

令和元年6月17日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2016～2018

課題番号：16KT0137

研究課題名(和文)イカ類が表出する体表パターンの言語的意味に関する数理的探求

研究課題名(英文) Mathematical approach for the linguistic meaning of body patterns in cuttlefish

研究代表者

岩本 真裕子 (IWAMOTO, Mayuko)

島根大学・学術研究院理工学系・講師

研究者番号：80738641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：イカ類は、瞬時に体表パターンを変化させることができることが知られているが、その高い記憶・学習能力および発達した視覚系から、体表パターンは同種個体間でのコミュニケーションに利用されていると考えられてきた。本研究は行動学と数学の協同により、イカ類がコミュニケーション時に体表に表出させる動的で多彩な体表パターンの言語的意味について理解することを目的とした。トラフコウイカやコブシメを用いて社会的場面を設定し、その動作と体表パターンの変化について観察を行い、動作と体表パターンの出現頻度のデータからその特徴を考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動物が発するパターンの言語的な意味の解読に関する研究は、霊長類や鳥類などの鳴き声で行われている。学習・記憶能力が高く視覚系が発達したイカ類も体表パターンを用いて意思や感情を示し個体間コミュニケーションを行っていると示唆されてきたが、観察者の主観にとどまっており、その謎解きには革新的なブレークスルーが必要であった。本研究は近年確立された安定したイカ類の飼育法を基盤に、数理科学的アプローチを加えて研究を行おうという新たな試みである。まだ研究は初期段階ではあるが、社会的場面の設定を提案して行動実験を行い、その行動と体表パターンについて考察し、より詳細な数理的研究を行うことが可能となった。

研究成果の概要(英文)：It has been known that cephalopods can change their body surface patterns rapidly and dramatically, and these body patterns are thought that used as a linguistic tool in the situations of communication between the individuals because of their high ability of learning and memory. The purpose of this study was to understand the linguistic meanings of body patterns in cephalopods. Hence, we suggested a behavioral experiment of social situation for cuttlefish, *Sepia pharaonis* and *Sepia latimanus*, then investigated the variations of their actions and body patterns. From appearance frequency of that actions and body patterns we discuss the statistical feature of the variations.

研究分野：現象数理学

キーワード：パターン コミュニケーション 行動実験 頭足類

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) イカ類のボディパターンとその特徴

イカ類は、ストライプやドット、迷路柄などの多彩なパターンを表出し、そのパターンを瞬時に変化させることができる。これは、魚類の体表模様に見るチューリングパターンのように、表皮細胞の相互作用だけで実現されるものとは異なり、脳からの神経伝達と末端の筋肉との相互作用によって実現されるシステムである。イカ類の体表には、色素顆粒の入った小さな袋である色素胞が規則的に配置されている。色素胞は、四方を筋肉により吊られ、視覚を介した脳からの信号伝達により、これら筋肉が収縮、弛緩することで、色素胞の面積に局所的な差が生まれる。その結果として、体表全体に多彩なパターンが形成される電光掲示板のようなシステムであり、短い時間スケールでパターンの形成・維持・崩壊・再形成が実現されている。

イカ類は下等動物に位置付けられる軟体動物門の一群であるが、小型哺乳類並みに発達した巨大脳と、精巧なレンズ眼という視覚系をもち、これらにより迅速で多彩な体色変化を可能とする。また、発達した記憶・学習など知的側面ももつ。このようなことから、イカ類の体表パターンは、防衛を企図したカモフラージュ(擬態)と同種個体間のコミュニケーションという、複雑な行動に利用されていると考えられてきた。しかし、後者についての詳細は必ずしも明らかではなく、体表パターンには何か意図する意味があるのか、それはどのような意味なのか、また、体表パターンによりどのようなコミュニケーションが行なわれているのかなどは謎であった。イカ類の体表パターンについては行動記載をベースとした隠蔽行動の研究が進められているが[1]、イカ類の体表パターンの意味解読について、言語的解釈を当てはめたアプローチは例がなかった。

