

水槽設計のための矩形容器内の気液二相流流動現象の計測と解析

山口 太一・平野 博之*・岡本 直孝*・桑木 賢也**

岡山理科大学 大学院 工学研究科博士課程 システム科学専攻

*岡山理科大学 工学部 バイオ・応用化学科

**岡山理科大学 工学部 機械システム工学科

(2013年9月30日受付、2013年11月5日受理)

1. 緒言

本研究は気液二相流解析を、水槽設計の観点から、魚類初期飼育に発生する大量減耗を防ぐための方策の一つとして利用することを検討するものである。

海産魚類の生活史（生物の生涯にわたる生活の有り様）の中でとくに、初期の期間が重要となる。具体的には、初期の期間とは、魚がふ化して仔魚となり、その後、背骨の形成によって稚魚へ移行する稚魚期までのことを指す。この期間は、魚の一生のうちの100分の1程度の期間であるにも関わらず、これまでに数多くの研究が行われている。その主な理由の一つに、初期減耗とよばれる千分の一もしくは1万分の一への数的激減が、この極めて短い期間において起こることがあげられる^{1,2)}。したがって、魚類の養殖への取り組みが、1970年代初めより種苗生産として行われるようになったが、いまだ、個体の減少数（減少の割合）という観点からみても、自然界において生じる初期減耗に対して有効な手段がなく、現在なお、その対策に焦点が当てられている。種苗生産における初期減耗には飼育環境も含めた様々な要因が関わっているが、主な原因を大別すると浮上死亡と沈降死亡に分けられる^{3,5)}。浮上死亡とは、酸素供給のための通気による流れや、仔魚の集光性によって、仔魚が水面へ集まりやすく、その結果、水の表面張力によって、もともと遊泳力の乏しい仔魚は再び水中へ戻ることができずに死亡してしまうというものである。沈降死亡は、仔魚が水槽の底部へ沈降して死亡するものである。この原因はまだ明らかとはなっていないが、個体の遊泳力が乏しい期間に成長によって体の密度上昇が認められ沈降が起こると、個体と水槽底面あるいは側面との擦れによる傷からの細菌の感染、とくに沈降が夜間である場合は低酸素濃度域への移動等が原因となって死亡すると考えられている^{3,5)}。これらのいずれの要因においても共通する重要なことは、通気などによる水槽内の流動様相であることは疑いない。なお、水槽の形状は、矩形、円柱形などがあるが、本研究では一般家庭などでよく見られる矩形容器を対象とする。

そこで本研究では、魚類飼育において通気のために行われる酸素供給に伴う流れ（気体と液体による気液二相流）に着目する。気液二相流 (gas-liquid two-phase flow) は、気体と液体の相が混在する流れで、固気、固液系などの混相流とは異なり、連続した界面が多様に変化することで、その流動様相が極めて多岐に亘ることが特徴である。工業的には、気液二相流は沸騰や凝縮を伴う工業プロセスで広くみられ、気泡塔や反応容器、電気分解槽などの各種の化学プラントや化学工業装置、船舶流体、活性汚泥処理の曝気槽など、工業装置と関わる技術要素としてこれまでに多数の報告⁶⁾がある。

以上、本研究は、魚類初期飼育における仔魚の減耗（水槽壁との物理的な接触などによる死亡）を可能な限り防ぐための水槽を化学工学的観点から設計することを最終的な目的とし、その基礎的な知見を得るために水槽として代表的な矩形容器をとりあげ、槽内の基本的な流動様相を実験的に明らかにするとともに、さらに数値解析的な手法を用いた検討を行うものである。

2. 実験方法

本研究において用いた実験装置をFigs.1, 2に示す。実験に用いた水槽は、容積約60 L（内径寸法 D300(z) × W600(x) × H300(y) mm）で、水道水および計測のためのトレーサー（平均粒径：65~70 μm、ゼオライト、シリカなどから成る粒子。実測の嵩密度は約0.37 g cm⁻³。）を水槽内に満たした。なお、ここでいう水道水は、上水であり、純水とは異なるいわゆる汚染系とよばれる一般的な水である。

本研究では、魚類初期飼育に発生する大量減耗を防ぐための方策の一つとして、水槽設計の観点から気液二相流解析を行っているため、水槽底面中央には、市販のセラミック製の多孔質体（直径約25 mm×長さ約45 mm, 孔径約0.1 mm. 以降、エアストーン）を設置した。そして、エアストーンへ空気を供給することに

