

氏名・(本籍)	ヤマグチ タイチ 山口 太一 (佐賀県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第工44号
学位授与の日付	平成28年3月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当(課程博士)
学位論文題目	エアレーションをともなう水槽内における気液二相流 に関する基礎的研究
論文審査委員	主査 教授 平野 博之 副査 教授 堂田周治郎 教授 桑木 賢也 准教授 永谷 尚紀 教授 柳瀬眞一郎 (岡山大学大学院自然科学研究科)

論文内容の要旨

申請者氏名 山口 太一

論文題目

エアレーションをともなう水槽内における気液二相流に関する基礎的研究

本論文は、魚類飼育における種苗生産の初期に発生する大量減耗を最小限に抑えるため、水槽設計の観点から、底面中央からのエアレーションをともなう槽内の対流に与える、エアレーションの体積流量、水深、容器形状の影響について、実験的かつ数値解析的手法を用いて論究するものである。

1章では、魚類飼育における初期減耗および、この対策としての水槽設計について、既往の研究をもとにその重要性について触れ、研究概要を整理し目的と意義について述べている。

2章では、底面中央からのエアレーションをともなう直方体容器内において誘起される気液二相流について、PIV (particle Image Velocimetry) 計測を行った結果についてまとめている。

具体的には、幅 $W=600$ mm、奥行き $D=300$ mm の水槽において、流動様相に与える水深 H の影響については、水深が低くなるにつれエアレーションによる上昇流は十分な加速を得られないこと、とくに、 $H=75$ mm ($AR=H/D=0.25$) のときはエアレーションによる上昇流が水面に到達しない場合があることを実験的に明らかにしている。その結果、水深の違いからみた水槽設計においては、 $H=150$ mm ($AR=0.5$) と $H=225$ mm (0.75) の条件が適していることを見出した。

エアの体積流量の影響については、体積流量が小さいと上昇流は弱く、水面に達した後に水面を沿う流れは生じて側壁に達しない場合もあること、および、水深が $H=150$ mm ($AR=0.5$) より低くなると、エアの体積流量を 300 mL/min まで増加させても、エアレーションによる上昇流によって水面に誘起される流れは側壁に達することなく、循環流は側壁から離れた位置において生じることを実験的に明らかにしている。その結果、循環流と側壁の間には、循環流とは逆向きの低流速域が生じ、ここに仔魚がトラップされると減耗につながると考えられるため、仔魚の飼育には適さないことを見出した。

以上より、直方体容器を用いる場合、仔魚の飼育に適しているのは $H=225$ mm ($AR=0.75$) の場合であるという結論を得ている。さらに、この容器を用いると、槽内は2つの領域にわかれて流動していることを実験的に明らかにしている。

3章では、底面中央からのエアレーションをともなう立方体容器内において誘起される気液二相流について、PIV 計測を行った結果についてまとめている。

具体的には、 $W=D=300$ mm の水槽において、流動様相に与える水深の影響については、2章で行った実験と同様に水深が低くなるにつれて、エアレーションによる上昇流は十分な加速を得られないことを実験的に明らかにしている。とくに、 $H=75$ mm ($AR=0.25$) の場合では、エアレーショ

ンによる上昇流が水面に到達しない場合があること、水深が $H=300\text{ mm}$ ($AR=1.0$), 225 mm ($AR=0.75$) においては、小さな渦が生じやすいことを明らかにしている。したがって、水深の違いからみた水槽設計においては、 $H=150\text{ mm}$ ($AR=0.5$)が適していることを見出した。

エアーの体積流量の影響については、体積流量が小さいと上昇流は弱く、水面に達した後に水面を沿う流れは生じて側壁に達しない場合もあること、体積流量を増加させるとこの流れは側壁に達することを明らかにしている。また、底面の角に生じる渦のスケールは、体積流量の増加とともに大きくなり減耗につながるため、仔魚の飼育には適さないことを見出した。

以上より、立方体容器を用いる場合、仔魚の飼育に適しているのは $H=150\text{ mm}$ ($AR=0.5$)の場合であるという結論を得ている。さらに、この容器を用いると、槽内は4つの領域にわかれて流動していることを実験的に明らかにしている。

