

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19290

研究課題名（和文）偏光による頭足類の隠れた種内コミュニケーションとその適応的意義

研究課題名（英文）Intraspecific communication using polarization signal in cephalopod and its adaptive significance

研究代表者

岩田 容子（Iwata, Yoko）

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：60431342

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：多くの無脊椎動物は偏光を視覚情報として利用するが、配偶相手の質や繁殖ステータスを表す視覚情報は非常に重要であるにも関わらず、性淘汰過程において偏光情報がどのように利用されているかは未だ明らかになっていない。本研究は、エゾハリイカの繁殖行動の観察によって、求愛ディスプレイにおいて、雄は性的二型腕に偏光角度による強いコントラスト模様を示すこと、性的二型腕の組織学的観察により偏光シグナルを強化するための形態的適応が見られることを明らかにした。この成果は、動物が示す偏光パターンに性淘汰がどのような適応をもたらすかを世界で初めて明らかにしたものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで生物における偏光情報の利用に関する研究は、環境中の偏光を利用した昆虫類における方角ナビゲーションや餌探索、また同種認識に関するものに限られていた。本研究は、体表の偏光特性を変えることができるという頭足類の稀有な特徴に着目したことで、生物がもつ偏光特性が種内コミュニケーションにおいて動的シグナルとして重要な役割を果たすことを示した初めての研究となった。求愛形質に捕食者となる多くの脊椎動物が認識できない偏光情報を、特定の方向からしか見えないように用いることで、捕食リスクを避けつつ求愛形質を目立たせることができる、という性選択の新たな適応様式を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：Many invertebrate species use polarized light as a visual information, but it is still unverified how polarization information is used in sexual selection process, despite the fact that visual information representing mate quality and reproductive status is very important for sexual selection. This study revealed that males of cuttlefish *Sepia andrea* show a strong polarization pattern on their sexually dimorphic arms to females during courtship displays, and that the sexually dimorphic arms morphologically adapted to enhance the polarization signal by histological observations. These results firstly showed how sexual selection can lead to adaptations in the polarization patterns exhibited by animals.

研究分野：行動生態学

キーワード：性選択 偏光 コミュニケーション 頭足類

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

性淘汰は繁殖を通じて生物に様々な適応をもたらす進化的圧力であり、異性との配偶機会をめぐる“同性内競争”や“配偶者選択”である交尾前性淘汰と、雌が複数の雄と交尾する場合、異なる雄の精子間での受精をめぐる“精子間競争”や、受精に用いられる精子を雌が直接的・間接的に選ぶ“隠れた雌の選択”である交尾後性淘汰が挙げられる。配偶相手の質や繁殖ステータスに関する情報伝達は、交尾前後の性淘汰において重要であるが、これまでの知見のほとんどは、色や大きさなど、人間が認識できる視覚情報に限られている。

頭足類は顕著に発達した眼と脳を持ち、複雑な体色模様を求愛や雄間競争に用いる(Hanlon & Messenger 2018)。頭足類は色盲であるが、視覚情報として光波の振動方向が偏った光である“偏光”を認識できることが明らかになっている(Marshall et al. 2019)。また、体表面に偏光を反射する虹色素胞を持ち、腕や鰭の付け根、外套膜などの部位に特徴的な偏光模様を持つこと、さらに虹色素胞の上層にあるメラニンなどの色素を含む色素胞の収縮・弛緩により、体表が放つ偏光反射を調節できることなど、他の生物には見られない特徴がある。これらのことから、頭足類が偏光情報を何らかの種内コミュニケーションに利用していることが考えられていたが、実際にどのように利用しているかは、これまで全く明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

(1) 小型コウイカ類であるエゾハリイカは、雄のみ第二腕が顕著に伸張するという性的二型を持つ。我々のこれまでの研究により、エゾハリイカの性的二型腕は求愛行動に用いられることがわかってきたことから、この性的二型腕は交尾前性選択により進化してきたと考えられる。多くのコウイカ類の腕には偏光による線状の模様が見られることから、エゾハリイカでは性的二型腕が伸長することにより、偏光による視覚シグナルも強化されている可能性が考えられる。そこで本研究は、交尾前性淘汰が重要と考えられるエゾハリイカを用いて、求愛時の種内コミュニケーションにおいて雄の性的二型形質の偏光特性は求愛成功に影響しているかを明らかにすることを目的とした。

