



# 仔魚飼育用円形水槽内流れの定性的および定量的推察

角田, 哲也

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2013-09-25

(Date of Publication)

2014-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第5971号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005971>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

## 論文内容の要旨

氏 名 角田 哲也

専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

仔魚飼育用円形水槽内流れの定性的および定量的推察

指導教員 塩谷 茂明

(氏名： 角田 哲也 NO. 1)

本研究は水産学に流体工学の技術とアイデアを導入した融合研究である。その目的は、仔魚飼育用円形水槽内の流れ場の定性的かつ定量的に推察することにある。なお、本研究で対象とする飼育水槽は実験室レベルの実施可能な小型モデル水槽のことである。本論文は、5章で構成され、その各章での要旨を以下に示す。

緒論では本研究の背景について述べており、はじめに、種苗生産の意義、関連する研究資料を取り上げ、現時点での問題点と水産学に異分野である流体工学の技術とアイデアを導入する必要性を説明し、最後に本研究の目的を述べ、研究の方針について説明する。

第2章では、飼育用円形水槽内の流れを定性的に明らかにした。はじめに、流れ場の定性的性質を流れの可視化で実施する背景と意義を関連研究を取り上げ、説明する。次に、流れの可視化を実施するための実験装置および可視化方法を説明する。飼育モデル水槽内の流れを通気量 $Q$ とアスペクト比 $AR$ を実験パラメーターとして、流れの可視化実験を実施し、水槽内のフローパターンを定性的に明らかにした。具体的には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 $Q$ の影響は弱い。さらに、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。上記2つの結果はこれまでの研究では報告例がない。さらに、本研究で導入したアスペクト比 $AR$ の概念を種苗生産用水槽に導入することによって、流れ場を $AR$ によってコントロールできる可能性を示唆した。

次に、可視化結果と従来の研究結果を照合し、水槽内のフローパターンと仔魚生産率との関連性を推測した。その結果は長崎大学が実施した飼育実験結果と単純に照合すると、2渦対系の方が仔魚の生産率が高いことになる。

第3章では第2章の可視化実験データを基に同条件で数値計算を実施し、水槽内の流れ場を定量的に推測した。種苗生産水槽内流れの数値解析に関する報告例は決して多くない。マハタの仔魚飼育について一連の研究があるが、Shiotaniらは、仔魚飼育水槽内の流れ場を単相流として取扱い、差分法により速度分布を二次元計算して実測値と比較している。ところが、Shiotaniらの数値計算結果と著者の第2章の可視化結果を照合してみると、両者の対応は必ずしも対応しない。たとえば、Shiotaniらの結果は $AR$ の値に対するフローパターンの変化、特に大きな渦の生成個数は1種類のみしか結果を得ていなく、さらにコーナー渦の存在は数値解析結果には反映できていない。この第1の原因は、計算を同一流体による乱流噴流混合として扱ったことが考えられる。その場合の流れ場は潜り噴流であるため急速な連行による拡散で噴流速度が急減速し、第2章で報告した大渦構造などは形成されないとと思われる。第2の原因は、境界条件として水槽中心の鉛直速度および水表面でのslip速度を付加している点にある。これは必然的に、水表面と側壁の間に形成されるコーナー渦が計算結果に反映されない。この点につ

(氏名： 角田 哲也 NO. 2)

いては、Kuwagi からも自由表面に slip 条件を課すと課題が残ることを報告している。一方、飼育水槽内の流れ場では、水槽中心線付近の流れは底面に設置されたエアストーンから水中に気泡が放出される気液二相流であり、気泡に付随して水が水表面付近まで上昇し大渦構造が形成されている。さらに、可視化観察によれば、自由表面上の速度はほとんどよどんでいる。

