

密度関数法による 種苗生産用円形水槽内流れの数値予測

坪郷浩一*¹ 角田哲也*²

Circular Water Tank in The Flow Of Numerical Prediction for Seedling Production With Density Function Method

Koichi TSUBOGO and Tetsuya SUMIDA

Abstract

In this paper, flow patterns in a circular water tank with three different aeration rates are in estimated by gas and liquid phase flow simulations. As the result, vortex center positions measured from visualization experiments had a good agreement with simulation ones. And when the aeration rates increase, the strength of large vortex increased.

Keywords: density method, flow simulation, two phase flow, rearing tank, early mortality, vorticity

1 まえがき

本論文の目的は、種苗生産用円形水槽内の流れを数値計算によって定量的に予測し、その基礎的知見を水産学や種苗生産技術者へ提供することである。近年、乱獲、自然環境の変化および自然災害等により、日本の魚介類の漁獲量は年々減少し、捕る漁業から栽培する漁業へとシフトしつつある。一般に、卵からふ化した直後の魚を仔魚というが、仔魚が稚魚に成長する期間に大量死滅するケースがある。これを初期減耗という。種苗生産が成功するか否かの鍵は、いかに初期減耗を抑えるかどうかである。初期減耗に及ぼす因子は多数存在するが、水流が初期減耗に及ぼす影響が指摘されているものの¹⁾、未だその課題はほぼ手付かず状態である。ところで、種苗生産現場では、水流を発生させる空気（気泡）の通気量を音や目視などの経験と勘で調整している。もし、通気設定を少しでも誤れば、仔魚の大量死滅を招く可能性があるため、基本情報となる通気量と

流れ場との関係を明らかにする必要がある¹⁾。関連研究として、Sakakura ら²⁾は円形水槽において、仔魚の飼育実験と流速測定を実施し、仔魚の生残率を高める最適な通気量が存在することを示した。しかし、その測定法は水中にセンサーを挿入するタイプの超音波流速計のため、センサー自体で流れを乱し、計測誤差を招く。次に、Shiotani ら³⁾は流れ場の流速測定と数値計算を実施した。その計算は、流れ場を単相流として取り扱っているため、計算結果と測定結果は一致していない。一方、角田ら⁴⁾は、通気量 $Q=10\text{mL}/\text{min}$ における円形水槽内の可視化実験と数値計算を実施した。具体的には、流れ場を気液二相流解析の代表的な数値解法である一圧二流体モデル⁵⁾を用いて数値予測を実施した。その計算結果は可視化結果とよく一致したが、 $Q=25\text{mL}/\text{min}$ 以上では解が発散し、定量的予測ができなかった。この理由として、通気量が増すと気相と液相の流速差(すべり)が生じ、解が発散したためである⁶⁾。このため、種苗

生産用円形水槽内流れの数値予測は未だ確立されていない⁴⁾。

著者らは前述の課題を克服するために界面捕捉法に基づく自由水表面流れ解析のための有力な手法の一つである密度関数法⁷⁾を導入する。密度関数法は、気液二相流を同時に解くことができ、すべりがある場合でも適用可能である。なお、水槽内の流れは気液二相流のため流速測定が困難であるため、数値計算によって流れ場を数値予測することは意義がある。本論文では、密度関数法によって、通気量 $Q=10\text{mL/min}$ に加えて 25mL/min 、 50mL/min の種苗生産用円形水槽内の流れの数値予測を実施した結果について述べる。

2 密度関数法

2.1 基礎方程式

非圧縮性流体において、基礎方程式は連続の式と運動方程式で表すことができる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = \frac{1}{\rho}(F - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}) \quad (2)$$

なお、 \mathbf{u} 、 ρ 、 μ 、 ρ 、 F は、それぞれ流速ベクトル、密度、圧力、粘性係数、および外力である。密度と粘性係数は以下の式を満足する。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\rho) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mu) = 0 \quad (4)$$

2.2 密度関数法

密度関数法は、式(3)と式(4)を直接解く代わりに式(5)を解くことを考える。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\Phi) = 0 \quad (5)$$

ここで、図1より、密度関数 Φ の値は、0から1の範囲で正規化したものである。 Φ の値が0ならば流体を気相、0.5であるならば界面相、1ならば流体を液相とする。

