

仔魚飼育モデル水槽内のフローパターンの観察

誌名	水産工学
ISSN	09167617
著者名	角田, 哲也 川原, 秀夫 塩谷, 茂明 阪倉, 良孝 萩原, 篤志
発行元	日本水産工学会
巻/号	48巻2号
掲載ページ	p. 99-108
発行年月	2011年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



【研究論文】

仔魚飼育モデル水槽内のフローパターンの観察

角 田 哲 也^{1*}・川 原 秀 夫¹・塩 谷 茂 明²
阪 倉 良 孝³・萩 原 篤 志⁴

Observation of Flow Pattern in a Model of Rearing Tank for Marine Fish Larvae

Tetsuya SUMIDA^{1*}, Hideo KAWAHARA¹, Shigeaki SHIOTANI²,
Yoshitaka SAKAKURA³ and Atsushi HAGIWARA⁴

Abstract

Flow field in rearing tank is generated by aerators, however, few studies evaluating such flow field in detail had been conducted. In the present study, we attempted to clarify the relationship between the flow pattern and the topological character on a vertical cross section through the flow. The effect of aeration rate and aspect ratio (the ratio of water depth to tank radius) on overall flow pattern was investigated experimentally, by use of flow visualization techniques. The results showed that flow patterns were classified into 2 cases, namely 1 vortex pair and 2 vortex pairs systems, as the value of aspect ratio varies almost 1.0 to 2.0, respectively. On the other hand, the change of aeration rate weakly affected these change of vortex pair systems. In addition, corner vortex structures were observed in the both region between the free surface and the upper side wall, and between the bottom wall and the lower side wall. On the side wall, reattachment and separation points were found, which were closely related with these vortex structures.

1. 緒 言

魚類の種苗生産上の重要な問題点は、初期減耗とよばれる卵から孵化した仔魚が稚魚になるまでの期間における死亡率である。初期減耗の主要因として、天然水域の場合、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¹⁾。

種苗生産においても物理的な環境の制御は重要な要素であるが、一般に、魚類の種苗生産水槽では通気装置によって水槽内の流れを制御する方法がとられる。しかし

ながら、その管理は水の流れを目視で監視するなど五感を活かした飼育技術者の経験と勘に頼ることが多いため、飼育技術者によってそのノウハウが若干異なる。それに加えて通気設定を少しでも誤ると、大量へい死に繋がることも生じ得る。たとえば、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、結果的にへい死をもたらしことが懸念される²⁾。一方、通気が少なすぎると渦中心部の流れはほとんどいわゆる死水となり、仔魚飼育に適さないことが報告されており³⁾、仔魚飼育に最適な通気量の存在を示唆する。これらの点を考

2011年1月17日受付, 2011年5月26日受理

キーワード: フローパターン, アスペクト比, 飼育水槽, 流れの可視化, トポロジー

Key words: Flow pattern, Aspect ratio, Rearing tank, Flow visualization, Topology

¹ Shipping Technology Department, Oshima College of Maritime Technology, Komatsu 1091-1, Suooshima 742-2193, Japan (大島商船高等専門学校商船学科, 〒742-2193 山口県大島郡周防大島町小松1091-1)

² Organization of advanced Science and Technology, Kobe University, 5-1-1 Fukae-Minami, Higashinada, Kobe, 658-0022, Japan (神戸大学自然科学系先端融合研究環, 〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

³ Faculty of Fisheries, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo, Nagasaki, 852-8521, Japan (長崎大学水産学部, 〒852-8521 長崎市文教町1-14)

⁴ Graduate School of Science and Technology, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo, Nagasaki, 852-8521, Japan (長崎大学大学院生産科学研究科, 〒852-8521 長崎市文教町1-14)

*Tel: 0820-74-5518, Fax: 0820-74-5518, sumida@oshima-k.ac.jp

えると、魚類の初期減耗要因の一つである適切な物理的環境の確保は、種苗生産の技術開発にとり基礎的知見を与えるための重要なアプローチといえよう。具体的には、種苗生産水槽の使用状況に応じた水槽内のフローパターンの作成、さらには速度分布からのシミュレーションが可能となるように正確な流場を把握する必要がある。これにより初めて、通気による水槽内の流場の制御が可能になると思われる。

飼育水槽内の流れに関する研究を概観すると、小規模な角型水槽内の流れの簡易計測や通気の効果を検討した例は見られるが⁴⁾、水槽内の流場を系統的に計測した例は少なかった。近年、マハタの種苗生産水槽内の流場を定量的に調べた一連の研究によって^{3), 5)~8)}、1kLおよび100kL容量の円筒型水槽について中心軸を含む鉛直断面のAspect比 AR (以下、 AR と記す) が1以下の流れを超音波流速計で計測し、断面内で鉛直循環流が発生することが定量化された。さらに、同一水槽を用いた仔魚飼育実験を通じて通気により発生する流場と仔魚の生残率との関係が明らかにされ、各々の規模の水槽で仔魚飼育に最適な流場が求められるようになった^{3), 6)~8)}。ただし、超音波流速計の計測原理上、壁面および水表面近傍の速度は計測できていない。また、Ruttanapornvareesakulら⁹⁾は通気量 Q (以下、 Q と記す) が50mL/min、水量一定(100L)の下で、水槽半径と液深を変えた3種類の円筒型水槽において、マハタとオニオコゼの仔魚飼育実験を実施した。その結果、両種ともに仔魚の生残率は、直径が小さく液深が深い (AR が大きい) 水槽ほど高いことを報告し、水槽内の仔魚の行動の目視観察から自由表面の面積が小さい水槽ほど表面張力で捕捉されて死ぬ、いわゆる浮上死の数が少ないことを見いだした。しかしながら、この研究では水槽内の流れと仔魚の水槽内の分布の関係までは調べられていない。

