

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K06261

研究課題名(和文) ヨウジウオ科魚類の特異な一夫一妻を成立させる神経内分泌基盤の解明

研究課題名(英文) Neuroendocrinological mechanisms for life-long monogamy in syngnathid fishes.

研究代表者

曽我部 篤 (Sogabe, Atsushi)

弘前大学・農学生命科学部・准教授

研究者番号：80512714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、特異な一夫一妻を維持するヨウジウオ科魚類において、ペアボンド維持に働く神経内分泌機構を網羅的に明らかにすることを目的とする。生涯にわたって一夫一妻を維持するイシヨウジにみられるペアボンド維持に重要な行動に伴って発現量が変化する脳内発現遺伝子の解析、配偶システムの異なるヨウジウオ科魚類4種の比較トランスクリプトーム解析、配偶システム決定の至近的機構として注目されるバソプレシン受容体遺伝子発現の脳内局在に関する解析を行なった。新型コロナ禍により、当初予定通りに研究を進めることができず、目的を完遂するには至らなかったが、今後の研究の基盤となる遺伝子発現プロファイルを多数取得できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多様な配偶システムを示すヨウジウオ科魚類は、北欧を中心にアメリカ、オーストラリアなど海外で盛んに研究されてきた。しかし、これまでの研究は配偶システム決定の究極要因の解明を目指したものであり、配偶システム変異を至近的機構の面から研究した例はほとんどない。ペアボンド維持の至近的機構とその遺伝基盤については、ハタネズミ類を中心にヒトを含む哺乳類で盛んに行われてきたが、魚類や鳥類など広範な分類群にみられる一夫一妻のペアボンド維持機構に系統を超えた普遍性があるのか、個々に独立した進化的起源があるのかは未解決の問題であり、ヨウジウオ科魚類を対象にした本研究はその一端を明らかにするものである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to comprehensively elucidate the neuroendocrine mechanisms that function in maintenance of pair bond in monogamous syngnathid fishes. We used three approaches to accomplish the purpose: 1) the analysis of gene expression in the brain that change their expression levels in response to the behavior important for the maintenance of pair bonds in the life-long monogamous pipefish, 2) comparative transcriptome analysis of four species of syngnathids with different mating systems, and 3) analysis of the vasotocin receptor gene, which is known to be a putative gene for the determination of mating system in voles. Although it was unable to proceed with the research as originally planned due to the new corona disaster, I was able to obtain a number of gene expression profiles that will serve as the basis for future research.

研究分野：行動生態学

キーワード：配偶システム 魚類 遺伝子発現解析 ペアボンド 一夫一妻

### 1. 研究開始当初の背景

雄と雌が長期にわたってペアボンドを維持し、同じ相手と繰り返し配偶する一夫一妻は、動物界全体で稀な配偶システムである。ペアボンド維持の至近的機構とその遺伝基盤について、近年、神経内分泌に注目した研究が、ヒトを含む哺乳類で盛んに行われている。多くの研究が神経ペプチドの一種であるバソプレシンとオキシトシンの役割に注目しているが、ペアボンド維持におけるこれら神経ペプチドの重要性は種ごとにかなり異なることが分かってきており、このことはペアボンド維持の至近的機構を包括的に理解するためには、特定の神経内分泌のみに注目するのではなく、より探索的なアプローチで多様な種を研究することの必要性を示唆している。

雄が腹部にある育児嚢で雌の産んだ卵を保護するという特徴を持つヨウジウオ科魚類には、一夫一妻から乱婚まで著しい配偶システムの変異がみられる。求愛してくる他の異性には目もくれず、パートナーが生きている限りは生涯一夫一妻を貫く種が存在する一方で、1繁殖サイクル中に雌雄ともにたくさんの異性と配偶する乱婚制を示す種や、他の分類群では非常に稀な一妻多夫の種まで知られている(図1)。多くの動物では、配偶システムの変異に応じて、子の保護様式(両親保護 vs 母親保護)や生活様式(なわばり vs 群れ生活)など繁殖生態も変化するが、ヨウジウオ科魚類では配偶システムが異なっても繁殖生態に違いが見られないため、種間比較を通じて配偶システム決定に直接関わる神経内分泌機構を検出できる可能性がある。