4章では、底面中央からのエアレーションをともなう円筒容器内において誘起される気液二相流について、PIV計測を行った結果についてまとめている。

具体的には、内径 $D=300\text{ mm}$ の水槽において、流動様相に与える水深の影響については、2,3章で行った実験と同様、水深が低くなるにつれエアレーションによる上昇流は十分な加速を得られないこと、とくに、 $H=150\text{ mm}$ ($AR=H/D=0.5$), 75 mm ($AR=0.25$)の場合はエアレーションによる上昇流が水面に到達しない場合があることを実験的に明らかにしている。水深が $H=300\text{ mm}$ ($AR=1.0$), 225 mm ($AR=0.75$) においては、底面の側壁の部分に、循環流の中に生じる水面付近の渦とは別の比較的速度の速い渦が生じることを明らかにしている。したがって、水深の違いからみた水槽設計においては、 $H=150\text{ mm}$ ($AR=0.5$)が適していることを見出した。

エアーの体積流量の影響については、体積流量が小さいと上昇流は弱く、水面に達した後に水面を沿う流れは生じて側壁に達しない場合もあること、水深が $H=75\text{ mm}$ ($AR=0.25$)のときは体積流量を 300 mL/min まで増加させても同様であることを実験的に明らかにしている。その結果、循環流と側壁の間には、循環流とは逆向き低流速域ができるため、ここに仔魚がトラップされると減耗につながると考えられ、仔魚の飼育には適さないことを見出した。

以上より、円筒容器を用いる場合、仔魚の飼育に最適なのは、 $H=150\text{ mm}$ ($AR=0.5$)の容器、あるいは、 $H=225\text{ mm}$ ($AR=0.75$)にて体積流量を大きくした場合であるという結論を得ている。

5章では、底面中央からのエアレーションをともなう直方体容器内において誘起される気液二相流について、汎用コード OpenFOAM を用いた数値解析を行った結果をまとめている。

流動様相に与える水深の影響については、水深が低くなるにつれ、エアレーションによる上昇流は十分な加速を得られないこと、とくに $H=75\text{ mm}$ ($AR=0.25$)の場合では、エアレーションによる上昇流は水面に到達しない場合がほとんどであることから、水深の違いからみた水槽設計においては $H=75\text{ mm}$ ($AR=0.25$)より大きい場合が適していることを見出した。

エアーの体積流量の影響については、体積流量が小さいと上昇流は弱く、水面に達した後に水面を沿う流れは生じて側壁に達しない場合もあるが、側壁に達する場合は体積流量が小さいと、大きなスケールの循環流が生じる傾向にあることを見出した。

以上より、直方体容器を用いる場合、仔魚の飼育に適しているのは、 $H=75\text{ mm}$ ($AR=0.25$)より大きい容器で、エアーの体積流量が小さい場合であるという結論を得ている。さらに数値計算結果から、この場合、槽内は2つの領域にわかれて流動していることを見出し、実験結果と定性的に一致していることを明らかにしている。

6章では、底面中央からのエアレーションをともなう立方体容器内において誘起される気液二相

流について、OpenFOAM を用いた数値解析を行った結果をまとめている。

流動様相に与える水深の影響については、水深が低くなるにつれ、エアレーションによる上昇流は十分な加速を得られないこと、とくに $H=75\text{ mm}$ ($AR=0.25$) の場合では、エアレーションによる上昇流が水面に到達せず、水深の違いからみた水槽設計においては、 $H=150\text{ mm}$ ($AR=0.5$) 以上が適していることを見出した。

エアの体積流量の影響については、体積流量が小さいと上昇流は弱く、水面に達した後に水面を沿う流れは生じて側壁に達しない場合もあるが、側壁に達する場合は体積流量が小さいと、大きなスケールの循環流が生じる傾向にあることを見出した。

以上より、立方体容器を用いる場合、仔魚の飼育に最適なのは、5 章と同様に $H=75\text{ mm}$ ($AR=0.25$) より大きな容器で、エアの体積流量が小さい場合であるという結論を得ている。さらに数値解析結果から、この場合、槽内は 4 つの領域にわかれて流動していることを見出し、実験結果と定性的に一致していることを明らかにしている。

