

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：82503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K06847

研究課題名（和文）ハゼが海底につくる「ミステリーサークル」の適応的意義と形成ロジックの解明

研究課題名（英文）The adaptive significance and formation logic of 'mystery circles' constructed by a goby on seabeds

研究代表者

川瀬 裕司（Kawase, Hiroshi）

千葉県立中央博物館・分館海の博物館・主任上席研究員

研究者番号：10270620

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）：サキンハゼは砂泥底に生息し、沖縄本島では周年繁殖していることが確認された。本種は産卵基盤として二枚貝の貝殻などを使用し、その周りに放射状の溝を形成した。雄は巣を訪れる複数の雌と繁殖することから、本種の配偶システムはなわばり訪問型複婚であると考えられた。産卵後は雄が単独で卵保護を行い、侵入者に砂を飛ばして撃退したり、卵に砂をかけて捕食者から隠蔽するなどの行動が観察された。営巣開始時には、雄は基盤の縁から外側へ向かう溝掘りと、溝掘りにより基盤に溜まった砂の掃き出しを繰り返した。その結果、基盤の周りの砂が次第に盛り上がり、基盤を海底に安定させる効果があると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の発端となったアマミホシゾラフグがつくる「ミステリーサークル」は真円に近いのに対して、サキンハゼではいびつな楕円となっていた。フグでは3つの単純なルールのもとで掘削行動を繰り返すと、必然的に放射状構造が形成されることがコンピュータシミュレーションで明らかにされている。これに対して、ハゼでは産卵基盤の縁から外側へ向かって溝を掘り進めること、溝の長さにはばつきがあることから、溝の先端を繋いだ形状は基盤の形状に依存するとともに凹凸が生じていた。すなわち、フグとハゼの巣は放射状に並ぶ溝に囲まれている点では共通しているが、形成アルゴリズムの差異が全体の形状に大きな影響を与えていた。

研究成果の概要（英文）：The sand goby, *Hazeus ammophilus*, inhabited muddy bottoms and bred year-round in Okinawa. It used bivalve shells and other materials as spawning substrates, forming radial ditches around them. Males mated with multiple visiting females at their nests, indicating a male-territory-visiting polygamous mating system. After spawning, paternal egg-care behavior was observed: males repel intruders and cover the eggs by blowing sand, protecting them from predators. Upon nest initiation, males repeatedly dug radial ditches outward from the substrate's edge and swept out accumulated sand from the spawning substrates. Consequently, sand gradually accumulated around the substrate, stabilizing it on the seabed.

研究分野：魚類生態学

キーワード：繁殖生態 産卵行動 営巣 卵保護 ハゼ科魚類 形成アルゴリズム シミュレーション バイオミメティクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

動物が体の外につくる立体構造物には様々なものがある。例えば鳥類が小枝などを利用してつくる巣、サバンナ地帯に生息するシロアリ類が土で形成する巨大な塚などが挙げられる。これらの構造物の適応的意義(何のためにつくるのか)については、生態学や行動生態学の視点からさまざまな研究が進んでいるが、形成ロジック(どのようにつくるのか)はハチの巣に見られるハニカム構造などごく限られている。

我々は2011年に直径2mもある非常に精巧な円形幾何学模様の構造物(ミステリーサークル)を体長わずか10cmの小さなフグが海底につくっていることを発見し、学界のみならず一般の人々の大きな反響を呼んだ。現在このフグの生態研究は我々の研究グループが世界で独占して行っているが、その最中に第2のミステリーサークルをつくる魚が全く別の分類群のハゼ科で発見された。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、新たに「ミステリーサークル」をつくることが発見されたトンガリハゼ属の1種-3 *Oplopomus* sp. 3 の繁殖行動を観察して、この放射状構造物の適応的意義と形成ロジックを解明することである。これまでの予備調査で、このハゼは中央部にある基盤上で産卵・卵保護を行うことがわかっている。

