

## 水槽内の流場制御によるマハタ仔魚飼育

阪倉良孝,<sup>1\*</sup> 萩原篤志,<sup>2</sup> 塩谷茂明<sup>3</sup><sup>1</sup>長崎大学水産学部, <sup>2</sup>長崎大学大学院生産科学研究科, <sup>3</sup>神戸大学海事科学部Flow field control for larviculture of the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus*YOSHITAKA SAKAKURA,<sup>1\*</sup> ATSUSHI HAGIWARA<sup>2</sup> AND SHIGEAKI SHIOTANI<sup>3</sup><sup>1,2</sup>Faculty of Fisheries, Nagasaki University, Bunkyo, Nagasaki 852-8521, <sup>3</sup>Faculty of Maritime Sciences, Kobe University, Kobe, Hyogo 658-0022, Japan

## 1. はじめに

魚類の初期減耗の大きな要因として、飢餓、被食、および物理的条件（たとえば海流による不適切な環境への輸送）が挙げられている。<sup>1)</sup> 魚類の種苗生産では、餌料条件、物理・化学的な水質環境要因を人為的に制御することにより、初期減耗を極力抑えることが大きな課題となる。我が国では30種を超える多くの海産魚種の種苗生産が行われ、既にマダイ、ヒラメなどの魚種では大量の種苗生産に成功している。この量産の成功は、仔魚に適切な餌料種の選定や給餌量、および栄養面の強化といった餌料条件の側面からの基礎研究<sup>2-5)</sup>に基づく技術改善に依るところが大きい。しかし、これらの量産可能魚種の種苗生産でも、安定した量産が常に実現できるとは限らない。この原因としては、親魚の卵質が一定しないことに基づく場合もあり得るが、物理・化学的な水質環境要因が仔魚にとって不適切であった場合もあると考えられる。

一般に魚類の種苗生産水槽では、通気装置によって流場を制御し、温度などの成層の防除や、溶存酸素の確保、生物餌料および人工飼料の拡散が行われている。<sup>6)</sup> 一方、通気による気泡の仔魚への接触は、仔魚に対する物理的な傷害をもたらす上、強い通気は仔魚の摂餌を妨げ、定位するためのエネルギーを過剰に要し、結果的に斃死をもたらすことが懸念される。<sup>7)</sup> 実際には水槽内の流れの管理は飼育技術者の経験と勘に基づいていることが多く、水の流れ方に気を配りながら通気量を調整することを仔魚飼育のコツとして挙げる技術者は多い。実際、魚種によっては、孵化仔魚の体サイズが著しく小さい場合があり、適サイズの餌料種の選定のみならず、飼育水槽内に生じる水流等の物理環境要因の設定を誤ると大量へい死に繋がることも少なくない。したがって、魚類の初期減耗要因の一つである物理的条件の検討もまた、種苗生産の技術開発に基礎知見を供するための重要

なアプローチであると考えられる。

水槽内の物理環境を設定するには、水槽内の流れの速度分布を正確に把握し、さらに通気で生じた流れ自体のコントロールが重要であると思われる。しかし、小規模な角型水槽内の流れの簡易的計測や通気法の検討を行った例は見られるものの、<sup>6)</sup> 厳密に体系立てて計測を行った例はほとんどなく、流場の実態把握はなされていないのが現状である。そこで我々は、流体力学的観点から水槽内の流れの動態を詳細に明らかにし、仔魚の成長・生残との関わりを総合的に明らかにする研究を実施している。本稿では、長崎県地域集結型共同研究事業の一環として、長崎県産業振興財団および長崎県総合水産試験場との共同研究によって得られたマハタの仔魚飼育研究の最近の知見を述べる。本種を含む温帯・熱帯産のハタ科魚類は日本および東南アジア諸国で、商品価値の高い重要な水産資源であるが、ハタ類の種苗生産では、孵化以降に見られる大量減耗によって、未だ安定した十分な種苗生産に至っていないのが現状である。<sup>8)</sup> これは、孵化時の全長が2mm前後と魚類の中でも小さい体サイズのハタ類仔魚が、通気のための気泡により水面に運ばれ、粘液の分泌<sup>9)</sup>と水面の表面張力によって動けなくなりへい死する、いわゆる「浮上へい死」<sup>10)</sup> 個体数が多いためである。また、ハタ類仔魚は、他の種苗生産対象魚種に比べてハンドリングなどの物理的なストレスに対して特に弱い。<sup>11)</sup> したがって、小型餌料の給餌による初期摂餌の改善もマハタ仔魚飼育には重要な要素ではあるものの、<sup>12)</sup> 水流が本種の初期減耗に与える影響は、他の種苗量産可能魚種よりも特に強いと判断される。このように、ハタ類の種苗生産技術開発は、飼育水槽内の流れを定量的に研究することによって、飛躍的進歩を遂げる可能性がある。