### (2) パターン形成における数理科学のこれまでの貢献

生物の表皮に見られる自発的なパターン形成では、A.M. Turing による反応拡散系における拡散誘導の不安定性という数理的な議論から実験研究へフィードバックされ、タテジマキンチャクダイの成長過程のパターン変化が Turing のモデルで説明された[2]。その他の種でも、色素細胞の空間的相互作用と表皮パターン形成について研究が進められており、チューリングパターンは数理が実験系へ貢献できた代表的な例である。

### (3) 研究代表者と研究分担者のこれまでの研究背景

イカ類のボディパターンにおける多くの謎の解明には、実験的検証が有効であるが、イカ類の飼育は難しく、系統的な解析研究が困難であった。飼育が困難という背景から、イカ類の行動については系統的な研究の蓄積は必ずしも多くない。研究分担者の池田は頭足類の飼育学を進め、飼育下での安定した行動研究を可能にし、イカ類の防衛行動における体表パターンの系統的理解や、イカ類の群れ集団におけるコミュニケーションについての理解を深め [3]、さらにこれらの取り組みを通じて、イカ類が表出する多様な体表パターンが言語的な要素を持つ可能性があるとの着想に至った。

一方、研究代表者の岩本は、アワビ、カタツムリなどの腹足類の筋肉運動を数理解析とモデリングから探る研究法を確立し、数理生物学分野において一定の成果を得てきた[4]。これまでの研究を通して、アワビやカタツムリを用いた観察・実験や非平衡系化学反応の実験などを行い、画像解析ソフト ImageJ を用いた画像処理の技術を習得するなど、自ら実験を行って数理モデルを構築し、数値計算を用いて問題の解明に当たるスタイルを確立してきた。

- [1] R.T. Hanlon and J.B. Messenger, Adaptive coloration in young cuttlefish (*Sepia Officinalis* L.): The morphology and development of body patterns and their relation to behaviour, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* **320** (1987) 437-487.
- [2] S. Kondo and R. Asai, A reaction-diffusion wave on the skin of the marine angelfish *Pomacanthus*, *Nature* **376** (6543) (1995) 765-768.
- [3] K. Okamoto, A. Mori and Y. Ikeda. Effects of visual cues of a moving model predator on body patterns in cuttlefish *Sepia pharaonis*. *Zoological Science*, 32(4) (2015) 336-344.
- [4] M. Iwamoto, D. Ueyama, R. Kobayashi, The advantage of mucus for adhesive locomotion in gastropods, *J. Theor. Biol.*, **353** (2014) 133-141.

## 2. 研究の目的

これまでの研究背景を踏まえ、本研究はコミュニケーション時にイカ類が表出する動的で多彩な体表パターンに注目し、行動学と数学の協同により、その表出パターンがどのような規則により発現され、維持されるのか、その規則に言語的意味を当てはめて解読し、明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

トラフコウイカおよびコブシメをモデル種として行動実験を行い、体表パターンを記載し、統計的解析を行った。特に、個体間のコミュニケーションにおける特徴を抽出するために、2個体の社会的場面として、初対面の場面の設定を提案した。一連の実験で用いるトラフコウイカは、沖縄本島沿岸より卵を採集して琉球大学にて育成し、おおよそ2ヶ月齢以降のものを対象とし、コブシメは成体を収集し、対象とした。行動実験は琉球大学に設置した飼育システムにより行った。また、数理的アプローチとして、これまで観察者が経験的に分類していた体表パターンを機械学習によって分類する方法を確立し、言語的規則を記述した数理モデルの構築に向けた基盤を構築した。具体的には、以下の5つの研究項目を実施した。

