

気泡上昇を伴う円筒容器内の流れに関する研究

角田 哲也 * 本庄 孝光 * *

A study on the flow in a cylindrical vessel with air bubbles lift up

Tetsuya SUMIDA and Takamitsu HONJHO

Abstract

A flow in a cylinder tank is the flow that even fisheries engineering is seen in as well as chemical engineering. The object of this study is the flow in a rearing tank with regard to fisheries engineering. Recently, the cultivation of high efficiency has been required as well as fishery to save resources in fishery. Marine fish larvae are fragile against physical stress. However, few studies have been conducted to evaluate the flow field in a rearing tank, which is assumed to provide a high degree of physical stress to marine fish larvae. Therefore, I attempt to quantify and visualize the flow field by aeration in the rearing tank with hydrodynamics approach. The first step is flow visualization. Flow visualization has carried out to grasp flow pattern in rearing tank. When the ratio depth to diameter H/D exceeded 0.59, flow pattern in rearing tank was transrated, regardless of aerating rate.

Key words: Flow visualization , Cylindrical vessel ,Aerating rate ,Tracer, Rearing tank, Fish larvae

1. 緒言

本研究の目的は気泡上昇によって誘起された円筒容器内の流れ構造を解明することにある。

この種の流れは水産工学では飼育水槽、化学工学では懸濁気泡塔で見られる流れであるが、本研究では飼育水槽内の流れを研究対象とする。

漁業において、資源を確保するためには効率良く獲る漁業だけではなく、効率よく飼育する漁業の必要性が高まってくる。もし、種苗生産技術の発展によって、大量の仔魚を親魚までほぼ 100%成長させることが可能になれば、近い将来、世界人口の急激な増加によるタンパク資源の不足に対応した新しい漁業を発展させることが期待できる。

従来の種苗生産技術のほとんどの研究は餌料や病気などに関連した生物学的観点に力点が置かれている。しかし、魚類の初期飼育において、物理的環境である飼育水槽内の流れ場を解明し、厳密に制御することも仔魚の生残率を高めるうえで重要である。飼育水槽の流れを流体力学のような工学的観点から

アプローチを試みた研究は極めてまれである^{[1]~[2]}。これらの研究は超音波流速計で水槽内の速度測定を実施し、フローパターンを報告している。しかしながら、使用された超音波流速計はセンサーの 50mm 離れた位置の速度を測定するため、水面および容器壁面近傍の流れは依然不明のままである。

以上のことをふまえて、本稿では研究の第 1 段階として飼育水槽内全体のフローパターンを流れの可視化によって調査した。

2. 実験装置および方法

2.1 供試水槽

飼育水槽の容器形状は角形が少なく、円形水槽が一般的である。水槽の材質は可視化実験用に透明アクリル製とした。水槽の容積は 0.28m³ で、その寸法は内径 390mm、外径 400mm、高さ 590mm である。なお、可視化の際、光の屈折を防止するために、供試水槽の外側に断面が 500mm×500mm の高さ 500mm の角形水槽を設置した (図 1 参照)。

