

【短 報】

サザナミハゼ *Valenciennea longipinnis* の巣穴の
換水に与えるマウンドの効果

竹 垣 毅^{*1}・森 健^{*2}
四ヶ所 四男美^{*2}・中 園 明 信^{*1}

Effect of Mound Structure on Water Exchange in
Valenciennea longipinnis Burrow

Takeshi TAKEGAKI^{*1}, Ken MORI^{*2}, Shiomi SHIKASHO^{*2} and Akinobu NAKAZONO^{*1}

1. はじめに

インド・太平洋域の浅海域に分布するクロイトハゼ *Valenciennea* 属の数種は、海底の岩盤や岩の下を利用して巣穴を作り、その上に死サンゴ片や砂粒などで顕著なマウンドを作ることが知られている^{1)~5)}。Takegaki and Nakazono (1999) は、サンゴ礁礁池内に生息するサザナミハゼ *V. longipinnis* の雌が、産卵後に雄が卵保護を行っている巣穴の開口部の1つに死サンゴ片や砂粒、小石、貝殻、海藻などを周囲から口で運び込み、高く積み上げてマウンドを作ること報告している。しかしこれまでその機能や役割に関する研究は皆無である。

サザナミハゼと同様に巣穴の開口部の1つにマウンドを作るアナジャコの1種 *Upogebia africana* やプレーリードッグ *Cynomys ludovicianus* においては、そのマウンドに巣穴外の水や大気の流れを利用して巣穴の中の換水あるいは換気を促進する機能があることが知られている^{6),7)}。このマウンドの換水機能にはベルヌーイ効果と流体の粘性が関係していると考えられている^{7)~10)}。すなわち、マウンドが積み上げられた開口部は同じ巣穴の他の開口部よりも速い流れにさらされるため、マウンド頂部

の流体の圧力は他の開口部付近よりも低くなる。その結果、巣穴内の流体はマウンドのある開口部へと移動し、巣穴の外の速い流体に引きずられて排出される。

サザナミハゼの雄は卵が孵化するまで、巣穴の中で鰾や体を使って卵を煽るファニングと呼ばれる行動によって卵に酸素の多く溶け込んだ新鮮な海水を供給している⁵⁾。卵保護期間中の巣穴内の水中酸素濃度は巣の外に比べて低く、巣によっては1.5ml/l 近くまで低下することが知られている¹¹⁾。ファニング行動の頻度およびそれに費やす時間は巣穴内の水中酸素濃度の低下にともなって増加することから¹¹⁾、マウンドが巣穴内の換水を促進する機能を持ち、酸素を多く含む外海水を産卵巣内に供給するならば、雄の卵保護の負担が軽減されることが考えられる。

そこで本研究では、水理実験によりマウンドの換水機能を確認すると同時に、その換水機能に影響すると考えられる幾つかの要因を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

実験は循環水路(長さ25.0m、高さ1.8m、幅0.6m)で行い、水路のやや下流部にアクリル板を加工して実験区画(3.0×0.6×0.05m)を設けた(Fig.1)。また、実験区画の水深は40cmとし、平均流速は2~20cm/sに変化させた。実験中の水路内水温は24.0~24.2°Cであった。

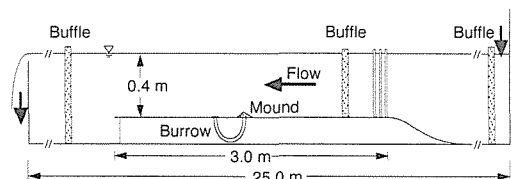


Fig. 1 Sketch of the experimental setup in the flume.

1999年3月1日受付, 1999年4月9日受理

キーワード: ハゼ, 巣穴, 産卵, マウンド, 換水

Key words: Goby, Burrow, Spawning, Mound, Water-exchange.

^{*1} Department of Fisheries, Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi, Fukuoka 812-8581, Japan (九州大学農学部水産学科 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

^{*2} Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi, Fukuoka, 812-8581, Japan (九州大学農学部農業工学科 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

サザナミハゼの巣穴には出入口を含めて複数の開口部が存在するが⁵⁾、本実験は開口部を2つ持つ最も単純な巣穴を想定して行った。上流側の開口部にマウンドを設置し、下流側を出入口とした。実験には1997年の4月～7月に沖縄県今帰仁村長浜海岸（北緯26度42分，東経127度56分）で確認した産卵巣の開口部間の距離（平均開口部間距離 \pm SD=41.7 \pm 18.1cm，範囲=16～110cm， $n=32$ ）と開口部の直径（平均開口部直径：6.8 \pm 0.8cm，5.5～7.8cm， $n=6$ ）を約60%に縮小したもの（開口部間距離：25.0cm；開口部直径：4.0cm）を用いた。ただし巣穴および開口部の形状は利用される岩盤の隙間の形に依存しており一様ではないため，実験にはU字状に加工した透明アクリルパイプ（長さ45.0cm，内径4.0cm）を巣穴として用いた。