さて、円筒型水槽の鉛直断面内流れを2次元対称流と見なし、2次元溝内部流れと比較することを試みる。溝内部の流れ場は2次元壁面流中の単一溝あるいは連続溝粗面流として多くの研究がなされている^{10)~13)}。その中、Taniら¹⁰⁾は溝内の表面圧力と速度分布の測定から、溝を越える流れは溝の深さと幅の比が0.7付近で著しく変化すると報告している。この結果を参照すると、円筒型飼育水槽内でも AR によってフローパターンが変化する可能性がある。これより、水槽内のフローパターンの変化を精査して制御できれば、上述したRuttanapornvareesakulら⁹⁾の飼育実験の生残率向上の要因に物理的要素、すなわち流れがどのように影響を与えているかを明らかにすることができると思える。

ところで、前述のRuttanapornvareesakulら⁹⁾の3種類の飼育実験水槽は我が国の種苗生産機関で汎用されているポリカーボネイト製水槽 (SPS-200, SPS-100, SLP-100,

いずれも(株)田中三三郎商店)で、底面から上方に向かい直径がわずかに増加する形状である。そこで、便宜上、水の体積と液深から水槽平均半径を求めて AR を算出すると、その値はそれぞれ、 $AR=0.74$ 、 1.36 および 3.29 になる。彼らの飼育実験結果では、 $AR=0.74$ と 1.36 の水槽では生残率はそれぞれ5.3~7.3%、4.6~7.3%であるのに対し、 $AR=3.29$ の水槽では16~36.4%と高い値を示した。このため $AR=1.36$ と 3.29 との間でフローパターンが著しく変化した可能性が推測できる。

以上の点をふまえて、本研究では Q と水槽の AR を変化させた場合について、水表面、底壁面および側壁面のごく近傍までの広い領域のフローパターンを流れの可視化によって明らかにする。得られたフローパターンから、溝構造とその存在理由を簡単な解析から実証し、種苗生産水槽の流場の改善制御に寄与することを目的とする。

2. 材料と方法

1) 実験装置

実験に用いた円筒型飼育水槽は、寸法が内径 $2r_i=390$ mm、外径400mm (厚さ5mm)、高さ590mmであり、材質は透明アクリル樹脂製である。水槽内の流体はフローパターンの観察のみが目的のため、清水 (水道水) を用いた。可視化実験の際、透過光の屈折による歪みを防止するために、円筒型水槽の外側に断面が500mm×500mmで高さ500mmの角形水槽を設置し、その間に水を封入した。実験装置をFig.1に示す。実験は水槽内に導入した空気の流量 (通気量) Q を10、25および50mL/minの3種類とした。 Q はエアポンプ (テクノ高視製, SPP-6GA) から送風される空気量を三方コックで調整し、必要空気量となるように制御した。なお、通気量は1分間当たりの吐出空気量を水槽内でピーカーを用いて直接捕集し、数回の計測の平均値とした。液深は投影断

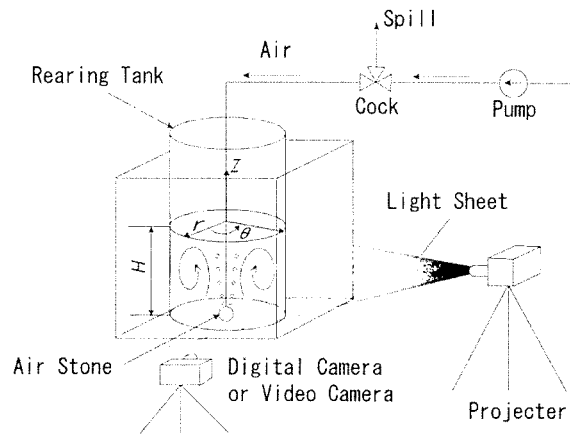


Fig. 1 Experimental apparatus and coordinate system.

面内 $AR (=H/r_i, H$ は液深, r_i は水槽半径)の値に応じて変化させた。なお, AR は0.5, 1.0および2.0に変化させた。実験時の水温はおおよそ25°Cの一定に調節した。

2) 可視化方法

可視化方法は細部の状況を詳細に判別できるように, 場合に応じて懸濁法と色素流脈法を併用した^{14)~16)}。まず簡単に, それぞれの可視化法について述べておく。色素流脈法は色素液をトレーサとして流れの中に注入し, トレーサの描く流脈を観察する方法である¹⁵⁾。色素液は光に対して蛍光するフルオレセインナトリウム溶液を使用した。実験に際して, 色素液に少量のアルコールを混ぜて水の比重に一致するように調節した。色素液注入管は外径1.06mm (内径0.7mm) のステンレス管を観察に適した位置に配置し, 注入管に接続する液タンクの位置ヘッドを利用して, 色素液を流れ場になめらかに注入した。

一方, 懸濁法とは流れ場中に微小の固体トレーサを直接注入し, 水と懸濁させた後, そのトレーサを追跡観察してフローパターンを求める方法である¹⁵⁾。本実験に用いたトレーサは比重2.7, 平均粒径40 μ mのアルミ粉である。アルミ粉と水との質量比は 4.31×10^{-7} に固定して実験した。アルミ粉と水との親和性をよくするため, アルミ粉を一旦アルコールに混ぜてから水面下に注入した。なお, アルミ粉の沈降速度 Ug をStokesの抵抗法則¹⁵⁾から評価すると, $Ug = 1.64$ mm/sであり, 極めて小さいので, 沈降速度は無視した。電子顕微鏡で撮影したアルミ粉の拡大写真(500倍)をFig.2に示す。写真に見られるように, アルミ粉は尖った扁平状で複雑な形状をしており, アルミ粉の姿勢によっては光をよく反射する場合と反射しない場合がある。

可視化に用いた光源はスライドプロジェクター(理化学製, HILUX-HR)を使用した。光源部にスリットを入れたフィルムを挿入し, 幅20mmのスリット光源とした。さらに光が水槽に入射する位置に幅10mmのスリッ

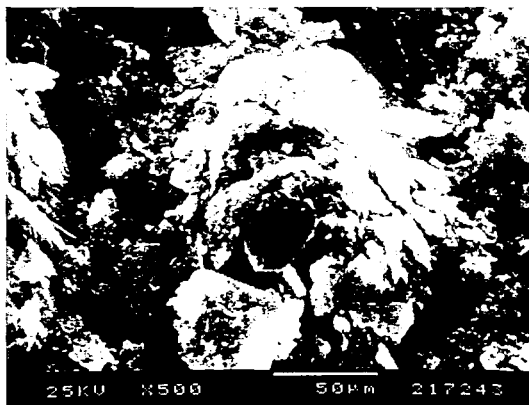


Fig. 2 Enlarged photograph of tracer particle (aluminum powder).