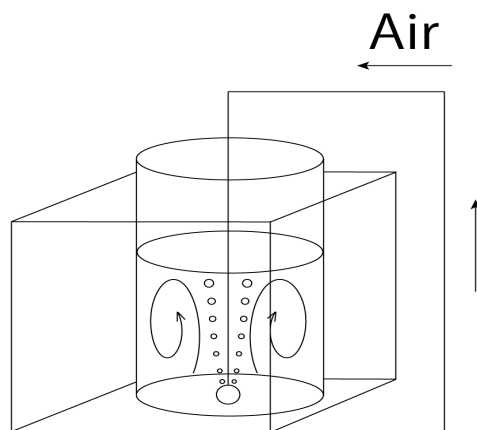


図1 実験装置の概略

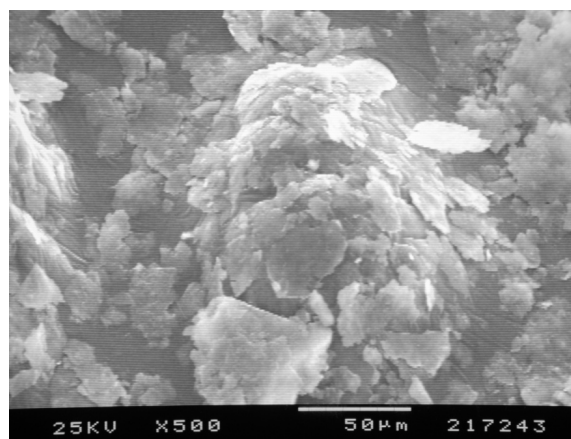


図2 トレーサーの拡大写真

2.2 トレーサー粒子の選定

本研究では可視化方法として懸濁法を採用した。懸濁法とは流れ場中にトレーサーを注入し、それを追跡観察することによってフローパターンを把握する方法である^[3]。従って、トレーサーに具備すべき条件はできるだけ流体の比重に近いことである。本実験に用いたトレーサーは比重2.7の最大寸法が50 μm のアルミ粉で、水との質量比を 2.155×10^{-7} に固定した。トレーサーを電子顕微鏡で観察した写真を図2に示す。トレーサーの沈降速度 Ug をStokesの抵抗法則から示される式(1)から評価すると^[3]、 $Ug=0.05\text{mm/s}$ となり、極めて小さい。従って、トレーサーの沈降速度は無視しても差し支えない。

$$Ug = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) g \frac{d^2}{\nu} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 ν は流体の動粘性係数、 ρ_p はトレーサー密度、 ρ は流体密度、 d はトレーサー粒子の直径である。なお、実験時の水温は25°Cであった。

2.3 実験条件

実験パラメーターは通気量 Q 、 H/D (H :水深、 D :水槽直径)である。実験条件を表1に示す。

表1 実験条件

$Q(\text{min/min})$	10	25	50
H/D	0.25	0.5	1.0

通気量 Q はエアポンプ(SPP-6GA, テクノ高機製: 常用吐出圧力 0.1kgf/cm^2 (0.01MPa), 吐出風量 8.5l/min)から送られる空気量を三方コックで調整した。 Q の測定は1分間当たりの吐出空気量を水中でビーカーに直接受けて計った。可視化光源はスライドプロジェクター(理科学製, 定格電圧100V, 消費電力1050W)を使用し、フィルムに切り欠きを入れて幅20mmのスリット光源にした。

3. 可視化結果

図3~5に $Q=50\text{ml/min}$ 、 $H/D=0.25\sim 1.0$ の静止画像を示す。流れ場は軸対称なので、図は流れ場の半分のみを示す。いずれの写真にも気泡の上昇が認められる。図中に渦の回転方向を示す。図3と4には中心部に大きな時計回転方向の渦が存在するが、この結果は従来報告された結果と一致する^{[1]~[2]}。ところが、図5では水面付近には時計回転方向の渦が、一方、底面付近には反時計回転方向の渦が存在する。このことは H/D の値によって円筒容器内のフローパターンが変化することを示唆する。

次に、フローパターンが遷移する条件を見いだすために H/D を系統的に変化させ、目視および動画観察した。動画はビデオレコーダー(SONY HDR-SR12)で撮影するとともにHDDレコーダー(SONY BDZ-T55)に保存した。動画観察の結果、 $H/D=0.59$ でフローパターンが遷移した。本研究では水槽底面付近の流れ方向が反転するときをフローパターンの遷移と定義する。なお、フローパターンが遷移する条件は通気量 Q を変化させてもほぼ同じ結果であった。通気量 Q が飼育水槽内の流れ場に及ぼす影響は渦スケールと循環の強さのみである。通気量を増すと、図5の水面付近における時計回転方向の渦の寸法が大きくなるとともに底面付近における反時計回転方向の渦の寸法が小さくなった。

