pathways for antennal sensory information in the central nervous system of the cricket, *Gryllus bimaculatus*. *Invert. Neurosci.*, 12: 103-117. 査読有り

[学会発表] (計9件)

- ① Aonuma H. (2013年3月14日) Emergence of social adaptability in insects. *The 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2013)*, (Darmstadt, Germany) (Keynote Lecture)
- ② Kawabata, K., Aonuma, H., Hosoda, K., Xue, J. (2012年12月13日): "Development of a Cricket Interaction System utilizing Mobile Robot for Behavioral Data Collection", *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp1615-1620 (Guangzhou, China), 査読有り
- ③ Aonuma, H., Kawabata, K., Watanabe, T.,

Hosoda, K. (2012年12月5日): "Synthetic Approach for Understanding Emergence of Social Adaptability in Insect", *RIKEN-HYU Joint Conference 2012*, pp44-45 (Saitama, Japan)

- ④ Kawabata, K., Aonuma, H., Hosoda, K., Xue, J. (2012年10月23日): "Real-Time Visual Tracking for Cricket - Micro Robot Interaction Experiment", *Proceedings of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, pp122-125 (Majorca, Spain), 査読有り
- ⑤ 川端 邦明, 青沼 仁志, 細田 耕, 薛 建儒 (2012年5月29日): "マイクロロボットを用いたクロコオロギへの能動的相互作用による行動誘引", *ロボティクス・メカトロニクス講演会'12 講演会論文集 (CD-ROM)*, 2P1-H05 (浜松)
- ⑥ 川端 邦明, 青沼 仁志, 薛 建儒 (2012年1月27日): "クロコオロギ-ロボット間相互作用による実時間行動選択機構の理解-相互作用実験および行動データ収集系の構築-", 第24回自律分散システム・シンポジウム資料, pp103-108 (神戸)
- ⑦ 佐倉 緑, 渡邊 崇之, 青沼 仁志 (2011年9月21-23日) クロコオロギの闘争行動における視覚情報の効果, 日本動物学会第82回大会, (旭川市大雪クリスタルホール)
- ⑧ Sakura M., Watanabe T. and Aonuma H. (2011年8月31日-9月4日) Fighting behavior of white-eye mutants in the cricket *Gryllus bimaculatus*, 12th ISIN Symposium on the Neurobiology of Invertebrates, Tihany, Hungary.
- ⑨ Aonuma H., Sakura M., Kawabata K., Ota J. and Asama H. (2011年5月31日-6月5日) Synthetic approach for understanding internal state changes in subordinate cricket in fighting, *The 8th International Congress of Comparative Physiology and Biochemistry*, Nagoya, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川端 邦明 (KAWABATA KUNIAKI)
独立行政法人理化学研究所・理研-XJT
U連携研究チーム・チームリーダー
研究者番号: 90301754

(2) 研究分担者

青沼 仁志 (AONUMA HITOSHI)
北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号：20333643

(3) 連携研究者
なし