トをもつ黒紙を貼り, 水槽内には幅10mmのスリット光源のみが入射するように工夫した。可視化画像は光路に対して90°の方向から¹⁶⁾ デジタルカメラ(CANON製, D70)で撮影した。また, 動画はビデオレコーダー(SONY製, HDR-SR12)で撮影するとともに, HDDレコーダー(SONY製, BDZ-T55)にも保存した。ところで, 水槽内の鉛直断面($r-z$ 面)全域にわたるフローパターンの可視化において, $\theta = 0^\circ$ (観察方向に対して鉛直となる面, スリット光の照射面内), 45° および 90° について予備実験をしたところ, θ によらずほぼ同様の結果が得られた。したがって, 本論文では $\theta = 0^\circ$ の結果を代表として報告する。

3) フローパターンの推定方法

可視化観察によるフローパターンの確認と概略的な模式図を示すため, Huntら¹⁷⁾によるトポロジ的考察を適用する。ここで, この考察について簡単に説明する。2次元の力学系は一般に式(1)で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

Huntは式(1)の行列の要素に流体力学の変形速度を適用した。すなわち, 2次元定常流における流体点の運動は式(2)で表現される。式(2)は2次元曲線場の平衡点(よどみ点)近傍の挙動が線形化された式である。物体表面からの距離を0に近づけた流線を限界流線という¹⁴⁾が, 限界流線の接線はその点における表面摩擦応力の方向に一致する。平衡点近傍の限界流線パターンは行列の各要素の組み合わせによって表現可能である。Huntは空間中出现する平衡点(鞍点, 結節点)の他に物体表面上の平衡点を面内流れて見たときの点(半鞍点, 半結節点)の概念を導入し, 流れ場に位相的なルール(平衡点の種類と個数の関係式)を適用している。物体を切断する平面上の面内流線に関し示したものが式(3)である。着目する流線に関して式(3)が成立すれば, 推測したフローパターンが存在することを示したものである。これにより推測した渦構造が, 現実の流れの可視化による観察から見られるものと同一であると解釈できる。

$$\left(\Sigma_N + \frac{1}{2} \Sigma_{N'} \right) - \left(\Sigma_S + \frac{1}{2} \Sigma_{S'} \right) = 1 - n \quad \dots\dots(3)$$

ここで, $\Sigma_N, \Sigma_{N'}, \Sigma_S, \Sigma_{S'}, n$ はそれぞれ結節点(Nodal Point), 半結節点(Half Nodal Point), 鞍点(Saddle Point), 半鞍点(Half Saddle Point)の総数および流れ場の連結数である。結節点, 半結節点, 鞍点および半鞍点は力学系で使用される用語である¹⁸⁾, また, 連結数は

複素関数論で用いられる用語（任意の領域内Dにどんな単一閉曲線Cを描いても、Cの内部がDの点ばかりであるとき、Dを単一連結領域という）である¹⁹⁾。ちなみに、本流れ場は単一連結領域を対象としているので、 $n=1$ である。

3. 結果

1) 鉛直断面内のフローパターン

(1) アスペクト比がフローパターンに及ぼす影響

Fig.3, Fig.4およびFig.5は、 $Q=50\text{mL}/\text{min}$ 一定における $AR=0.5$, 1.0 および 2.0 の場合の水槽内全域のフローパターンを可視化した写真を示す。写真では渦構造が判別しにくいのが、Fig.3 ($AR=0.5$) および Fig.4 ($AR=1.0$) では水槽内の左右領域に1対、Fig.5 ($AR=2.0$) では左右領域の上段、下段に2対の寸法の大きな渦構造が存在している（なお、フローパターンの模式図は後述のFig.11を参照）のが見られる。

まず1対の渦構造を示す場合の代表として、Fig.4の循環流れについて結果を述べる。なお、図示していないが動画観察を加えて検討する。水槽底部中央に配置した直径25mmのエアストーンから発生した気泡の上昇に伴い、流体（水）は水槽底面付近から水表面に向かい上昇し、水表面付近で向きを半径方向に転じ、円形水槽側面まで輸送される。円形側壁面に到達した水は側壁面に沿うように向きを変え下降し、水槽底面付近でさらにその向きを半径方向中心向きに転じる。この水の水槽内における大循環により大きな渦 (N_1) 構造が形成される。なお、水表面ではエアストーンからの気泡が一部大気中へ放出されるが、その放出量は水槽内の液深が浅いほど著しい。また、水表面の水は流動が抑制されほとんどよどんでいるが、表面パターンを注意深くみると緩やかながら複雑な流動を呈している。一方、水表面の直下すぐ近傍では、かなり大きい速度の流体が中心付近から半径方向放射状に移動している。また、水槽中央部にはエアストーンからの気泡上昇も明白に見られる。なお、Fig.3の可視化写真の渦構造が不鮮明であるが、これは動画観察によると、この条件の場合、液深が浅いため水表面から多量の気泡が抜け、そのため水槽底面から水表面に向かう気泡とともに上昇する液体の速度（アルミ粉の動き）は小さくなり、ひいては渦の循環速度が小さくなったためと思われる。なお、液深と気泡の上昇速度の関係を別途計測（図示していない）しているが、上昇速度は液深が浅いほど緩やかであった。

次に、2つの渦対構造を示した $AR=2.0$ の場合（Fig.5）について、フローパターンを述べる。

図から明白に見られるように、上半面領域に左右1対の渦 (N_1) とその下半面領域に左右1対の渦 (N_2) が存在している。動画観察によると、上半面側の1対の渦

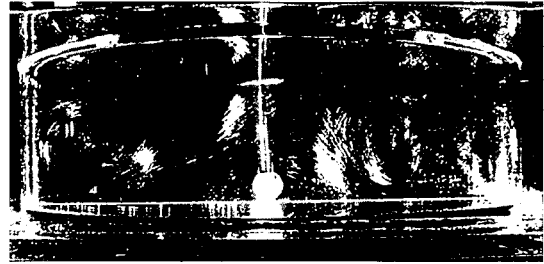


Fig. 3 Flow visualization of overall flow pattern in vertical cross section at $AR=0.5$.