図1 ヨウジウオ科の系統と配偶システムの多様性 (Hamilton et al. 2017より配偶システムが既知の属のみ抽出)

### 2. 研究の目的

本研究では、他に類をみないほど安定した一夫一妻を維持することが知られているヨウジウオ科魚類をモデルとして、一夫一妻維持の至近的機構とその遺伝基盤を調査する。それにより、哺乳類とは系統的に遠く離れ、一夫一妻の哺乳類とは子の保護様式もペア雌雄の関係性もまったく異なるヨウジウオ科魚類において、ペアボンド維持のための独自の神経内分泌機構が進化しているのか、それとも一夫一妻の哺乳類との間で共通する普遍的な神経内分泌機構が存在するのか明らかにする。これに加えて、複婚のヨウジウオ (*Syngnathus schlegeli*) が著しい乱婚制をとる要因を明らかにすることを目的に2つの研究を行なった。

### 3. 研究の方法

3つの実験により、ヨウジウオ科魚類のペアボンド維持における未知の神経内分泌機構を網羅的に探索するとともに、配偶システム変異におけるハタネズミ類との共通性を検証する。

ペアボンド維持のための「挨拶行動」ともなって発現量が変化する遺伝子の網羅的探索  
一夫一妻のヨウジウオ科魚類では「挨拶行動」と呼ばれる、配偶者認識にもとづき、ペア雌雄間でのみ交わされる一風変わった行動が知られている。日中は別々に過ごすペアの雌雄が、日の出直後にだけペアごとに決まった場所で落ち合い、ごく短時間の求愛を交わしてすぐ別れるという行動を、繁殖期・非繁殖期を問わず毎日行っている。ペアボンド維持に不可欠な挨拶行動の前後で発現量が変動する遺伝子は、ペアボンド維持に深く関わっていると推測される。そこで一夫一妻のイシヨウジを対象とした野外実験で、ペア雌雄が出会って挨拶行動をした時にだけ発現量が多い(または少ない)遺伝子を網羅的に明らかにする。

配偶システムの異なる種間の比較によるペアボンド維持遺伝子の探索

配偶した相手が将来の配偶相手でもある一夫一妻種とそうではない複婚種の間では、配偶後の相手との関係を維持する“モチベーション”に明確な差があると考えられる。そのため、複婚の種では配偶前後で発現量が変化するが、一夫一妻種では変化のない遺伝子は、ペアボンド維持に深く関わっていると推測される。そこで、一夫一妻の2種(イシヨウジと *Hippocampus abdominalis*) と複婚の2種(ヨウジウオとオクヨウジ)で、配偶前後の脳内の遺伝子発現を比較し、仮説にあった変動パターンを示す遺伝子を網羅的に探索する。

配偶システム決定の至近機構におけるヨウジウオ科魚類とハタネズミ類の共通性の検証

一夫一妻のハタネズミ類では、バソプレシン受容体 (V1aR) 遺伝子の転写調節領域に数百塩基のマイクロサテライト配列が存在するが、乱婚の種にはそのような配列はない。また、一夫一妻の種と乱婚の種では、V1aR の脳内局在がまったく異なる。ヨウジウオ科魚類でも、配偶システムの変異に応じてバソプレシン(バソプレシンのオーソログ)受容体遺伝子の転写調節領域や V1aR の脳内局在に種間で違いが見られるか明らかにする。