そこで、ハゼは繁殖の際になぜ巣の周りに放射状構造をつくる必要があるのか(ハゼにとってどんなメリットがあるのか)、フィールドで潜水観察を行い明らかにする。さらに、ハゼがどのように綺麗な放射状構造をつくるのか(どんなアルゴリズムに基づいてつくっているのか)、フィールドで得られたデータと動画をもとにコンピュータシミュレーションを行い明らかにする。

### 3. 研究の方法

分類と生息域: トンガリハゼ属の1種-3は分類学的な検討はある程度進んでいるが、新種記載には至っていない。本研究を進める上で本種の分類学的位置づけが確定していることが望ましく、新種記載の準備を進めている魚類分類学者と協同して本種の採集と生息域の調査を沖縄本島、奄美大島、屋久島でスキューバ潜水調査を行い、分布域を明らかにする。

なぜつくる?(適応的意義の解明): 沖縄県金武町地先、水深約8mの海底に観察区を設置してスキューバ潜水を行い、以下の調査を行う。1. 観察区で産卵床を持つ雄を個体識別して、全長、産卵床の周りに形成されている放射状構造の長さや数、産卵基盤の種類と大きさを計測・記録する。2. 識別個体を追跡して、行動圏を明らかにする。3. 産卵床の側にビデオカメラを設置して、映像解析を行う。これにより、雄の配偶者、求愛頻度、雄間闘争頻度、産卵継続時間、卵保護時間を明らかにする。

どのようにつくる?(形成ロジックの解明): 1. 放射状構造が形成されているハゼの産卵床の周辺にマーカーを置いて、4Kビデオカメラにより複視点撮影(SfM)を行う。2. ハゼの産卵床の周りに形成されている放射状構造を手で平らに均して、ハゼが放射状構造を再建築する様子を、側に設置したビデオカメラで録画して、溝を掘る順番を確認する。3. 1で得られた動画により産卵床全体の3Dモデルを構築し、放射状構造の長さ・幅・高低差を計測する。

### 4. 研究成果

#### (1) 分布と生息域

本種は沖縄本島中部東岸の水深7~8mの浅い砂泥底に生息しているのを確認している。他地域での生息状況を明らかにするため奄美大島北部西岸で潜水調査を行ったところ、水深30mの砂泥底で本種が営巣している様子を確認され、浅場だけでなく深場にも生息して繁殖していることが明らかとなった。なお、本種は *Hazeus ammophilus* Allen & Erdmann, 2021 として新種記載され、標準和名はサキンハゼと命名された。

#### (2) 巣の形状と位置

サキンハゼの雄は、産卵基盤として陸上植物の枯葉(図1A)、木片(図1B)や人工物、サンゴ片(図1C)、二枚貝の貝殻(図1D)など、多様なものを利

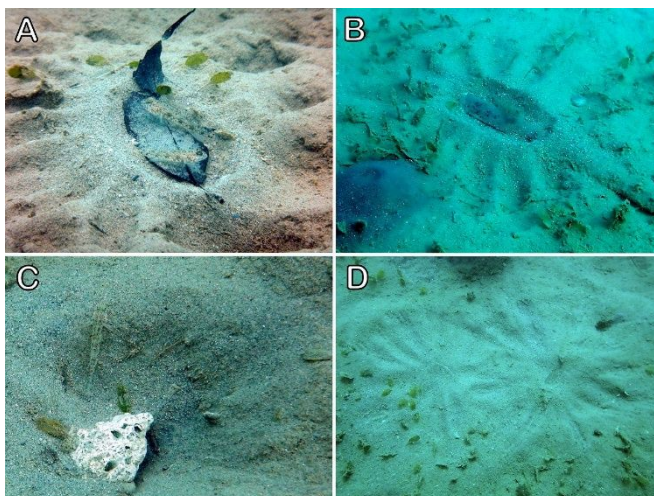


図1. サキンハゼ *Hazeus ammophilus* の産卵基盤とその周りに形成される放射状構造。

用していた。ふつう基盤の底面を利用するが、稀に基盤の下に穴を掘って天井を利用する個体も見られた(図1C)。

基盤の周りには3~20本の溝が見られたが、全く見られなかったり不鮮明な場合もあった。溝は基盤の縁に対しておよそ垂直方向に伸びており、各個体の溝の長さは約60mmで、最短と最長では2~3倍程度のばらつきが見られた。このため、溝を含む巣全体の形状は、いびつな楕円形であった。元の産卵基盤の近くに新たに基盤を置くと、両方で営巣することがあり、その場合には2つの楕円が重なる形状となった(図1D)。