(2) ヒメイカでは交尾前に雄は明確な求愛を行わず強制的な交尾を行うが、雌は交尾後に雄が渡した精子塊を捨てるという明確な“隠れた雌の選択”を行うことが知られている(Sato et al.)。このことから、ヒメイカでは交尾後性淘汰が重要と考えられる。予備的観察により、交尾経験のあるヒメイカの貯精嚢は、中に並んだ精子によって構造色のように光る現象がみられている。そこで、ヒメイカにおける雌の交尾経験を示す偏光特性が、雄の配偶者選択や精子配分戦略に影響しているか、を明らかにすることを第二の目的とした。

以上より、本研究は、交尾前・交尾後の性淘汰過程における偏光利用とその適応的意義を世界で初めて明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 青森県営浅虫水族館のバックヤードに設置した実験用水槽を用い、エゾハリイカの繁殖行動を観察した。偏光度及び偏光角度を可視化する特殊な偏光カメラを用いて撮影した画像データをもとに、求愛中及び求愛以外の場面での性的二型腕の偏光特性を比較することにより、偏光情報を特定の状況で動的に用いているかを検証した。また、光学顕微鏡と透過型電子顕微鏡を用いた性的二型腕の組織学的観察により、偏光を生み出す虹色素胞の腕の中での分布とその量、また偏光特性を決定する虹色素胞内の反射板の角度とその統一性を定量した。

(2) 愛知県知多半島で採集したヒメイカ未成熟個体を研究室で成熟するまで飼育し、処女雌と既交尾雌を用意した。処女雌と既交尾雌の貯精嚢を実体顕微鏡下で撮影した後、固定し、貯精嚢内の壁面に精子が並ぶように収まることで偏光を発するメカニズムを検証した。3部屋に分かれた水槽を用い雄とその両側に処女雌と既交尾雌を入れて、雄の行動を観察する配偶者選択実験を行った。また、雌の交尾経験に応じて雄が射精量を調節するかを検証する行動実験を行った。さらに、クイーンズランド大学との共同研究として、日本のヒメイカとは異なる精子貯蔵様式を持つオーストラリアヒメイカを用いた繁殖行動に関する実験を行った。

4. 研究成果

(1) これまで全く知見のなかったエゾハリイカの繁殖行動を記載し、雄は性的二型腕を用いて触覚的・視覚的な求愛行動を行うこと、求愛のクライマックスには性的二型腕を伸ばし構造色による光沢を発する Stretched Iridescent Display という求愛ディスプレイを行うことを明らかにした(Nakayama et al. 2024)。その際、通常捕食者に対する防御形質である墨を、求愛ディスプレイの直前に雄自身の背景となる位置に拡散するように放出することを発見した。この墨には、即時的に周辺環境を暗くし背景を均一にすることで、求愛ディスプレイ時の白く輝く体色を目立たせる効果があると考えられた。一方、墨の粒子が拡散することによる偏光特性への影響はみられなかった。

求愛中の雄を、偏光度・偏光角度を可視化する特殊な偏光カメラを用いて、雌からの視点に近い角度から撮影することにより、Stretched Iridescent Display の際に、性的二型腕に強い偏光シグナルが示されることが明らかになった（図1）。この強い偏光による模様は、通常時や求愛の他の場面ではみられず、ディスプレイ時に動的に示されることが明らかになった。さらに、雌から見た手前側の性的二型腕は垂直の偏光角度を示すのに対し、ねじって持ち上げた状態で雌に提示された奥側の性的二型腕の先端は水平の偏光角度を示すことが明らかになった。手前側の性的二型腕が垂直偏光を反射することで、水平偏光を示す奥側の性的二型腕先端に対しても、また本種が求愛を行う背景となる 20～50m の水中の水平偏光に対しても、顕著に強い偏光コントラストを生み出すことが示された。さらに、行動解析の結果から、求愛ディスプレイ時に雌に腕を提示する際の角度が、偏光度を最大化する角度に最適化されていることも示された。