Fig. 4 Flow visualization of overall flow pattern in vertical cross section at $AR=1.0$.

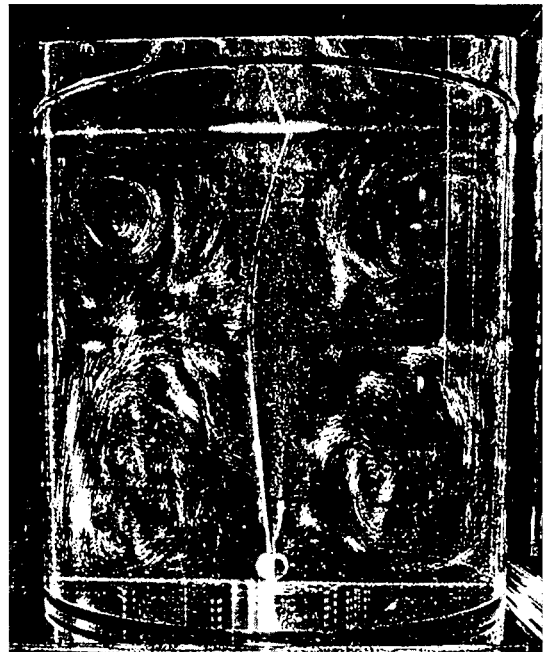


Fig. 5 Flow visualization of overall flow pattern in vertical cross section at $AR=2.0$.

(N_1)は断面中心領域で上方に向かう流れであり、一方、下半面側の1対の渦 (N_1')は断面中央近くで下方に向かう流れであり、両者の回転方向は反対である。なお、循環する渦構造がもつ速度は直視観察によれば、上半面側の方が大きい。以上に示したフローパターンの傾向は、 $Q=10\sim 50\text{mL}/\text{min}$ の範囲内では Q にほとんど無関係に、 AR のみに依存して変化する。 AR が2.0で見られる2対の渦構造フローパターンは従来の研究結果では報告されておらず^{3), 5)~8)}、仔魚飼育技法にとり興味深い結果である。

(2) 水槽角部および円形側壁面近傍の渦構造

3章(1)項において、水槽全領域のフローパターン、特にスケールの大きい渦構造について説明した。その観察結果を詳細に吟味すると、これまでの研究^{3), 5)~8)}では必ずしも明らかとはなっていない渦構造が、水槽角部の水表面付近と底壁面近傍および鉛直側壁面の局所位置に見られたので、これについて述べる。Fig.6~Fig.8は $Q=50\text{mL}/\text{min}$, $AR=2.0$ の場合における可視化写真である。

Fig.6は水槽左側角部の水表面近傍における渦構造(水表面コーナー渦とよぶ)を示す。アルミ粉の軌跡は水表面付近では、水槽中央領域から円形水槽側壁に向かってつれ向きを変え、下方に移動している。その際、水表面近傍角部で閉じた三角形領域を形成し、渦構造(写真では時計回りの渦 N_1)を呈している。この渦構造は円形水槽の縁の回りに形成されたリング状の渦輪の断面が可視化されていると推測できる。この水表面コーナー渦は本実験の範囲内で AR と Q を変化させた場合、常に観察され、また渦の回転方向は同一であった。なお、

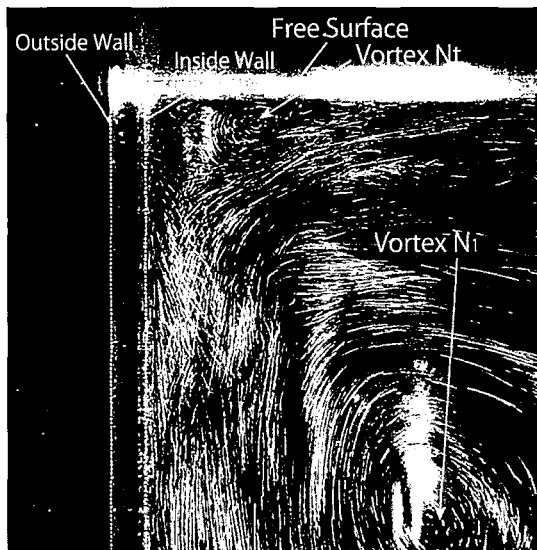


Fig. 6 Flow visualization of corner vortex in the region between the free surface and the upper side wall in vertical cross section.

動画観察によるとコーナー渦の回転速度は著しく大きく、またその渦輪軸は時折円形から変形し、3次元性(花びら状)を生じている。なお、写真右下部に大渦構造 N_1 が観察されている。

Fig.7は円形左側壁面上のはく離点 S' と渦構造 N_1 を示す。この場合に観察されるのはく離点 S' は、 $AR=2.0$ の場合であるので、水槽上半面と下半面の渦構造 N_1 と N_1' の境界として形成されたものである。はく離点位置は、本実験条件の範囲内 ($Q=10\sim 50\text{mL}/\text{min}$) で通気量を変化させてもほとんど変化しなかった。これより、円形水槽内のフローパターンを制御する場合、 AR と Q の範囲を適度な関係に絞ることが必要であろう。

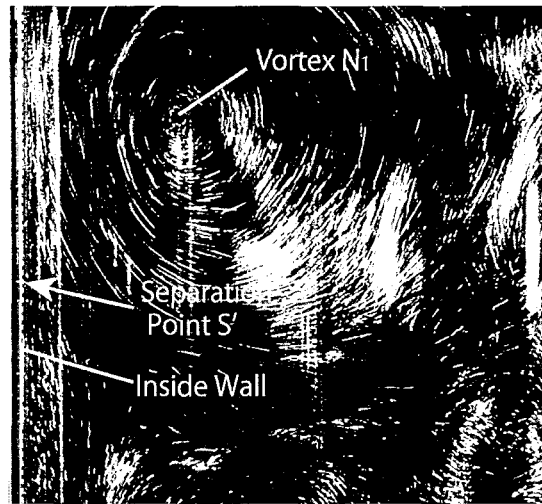


Fig. 7 Flow visualization of the separation point S' on inside wall in vertical cross section.