観察エリア内でサキンハゼの営巣位置と状況を確認して、翌月に再度確認すると、同じ場所で維持されている巣は全く見られなかった(図2)。また、別の観察で2個体の巣の維持期間を調べたところ、2個体とも12日後には消失していた。各月の平均巣間最短距離はそれぞれ2.5m、1.7mで、有意差は認められなかった。

観察エリア内で最大4個体の営巣雄状況を周年観察すると、10月から1月は営巣個体が少ないものの、毎回卵保護をしている個体が観察された(図3)。また、2018年の観察によると、4、5月は営巣個体が多いことなどから、サキンハゼは周年繁殖していることが示唆された。

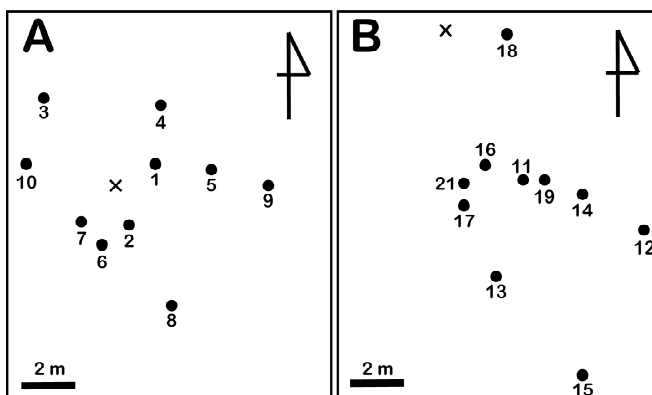


図2. サキンハゼ *Hazeus ammophilus* の営巣位置。2018年4月(A)と5月(B)。×印は同一地点を示す。

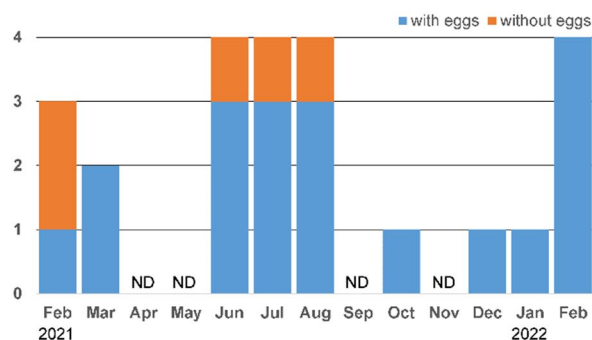


図3. サキンハゼ *Hazeus ammophilus* の営巣数と卵の有無。NDは観察データ無。

### (3) 営巣行動

サキンハゼが営巣している海底に二枚貝の殻を置くと、非営巣雄がやって来て、まず貝殻の下側に潜って鰓で砂を掘った(図3A)。この行動を繰り返すと、貝殻の縁は海底と同じレベルまで下がった。次に、雄は貝の縁から外側に向かいながら溝を掘り、その際鰓で飛ばされた砂が貝殻に入った(図3B)。この溝掘りを様々な方向から繰り返すと、貝の周りには放射状の溝が出来て、貝殻は完全に砂に埋没した。その後、雄