7 章では、底面中央からのエアレーションをとまなう円筒容器内において誘起される気液二相流について、OpenFOAM を用いた数値解析を行った結果をまとめている。

流動様相に与える水深の影響については、水深が低くなるにつれ、エアレーションによる上昇流は十分な加速を得られないこと、とくに、 $H=75\text{ mm}$ ($AR=0.25$) の場合では、エアレーションによる上昇流が水面に到達せず、ほぼ全体の 4 分の 1 程度の領域において、上昇流の近傍の流体による渦となることがあるため、水深の違いからみた水槽設計においては、 $H=75\text{ mm}$ ($AR=0.25$) より大きい場合が適していることを見出した。

エアの体積流量の影響については、体積流量が小さいと上昇流は弱く、水面に達した後に水面を沿う流れは生じて側壁に達しない場合もあること、体積流量の増加にともなって、循環流の中に生じる明確な渦が複数となることを数値解析的に明らかにしている。

以上より、円筒容器を用いる場合、仔魚の飼育に適しているのは、4, 5 章と同様に $H=75\text{ mm}$ ($AR=0.25$) より大きい場合であるという結論を得ている。なおこの場合、槽内は 4 つの領域にわかれて流動しているということを見出した。

8 章では論文の総括を行い、魚類初期飼育における減耗を最小限に抑えるにあたり、直方体、立方体、円筒、それぞれの容器において最適と思われるエアの体積流量と水深の組み合わせが存在するという結論を得ている。さらに容器形状については、本論文において検討した範囲においては、槽内の対流パターンが分割されにくいという観点から、直方体の水槽が適しているという結論も得ている。

以上を纏めると、本論文では、魚類の初期飼育において生じる減耗を最小限に抑えるための水槽設計について、化学工学的観点から、その流動様相に重きを置き、実験的手法ならびに数値解析的手法を用いて解析し、水深、容器形状、エアレーションの体積流量が与える影響について基礎的な知見が得られている。ここで得られた結果については、工業装置内の気液二相流の流動様相など装置設計への応用にもつながる。

発表論文

【 学術論文 (査読有) 】

- (1) **Taichi Yamaguchi**, Hiroyuki Hirano, Kenya Kuwagi, Experimental Study on Structure of Flow Pattern of Two-Phase Gas-Liquid Flow in Rectangular Container with Aeration, *International Journal of Engineering*

and Innovative Technology, 4(6), pp.202-204, 2015. (2015年1月)

【 学術論文 (査読無) 】

- (1) 山口太一, 平野博之, 岡本直孝, 桑木賢也, 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, 岡山理科大学紀要, 第49号A, pp.35-41, 2013. (2013年1月)

【 国際会議 (口頭発表) 】

- (1) Taichi Yamaguchi, Hiroyuki Hirano, Kenya Kuwagi, Numerical Computation of Gas-Liquid Two Phase Flow in Rectangular Container with Aeration from Center of Bottom, *Proc. the 7th International Conference on INFORMATION*, pp.365-368, 25-28 Nov., Taipei, Taiwan. 2015. (2015年11月)

【 国際会議 (ポスター発表) 】

- (1) Taichi Yamaguchi, Hiroyuki Hirano, Kenya Kuwagi, Measurement and analyses of flow pattern of gas-liquid two-phase flow in rectangular container for aquarium design, *Proc. 27th International Symposium on Chemical Engineering (CD-ROM)*, PE-05, pp.1-2, 5-7 Dec., 2014, Kuala Lumpur, Malaysia. (2014年12月) BEST POSTER Award 受賞

【国内学会 (口頭発表) 】

- (1) 山口太一, 平野博之, 桑木賢也, 岡本直孝, 矩形容器内の気液二相流流動現象の計測と解析, 化学工学会第45回秋季大会講演要旨集(CD-ROM), XBA123, p.965, 16-18 Sep., 2013, 岡山. (2013年9月)
- (2) 山口太一, 平野博之, 桑木賢也, 底面中央からのエアレーションをとまう矩形容器内における気液二相流の数値解析, 化学工学会第47回秋季大会講演要旨集(USB), O122, 9-11 Sep., 2015, 札幌. (2015年9月)