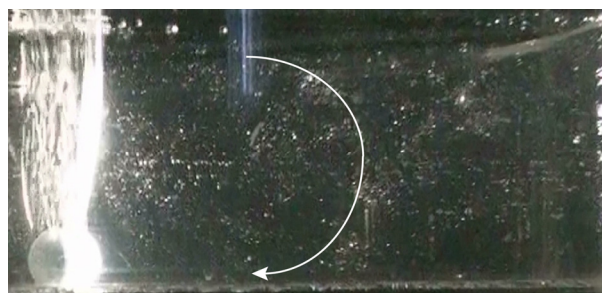


図3 飼育水槽内の流れ ($H/D=0.25$)

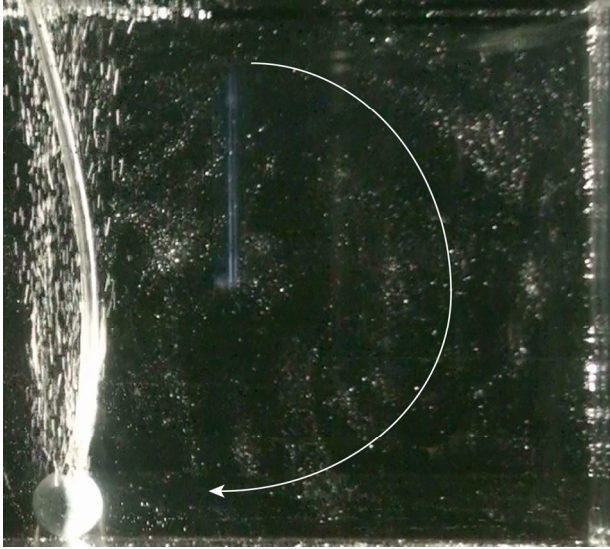


図4 飼育水槽内の流れ (H/D=0.5)



図5 飼育水槽内の流れ (H/D=1)

静止画像で渦の存在を判明することが困難である水槽の水面角部および底面角部の流れ場を動画観察した。これらの結果を含む水槽全体のフローパターンを図6に示す。図中の S' はハーフサドルポイントを示す。図6(a)は $H/D < 0.59$ のフローパターンを示す。図6(a)において、中心付近は気泡上昇に伴う上昇流が認められ、水面付近で流れ方向は半径方向に反転する。水面付近の円筒壁面角部で渦(N3)が発生する。その後、底面方向に流れ方向を変え、下降する。流れは壁面に沿って下降するものの、底面付近ではく離し、中心方向に流れ方向を転じる。なお、底面角部にも渦(N2)が存在する。また、水槽中心部には大きな渦(N1)が存在する。水面および