## 2. 小型水槽による飼育実験と流場の定量

まず、我々は小型水槽（容量1kLのパンライト水

\* Tel/Fax : 81-95-819-2823. Email : sakakura@net.nagasaki-u.ac.jp

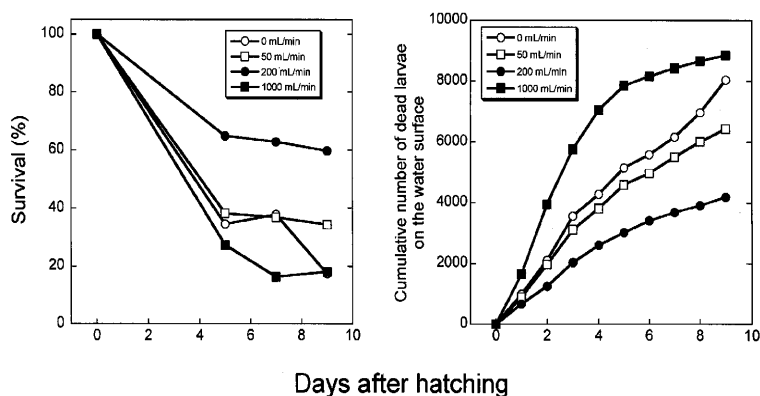


図1 異なる通気量で飼育したときのマハタ仔魚の生残率(左図)と累積浮上斃死数の変化(右図)(塩谷ら<sup>12)</sup>)

槽：水面直径 140 cm，水深 70 cm）によるマハタ仔魚飼育実験と流場の定量に着手した。<sup>13)</sup>水槽底面の中央に設置したエアストーン（直径 5 cm）に通気することで流れをつくり，4段階の通気量（1,000, 200, 50, 0 mL/min）で 10 日齢までの仔魚飼育を実施し，生残，成長，累積浮上斃死数を調べた。あわせて，水槽内の流場を 200 点以上にわたって三次元流速計により定量した。その結果，200 mL/min の通気量もっとも生残・成長が高く，逆に浮上斃死数は最も少なくなることが明らかになった（図 1）。水槽内の流場をみたところ，エアストーンから生じた気泡による水槽中心の上昇流から時計回りの循環流が形成されており，水平方向の流れは非常に弱いことが明らかになった（図 2）。通気量 200 mL/min の場合，平均流速ベクトルで見た流れの強さは，水槽底部で弱く，上向きに次第に加速され，中央の深さで最も速くなった（約 8 cm/s）。しかし，水面付近では自由表面境界のため逆に弱くなり，それによって水平方向の流れ（約 6 cm/s）が顕著となった。各測点での循環流の強さの比較のため，循環流中心部の穏やかな流れのオーダーを 1 とすると，水面付近の水平流れが 10，水槽中央部の上昇流が 10<sup>2</sup> のオーダーにも達することがある。もし初期飼育段階での仔魚にとって，循環流の中心部分が最適な環境であるとすれば，このように高いオーダーを示す場所では，仔稚魚に与える流れの負荷が相当大きく何らかの影響を与えるものと考えられる。