水路内流速は電磁流速計（本体；VM-1001型，検出部；VMT3-200-20P型，KENEK社）を用いて，巣穴内の流速はパイプの中央部に白金板電極型濃度計を応用した自作のトレーサー型微流速計プローブを設置して測定した。微流速計は実験前後に検定用管路で校正を行い，その測定精度は0.1～1.7cm/sの範囲で \pm 2.80%であった。

実験区画内の流れのレイノズル数(Re)は3,800～38,000の乱流であった[$Re=UR/\nu$ ，平均流速(U)=2～20cm/s，径深(R)=17.14cm，動粘性係数(ν)=0.009cm²/s]。

実験1：サンゴ片マウンド実験

1) 換水機能の確認および流速とマウンドの高さの影響

まず，マウンドの換水機能を確認するために，巣穴内に着色溶液（アニリンブルー）を注入して巣穴内の流れを観察した。ついで，その換水機能に与える水路内流速およびマウンドの高さの影響を明らかにするために，それぞれの条件を変えて巣穴内の平均流速（換水速度）を測定した。野外で確認されたマウンドは死サンゴ片88%，砂8%，貝殻3%，その他，藻類，有孔虫の骨格などで構成されている（竹垣 未発表データ）が，本実験では，死サンゴ片，砂，貝殻を用いて，前述の巣穴と同様に長浜海岸で確認したマウンドの高さ（平均高さ \pm SD=8.9 \pm 2.4cm，範囲=0.1～13.1cm， $n=44$ ）と直径（平均長径：40.8 \pm 12.8cm，16～70cm， $n=58$ ；平均短径：33.1 \pm 10.9cm，12～55cm， $n=58$ ）を約60%に縮小したもの（高さ：5.0cm；直径：21.0cm）を用いた。ただし換水機能に与えるマウンドの高さの影響を明らかにするため，実験では高さ5.0cmのマウンドの他に3.0cmと4.0cmのマウンドも用いた。下流側の開口部は野外での観察に基づき，マウンドと同じ材料で薄く（厚さ0.8cm）被った³⁾。巣穴の両開口部には材料の巣穴内への脱落を防止するためにステンレスネット（目合い0.2mm）を設置した。

2) シルト添加実験

マウンド表面に堆積する海水中の浮遊物質がマウンドの換水機能に与える影響を明らかにするために，マウンド表面にシルト（粒径64 μ m）を添加する前後の換水速度を比較する実験を行った。長浜海岸の水深約2mの海底に置いた高さ8.0cmのブロックにタイル（10.9 \times 10.9cm）を設置したところ，堆積物の平均乾重量は100cm²あたり0.24g/day（SD=0.04， $n=14$ ）であった。水路内のマウンド（高さ5.0cm，表面積401.9cm²）に卵保護期間中（3日間）に堆積すると予測されるシルト3.0gを約20mlの水と混合し，ピペットでマウンド表面に様に添加した。一定の水路流速7.5cm/sで，シルトを添加する前後の換水速度をそれぞれ8回測定して比較した。

実験2：モデルマウンド実験

マウンドの換水機能と透過率との関係を明らかにするために，試料粉碎用のアルミナボール（3.6g/cm³）の粒径と積層数を変え，すなわち粒径6mm，高さ56.38mm（10段）および粒径8mm，高さ52.76mm（7段），粒径10mm，高さ47.32mm（5段）の3種類のマウンドを用いて実験を行った。なお，マウンドの形状は六角錐型で，アルミナボールは斜方充てんで積み上げた。

3. 結果と考察

巣穴内に注入した着色溶液はいずれの条件においても下流からマウンドのある上流側へ流れ，マウンド表面から流出するのが確認された。アナジャコ⁶⁾やプレーリードッグ⁷⁾のマウンドは巣の開口部の周囲を取り囲むように盛り上げられているため開口部は開かれているが，サザナミハゼのマウンドは開口部が材料で被われていた。しかし巣穴内の水は材料の間隙を通過して排出された。卵保護中の巣穴の中には，ファニングを行う雄と，平均13万個の卵があり³⁾，マウンドによる酸素濃度の高い外海水の巣穴内への供給は，それらの代謝に大きく貢献していると考えられる。

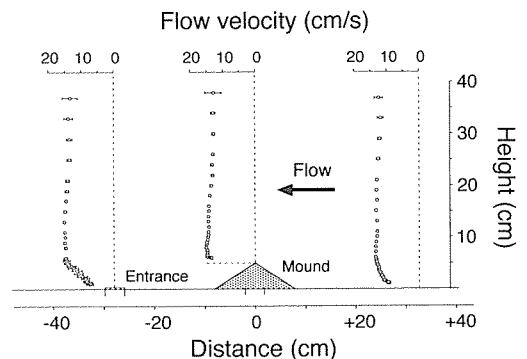


Fig. 2 Flow velocity profiles on the experiment section in the flume. Error bars indicate standard deviation ($n=128$).