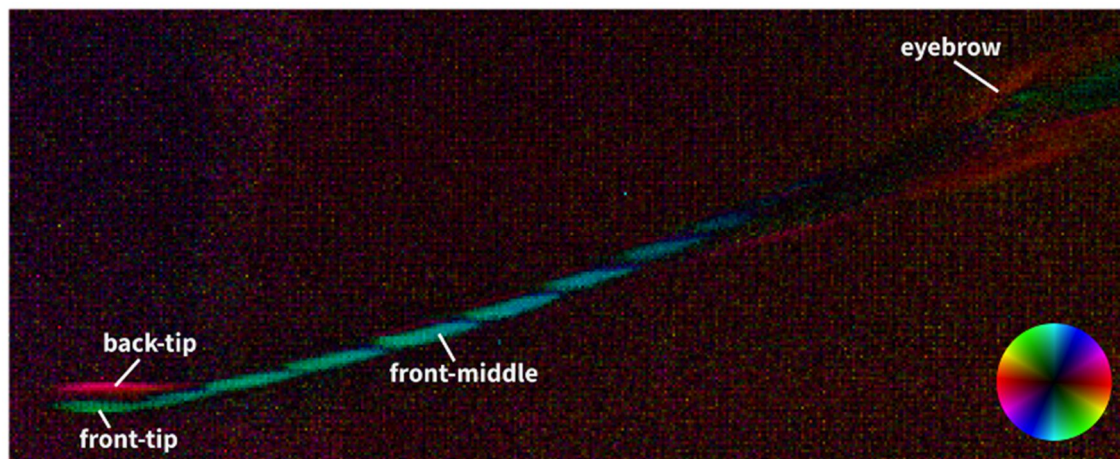


図1. 求愛ディスプレイ時に性的二型腕が示す偏光角度

性的二型腕の虹色素胞の配置と虹色素胞内の反射板の角度を光学顕微鏡と透過型電子顕微鏡を用いて組織学的に調べることにより、性的二型腕の偏光シグナルに対する形態的適応を検討した。その結果、性的二型腕では虹色素胞が内側側面全体を覆っていること、細胞間で反射板の角度が均一であることが明らかとなった。これにより偏光反射が広範囲で増強される一方で、偏光反射の指向性が強くなることから、特定のターゲットに向けて求愛シグナルを発することに適応していると考えられた。

(2) ヒメイカの雄が貯蔵精子量を認識し、それに応じた射精戦略をとっているかを検証するため、貯精嚢内に精子があるが精子塊は付着していない雌、貯精嚢内に精子は無いが雄から直接交配経験が確認できる精子塊が体表面に付着している雌、貯精嚢内に精子が無く精子塊も付着していない雌を使って、雄との交配実験を行った。その結果、いずれの実験区においても射精量に違いは見られず、ヒメイカの雄は雌の精子貯蔵量に応じた射精量の調節を行っているという予測は当てはまらなかった。

オーストラリアヒメイカの繁殖行動はこれまでほとんど明らかになっていなかったが、本研究により、雌は腕の付け根に精子塊を貯蔵するためのポケットのような構造を持ち、雄は雌の腕の内側に腕を挿入しポケットに精子塊を埋め込む形で受け渡す“内側の交配”と、雌の頭部体表面に極めて短時間で精子塊を付着させる“外側の交配”の二つの交配戦略があることを発見した。また、同一の雄が両方の交配戦略を使い分けること、雄がどちらの交配戦略を用いるかは、雌が配偶者選択を示す体色模様を示すか否かによることを明らかにした。さらに、雌が拒否の体色模様を示すと雄は“外側の交配”を行うが、その場合は交配後に雌が付着された精子塊を排除する行動が観察された。これらの結果より、視覚的コミュニケーションを用いた雌の交配前の配偶者選択、それに対抗した雄の交配行動、雌の交配後の隠れた選択が密接に関係していることが明らかになり、本種の性的対立構造における視覚的コミュニケーションの重要性を示している。

< 引用文献 >

- Hanlon, R. T., J. B. Messenger. 2018. *Cephalopod Behaviour*. Cambridge University Press.
- Marshall, N. J., S. B. Powell, T. W. Cronin, R. L. Caldwell, S. Johnsen, V. Gruev, T.-H. S. Chiou, N. W. Roberts, and M. J. How. 2019. Polarisation signals: a new currency for communication. *The Journal of Experimental Biology* 222: jeb134213.
- Nakayama, A., Momoi, S., Sato, N., Kawamura, T., Iwata Y. 2024. Ritualized ink use during visual courtship display by males of the sexually dimorphic cuttlefish *Sepia andrea*. *Ecology & Evolution*, 14: e10852.
- Noriyosi, S., Yoshida, M., Kasugai, T. 2017. Impact of cryptic female choice on insemination success: Larger sized and longer copulating male squid ejaculate more, but females influence insemination success by removing spermatangia. *Evolution*, 71: 111-120.