魚類の資源変動予測と初期減耗要因解明の観点から，海洋の乱流条件の違いや，実験的に水槽内で通気量を変化させることにより生じる流れ（乱流と記述されることが多い）と，仔稚魚の成長・生残および摂餌効率を調べた研究は多い。<sup>14-16)</sup>他のハタ科魚類についても，水槽内の通気量と孵化仔魚の生残を調べた例はあるが，いずれも生残率の高い特定の通気量が報告されている。<sup>10,17)</sup>しかし，種苗生産という応用的な視点から，形状および容量の異なる水槽で実施されたこれらの実験を標準化して比較し，仔魚飼育に適した水流を評価するにまでは至っ

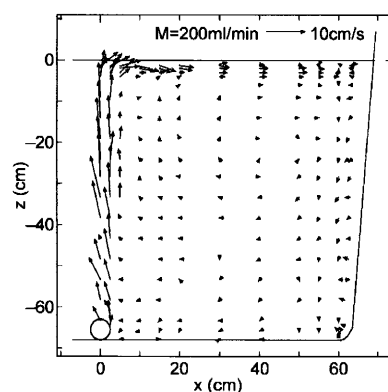


図2 1 kL パンライト水槽（直径 140 cm，水深 70 cm）にマハタ仔魚飼育に最適な通気量（200 mL/分）で通気したときの鉛直方向の流場（塩谷ら<sup>12)</sup>）  
個々の矢印は，測点での水流のベクトルを示す。

ていない。マハタについてもこれらの研究結果と同様に，湧昇強度が中程度で仔魚の生残，成長および摂餌状況が最大になることが示されたが，さらに水槽内の流場を定量・可視化することによって得られた本研究の成果は，どのような流れが仔稚魚の生残や成長に適しているのかを具体的に評価する上で意義深いものと考えられる。

水槽内の流場を定量・可視化することは，種苗生産の流場制御をデザインするにあたり，具体的なイメージを提供することができる。しかし，形状や水量の異なる水槽のセッティングに対して，すべての流場を測定することは事実上困難であろう。また，塩谷ら<sup>13)</sup>と同じ形状・通気装置を備えた水槽であっても，魚種によって飼育に最適な流れは異なることが我々の研究プロジェクトの中でも次第に明らかになってきている上，<sup>18)</sup>水槽の流場測定には相当の時間と労力を要する。そこで，円形水槽について，水槽中央底部にエアストーンを置き，通気量および水槽の形状・容量を変化させた場合の流場を予測するシミュレーションプログラムを開発した。<sup>19)</sup>本プログラムは，形状・容量の異なる円形水槽を用いて通気量を変化させたときの水槽内の流場の実測値に基づいて作