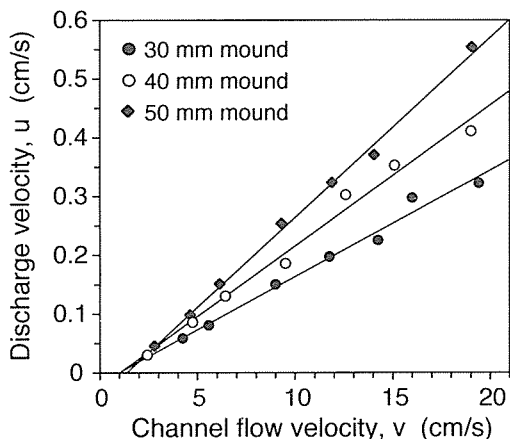


Fig. 3 Experiment 1 (1). Discharge velocity measured at rubble mounds of different heights at selected channel flow velocities.

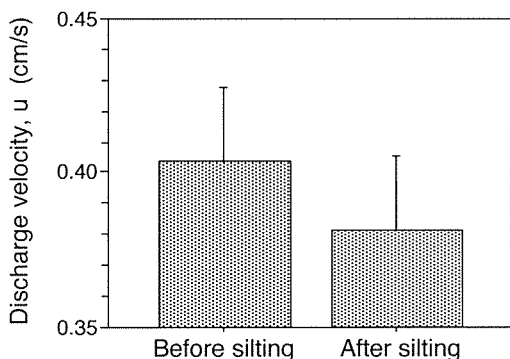


Fig. 4 Experiment 1 (2). Comparison of discharge velocity between before and after silting on the surface of the rubble mound.

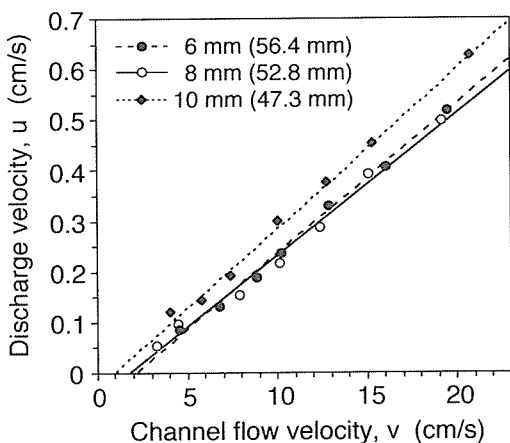


Fig. 5 Experiment 2. Discharge velocity measured at model mounds of different grain size at selected channel flow velocities.

Fig. 2 は平均水路流速 15cm/s 時の粒径 8mm, 高さ 52.8mm (7 段) のモデルマウンドを設置した実験区画内

の流速の鉛直分布である。水路流速 (v) と巣穴内の換水速度 (u) にはいずれのマウンドの高さにおいても正の相関があり (Pearson's correlation coefficient, all $r=0.99$, $p<0.001$, $n=7$; Fig. 3), 換水速度はマウンドが高いほど速かった。これは流速が速くマウンドが高いほど, マウンド頂部と出入口部の速度差に基づく圧力差が大きくなることによるものと考えられる。サザナミハゼのペアは複数所有する巣穴の中の 1 つで繁殖を行うが⁵⁾, 本実験の結果から最適な産卵巣を選択する条件として, より流れの速い場所にあることが可能性として示唆された。また, マウンド表面にシルトを添加した場合の換水速度は, 添加前よりも有意に低下したが (Mann-Whitney U test, $U=12.0$, $p<0.05$; Fig. 4), これはシルトがマウンドの材料の間隙に入り込み, 流体の透過性が悪化したことが原因と考えられる。サザナミハゼの雌は雄が卵を保護している間, マウンド表面の砂を取り除いたり, サング片を組み替えるなどの手入れを行ったが, これはマウンドの換水機能を維持する上で重要な役割があると考えられる。

粒径 10mm のモデルマウンドを用いた実験では, 粒径 6mm と 8mm のマウンドよりも速い換水速度が確認された (one-factor ANCOVA, $F=39.4$ and 40.8 respectively, both $p<0.001$; Fig. 5)。粒径 10mm のマウンドは 3 種類のマウンドの中で高さが最も低いにも関わらず最も高い換水能力を持っていたことから, マウンドの換水率はその透過性に大きく影響されていることが示唆された。粒径 6mm と 8mm のマウンドの換水能力には差が見られなかったが ($F=0.01$, $p>0.05$; Fig. 5), これは 6mm と 8mm のマウンドの場合, 高さの影響と透過性の影響が相殺されたためと考えられる。