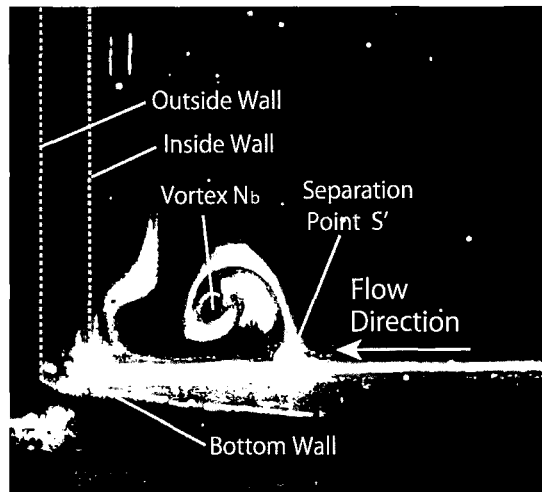


Fig. 8 Flow visualization of corner vortex in the region between the bottom wall and the lower side wall in vertical cross section.

Fig.8は色素流脈法によって可視化された水槽左側角部の底壁面近傍における渦構造 N_b （底面コーナー渦とよぶ）を示す。水槽底面中央付近から底面に沿って円形側壁方向に移動した水は、下半面領域に生成する大渦構造 N_1 （時計回り）を構成する。他方、水槽角部に近づくにつれて底面に沿う流れに逆圧力勾配が生じ、そこではく離（はく離点 S' ）して流れが上昇する。はく離した上昇流は、次に円形側壁面上に再付着（点 S' ）し（写真では識別困難、動画観察より）、この角部コーナーに反時計回りの渦（ N_b ）が形成される。この渦構造の挙動は定常で安定しているが、極めて遅い循環速度である。そのため、アルミ粉末を懸濁する方法では露出時間の制約から明瞭に可視化できず、色素流脈法を用いて観察した。

2) 水平断面内のフローパターン

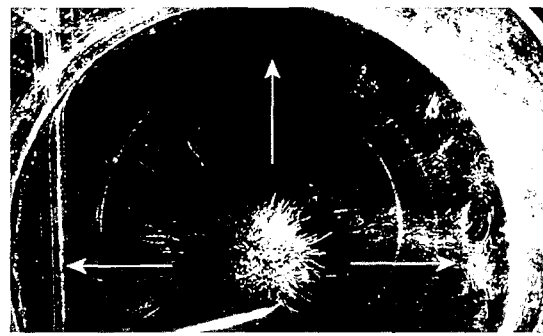
3章1)節において、鉛直断面内のフローパターンについて説明したが、本節では水平断面（ $r-\theta$ 面）内フローパターンについて説明する。代表として $Q=50\text{mL}/\text{min}$ 、 $AR=2.0$ （2渦対系の場合）における水表面付近、中央高さ付近および底面付近の可視化結果のみFig.9(a)、(b)および(c)に示す。水表面付近（ $z/r=-0.03$ ）のFig.9(a)を見ると、中心付近に気泡の上昇（動画の結果より）している領域が観察され、そこから放射状方向に気泡とアルミ粉とが移動している。また、円形側壁近傍では種々のスケールの渦構造が観察（動画の結果を利用）され、円周方向に3次元性が見られる。

中央高さ付近（ $z/r=-1.0$ ）のFig.9(b)を見ると、円形側壁付近ではアルミ粉は複雑な挙動を示しつつ、比較的スケールのそろった渦構造（下半面で見られる規模の大きい循環渦の頭頂部に相当）が見られる。全体のフローパターンは流れが中心向き（写真の矢印）に移動して（動画の結果を利用）いる。

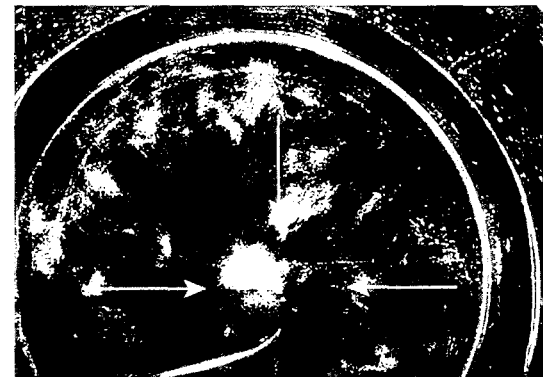
底面付近（ $z/r=-1.97$ ）のFig.9(c)を見ると、中心付近を除き、アルミ粉は放射状に外向き（写真の矢印）に向かっており、流れは放射状外向きとなっている。

$AR=1.0$ の場合、水面付近のフローパターンはFig.9(a)と同様である。すなわち、 AR の変化によって鉛直断面内のフローパターンは2つに大別できるが、水表面付近のフローパターンは変化しないようである。一方、 $AR=1.0$ の底面付近のフローパターンはFig.9(c)と同様であるが、流動方向は反対である。

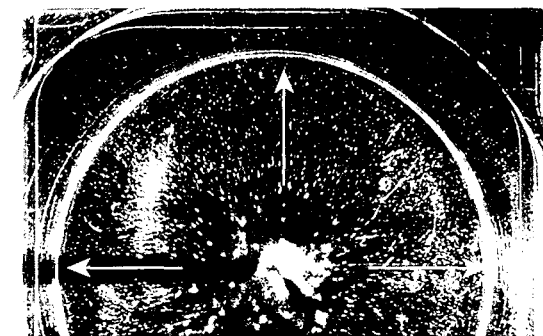
ところで、本実験条件の Q の範囲内ではエアストーンから放出される気泡上昇によって誘起される水は水槽底部付近から水面付近まで輸送される。しかしながら、通気量を極めて少なくすると、水槽底部付近の水は水面付近まで上昇せずに本研究で観察されたフローパターンとは異なる可能性がある。



(a) $z=-5\text{mm}$ ($z/r=-0.03$)



(b) $z=-195\text{mm}$ ($z/r=-1.0$)



(c) $z=-385\text{mm}$ ($z/r=-1.97$)

Fig. 9 Flow visualization of overall flow pattern in horizontal cross section at $AR=2.0$.