よって生じる気泡群（以降、エア）を用いて、水槽内に気液二相流を発生させ、エアの体積流量が流動様相に与える影響などについて検討した。なお、エアストーンのパore sizeやporeを通過する空気速度などにより、生成する気泡のサイズは変化するが、汚染系の水を用いていること、また可視化にあたってトレーサーを用いていることなどから、pore sizeは変化すると思われる。これはまた、poreを通過する空気速度や気泡径の大きさの変化などをもたらす。したがって、実験中、こうしたporeに関する状態が完全に一定しているとはいえないため、本研究においては、エアストーンを通して結果的に放出されている空気の体積流量をもとに、流動様相の検討を行った。

流動様相の計測には粒子画像流速計（PIV, Particle Image Velocimetry; Dantec社製）を用い、槽内の速度分布を求めた。具体的には、流れ場にトレーサー粒子を加え、槽内の断面をレーザーシート光により異なる2時刻においてそれぞれ照射し、その間に移動するトレーサー粒子の散乱光をCCDカメラにて読み取り、2時刻における情報を記録することで、これらの時間間隔と各々の粒子についての移動距離をもとにして、各々の粒子に関する速度ベクトルを得る方法⁷⁾である。

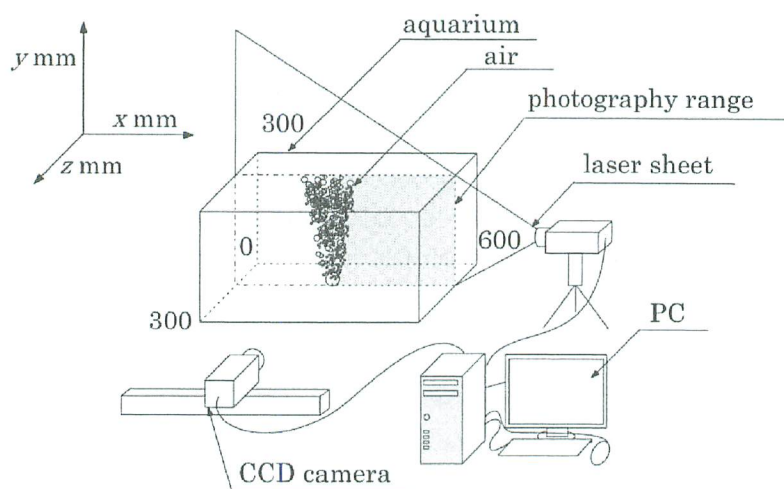


Fig. 1 Measurement system

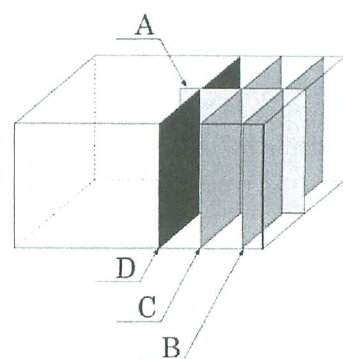


Fig. 2 Measurement plane

3. 数値解析

本研究の対象を流体力学的に考えると、気液二相流となり、その基礎方程式は連続の式と運動方程式となる。さらに、これら2つの式を、気相と液相の各々について考えることとなる。

本研究では、数値解析において以下の仮定を用いることとした。

- 気液間における相変化はない
- 液相、気相ともに密度一定
- 流れは二次元
- 解析領域内では温度一定
- 気泡の合体、分裂など気泡相互の影響は考慮しない
- 乱流モデルは使用しない

上述の仮定にあるとおり、本研究では、まず、数値計算プログラムの妥当性を検証するためにも、2次元にて解析を行った。したがって、現象が比較的穏やかな条件、すなわち、体積流量が小さい条件にて解析を行った。

3-1 支配方程式

本研究の数値解析において必要となる具体的な支配方程式を、上記の仮定を考慮して示す。なお、式において、Gは気相を、Lは液相をそれぞれ表す。

● 連続の式

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_k u_k) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha_k v_k) = 0, \quad k = G \text{ (気相)}, L \text{ (液相)} \quad (1)$$

$$\alpha_L + \alpha_G = 1 \quad (2)$$

$$\left\{ \frac{\partial(\alpha_G u_G)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_L u_L)}{\partial x} \right\} + \left\{ \frac{\partial(\alpha_G v_G)}{\partial y} + \frac{\partial(\alpha_L v_L)}{\partial y} \right\} = 0 \quad (3)$$