ρ と μ は以下のように密度関数 Φ を用いて表すことができる。

$$\rho = \rho_{Liq}\Phi + \rho_{Gas}(1 - \Phi) \quad (6)$$

$$\mu = \mu_{Liq}\Phi + \mu_{Gas}(1 - \Phi) \quad (7)$$

なお、 ρ_{Liq} と ρ_{Gas} は、それぞれ液相および気相の密度であり、 μ_{Liq} と μ_{Gas} は各二相の粘性係数となる。

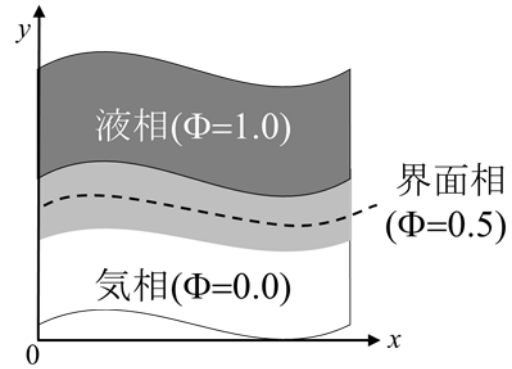


図1 気液相の区分

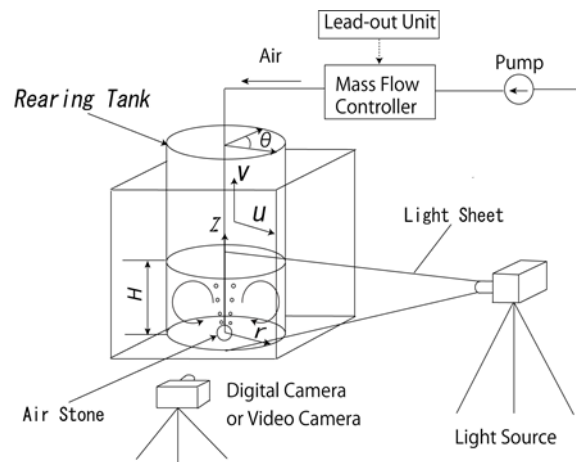


図2 実験装置の概略と座標系

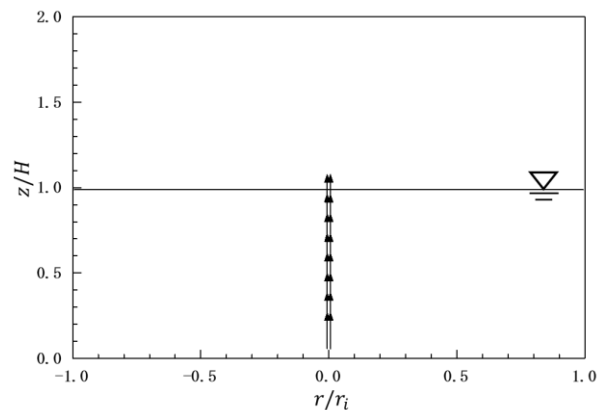


図3 鉛直二次元数値解析モデルの初期分布

3 種苗生産用円形水槽内流れ解析

この章では、種苗生産水槽を模した気泡上昇に伴う流れ構造について検討する。

3.1 可視化実験について

図2より、角田ら⁸⁾の可視化実験は、懸濁法を採用した。使用したトレーサは比重2.7、平均粒径 $40\mu\text{m}$ のアルミ粉である。可視化光源はスライドプロジェ

クタで、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 度の方向からデジタルカメラで撮影した。大渦の形状はリング形状なので、図 2 に示す θ の値によらずほぼ同じ画像が得られた。可視化実験では、通気量の増加にともない底面近傍の流れは複雑になり、定量的評価が困難である。

3. 2 仔魚のストレス特性について

流れ場を数値的に予測する意義であるが、塩谷ら⁹⁾によると、マハタなどの仔魚は物理的なストレスに弱く、循環流（本論文では大渦と表現）中心付近は通気が無い状態と同じ環境となり、生残率の低下の要因の一つであると指摘している。さらに、水槽中央部の上昇流が水槽内の循環流の流速よりも 100 倍程度高い値を示し、その流れは仔魚に相当大きい負荷を与えることを報告している。一般に、物体に作用するせん断応力は、壁面上の速度勾配に比例する。したがって、流速が大きいほど仔魚に作用するせん断応力は大きい。ゆえに、数値計算から速度分布を求めれば、仔魚に作用するせん断応力強度を推測可能になる。水表面近傍において、仔魚は自由表面で表面張力によって捕捉され死滅する、いわゆる浮上死¹⁾が生じる箇所である。一方、底面近傍では、仔魚が底面に接触し、傷つき、細菌が侵入して死滅する沈降死¹⁾が生じる箇所である。このため、水平断面内の流速の数値予測は、水面近傍と底面近傍の流れ状況を把握するために意義がある。コーナー渦が仔魚の生残率に及ぼす影響は現時点で不明であり、水産学の論文でコーナー渦の存在について言及された論文はない。