4. 考 察

1) トポロジー的考察によるフローパターンの推定

考察の前に、流れ場の対称性について説明しておく。Fig.10は代表例として、2渦対系の流れ場（ $Q=50\text{mL}/\text{min}$ 、 $AR=2.0$ の場合）の結果である。渦中心位置は空間中で速度が0となるよどみ点と定義する。結果を見ると、側壁面上のはく離点（図中の \times ）と渦中心が流場の

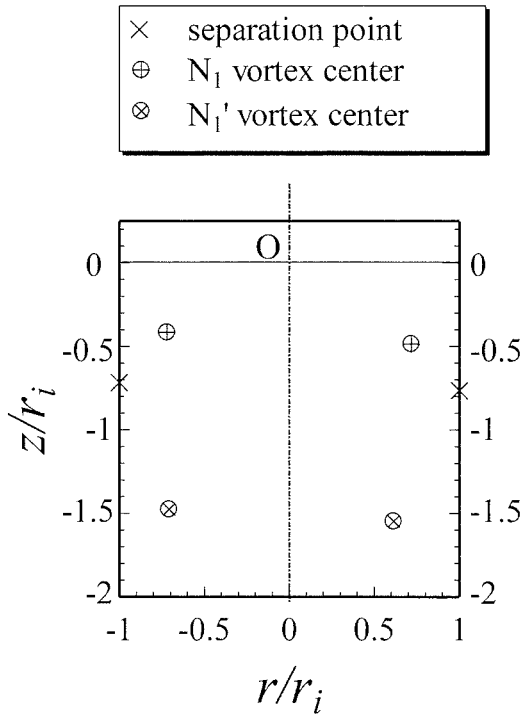


Fig. 10 The location of the separation points and both vortex center at $AR=2.0$.

ほぼ左右対称となる位置で観察されている。これより、本渦構造パターンは鉛直断面内の流場で対称性をもつことがわかる。なお、この傾向は Q 、 AR を変化しても同様の傾向を示していた。そこで、Huntらの式(3)を適用するに、流場の半断面について考察してもよいことが予想される。

Fig. 11 (a), (b)および(c)は、静止画写真および動画から推測された、それぞれ $AR=0.5$ 、 1.0 および 2.0 の場合の渦構造パターンの模式図を示す。なお、図中の水面に描かれている矢印は水面上の流体の流動方向ではなく、水面直下の流体の流動方向を示す。Fig. 11 (a), (b)の半断面の場合 ($AR=0.5$ および $AR=1.0$),

$$\Sigma_N = 3, \Sigma_{N'} = 0, \Sigma_S = 0, \Sigma_S = 6, n = 1$$

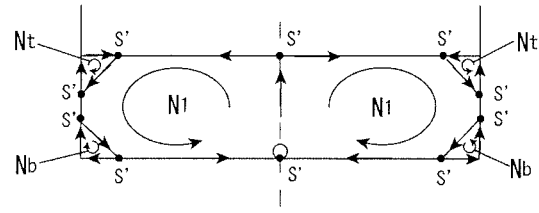
で、式(3)が成立する。一方、Fig. 11 (c)の半断面の場合 ($AR=2.0$),

$$\Sigma_N = 4, \Sigma_{N'} = 0, \Sigma_S = 0, \Sigma_S = 8, n = 1$$

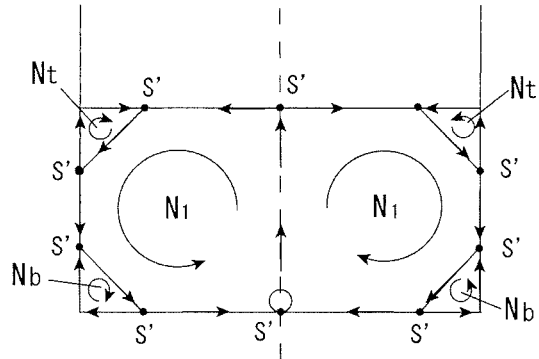
で、式(3)が成立する。以上より、いずれの AR の場合でも、それぞれの渦構造が生成しているものと推測される。

2) フローパターンの変化

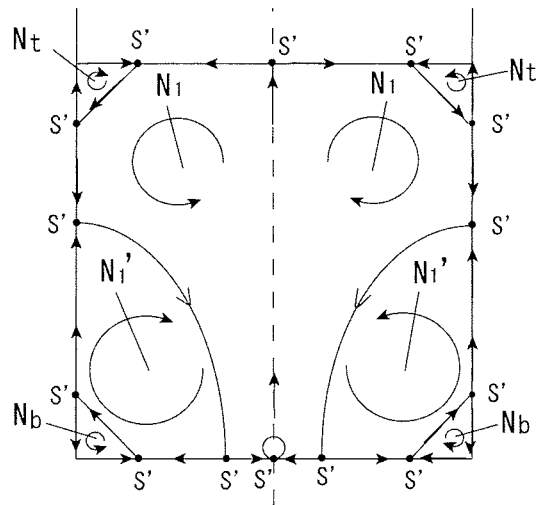
3章(1)項で鉛直断面内のフローパターンの傾向を述べたが、水槽内のフローパターンが AR によって変化する理由を考えてみる。前述したTaniら¹⁰⁾の溝内部の流れの結果を参照すると、溝内部の圧力分布は $H/r_i = 1.43$ を境に著しく変化していた。これと同様に本流場でもあ



(a) $AR = 0.5$



(b) $AR = 1.0$



(c) $AR = 2.0$

Fig. 11 Each singular points and flow pattern in vertical cross section.