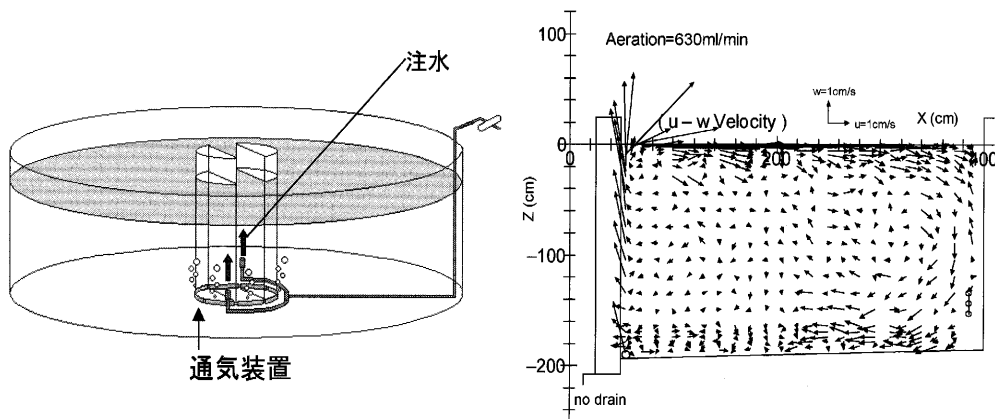


図3 長崎県総合水産試験場の100 kL水槽（直径8 m，水深2 m）で実施したマハタ仔魚飼育用の通気法（左図）と仔魚飼育時の通気量（630 mL/分）の時の水槽内の鉛直方向の流場（右図）<sup>20)</sup> 個々の矢印は、測点での水流のベクトルを示す。

成したもので、その予測精度および実用性は極めて高い。

### 3. 大型水槽での流場制御とマハタ仔魚生残率の向上

次に、小型水槽で得られた成果を、長崎県総合水産試験場でマハタ仔魚飼育に使われている大規模量産水槽（直径8 m，水深2 m，容量100 m<sup>3</sup>）へと展開した。<sup>20)</sup> 大型種苗生産水槽では、通常エアストーンやエアブロックなどの通気装置を水槽内に複数設置することが一般的であり、長崎県総合水産試験場でも2001年度までは同様の飼育技法で、10日齢の生残率は平均21%にとどまり、大きく変動していた。そこで、大型水槽でも小型水槽で得られたマハタ仔魚飼育に最適な上昇流（約8 cm/s<sup>13)</sup>と同様の流場を形成することで、生残率が改善できるという仮説を立て、2002年度に排水用ドレンを取り囲む形で通気装置を水槽中央に集約した（図3）。その結果、10日齢時の生残率は平均61%と従来の3倍の生残率を達成し、しかも飼育事例を重ねても生残率がこれまでより安定していることが明らかになった。2003年度以降も同様の飼育技法での飼育を継続し、生残率は安定していることから、小型水槽による飼育実験の成果が、大型水槽にも応用可能であることを示すことができた。本飼育技法での通気量は630 mL/minと、水槽の規模からすると比較的少ないように思われるが、水槽内の流場を測定したところ、通気装置により生じた気泡に伴う上昇流の流速は約8 cm/sであった（図3）。この水槽内の流場を精査すると、気泡に伴う上昇流の近傍に1-2 cm/sのごく弱い上昇流域が形成され、マハタ仔魚は常にこの上昇流域の外側に分布していた。これらのことから、マハタ仔魚は気泡およびそれに付随する急激な上昇流と排水装置の網に接触せず、物理的傷害を受けることが少なかったために、このような高生残率を保つことができたと考えている。

### 4. 通気によらない仔魚飼育の可能性

マハタ仔魚飼育では、浮上斃死防止を目的として、飼

育水槽水面に油膜を形成することが広く行われている。<sup>12,21)</sup>ところが、飼育水槽の水面に生じる油膜は、仔魚の鰓開腔を阻害し、その後の発育阻害や形態異常の原因となることから、<sup>22,23)</sup>マハタ仔魚飼育についても現在対処療法的に行われている油膜形成に対する懸念は大きい。<sup>21)</sup>また、一部の魚種については、卵白などのタンパク質を飼育水に添加して水の粘性を上げることで、浮上斃死を防止できることも報告されているが、<sup>24,25)</sup>大型水槽にこのような物質を添加することは、水質悪化やコストといった問題を考えると必ずしも得策とは言いがたい。そこで、飼育水槽に油膜を形成したり添加物を投入することなく、かつ通気による物理的傷害を除くために、直径5 cmの球を水面で上下させる（1 Hz）ことにより水面に波を発生させる造波装置を作製した（図4）。<sup>26)</sup>飼育水槽に1 kLパンライト水槽を用い、対照として200 mL/minの通気で油膜形成をこれまでの飼育技法とで、21日齢までのマハタ仔魚飼育を行い、仔魚の生残を比較した。その結果、21日齢の生残率は対照区が11.6%であったのに対し、造波装置では55.5%という過去にない高生残率を示した。さらに、造波装置を用いた飼育では、油膜形成をしていないのにもかかわらず、浮上斃死は全く観察されなかった。本実験については、まだ1例の飼育実験しか行っていないために、飼育システムそのものの評価にはさらに再現性試験を繰り返す必要があるが、通気によらない飼育技法の可能性を示すものとして注目に値するといえよう。