【国内学会 (ポスター発表) 】

- (1) 山口太一, 平野博之, 桑木賢也, 岡本直孝, 水槽設計のための気液二相流解析, 第50回化学関連支部合同九州大会講演予稿集, p.98, 6 Jul., 2013, 北九州. (2013年7月)
- (2) 山口太一, 平野博之, 桑木賢也, 水槽設計のためのPIVシステムを用いた直方体領域内における気液二相流計測, 第20回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム講演論文集, pp.165-167, PI-9, 11-12 Dec., 2014, 岡山. (2014年12月)
- (3) 山口太一, 平野博之, 桑木賢也, 水槽設計のための矩形容器内の気液二相流流動現象の数値解析, 第52回化学関連支部合同九州大会講演予稿集, p.23, 27 Jun., 2015, 北九州. (2015年6月)

【 その他 (ポスター発表) 】

- (1) 山口太一, 平野博之, 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, CIS フォーラム2014 要旨集, p.25, PN24, 18 Oct., 2014, 銚子商工会議所. (2014年10月)
- (2) 山口太一, 平野博之, 桑木賢也, 水槽内の気液二相流のPIV計測と解析, 岡山理科大学 OUS フォーラム2014 アブストラクト集, p.49, 21 Nov., 2014, 岡山プラザホテル. (2014年11月)
- (3) 山口太一, 平野博之, 桑木賢也, 立方体容器の底面中央からのエアレーションをとまう気液二相流の数値解析, 岡山理科大学 OUS フォーラム2015 アブストラクト集, 20 Nov., 2015, 岡山プラザホテル. (2015年11月)

審査結果の要旨

魚類の生活史において、卵から孵化した直後の仔魚とよばれる時期は、魚は自己遊泳力に乏しいことから、周りの流体の対流の影響を受ける。そして、水面に浮上して再び水中にもどることができずに死亡する浮上死亡や、成長にともなって体密度が増加して沈降していく際、様々なものとの物理的な衝突による損傷を受け、感染症により死亡する沈降死亡を引き起こす。その結果、孵化してから自己遊泳力が備わる稚魚までの間に、その数は10000分の1にまで減少する（初期減耗）。これは仔魚の周りの流体の流動様相が大きく影響している。しかしながら、こうした魚類初期飼育においては、経験などによるところが大きく、初期減耗を最小限に抑えるための流動様相の検討については、十分な研究がなされていない。

そこで本論文においては、魚類の初期減耗を最小限に抑えるための水槽を設計することを目的とし、容器底面からのエアレーションにともなう気液二相流について、エアーの体積流量、水深、容器形状が流動様相に与える影響を検討するために、以下の通り研究を行っている。

まず、実験的研究によって流動様相に関する知見を得るため、直方体容器を用いて、PIV (Particle Image Velocimetry)とよばれる手法により実験を行って、エアーの上昇流にともなう循環流と還流の計測と可視化に成功している。次に、流動様相に与える諸因子について検討を行っている。さらに、立方体容器と円筒容器についても同様の実験を行っている。その結果、いずれの容器についても、仔魚飼育に適した条件が存在することを明らかにしている。

次に、数値解析的研究によって流動様相に関する知見を得るため、最近、広く用いられているオープンソースコードであるOpenFOAMを用いた解析を行っている。解析は、先に行った実験に対応した条件にて行っている。その結果、実験結果と同様に、エアレーションに伴う循環流の存在を明らかにするとともに、上昇流の還流としての、容器底面からの上昇流についても実験結果と同様の結果を得ている。さらに、水槽内の流動様相はこの還流によっていくつかの領域に区切られること、その数は直方体容器では2つ、立方体容器と円筒容器では4つであることを見出している。

最後に、容器形状、エアーの体積流量、水深をパラメーターとして、仔魚飼育に最適な条件範囲について整理した表を得ている。さらに、この結果を踏まえて、仔魚飼育に最適な容器形状としては、水槽内の流動様相が小さく区切られることなく、大きなスケールの循環流が得られる直方体容器であると結論づけている。

これらの研究の結果、本論文では、魚類初期飼育における減耗対策として、底面中央からのエアレーションをともなう水槽設計に関して検討した結果、直方体、立方体、円筒の容器それぞれについて、エアー体積流量などの諸条件について適した組み合わせが存在することなど、化学工学的観点から基礎的な知見を得ている。得られた結果は、物質移動を目的とした気液二相流と関連する化学工業装置設計などへの応用にも繋がる。

以上、本審査委員会は、本論文の審査ならびに公聴会における最終審査の結果に基づき、本論文は博士（工学）の学位に値するものと認める