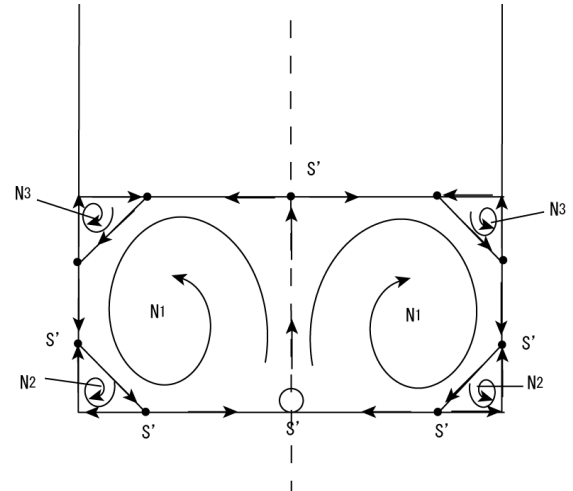


図6(a) $H/D < 0.59$ のフローパターン

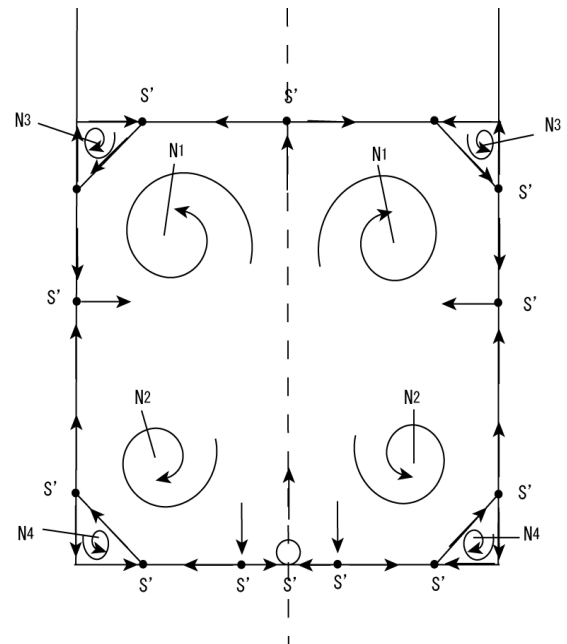


図6(b) $H/D \geq 0.59$ のフローパターン

底面付近における円筒容器角部の渦の存在以外は従来の報告と一致する^{[1]~[2]}。

一方、 $H/D \geq 0.59$ のフローパターンは図6(b)のようになる。特徴的なことは上下に対称な1対の渦(N1)と(N2)が認められることである。ただし、渦(N1)に比べ、渦(N2)は極めて遅い流れである。その他、図6(a)と異なるのは底面付近の流れ方向および水槽底面角部に形成される渦(N4)の回転方向が反対になる点である。

次に、図6の妥当性をチェックするためにHuntが提案した考え方を利用する^{[4], [5]}。Huntは3次元流れ場を調べるのに、流れ場を切断した面内の流線を考察するのが有効であることを示した。すなわち、トポロジー理論によって物体を切断する平面上の面内流線に関しては式(2)が成立すれば、推測した流れ場のパターンは正しい^[4]。

$$\left(\sum_N + \frac{1}{2}\sum_{N'}\right) + \left(\sum_S + \frac{1}{2}\sum_{S'}\right) = 1 - n \quad (2)$$

ここで、 \sum_N 、 $\sum_{N'}$ 、 \sum_S 、 $\sum_{S'}$ 、 n はそれぞれノードルポイントの総数、ハーフノードルポイントの総数、サドルポイントの総数、ハーフサドルポイントの総数、流れ場の連結数である。ところで、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。

図 6(a)の半分において、 $\sum_N=3$ 、 $\sum_{N'}=0$ 、 $\sum_S=0$ 、 $\sum_{S'}=6$ 、 $n=1$ であるので、式(2)が成立する。故に、推測したフローパターンは正しい。

一方、図 6(b)では円筒側壁ではなく離れたハーフサドルポイントと壁面中心付近のハーフサドルポイントとのつながりが現在のところ不明である。従って、図 6(b)で明らかになっていることは水深方向に対向回転している 1 対の渦の存在、底面における流体の流動方向および水槽上側角部と低側角部における渦の存在のみである。

以上のように、従来の研究では図 6(a)のフローパターンが報告されていたが、 H/D の値によっては 2 種類のフローパターンが存在すること。また、水面および壁面近傍のフローパターンが不明であったが、水面付近および底面付近の水槽角部には渦が存在するという新事実も判明した。以上の結果は通気量 Q を変化しても同様の結果であった。

4. 結言

気泡上昇を伴う円筒容器内のフローパターンを流れの可視化で調査した結果、以下の知見が得られた。

- (1) $H/D=0.59$ を境に 2 つのフローパターンに分類される。
- (2) フローパターンは H/D に強く依存するが、通気量 Q の依存は弱い。

おわりに、トレーサー粒子の粒径測定を賜った電子機械工学科岡本正典教授に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 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, 水産工学 Vol. 39, No. 3, P205-212, 2003.
- [2] 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, 日本水産学会誌 Vol. 72, No2, P267-270, 2006.
- [3] 可視化情報学会: 可視化技術の手ほどき, 朝倉書店, P107-114.
- [4] Hunt, J.C.R., et al: Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; Applying topology to flow visualization, J. Fluid Mech. Vol86, P179-200, 1978.
- [5] 中村育雄: 流体解析ハンドブック, 共立出版, P500-503.