### (1)【実験1】トラフコウイカ *Sepia pharaonis* 2個体間コミュニケーション場面で発現する体表パターンの観察と記載

2017年4月沖縄島沿岸にてトラフコウイカの卵塊を採集、研究室内で孵化させ飼育した。133-157日齢の個体を対象に行動実験を行なった。

別々の飼育水槽にて7日以上飼育し、この間においては互いに遭遇経験がなく体サイズが類似した2個体を用意し、側面を黒いポリプロピレンシートで覆い2区画に等分したプラスチック水槽にそれぞれ収容した(図1A)。収容24時間後に実験水槽の中央にある仕切りを取り外し(図1B)5分間対面させた。試行終了後(5分後)は再度仕切りをつけた。これを1試行として1日あたり1試行、連続する3日間、総計6つのペアで実験を行った。

ボディパターンの色彩要素と質感要素、動作要素、色彩・質感要素と動作要素の関係、個体間距離を体軸についてデータを収集した。

### (2)【行動実験2】コブシメ *Sepia latimanus* 2個体間コミュニケーション場面で発現する体表パターンの観察と記載

実験1と同様の実験を、成熟したコブシメを用いて行った。

### (3)【行動実験3】コブシメ *Sepia latimanus* とバーチャルコウイカ(アニメーション)間コミュニケーション場面で発現する体表パターンの観察と記載

成熟したコブシメ1個体を実験水槽に収容し、24時間後に液晶ディスプレイを用いてアニメーションを提示した(図2)。実験には、バーチャルなコウイカ(バーチャルコウイカ)を作成し(図3)、Normalから各種パターンに変化し、最後に正面を向くアニメーション動画を用いた。アニメーションの動きに伴う、コブシメのボディパターンの色彩要素と質感要素の変化を記録した。

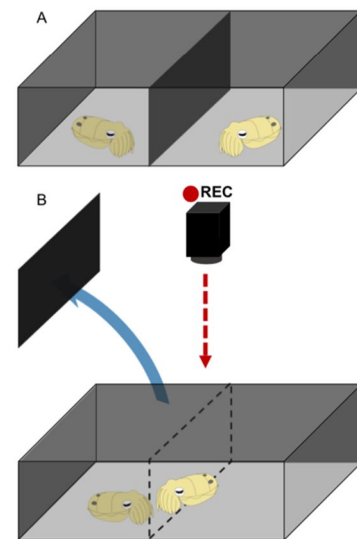


図1. 実験1の設定  
A: 馴化時(24時間)  
B: 試行開始時

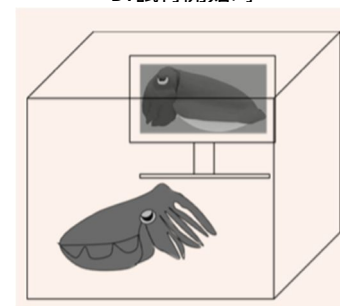


図2. 実験2と3の設定

### コウイカ

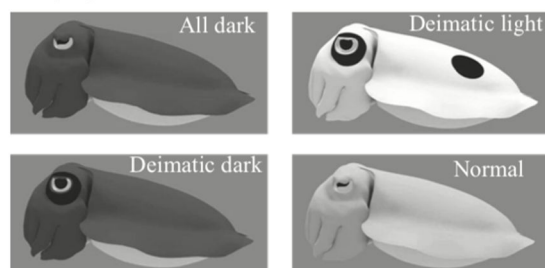


図3. バーチャルイカ4種類

(4) 【行動実験4】コブシメ *Sepia latimanus* と擬似捕食者 (アニメーション) 間コミュニケーション場面で発現する体表パターンの観察と記載

実験3と同様に実験水槽を用意し、迫り来る捕食者(魚類)が横を向いて遊泳し、その後正面を向いて接近するアニメーション(図4)を作成し、成熟したコブシメに提示した。アニメーションの動きに伴う、コブシメのボディパターンの色彩要素と質感要素の変化を記録した。



図4. バーチャル捕食者(魚)