3. 3 計算条件

本論文では、自由水表面流れ解析の有力な手法の一つである密度関数法を用いる。図 2 から、角田らの実験⁸⁾で用いられた半径 $r_f=195\text{mm}$ 、水深 H は 195mm の透明アクリル樹脂製円形水槽を二次元鉛直断面にモデル化(図 3 参照)して数値解析を行う。円形水槽底面中央部から通気量 $Q=10, 25, 50\text{mL/min}$ の気泡を噴出した数値計算を実行した。本論文では代表例として種苗生産現場で多用されるアスペクト比 AR ($=$ 水深 H /水槽半径 r_f) $=1.0$ の円形水槽のみを検証する。空気(気泡)はエアストーン設置位置の相当する直径の小孔を仮想し、底面中央部から水槽中へ一様流速を流入させる。本計算条件は計算格

子間隔が $\Delta x = \Delta y = 2.5\text{mm}$ 、時間刻みは $\Delta t = 0.0001$ 秒で一定値とし、計算時間は 60 秒としている。なお、境界条件は底面、側壁および自由表面を「すべりなし」とした。また、運動方程式および密度関数の輸送方程式の移流項計算スキームは、5 次精度保存形式 6-point scheme を用いる¹⁰⁾。

3. 4 鉛直断面のフローパターン

角田⁸⁾の円形水槽可視化実験結果を図 4、著者らによる密度関数法の計算結果から速度ベクトル図を図 5 に示す。図 5 中の×印は、角田らが文献 8 で観測した渦中心位置である。ここでの渦中心位置とは可視化実験における渦のよどみ点位置である。次に数値計算の結果は、左右に発生する大渦を、左右対称と考え、右側部分についてのみ考察を行う。図 5 は通気量の大きさに関わらず、時計回転方向の大渦が視認される。直視観察によっても、自由表面と側壁との間、および底面と側壁との間にそれぞれコーナー渦が存在する⁸⁾。次に図 5(a)の通気量 $Q=10\text{mL/min}$ の場合の速度ベクトル図の渦中心位置は、図 4(a)の可視化写真から求めた渦中心位置とほぼ一致し、水槽中央および大渦の周辺で流速が大きい。大渦周辺の流速のうち、側壁で拘束されるため大渦と側壁との間で流速差が顕著である。図 5(b)の通気量 $Q=25\text{mL/min}$ の場合の速度ベクトル図の渦中心位置は、可視化写真から求めた渦中心位置と隔差が生じて流入箇所近傍に大渦の中心が発達している。図 5(c)の通気量 $Q=50\text{mL/min}$ の場合の速度ベクトル図の渦中心位置は、可視化写真の渦中心位置と隔差が生じて複数の渦が発達している。

通気量が増加すると可視化実験との乖離の理由としては、通気量が増すと自由表面から放出される気泡によって自由表面が若干遊動し、その影響でリング状である大渦の形状は三次元性を帯びるため、渦中心位置の隔差が生じたと推測される。また図 4(b)、(c)より、通気量が増すことによって水槽内の流れが大渦を中心に発達している。

以上より、数値計算の結果は可視化写真から求めた渦中心位置とほぼ同じになることから、文献 8 で角田らが報告した可視化実験の結果と一致する。

4 あとがき

密度関数法による数値計算を実施した結果、通気量 $Q=25\text{mL/min}$ 以上の流れ場で解は発散せず、数値予測が可能になった。この点から、密度関数法が従来の一圧二流体モデルの弱点に対応できることを明らかにした。