4. おわりに

ハゼ類の多くは巣穴に依存した生活様式を持ち, その構造は種によって様々であることが知られている¹²⁾⁻¹⁷⁾。この構造の多様性は, 巣穴がその種の生態あるいは生息環境に適した構造に作られていることを示唆している。ハゼ類は世界中の浅海および淡水域に広く分布しており¹⁸⁾, その生息数も多く, 沿岸域における魚類群集の主要な構成要素となっているが^{19), 20)}, これまで本研究のような物理学, 生態学両面からのアプローチを試みた研究は非常に乏しいのが現状である。このような複合的なアプローチは今後, 沿岸生態系の維持・管理を行う上で, 有益な情報をもたらすものと考えられる。

参考文献

- 1) 田中洋一・鈴木克美・土井淳三: クロイトハゼ *Eleotriodes helsdingeni* の産卵と初期生活史. 東海大学紀要海洋学部, 15, pp. 367-376, 1982.

- 2) Hoese, D.F. and H.K. Larson.: Revision of the Indo-Pacific gobiid genus *Valenciennea*: with descriptions of seven new species. *Indo-Pacific Fishes*, **23**, Bishop Museum Press, Honolulu, pp. 71, 1994.
- 3) 塩原美敏・田中洋一: アカネハゼ *Valenciennea bella* の繁殖生態と卵内発生および前期仔魚. 東海大学紀要海洋学部, **39**, pp. 207-220, 1995.
- 4) Reavis, R. H.: The natural history of a monogamous coral-reef fish, *Valenciennea strigata* (Gobiidae): 2. behavior, mate fidelity and reproductive success. *Env. Biol. Fish.*, **49**, pp. 247-257, 1997.
- 5) Takegaki, T. and A. Nakazono.: Reproductive behavior and mate fidelity in the monogamous goby, *Valenciennea longipinnis*. *Ichthyol. Res.*, **46**, pp. 115-123, 1999.
- 6) Allanson, B. R., D. Skinner and J. Imberger.: Flow in prawn burrows. *Est. Coast. Shelf Sci.*, **35**, pp. 253-266, 1992.
- 7) Vogel, S., C. P. Ellington and D. L. Kilgore, Jr.: Wind-induced ventilation of the burrow of the prairie dog, *Cynomys ludovicianus*. *J. Comp. Physiol.*, **85**, pp. 1-14, 1973.
- 8) Vogel, S.: Organisms that capture currents. *Sci. Amer.*, **229**, pp. 128-139, 1978.
- 9) Vogel, S. and W. L. Bretz.: Interfacial organisms: passive ventilation in the velocity gradients near surfaces. *Science*, **175**, pp. 210-211, 1972.
- 10) Vogel, S.: *Life in moving fluids*. Princeton University Press, Princeton, NJ, pp. xiii + 467, 1994.
- 11) Takegaki, T. and A. Nakazono.: Responses of the egg-tending gobiid fish *Valenciennea longipinnis* to the fluctuation of dissolved oxygen in the burrow. *Bull. Mar. Sci.*, in press, 1999.
- 12) Clayton D. A. and T. C. Vaughan.: Territorial acquisition in the mudskipper *Boleophthalmus boddarti* (Teleostei, Gobiidae) on the mudflats of Kuwait. *J. Zool., Lond.*, **209**, pp. 501-519, 1986.
- 13) 道津喜衛: ビリンゴの生活史. 魚類学雑誌, **3**, pp. 133-138, 1954.
- 14) 道津喜衛・水戸 敏: マハゼの産卵習性および仔稚魚について. 魚類学雑誌, **4**, pp. 153-161, 1955.
- 15) Ishimatsu, A., Y. Hishida, T. Takita, T. Kanda, S. Oikawa, T. Takeda and K. K. Huat.: Mudskippers store air in the burrows. *Nature*, **391**, pp. 237-238, 1998.
- 16) 小林知吉・道津喜衛・田北 徹: 有明海産トビハゼの巣について. 長崎大学水産学部研究報告, **32**, pp. 27-40, 1971.
- 17) 酒井光夫・後藤 晃: 北海道の淡水魚に関する研究—1. 北海道大学水産学部研究彙報, **33**, pp. 9-23, 1982.
- 18) Birdsong R. S., E. O. Murdy and F. L. Pezold.: A study of the vertical column and median fin osteology in gobioid fishes with comments on gobioid relationships. *Bull. Mar. Sci.*, **42**, pp. 174-214, 1988.
- 19) Thresher, R. E.: *Reproduction in reef fishes*. T. F. H. Publications, Neptune City, pp. 399, 1984.
- 20) Lowe-McConnell, R. H.: *Ecological studies in tropical fish communities*. Cambridge University Press, London, pp. ix + 382, 1987.