(5) 【数理1】体表パターン発現の規則性の発見に向けた機械学習による体表パターンの分類手法の確立

機械学習(教師あり学習および教師なし学習 K-means 法)を用いてトラフコウイカの静止画から特徴量を取り出し、体表パターンの分類を行った。実験1の動画30秒から60枚の静止画を取り出し、トラフコウイカ個体を含む128x128ピクセルの画像を切り出し、その画像50枚について、白みを帯びたパターン、黒みを帯びたパターン、まだらなパターンの3種類に分け学習をさせ、残りの画像について、実際にどのように振り分けられるか実験を行った(教師あり学習)。また、K-means法を用いたクラスター分析を行った(教師なし学習)。

4. 研究成果

(1) 体色(色彩・質感)パターンの分類として19種類を抽出したが、そのうちの7種類のパターンが、表出頻度が高いことがわかった。そこで試行開始直後60秒間の実験動画を10秒ずつに区切り、体色パターンの表出頻度について解析を行った(図5)。その結果、完全な初対面である1日目においては、対面直後の20秒間で体色変化が顕著であることが明らかとなった。2日目以降も同様の解析を行ったが、1日目ほど体色変化が見られなかった。

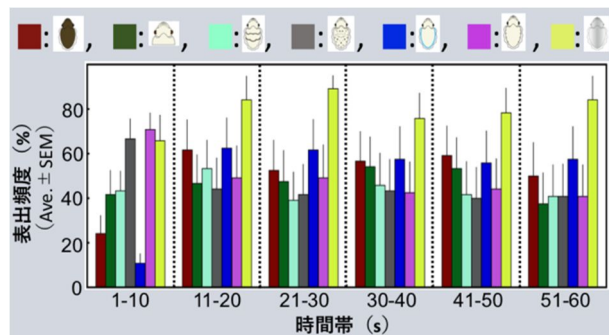


図5. 実験1: 試行1の60秒間の体色変化

次に同様に試行開始直後60秒間の実験動画を用いて動作変化に関して解析を行った(図6)。動作としては、接近・逃避・回転・観察・平泳・接触・停滞の7種類で分類した。動作についても同様に対面直後20秒間で表出する動作パターンの種類に変化が見られた。開始直後、および十分時間が経った後、2日目以降などに停滞の頻度が高いことも特徴的であった。

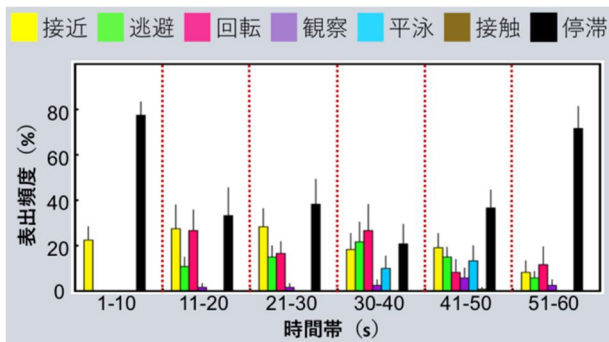


図6. 実験1: 試行1の60秒間の動作変化

また、接近・観察・停滞の動作場面において見られる体色パターンには、それぞれ、ある特定の体色パターンの頻度が高いことがわかった。

(2) 体色(色彩・質感)パターンの分類として22種類を抽出したが、そのうちの6種類のパターンが、表出頻度が高いことがわかり、(1)と同様の解析を行った(図7)。(1)と同様に対面直後の20秒間で体色変化が顕著であることが明らかとなった。