可視化から計測された渦中心位置は、数値計算の

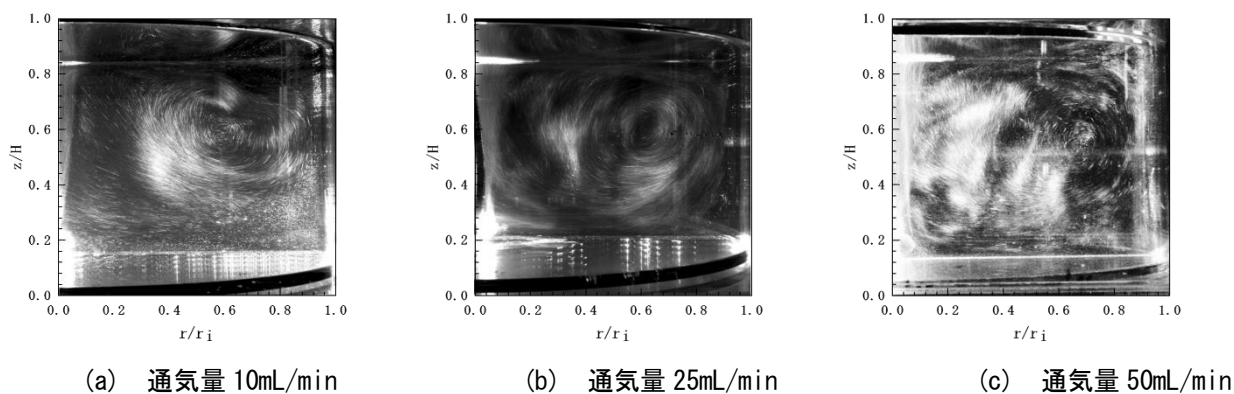


図4 円形水槽可視化実験の結果

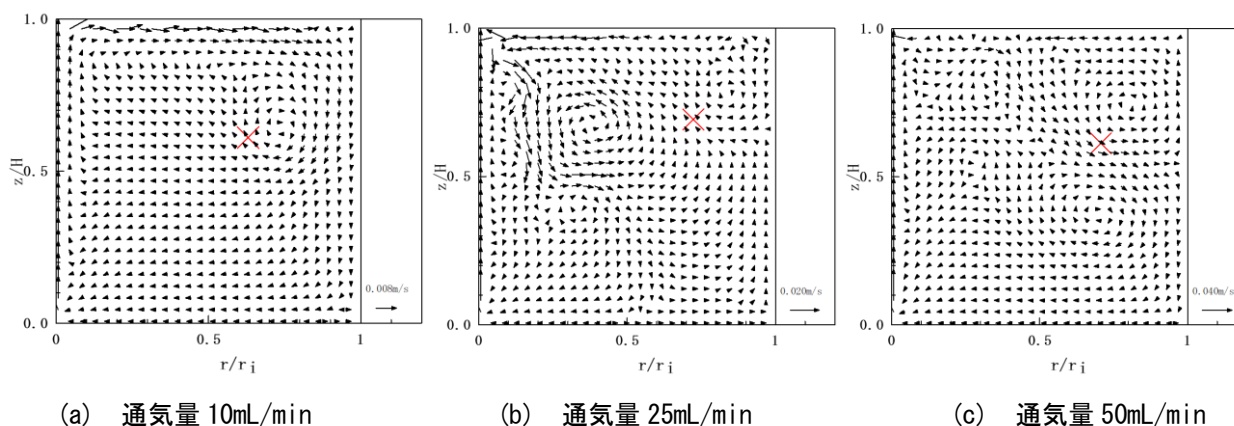


図5 速度ベクトル分布図

速度ベクトル分布および渦度分布における渦中心位置と概ね一致することを確認した。

本論文では、大渦およびコーナー渦の通気量に対する強度が数値計算から評価できた。

今後は、コーナー渦も含め、エアストーンへの通気によって生じる流れ場と仔魚の生残率との関係について飼育実験を通して解明する予定である。

参考文献

- 1) 棟方有宗, 小林牧人, 有元貴文: 魚類と行動研究と水産資源管理, 日本水産学会監修, pp.106-110, 恒星社厚生閣, (2013)
- 2) Yshitaka Sakakura, Shigeaki Shiotani, Hisashi Chuda, Atsushi Hagiwara :Flow field control larviculture of the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus*, *Aquaculture*, pp.29-215, (2007)
- 3) Sigeaki Shiotani, Atsushi Hagiwara, Yoshitaka Sakakura, Hisashi Chuda: Estimation of flow in a rearing tank of marine fish larvae by simplified numerical computation-a case of two-dimensional flow, *Aquacultural engineering*, pp.465-481, (2005)
- 4) 角田哲也, 川原秀夫, 塩谷茂明, 阪倉良孝, 荻原篤志, 山本健也: 仔魚飼育モデル水槽内流れの数値計算, *水産工学*, 49 (3) : pp.155-165, (2013)
- 5) たとえば, 秋山守, 有富正憲: 新しい気液二相流数値解析, pp.28-29, コロナ社, (2002)
- 6) 片岡篤, 富山明男: 二流体モデルに基づく気液二相分散流の基礎方程式とその数学的性質, *混相流*, 7, pp.132-141, (1993)
- 7) 朝位孝二, 坪郷浩一: 密度関数法による自由水表面流れ解析のための体積補正法に関する研究, *土木学会論文集*, No. 810/II-74, pp.127-132, (2006)
- 8) 角田哲也, 川原秀夫, 塩谷茂明, 阪倉良孝, 荻原篤志: 仔魚飼育モデル水槽内のフローパターンの観察, *水産工学*, 48 (2) : pp.99-109, (2011)
- 9) 塩谷茂明, 赤澤淳司, 阪倉良孝, 中田久, 荒川敏久, 荻原篤志: 仔魚飼育水槽内の流れの計測: マハタ飼育水槽の検討例, *水産工学*, 39 (3), pp.205-212, (2003)
- 10) 坪郷浩一: 特性曲線法に基づく高次精度移流輸送計算手法の開発, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, Vol. 73, No. 1, pp.1-10, (2017)