る AR を境にフローパターンが激変する可能性がないか考えてみる。本円形水槽の場合、静止流体中では側壁面上の圧力（静水圧）分布は深さ方向に直線的に増加し、鉛直下方に向かい正の圧力勾配を有する。ところが、水が循環流動している場合、流体が静止したときの圧力（静水圧）に流体の運動によって生じる圧力（流水圧）が加わるため²⁰⁾、円形側壁圧力分布は静水圧分布とは異

なることになる。すなわち、水表面すぐ直下の流れは水槽中心付近から半径方向に流動するが、その際、円形側壁のせき止め効果により流速が減少する。つまり、水の速度ヘッドが一部圧力ヘッド（静圧）に変換され、全圧に占める割合が大きくなる。したがって、円形側壁近傍の圧力をみると、水表面から液深方向に向かい流下するにつれ減少する静圧（したがって負の圧力勾配）と上述した静水圧（正の勾配）との関係により、ある液深で圧力が平衡する位置が生じることになる。その位置で流れは円形側壁面からはく離すると推察される。したがって、水槽の断面内幾何形状を表す AR の値により、はく離が生じる場合（ AR が大きい場合）と生じない場合（ AR が小さい場合）が存在することになる。本流場では、 $AR=0.5$ および 1.0 の場合、側壁上ではく離はなく 1 渦対系となり、一方、 $AR=2.0$ の場合、側壁上ではく離が生じ 2 渦対系となったものと思われる。

次に、 Q （ただし、 Q の範囲を $100\text{mL}/\text{min}$ まで拡張）と AR を系統的に変化させ、この渦対系の変化が生じる限界領域を求めてみる。本報告においては、水槽底面近傍の流れ方向が定常的に反転する条件の場合、渦対系を表すフローパターンが変化したものとみなすことにする。Fig. 12 は縦軸に AR の値をとり、横軸の Q を変化させた場合の各渦対系が生じる領域を示したものである。図中の境界を示す 2 本の実線は得られた実験データを最小二乗法で求めた曲線を示す。結果をみると、 $Q=10\sim 100\text{mL}/\text{min}$ の範囲では、1 渦対系および 2 渦対系を示す AR の値は変化せず、およそ一定であった。

3) フローパターンと仔魚飼育との関連性

3 章(1)項において、鉛直断面内のスケールの大きい渦構造は 1 渦対系と 2 渦対系に分類されると説明した。海産仔魚は基本的に遊泳力が乏しく、水流にしたがって水柱に分布する。Ruttanapornvareesakulら⁹⁾ は AR が 2.0 を超える水槽で仔魚の生残率が著しく高くなった理由に、水表面での仔魚の移動速度が速いために仔魚が表面張力に囚われる機会が少なくなり、その結果として浮上死が少なくなったことを挙げている。しかしながら、Ruttanapornvareesakulら⁹⁾ が観察したのは流れによって水表面にまで運ばれた仔魚の移動速度のみを調べての考察に留まっている。本研究結果からは、この要因に加えて新たに、仔魚が Fig. 5 に示す 2 対の渦構造のうちのいずれかにとりこまれ複雑に移動しており、その結果として AR が 2.0 より小さい水槽に比べて水表面への接触が減少して仔魚の浮上死が少なくなった、と考えた。今後は実際に仔魚を収容した水槽で、これらの 2 対の渦構造に対して仔魚の移動がどのようになっているかを精査する必要があるだろう。近年、ハタ類仔魚に顕著に見られる浮上死に加えて、クロマグロなどで仔魚が夜間に遊泳を停止した際に水槽底に沈みそのままへい死する沈降死

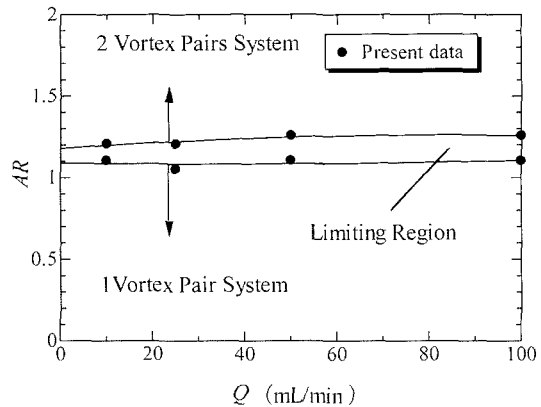


Fig. 12 Relation between aspect ratio and air ration rate.

現象が大きな問題となっている^{21)~24)}。本研究で示されたような AR の高い水槽中の異なる渦構造のうち特定の渦流に仔魚を留められるように通気量を調整することで、海産仔魚の浮上死や沈降死を防除できる可能性が期待できる。

次に、3 章(2)項においてスケールの小さい渦構造についても説明したが、仔魚の飼育水槽内での水流に伴う移動において、小スケールの渦が仔魚の生残とどのような関わりを有するのかは、本研究では明らかにすることはできなかった。しかしながら、このような小スケールの渦が仔魚の移動とどのような関係があるのかについては、さらに小スケールでの仔魚の移動を、中間浮力をもつような材質で仔魚の模型を作り、その模型の動きを詳細に観察することで新たな知見が得られる可能性がある。

また、本研究を発展させるうえで、次のような課題がある。実際の種苗生産の現場では大型の水槽が使われている。たとえば、長崎県総合水産試験場で種苗生産に使用されている円筒水槽の寸法は直径 8m 、深さ 2m で、飼育水量は 100トン ⁶⁾ である。この水槽の場合、 $AR=0.47$ となる。この水槽を用いてマハタの種苗生産を実施した場合、通気装置は水槽底部中央に 1 個を設置し、その通気量は $630\text{mL}/\text{min}$ であった⁶⁾。本研究も同様に、円筒水槽にエアストーンを中央に 1 個配置した場合を取り扱った。そこで、本研究と Sakakuraら⁶⁾ の使用した大型水槽を比較すると、大型水槽の AR の値は 0.47 であるので、本研究の Fig. 11(a) の場合に相当し、必ずしも仔魚の生残が高くなるような AR ではないと判断される。したがって、 $AR=2.0$ のような鉛直方向に二層の渦流は形成されないケースであろう。このような実用規模の水槽において、さらに液深を深く、あるいは浅くとなるように設定した場合、 AR が仔魚の生残率に影響を与えるかどうかを明らかにする必要があると考える。さらに、次のステップとして、エアストーンの設置位置（高さ、個数）

を工夫することにより、ARの小さな水槽でも2渦対系のフローパターンが作成できる可能性を調査する。それにより、本研究の結果が種苗生産現場へ応用できる可能性が生まれるであろう。