### 5. まとめと今後の展望

マハタの種苗生産飼育水槽内の流場を流体力学的に定量・可視化することによって、小型水槽のみならず量産規模の大型水槽でも仔魚飼育に最適な流場のデザインを的確に実施できることを示した。飼育水槽の流場は従来経験的に制御されており、水槽の形状や水量によって大きく異なる。したがって、これまでの種苗生産や仔魚飼育実験では、ある生命現象や生理現象の一般化や、実験

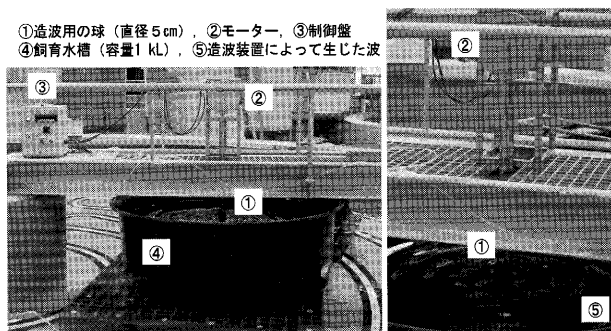


図4 造波装置の外観<sup>26)</sup>

間の比較を統一的行うことに困難を伴うという問題点を含んでいた。例えば、魚類の種苗生産では、卵および孵化仔魚の質、いわゆる「卵質」の問題が必ずついて回るが、飼育技法が標準化・統一化されない以上は、症例の積み重ねに終始せざるを得ず、問題解決に時間がかかることはいうを待たない。そのような背景の中で、今回紹介したような研究アプローチは、従来の飼育技法に内包されていた経験値を実測値に変え、飼育環境を最適化する上で、きわめて大きな意義を持つと考える。さらに、このような定量的な流れの計測によって、他の魚種の種苗生産技術改良にも大いに適用可能であると考えられる。