ヨウジウオ (*S. schlegeli*) が著しい乱婚制を示す要因を明らかにするため以下の2つの研究を行なった。

ヨウジウオ地域個体群間の緯度に沿った体長変異

ヨウジウオでは北方の個体群ほど1回の繁殖サイクルで雄が配偶する雌の数が増える傾向

があり、北限の陸奥湾では雄は最大9匹の雌と配偶しているのに対して、南方の玄界灘の個体群では雄は最大でも4匹の雌としか配偶しない。また、ヨウジウオではベルクマン則に従った体長変異が存在し、北方の個体群ほど雌雄ともに体長が大きくなる。近縁種では体サイズの地域間変異が多産性に対する選択の結果進化し、それに応じた配偶システムの変異がみられることが報告されている。そこで日本全国で採取したヨウジウオについて体長と脊椎骨数の関係を調査した。

#### ヨウジウオの配偶者選択性と配偶様式

ヨウジウオの著しい乱婚性をもたらす行動特性を明らかにする目的で、水槽下における配偶者選択実験および配偶実験を行った。1匹の雄または雌に体長の異なる2匹の異性を提示し、どちらに選好性を示すか観察した後に自由交配させ、どちらの異性と先に配偶するか、その際どれくらいの数の卵の受け渡しが起こるか調べた。

#### 4. 研究成果

本実験では野外に設置したケージ内に1)ペア雌雄、2)ペアの異なる雌雄、3)ペア雌雄の一方のみを入れ、挨拶行動が起きた場合とそうでない場合で、脳内の遺伝子発現に違いが見られるか検証するものであるが、新型コロナウイルスの感染拡大に伴う移動自粛のため、解析に必要な1)~3)の脳試料の内、3)については分析に必要な試料を得るための実験を実施することができなかった。1)、2)については既にRNA-Seqを完了しており、3)が入手出来次第1)~3)の比較によって、ペア bond 維持関連遺伝子の絞込みをおこなう予定である。

複婚のヨウジウオ2種(ヨウジウオ、オクヨウジ)ならびに一夫一妻のイシヨウジについて、飼育配偶実験を行ない、摘出した脳のRNA-Seqが完了した。しかし、一夫一妻の *Hippocampus abdominalis* については水槽下での配偶がうまく行えず、予定した試料が得られていない。今後飼育条件を再検討して試料を取得し、4種の遺伝子発現プロファイルの比較を行う予定である。

配偶システム決定の至近機構におけるヨウジウオ科魚類とハタネズミ類の共通性を検証するため、配偶システムの異なる4種のヨウジウオ科魚類で、バソトシン受容体の脳内局在とバソトシン受容体遺伝子の転写調節領域について比較を行なうための予備実験を行う予定であったが、予定通りの飼育実験ができなかったことから、複婚のヨウジウオのみで *in situ* ハイブリダイゼーション用のプライマーとプローブを開発できたのみであった。ヨウジウオ科魚類のバソトシン受容体遺伝子について、解析を進めた結果、ヨウジウオ科魚類では他の魚類では2つ存在するバソトシン受容体遺伝子の一方を消失していることが明らかになった。

ヨウジウオ国内7個体群(陸奥湾、宮古湾、七尾湾、東京湾、英虞湾、瀬戸内海、玄界灘)で採取した成魚雌雄について、CT画像または外部形態の直接観察から脊椎骨数を計数したところ、高緯度個体群ほど脊椎骨数が多いことが明らかになった。このことはヨウジウオにおける体サイズ変異が Jordan's rule として知られる緯度に応じた脊椎骨数の変化によって引き起こされていることを示唆している。