● 運動方程式 (二流体一圧力モデル)

液相

$$\alpha_L \rho_L \frac{D\vec{v}_L}{Dt} = -\alpha_L \vec{\nabla} p + \alpha_L \vec{F}_V + \vec{F}_D + \vec{F}_{VM} + \vec{F}_L - \rho_L \vec{g} \alpha_L \quad (4)$$

気相

$$\alpha_G \rho_G \frac{D\vec{v}_G}{Dt} = -\alpha_G \vec{\nabla} p - \vec{F}_D - \vec{F}_{VM} - \vec{F}_L - \rho_G \vec{g} \alpha_G \quad (5)$$

ここに、式中の変数などの記号の意味は、以下の通りである。

α : ボイド率, ρ : 密度, p : 圧力, g : 重力, $\vec{v} = (u, v)$

\vec{F}_V : 粘性力, \vec{F}_D : 気泡に働く抗力, \vec{F}_{VM} : 仮想質量力, \vec{F}_L : 気泡に働く揚力

さらに、eqs.(4), (5)の各項の詳細を以下に記す。

$$\vec{F}_V = -\frac{2}{3} \nabla[\mu(\nabla \cdot \vec{v})] + [\nabla \cdot 2\mu \mathbf{E}] \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{D} + \mathbf{D}^T) \quad \mathbf{T}: \text{転置} \quad (7)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3\text{次元表記}) \quad (8)$$

$$\mu = \mu_L(1 + \alpha_G) \quad (9)$$

$$\vec{F}_D = \frac{3}{4} \frac{C_D \alpha_G \rho_L \bar{v}_r |\bar{v}_r|}{d_B} \quad (10)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (11)$$

$$\vec{F}_{VM} = \alpha_G \rho_L C_{VM} \left(\frac{D\vec{v}_G}{Dt} - \frac{D\vec{v}_L}{Dt} \right) \quad (12)$$

$$\vec{v}_r = \vec{v}_G - \vec{v}_L \quad (13)$$

$$Re = \frac{d_B |\bar{v}_r| \rho_L}{\mu_L} \quad (14)$$

$$\vec{F}_L = C_L \alpha_G \rho_L \vec{v}_r \times (\nabla \times \vec{v}_L) \quad (15)$$

$$C_{VM} = \frac{1}{2} \quad (16)$$

$$d_B = 0.002 \text{ [m]} \quad (17)$$

$$C_L = \frac{1}{2} \quad (18)$$

なお、仮想質量係数 C_{VM} は非粘性流中の単一球形状気泡の場合0.5となることが知られている。このため多くの数値計算で $C_{VM}=0.5$ が使用されているが、気泡形状に応じて0.5~2程度の値が使用される場合もある⁸⁾。また、この取り扱いが気泡群を含む一般的な気液二相流の数値解析においても用いられることが多いため、本研究においても、 $C_{VM}=0.5$ を用いた。

抗力係数 C_D については、ここでは $0 < Re < 0.2$ において用いられる $C_D = 24/Re$ を用いた⁹⁾。

また、気泡径 d_B については、PIVの計測画像をもとに、本論文では 0.002 mとした。

上述の式を、気相と液相の速度の実質微分について解いた後、得られた式を有限差分近似を行って離散化し、流れ場を解くためのアルゴリズムにはHSMAC法^{10,11)}を用いて、数値解析を行った。