5. 主な発表論文等

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

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Nakayama Arata, Momoi Shunsuke, Sato Noriyosi, Kawamura Tomohiko, Iwata Yoko | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Ritualized ink use during visual courtship display by males of the sexually dimorphic cuttlefish <i>Sepia andreana</i> | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Ecology and Evolution | 6. 最初と最後の頁 e10852 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ece3.10852 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Arata Nakayama, Shunsuke Momoi, Noriyosi Sato, Tomohiko Kawamura, Yoko Iwata |
| 2. 発表標題 Sexually dimorphic trait of male <i>Sepia andreana</i> produces dynamic polarization signal during courtship behavior |
| 3. 学会等名 Cephalopod International Advisory Council Symposium 2022（国際学会） |
| 4. 発表年 2022年～2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Arata Nakayama, Syunsuke Momoi, Noriyoshi Sato, Tomohiko Kawamura, Yoko Iwata |
| 2. 発表標題 Novel ink use in courtship behavior in <i>Andreana</i> cuttlefish <i>Sepia andreana</i> |
| 3. 学会等名 International Society for Behavioral Ecology Congress（国際学会） |
| 4. 発表年 2022年～2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中山新、桃井駿介、佐藤成祥、河村知彦、岩田容子 |
| 2. 発表標題 偏光距離を用いたエゾハリイカの求愛ディスプレイの視認性評価 |
| 3. 学会等名 第7回ユニーク会 |
| 4. 発表年 2022年～2023年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 中山新、桃井駿介、河村知彦、岩田容子 |
| 2. 発表標題 性的二型腕に見られる特異的な虹色素胞の分布 |
| 3. 学会等名 第5回イカ・タコ研究会 |
| 4. 発表年 2022年～2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐藤成祥 |
| 2. 発表標題 イカ類の精子貯蔵過程の多様化から考える交尾後の性淘汰の意義 |
| 3. 学会等名 NIBB動物行動学研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年～2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田邊良平、秋山信彦、佐藤成祥 |
| 2. 発表標題 雌による精子排除が行われるヒメイカの精子競争に応じた精子配分戦略の検証 |
| 3. 学会等名 日本動物行動学会 |
| 4. 発表年 2022年～2023年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 田邊良平、杉本親要、佐藤成祥 |
| 2. 発表標題 ヒメイカ属にみられる精子塊ポケットの構造と機能 |
| 3. 学会等名 第5回イカ・タコ研究会 |
| 4. 発表年 2022年～2023年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 中山新・桃井駿介・佐藤成祥・河村知彦・岩田容子 |
| 2. 発表標題 偏光で模様を作るエゾハリイカの求愛ディスプレイ |
| 3. 学会等名 日本動物学会第92回大会 |
| 4. 発表年 2021年～2022年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 中山新・桃井駿介・河村知彦・岩田容子 |
| 2. 発表標題 人工産卵礁を用いたエゾハリイカ受精卵収集法の確立 |
| 3. 学会等名 第4回イカ・タコ研究会 |
| 4. 発表年 2021年～2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中山新・桃井駿介・河村知彦・岩田容子 |
| 2. 発表標題 野外調査と人工産卵礁の確立による小型コウイカ類の産卵生態の解明 |
| 3. 学会等名 第18回水族館シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年～2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田邊良平、佐藤成祥 |
| 2. 発表標題 ヒメイカ (<i>Ideosepuis paradoxus</i>) における雌の精子貯蔵状況に応じた射精配分戦略 |
| 3. 学会等名 第6回イカ・タコ研究会 |
| 4. 発表年 2023年～2024年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 田邊良平、佐藤成祥 |
| 2. 発表標題 ヒメイカにおける雌の繁殖力に応じた射精配分戦略の検討 |
| 3. 学会等名 日本生態学会第71回全国大会 |
| 4. 発表年 2023年～2024年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yoko Iwata, Mizuki Yamada, Ryohei Tanabe, Noriyosi Sato, Wen-Sung Chung |
| 2. 発表標題 Cryptic female choice overcomes male's cheating tactic in a pygmy squid |
| 3. 学会等名 Biology of Sperm (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年～2024年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| <p>Yoko Iwata website https://sites.google.com/site/iwayou/home</p> <p>本課題から発表された求愛行動に関する論文は、NHKや新聞各紙、子供の科学、New Scientistなど国内外のメディアに取り上げられ、極めて効果的なアウトリーチ活動となった。</p> |
|--|

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 | 佐藤 成祥 (Sato Noriyosi) (40723854) | 東海大学・海洋学部・講師 (32644) | |

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 | | | |
|---------|------------|--|--|--|
| オーストラリア | クイーンズランド大学 | | | |