#### 文 献

- 南 卓志. 初期減耗研究の方法論 ; 研究の歴史. 「魚類の初期減耗研究」(田中克, 渡邊良朗編) 恒星社厚生閣, 東京. 1994; 9-20.
- Watanabe T, Kiron V. Prospects in larval fish dietetics. *Aquaculture* 1994; **124**: 223-251.
- Takeuchi T. A review of feed development for early life stages of marine finfish in Japan. *Aquaculture* 2001; **200**: 203-222.
- 萩原篤志. 海産魚の初期餌料 : 餌料生物ワムシの生物機能と種苗生産への応用. *水産増殖* 2002; **50**: 473-478.
- Kotani T, Fushimi H, Suzuki H. Cultivation and application of copepod and cladoceran for larval rearing in Japan: past, present and future. In: Hendry CI, Van Stappen G, Wille M, Sorgeloos, P (eds), *Larvi '05 Fish & Shellfish Larviculture Symposium, European Aquaculture Society Special Publication No. 36*, Oostende. 2005; 256-257.
- Backhurst JR, Harker JH. The suspension of feeds in aerated rearing tanks: the effect of tank geometry and aerator design. *Aquacultural Engineering* 1988; **7**: 379-395.
- Tucker Jr JW. The rearing environment. In: Tucker Jr JW (ed) *Marine Fish Culture*. Kluwer Academic Publishers, London. 1998; 49-148.
- Fukuhara O. A review of the culture of grouper in Japan. *Bull. Nansei Reg. Fish. Res.* 1989; **22**: 47-57.
- Kaji T, Yamaoka K, Isshiki T, Yamada T. Mucus cell development on the body surface in larvae of red spotted grouper, *Epinephelus akaara*. *Bull. Mar. Sci. Fish. Kochi Univ.* 1995; **15**: 117-120.
- Yamaoka K, Nanbu T, Miyagawa M, Isshiki T, Kusaka A. Water surface tension-related deaths in prelarval red-spotted grouper. *Aquaculture* 2000; **189**: 165-176.
- 照屋和久. クエ種苗生産の初期減耗対策. 月刊養殖 2002; **39**: 66-69.
- 田中由香里, 阪倉良孝, 中田 久, 萩原篤志, 安元進. マハタ仔魚のワムシサイズに対する摂餌選択性. 日水誌 2005; **71**: 911-916.
- 塩谷茂明, 赤澤敦司, 阪倉良孝, 中田 久, 荒川敏久, 萩原篤志. 仔魚飼育水槽内の流場の計測 : マハタ飼育水槽の検討例. *水産工学* 2003; **39**: 201-208.
- Cury P, Roy C. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1989; **46**: 670-680.
- Utne-Palm AC, Stiansen JE. Effect of larval ontogeny, turbulence and light on prey attack rate and swimming activity in herring larvae. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2002; **268**: 147-170.
- 木村伸吾, 中田英昭, Margulies D, Suter JM, Hunt SL. 海洋乱流がキハダマグロ仔魚の生残に与える影響. 日水誌 2004; **70**: 175-178.
- Toledo JD, Caberoy NB, Qunitio GF, Choresca CH, Nakagawa H. Effects of salinity, aeration and light intensity on oil globule absorption, feeding incidence, growth and survival of early-stage grouper *Epinephelus coioides* larvae. *Fish. Sci.* 2002; **68**: 478-483.
- 安藤嘉英, 門村和志, 阪倉良孝, 萩原篤志. 通気量がオニオコゼの初期成長・生残に与える影響. 平成17年度日本水産増殖学会講演要旨集 2005; 16.
- Shiotani S, Hagiwara A, Sakakura Y, Chuda H. Estimation of flow in a rearing tank of marine fish larvae by simplified numerical computation-A case of two-dimensional flow. *Aquacultural Engineering* 2005; **32**: 465-481.
- 塩谷茂明, 阪倉良孝, 中田 久, 赤澤敦司, 萩原篤志, 安元 進. 通気法改良によるマハタの初期生残向上. 平成15年度日本水産学会春季大会講演要旨集 2003; 151.
- 土橋靖史, 栗山 功, 黒宮香美, 柏木正章, 吉岡 基. マハタ種苗生産過程における仔魚の活力とその生残に及ぼす水温, 照明およびフィードオイルの影響. *水産増殖* 2003; **51**: 49-54.
- 北島 力, 塚島康生, 藤田矢郎, 渡辺 武, 米 康夫. マダイ仔魚の空気飲み込みと鰾の開腔および脊椎前彎症との関連. 日水誌 1981; **47**: 1289-1294.
- Howell BR, Day OJ, Ellis T, Baynes SM. Early life stage of farmed fish. In: Black KD, Pickering AD (eds) *Biology of Farmed Fish*. Sheffield Academic Press, Sheffield. 1998; 27-66.
- Tagawa M, Kaji T, Kinoshita M, Tanaka M. Effect of stocking density and addition of proteins on larval survival in Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Aquaculture* 2002; **230**: 517-525.
- Kaji T, Kodama H, Arai H, Tanaka M, Tagawa M. Prevention of surface death of marine fish larvae by the addition of egg white into rearing water. *Aquaculture* 2003; **224**: 313-322.
- 阪倉良孝, 塩谷茂明, 萩原篤志. 水流がマハタの初期生残に与える影響 : 造波装置による飼育事例. 平成17年度日本水産学会講演要旨集 2005; 103.