4. 結果および考察

Figure 3に、PIV計測を行って得られた速度場 (x - y 2次元計測) から計算した粒子軌跡図を示す。図はエアアの体積流量を100, 200, 300 mL/minと変化させたときの計測面A, B, C, D (Fig.2 を参照) での様子である。各面の右端の模式図は、エアアの体積流量に関わらず、共通してみられる流動様相を模式的に描いたものである。面Aでは、水槽底面の中央に設置されたエアストーンからのエアアにもなう上昇流が上面に到達し、水槽壁面へ向かい循環流となる。ただし、流れは非定常で、水槽内の流れ場は領域の中心 $(x, y) = (450, 150)$ mm付近の比較的流れの弱い部分で、3次元となることがあった。さらに、面Aからすると、体積流量が100, 200 mL/minのときでは、循環流の中の渦は1つであるのに対し、300 mL/minになると循環流の中の渦は二つに分かれる。これは、エアアの体積流量が200 mL/minから300 mL/minの間のある一定の値を超えると、壁面に当たって内側へ戻される流れも強くなり、その分循環流が引き伸ばされることによって、その中に2つの小さな渦が生じるものと考えられる。さらにこの場合、この循環流をとりまくように、もう一つのさらに大きなスケールの循環流の存在が認められる。したがってエアアの体積流量が少なくとも200 mL/min以下であれば、循環流は1つになることが示唆される。これは、容器底面中央にあるエアストーンからの気泡後部に生じるwakeの剥離によって、ジグザグ運動する上昇気泡群による流れがもととなっている。

測定面を x 軸に沿って面Bから面Cさらに面Dへ移動させることで、以下のことがわかった。面Bの結果からは、いずれのエアア流量時においても、領域上部から左右に分かれて中心部に向かう下向きの流れが現れることがわかる。面Cの結果からは、領域中心付近から放射状に広がる流れ、およびこれにもなう循環流が現れることがわかる。さらに、図からはわかりにくいですが、渦の数は、体積流量が100 mL/minの 때가比較的多く、300 mL/minのときが少なかった。さらに面Dの結果からは、エアレーションにもなう下部から上部へ向かう上向きの流れが存在し、これにもなう循環流が形成されていること、エアアの体積流量を増加させても流動様相には定性的な違いはみられないが、体積流量の増加にもなう、領域の左右に存在する2つの循環流それぞれのスケールが大きくなっていることがわかった。

Figure 4には体積流量を36 mL/minとしたときの数値解析結果を示す。(a)は速度ベクトル図である。底面中央から上昇する気泡群にもなう流れによって、左右に循環流が生成しているのがわかる。この計算結果は、初期条件として槽内の流速を0として計算を開始後、13秒後の結果である。(b)には、(a)で得られた速度ベクトル図をもとに計算された粒子軌跡図を示す。この図の右半分の領域が、Fig.3の面Aに対応する。Figure 3と合わせて考えると、体積流量を36 mL/minとしたときの結果から得られた循環流は、100 mL/minの実験結果よりも中心にとどまっいて、弱い流れであることがわかる。