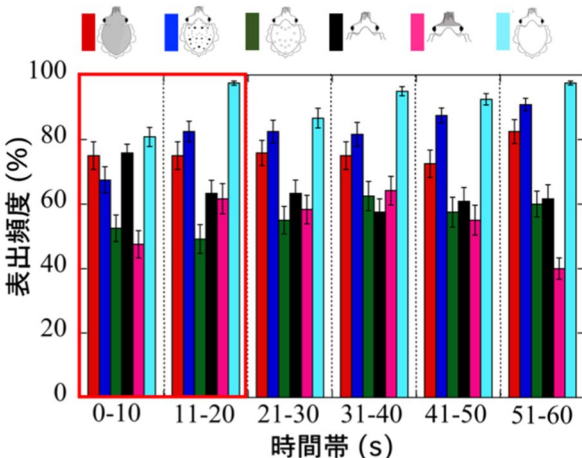


図7. 実験2: 試行1の60秒間の動作変化

動作については、(1)と比較して停滞の頻度が非常に高い結果となった。

(3) コウイカのアニメーションの体色変化として、

(i) Normal All dark

(ii) Normal Deimatic dark

の場合については、そのアニメーションを観たコブシメは著しく体色変化を示した。特に、アニメーションのコウイカが正面を向いた際に色彩・質感要素が変化する様子が見られた。一方、

(i) Normal Deimatic light

(ii) Normal (変化なし)

の場合については、体色変化があまり見られなかった。

(4) 捕食者のアニメーションが横を向いているときは、体色変化はなかったが、捕食者が正面を向き開口して接近する場面で、大きく色彩や質感要素が変化した。また、試行を繰り返すことで正面を向くまでの間に体色変化を見せるようになるなど、学習している様子が観察された。

4つの行動実験(1)～(4)の結果より、対面直後の短時間に色彩・質感要素が変化する様子が観察され、他個体との遭遇に際して情動が変化していることが考察された。また、体色変化と学習の様子から、アニメーションを捕食者と認識していることも明らかとなり、イカ類が視覚情報を非常に重要な情報として利用していることが明らかとなった。また、2個体間の動作要素として「回転」が観察されたが、このようなコミュニケーションを行なっていることは経験的に知られていたが、実際に観察し記録に残せた今回の実験動画は大変貴重なデータとなった。

(5) 3つの分類(白みを帯びたパターン、黒みを帯びたパターン、まだらなパターン)をラベリングし、教師あり学習をさせた後、5秒間の時系列の静止画像5枚(Coarse skin および Papillate skin であり、体色としてはどこに分類されるか不明)をテストし、どのように分類されるか調べた。分類の結果は、分類される可能性があるカテゴリを割合で示した。その結果、1秒ごとの静止画像の分類割合が、白みを帯びたパターンのカテゴリから黒みを帯びたカテゴリに徐々に変更していく様子が見られた。この手法を用いれば、曖昧な体色パターンの分類を自動的に行うことができるが、一方で、教師データとして、初めに分類を行う必要があり、何種類に分類すべきか、どこに分類されるべきかなど、教師データの生成に関して課題が残されている。

一方で、教師なし学習として K-means 法も行なったが、こちらは精度に課題があるとともに、こちら教師データは必要ないとはいえ、何種類にカテゴリ化するかを決定する必要がある。

今後は、解析手法の見直しを検討し、開始直後の20秒間を時系列でデータ化し、その頻出順序について詳細に解析を行うとともに、その解析においては、機械学習による分類の自動化を適用する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計3件)

玉城佑哉・網田 全・岩本真裕子・岡本光平・池田譲、頭足類の社会性に関する研究-25; 社会的場面でコブシメが示す行動、平成 31 年度日本水産学会春季大会、2019 年

中井友理香、安室春彦、水野佳奈、岩本真裕子、池田譲、トラフコウイカが発するボディパターンの意味の理解に向けて、第1回イカ・タコ研究会、2018 年

中井友理香・安室春彦・水野佳奈・岩本真裕子・池田 譲、頭足類の社会性に関する研究-21; トラフコウイカが発するボディパターンの意味、平成 30 年度日本水産学会春季大会、2018 年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6．研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：池田 譲  
ローマ字氏名：( IKEDA, Yuzuru )  
所属研究機関名：琉球大学  
部局名：理学部  
職名：教授  
研究者番号(8桁)：30342744

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。