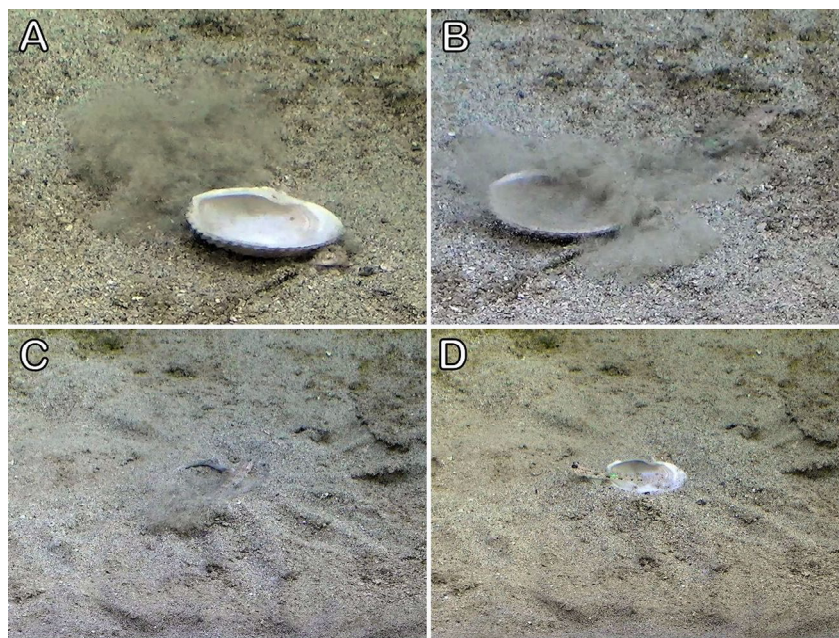


図4. サキンハゼ *Hazeus ammophilus* の営巣行動。

は貝殻に溜まった砂を鰓で煽って外に出し(図3C)、これを繰り返すと、貝殻内の砂は完全になくなった(図3D)。このように、貝殻を砂で埋める行動と、溜まった砂を掃き出す行動を何度も繰り返すのが確認された。

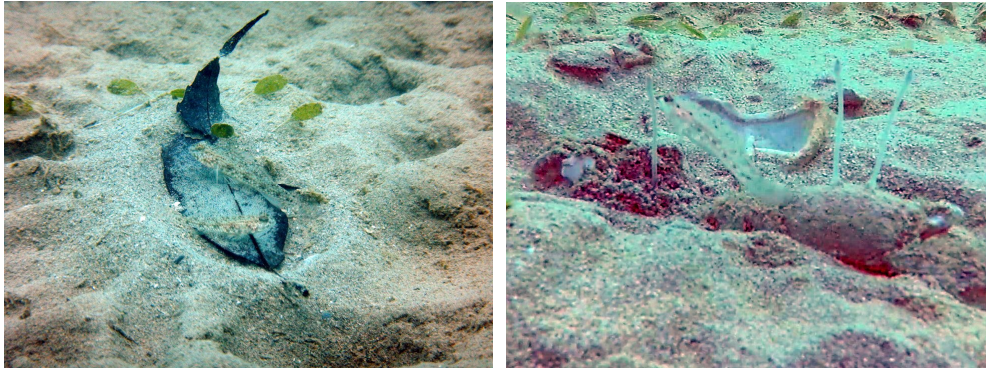


図5. サキンハゼ *Hazeus ammophilus* の産卵行動（左）と卵防衛行動（右）。

#### （4）産卵行動と卵保護行動

サキンハゼの産卵行動は、日中に観察された。営巣中の雄は、雌が近づくと体を見つけて体を浮かせて求愛し、雌はそれに応じて巣に入り、産卵を開始した（図5左）。雄は雌が産卵した場所とその周辺で体をくねらせる行動（精子塗り付け行動）が観察された。雌が巣に入ってから出ていくまでの時間はおよそ5～15分で、引き続き別の雌と産卵することも観察された。このことから、本種の配偶システムはなわばり訪問型複婚であると考えられた。