水槽下における配偶者選択実験および配偶実験を行った。本種では近縁種の先行結果で示されているような、体サイズの大きな異性に対する選好性が全く見られないこと、1回の配偶で受け渡しされる卵数が極端に少ないことが著しい乱婚制をもたらす要因であると示唆された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Miki Takeshi, Yamanaka Hiroki, Sogabe Atsushi, Omori Koji, Saito Yasuhisa, Minamoto Toshifumi, Uchii Kimiko, Honjo Mie N., Suzuki Alata A., Kohmatsu Yukihiro, Kawabata Zen'ichiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Spatial epidemiology model can explain the seasonal dynamics of infectious disease Cyprinid herpesvirus 3 (CyHV-3) by thermoregulation behavior of the host, common carp (Cyprinus carpio)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Theoretical Ecology	6. 最初と最後の頁 195 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12080-023-00563-3	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 Kawaguchi Mari, Chang Wen-Shan, Tsuchiya Hazuki, Kinoshita Nana, Miyaji Akira, Kawahara-Miki Ryouka, Tomita Kenji, Sogabe Atsushi, Yorifuji Makiko, Kono Tomohiro, Kaneko Toyoji, Yasumasu Shigeki	4. 巻 393
2. 論文標題 Orphan gene expressed in flame cone cells uniquely found in seahorse epithelium	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Cell and Tissue Research	6. 最初と最後の頁 47 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00441-023-03779-1	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 Hinosawa Tsubasa, Kinami Saki, Sogabe Atsushi, Ohtaka Akifumi, Azuma Nobuyuki, Ikeda Hiroshi	4. 巻 33
2. 論文標題 Habitat preferences, genetic isolation and climatic vulnerability of an endangered freshwater crayfish and a widespread freshwater crab in streams of northern Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems	6. 最初と最後の頁 761 ~ 772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aqc.3953	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 Harada Akari, Shiota Ryotaro, Okubo Ryohei, Yorifuji Makiko, Sogabe Atsushi, Motomura Hiroyuki, Hiroi Junya, Yasumasu Shigeki, Kawaguchi Mari	4. 巻 120
2. 論文標題 Brood pouch evolution in pipefish and seahorse based on histological observation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Placenta	6. 最初と最後の頁 88 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.placenta.2022.02.014	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 Honda Rina, Inumaru Mizue, Sato Yukita, Sogabe Atsushi	4. 巻 7
2. 論文標題 Complete mitochondrial genome of the Japanese Cormorant <i>Phalacrocorax capillatus</i> (Temminck & Schlegel, 1850) (Suliformes: Phalacrocoracidae)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mitochondrial DNA Part B	6. 最初と最後の頁 1577 ~ 1578
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/23802359.2022.2113753	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 -

1. 著者名 Honda Rina, Inumaru Mizue, Sato Yukita, Sogabe Atsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Complete mitochondrial genome of a subspecies of the great cormorant, <i>Phalacrocorax carbo hanedae</i> (Kuroda, 1925) (Suliformes: Phalacrocoracidae)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mitochondrial DNA Part B	6. 最初と最後の頁 61 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/23802359.2022.2160671	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 -

1. 著者名 Sogabe Atsushi, Murano Chie, Morii Ryota, Ikeda Hiroshi, Hata Hiroki	4. 巻 6
2. 論文標題 Complete mitochondrial genome of the Japanese field vole <i>Microtus montebelli</i> (Milne-Edwards, 1872) (Rodentia: Arvicolinae)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mitochondrial DNA Part B	6. 最初と最後の頁 2717 ~ 2718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/23802359.2021.1917315	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 -

1. 著者名 Sogabe Atsushi, Takatsuji Kiichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Marine-dumped waste tyres cause the ghost fishing of hermit crabs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 2110166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.210166	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 森山翼・森誠一・曾我部篤
2. 発表標題 十和田湖に人為導入されたトゲウオ2種の収斂的な形態変化
3. 学会等名 第55回日本魚類学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshida, R., Sasahira, M., Nishino, J., Nishino, A., Sogabe, A.
2. 発表標題 Loss of vasotocin 1a1R gene in syngnathids
3. 学会等名 Syngbio2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田峻馬・笹平素生・西野純子・西野敦雄・曾我部篤
2. 発表標題 ヨウジウオ科魚類におけるバソトシン1a1受容体遺伝子の消失
3. 学会等名 日本動物学会第92回大会（オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部勝徳・鬼倉徳雄・加納光樹・桑原正樹・古屋康則・白井厚太郎・杉山秀樹・東信行・曾我部篤
2. 発表標題 耳石Sr/Ca比分析によるクルマサヨリの回遊履歴推定
3. 学会等名 第54回魚類学会年会（オンライン）
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------