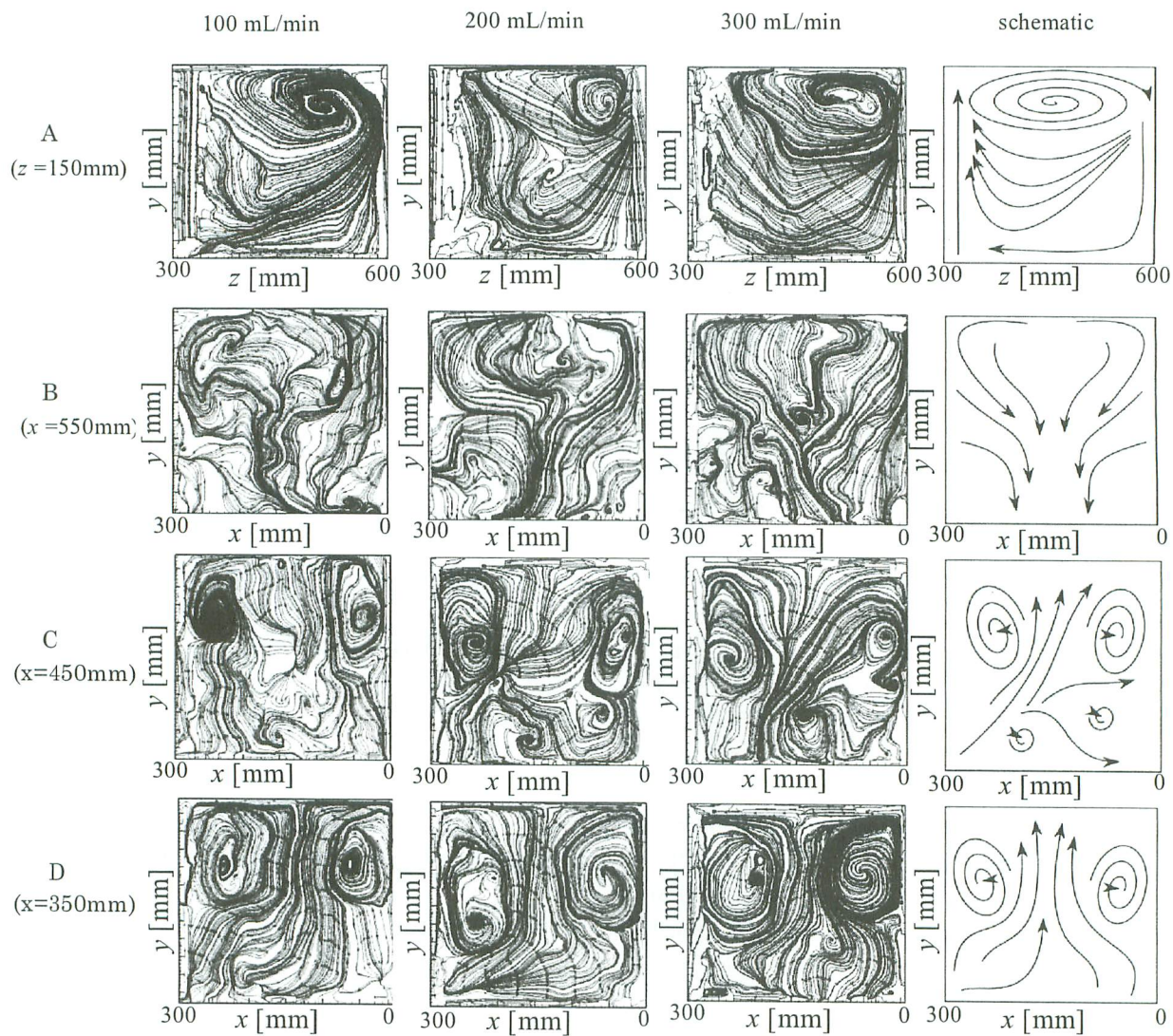


Fig. 3 Particle trajectories obtained by PIV, and schematic of flow pattern.

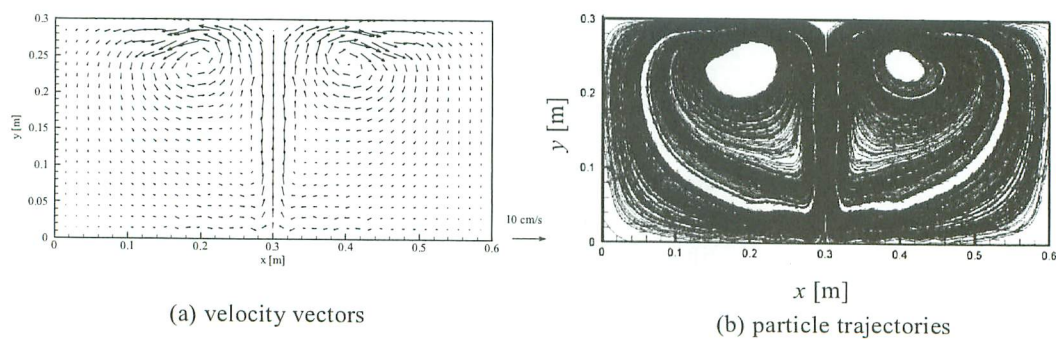


Fig. 4 Computed flow pattern after 13 s under volume flow rate of air at 36 mL/min and $\Delta z=1$ cm.

5. 結論

底面中央からエアーを吹き込まれた、水槽設計を目的とした矩形容器内の気液二相流に関して、PIVを用いた実験的手法と二流体一圧力モデルを用いた数値解析的手法により検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 底面中央からのエアーの上昇にともなう主流の循環流は、本実験条件においては体積流量が200 ml/minを超えると、小さなスケールの二次渦が生じる。
- (2) 底面中央からのエアーの上昇にともなう主流の循環流の渦中心付近では、渦に直角な方向への揺らぎが見られ、その流動様相の3次元性が強い。

謝辞

本研究は、平成24-28年度 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「QOL向上を目指す支援技術のイノベーション研究拠点形成」の助成に与った。