円筒型仔魚飼育水槽内のフローパターンについて、ARおよびQを変化させて可視化実験した結果、以下の点が明らかとなった。

- (1) 本水槽の鉛直断面内のフローパターンは本実験条件の範囲内で、ARの値が1.0と2.0の間で1渦対系から2渦対系へと変化する。一方、渦対系の変化に対して通気量の影響は弱い (Fig. 12参照)。
- (2) 水表面コーナー渦 (ARによらず回転方向は不変) と底面コーナー渦 (ARの値がおよそ1.0と2.0の間で回転方向が変化) の存在を見出した。これより、水槽底面近傍の流れの方向は1渦対系の場合、円周付近から中心向き、一方、2渦対系の場合、外向きとなる。
- (3) 円形側壁面上に、渦 N_1 , N_1' , N_2 および N_2' と関連する再付着点とはく離点が存在する。これらの渦対系はHuntらのトポロジー的考察による解析結果を支持する。
- (4) ARの高い水槽で仔魚の生残率が高いという既報の結果⁹⁾は、水槽内に2渦対系の流場が形成され、そのうちの1渦対系に仔魚が取り込まれることによって起こった可能性が高いと考えた。

謝 辞

広島工業大学共同研究機構産学連携推進センター長の 大坂英雄教授には貴重な助言を頂いた。大島商船高等専門学校技術支援センターの本庄孝光氏には実験に協力して頂いた。ここに記して感謝の意を表する。本論文に有益なコメントをいただいた2人の査読者に謝意を表する。

参考文献

- 1) 南 卓志：初期減耗研究の方法論；研究の歴史，田中 克・渡邊良朗編，魚類の初期減耗研究，恒星社厚生閣，東京，pp.9-20, 1994.
- 2) Tucker Jr JW：The rearing environment. In：Tucker Jr JW ed., Marine Fish Culture. Kluwer Academic Publishers, London, pp.49-148, 1998.
- 3) 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，39：205-212, 2003.
- 4) J. Backhurst and J. H. Harker：The suspension of feeds in aerated rearing tanks：the effect of tank geometry and aerator design. Aquacultural Engineering, 7：379-395, 1988.
- 5) S. Shiotani, A. Hagiwara, Y. Sakakura and H. Chuda：Estimation of flow in a rearing tank of marine fish larvae by simplified numerical computation—a case of two-dimensional flow. Aquacultural Engineering, 32：465-481, 2005.
- 6) Y. Sakakura, S. Shiotani, H. Chuda and A. Hagiwara：Improvement of the survival in the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* larvae by optimizing aeration and water inlet in the mass-scale rearing tank. Fish. Sci., 72：939-947, 2006.
- 7) 阪倉良孝，萩原篤志，塩谷茂明：水槽内の流場制御によるマハタ仔魚飼育。日水誌，72：267-270, 2006.
- 8) Y. Sakakura, S. Shiotani, H. Chuda and A. Hagiwara：Flow field control for larviculture of the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus*. Aquaculture, 268：209-215, 2007.
- 9) Y. Ruttanapornvareesakul, Y. Sakakura and A. Hagiwara：Effect of tank proportions on survival of seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* (Thunberg) and devil stinger *Inimicus japonicus* (Cuvier) larvae. Aquaculture Res, 38：193-200, 2007.
- 10) I. Tani, M. Iuchi and H. Komoda：Experimental investigation of flow separation associated with a step or a groove, Aers. Res. Unst., Univ. Tokyo, Rep., 364：119-136, 1961.
- 11) 亀田孝嗣，大坂英雄，望月信介：k形粗面乱流境界層の粗さ要素近傍構造に対する粗さピッチ比の影響。日本機械学会論文集，pp.70-697, B：2303-2310, 2004.
- 12) 亀田孝嗣，是石一任，望月信介，大坂英雄：2次元矩形粗面境界層の粗さ要素近傍における運動量交換機構（溝内部渦の可視化観察）。日本機械学会論文集。pp.71-710, B：2401-2406, 2005.
- 13) 井上 暢，吉田尚史，渡辺 崇，稲村純平：キャビティを過ぎる自律振動流の底面駆動を用いた制御の数値解。第21回数値流体力学シンポジウムCD-ROM, E7-1, 2007.
- 14) 流れの可視化学会：新版 流れの可視化ハンドブック。朝倉書店，東京，pp.46-54, 1991.
- 15) 可視化情報学会：可視化技術の手ほどき。朝倉書店，東京，pp.86-114, 1998.
- 16) 可視化情報学会：流れの可視化入門。朝倉書店，東京，pp.98-112, 1997.
- 17) J. C. R. Hunt, C. J. Abell, J. A. Peterka and H. Woo：Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles；applying topology to flow visualization. J. Fluid Mech., 86：179-200, 1978.
- 18) 中村育雄：流体解析ハンドブック。共立出版，東京，pp.500-501, 1998.
- 19) 古谷 茂，島津秀雄，木内 誠，八田秀三郎，松本和夫，丸山 求，道脇義正，矢野嘉銘介：解析学。大日本図書，東京，pp.197-198, 1975.
- 20) 今井 功：流体力学 前編。裳華房，東京，pp.53-54, 1988.

- 21) 宮下 盛：種苗生産における浮上および沈降死。日水誌, 72 : 947-948, 2006.
- 22) Y. Tanaka, K. Kumon, A. Nishi, T. Eba, H. Nikaido and S. Shiozawa : Status of sinking of hatchery-reared larval Pacific bluefin tuna on the bottom of the mass culture tank with different aeration design. *Aquaculture Science*, 57 : 587-593, 2009.
- 23) S. Masuma, T. Takebe and Y. Sakakura : A review of the broodstock management and larviculture of the Pacific northern bluefin tuna in Japan. *Aquaculture*, 315(1-2) : 2-8, 2011.
- 24) 武部孝行, 小林真人, 浅見公雄, 佐藤 琢, 平井慈恵, 奥澤公一, 阪倉良孝 : スジアラ仔魚の沈降死とその防除方法を取り入れた種苗量産試験。水産技術, 3(2) : 107-114, 2011.