産卵後、雄は巣の周辺にとどまり、卵が孵化するまで卵保護を行った。卵保護は、卵の世話と卵の防衛の2つに大きく分けられた。卵の世話では、雄は基盤に産み付けられた卵を鳍で煽ったり、基盤上のゴミを取り除いたりした。卵の防衛では、同種の非営巣雄が近づくと、営巣雄は相手に対してT字になるように自分の体で巣をブロックし、激しい喧嘩に発展することが観察された。また、観察エリアで多く見られるオサガニ科の一種が巣に近づくと、営巣雄はカニの眼を狙って攻撃するのが観察された（図5右）。また、鳍で相手に砂をかけて撃退するのも観察された。一方、魚卵食が知られているイイジマウミヘビが巣に近づくと、雄は巣に砂をかけて卵を隠蔽するのが観察された。

#### （5）サキンハゼとアマミホシゾラフグの「ミステリーサークル」の比較

本研究の発端となった、アマミホシゾラフグがつくる「ミステリーサークル」と比較すると、巣の周りに放射状に並ぶ溝が形成される点では共通していたが、その形状や溝の形成アルゴリズム、溝をつくる適応的意義には差異が見られた。

「ミステリーサークル」の形状は、アマミホシゾラフグの場合は真円に近い（図6右）のに対して、本種ではいびつな楕円（図6左）となっていた。その原因は放射状構造の形成アルゴリズムの差異にある。すなわち、本種では産卵基盤の縁から外側へ向かって溝を掘り進めること、溝の長さは一定ではなくばらつきがあることから、溝の先端を繋いだ形状は基盤の形状に依存するとともに凹凸が生じていた。一方、アマミホシゾラフグでは3つの単純なルールのもとで掘削行動を繰り返すと、必然的に放射状構造が形成されることが2Dコンピュータシミュレーションにより明らかにされている（Mizuuchi et al., 2018）。

サキンハゼは新たな産卵基盤を利用して営巣を開始する際、基盤の縁から外側への溝掘りと、それによって基盤に溜まった砂の掃き出しを繰り返して行った。この一連の行動の適応的意義として、産卵基盤を安定させていることが考えられる。この行動の繰り返しにより、基盤の周りの砂が次第に盛り上がることから、枯葉のような軽い基盤は、潮流やうねりで流されにくくなる効果があると考えられる。一方、アマミホシゾラフグでは、溝掘りによって形成される放射状構造そのものが配偶者選択に関与している可能性がある（Kawase et al., 2013, 2014）。また、産卵前日には巣のエリアに迷路状の模様が形成されるが、それに必要な粒子の細かい砂を抽出して巣エリアへ送る機能が溝にあることが確認されている（Kawase et al., unpublished data）。

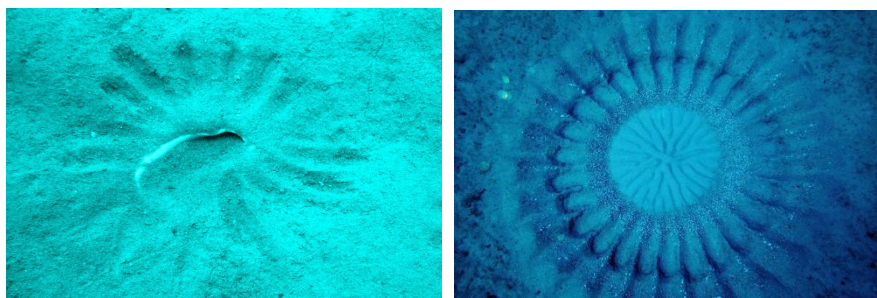


図6. サキンハゼ *Hazeus ammophilus*（左）とアマミホシゾラフグ *Torquigener albomaculosus*（右）の「ミステリーサークル」。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 KAWASE, Hiroshi
2. 発表標題 Nesting and reproductive behaviour of the sand-dwelling goby, <i>Hazeus ammophilus</i> (Gobiidae), which constructs a radially aligned ditches surrounded nest
3. 学会等名 11th Indo-Pacific Fish Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

魚の繁殖行動の謎を解き明かす <a href="https://tetraodon.jimdofree.com/">https://tetraodon.jimdofree.com/</a>
---

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