参考文献

- 1) 田中 克, 田川 正朋, 中山耕至: 稚魚生残と変態の整理生態学, 京都大学学術出版会 (2009)
- 2) 塩谷茂明, 赤澤敦司, 坂倉良孝, 田中 久, 荒川敏久, 萩原篤志: 仔魚飼育槽内の流場の計測: マハタ飼育水槽の検討例, 水産工学, 39 (3), 205-212 (2003)
- 3) 平田喜郎, 浜崎活幸, 照屋和久, 虫明敬一: マハタおよびクエ仔稚魚の成長にともなう体密度の変化, 日本水産学会誌, 75(4), 652-660 (2009)
- 4) 宮下 盛: 種苗生産における浮上および沈降死, 日本水産学会誌, 72 (5), 947-948 (2006)
- 5) 萱場隆昭, 杉本 卓, 松田泰平: マツカワ種苗生産における仔魚の大量沈下減耗, 水産増殖, 51(4), 443-450 (2003)
- 6) 桑木賢也: 縦型円筒容器内の気液二相流解析, 九州大学博士学位論文 (1998)
- 7) 可視化情報学会編: PIVハンドブック, 森北出版 (2002)
- 8) 小林敏雄 編: 数値流体力学ハンドブック, 丸善 (2003), p.368
- 9) Yeoh, G. H., Tu, J., Computational Techniques for Multi-Phase Flows, Elsevier, Oxford (2010), p.362
- 10) Hirt, C. W., Nichols, B. D. and Romero, N. C.: SOLA - A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows, Los Alamos Scientific Laboratory report, LA-5852 (1975)
- 11) Hirt, C. W., Nichols, B. D. and Romero, N. C.: SOLA - A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows - Addendum-, Los Alamos Scientific Laboratory report, LA-5852, Add (1976)

Nomenclature

C_D	: drag coefficient	[-]
C_L	: lift coefficient	[-]
C_{VM}	: coefficient of virtual mass	[-]
D	: depth of domain	[m]
\mathbf{D}	: rate of deformation tensor (strain rate tensor)	[m s ⁻²]
d_B	: bubble diameter	[m]
\mathbf{E}	: rate of strain tensor	[m s ⁻²]
g	: gravity acceleration	[m s ⁻²]
F_V	: viscous force	[N]
F_D	: drag force between liquid and gas	[N]
F_{VM}	: force of virtual mass	[N]
F_L	: lift force	[N]
H	: height of domain	[m]
\vec{n}	: normal vector on interface	[m]
p	: pressure	[Pa]
Re	: Reynolds number of bubble	[-]
t	: time	[s]
$\vec{v} = (u, v)$: velocity vector and its components	[m s ⁻¹]

$\vec{v}_r = \vec{v}_G - \vec{v}_L$: relative velocity vector between gas and liquid phases	[m s ⁻¹]
W	: width of domain	[m]
(x, y)	: coordinate	[m]
Greek letters		
α	: void fraction	[-]
μ	: viscosity	[Pa s]
ρ	: density	[kg m ⁻³]
Subscripts		
G	: gas phase	
L	: liquid phase	

Measurement and analyses of flow pattern of gas-liquid two-phase flow in rectangular container for aquarium design

Taichi Yamaguchi, Hiroyuki Hirano^{*}, Naotaka Okamoto^{*}

And Kenya Kuwagi^{**}

Department of System Science, Graduate School of Engineering,

**Department of Applied Chemistry and Biotechnology, Faculty of Engineering*

***Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Engineering,*

Okayama University of Science,

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

(Received September 30, 2013; accepted November 5, 2013)

In this article, the flow pattern of gas-liquid (air and water) two-phase flow in the rectangular domain was investigated experimentally and numerically. In the experiment, the measurement system of PIV (particle image velocimetry) was used to obtain the velocity field in the domain. As for the numerical study, two-fluid one pressure model was adopted, and the flow pattern was computed in case of the small volume flow rate of air.

It was concluded that the location of the secondary vortex is changed by the volume flow rate of air in the two-phase flow, and the vortex is changed into two small vortices when the volume flow rate of air is larger than 200 ml/min. The three-dimensional flow pattern exists around the center of vortices with the upward flow by aeration.

Keywords: gas-liquid two-phase flow; rectangular container; PIV (particle image velocimetry); numerical computation.