以上の点をふまえて、本研究では高い精度を考慮した数値計算によって Shiotani らによる計算方法を改良し、円形水槽内の流れ場を数値的に検証することを試みた。具体的には水槽中心付近の流れ場を実際の流れ場と同様の気液二相流として取り扱い、かつ境界条件をできる限り実際の流れ場に沿う（水表面では no-slip など）ように改良した数値計算を実施した。その結果、数値計算結果は可視化実験結果と良好に対応し、可視化結果を数値計算から確認できた。さらに、数値計算から渦の強度の差異、大渦中心断面内の速度分布、速度ベクトル図から水槽流れが仔魚及ぼす応力負荷が大きい箇所を予測した。

第2章および第3章で定性的かつ定量的に飼育水槽内の流れ場を推測したが、第4章では第2および3章とほぼ同じ条件で飼育実験を実施した。飼育実験の魚種としてアカアマダイを対象とし、その実験概要と結果を示した。飼育実験の結果、アカアマダイの仔魚はアスペクト比  $AR=2.0$  の場合、仔魚の生産率が  $AR=1.0$  の約2倍高かった。これから、単純に流れの可視化と比較すると渦の数が多いほうが生産率は高いと推測できる。

第5章では本研究で取り組んだ内容とその結果、本研究から得られた成果について整理した。また、本研究を発展させるための検討事項を今後の課題として挙げた。さらに、本研究を実用化へと発展させるための問題点を示した。

最後に付録として実験データの一部、式の導入、数値計算法など本文に掲載されていない資料を記載した。

氏名	角田 哲也		
論文 題目	仔魚飼育用円形水槽内流れの定性的および定量的推察		
審査 委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	塩谷 茂明
	副査	教授	福田 勝哉
	副査	准教授	笹 健児
	副査		

印  
印

要 旨

近年、我が国では乱獲や自然環境の変化などにより、水産資源が減少傾向にある。例えば、日本ウナギやクロマグロのような魚種では枯渇の危機にさらされている。水産資源を確保する手段として種苗生産技術が挙げられる。具体的には親魚から採取した卵からふ化させた魚（仔魚という）を稚魚に成長させ、それを海に放流し、親魚まで成長させる。このサイクルが完結すれば、一定量の水産資源は確保できる。一般に種苗生産において、ふ化直後の仔魚が稚魚になるまでに死亡することが多い。この理由は、仔魚は水泳能力が乏しいため自力で餌を摂取する能力も乏しいためである。第二の理由は水流によって仔魚に作用する応力負荷が大きいためと報告されている。この二点については水槽内への通気量、ひいては水槽内の流れ場が影響を及ぼす。このため水槽内の流れ場を解明する意義がある。

本研究は水産学に流体力学の技術とアイデアを導入した融合研究であり、水産学研究者が若手とする水槽内の流れ場の解明を工学的観点から解決することを試みている。この点が本研究の特徴である。本論文は5章で構成され、その各章の要旨は以下の通りである。

第1章では本研究の背景について記述している。最初に、種苗生産の意義、関連する研究資料を取り上げ、現時点での問題点と水産学に異分野である流体力学の技術とアイデアを導入する必要性を説明し、最後に本研究の目的を述べ、最後に研究の方針について説明する。

第2章では、飼育用円形水槽内の流れ場を定性的に明らかにしている。最初に、流れ場の定性的性質を可視化実験で実施する意義を関連研究を取り上げ、説明している。次に、可視化実験装置および方法を説明している。飼育モデル水槽内の流れを通気量  $Q$  とアスペクト比  $AR$  を実験パラメーターとして、流れの可視化実験を実施した結果、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  $Q$  の影響は弱い。さらに、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。上記の2点の結果はこれまでの研究では報告例がない。長崎大学が実施した飼育実験結果と上記の結果を単純に照合すると、2渦対系の方が1渦対系よりも仔魚の生産率が高いことになる。また、 $AR$ 、 $Q$  と生成される渦パターンを調査し、グラフ化している。すなわち、グラフから渦パターンをコントロール可能にした。

第3章では第2章の可視化実験データを基に同条件で数値計算を実施し、水槽内の流れ場を定量的に推測している。種苗生産水槽内流れの数値解析に関する先行研究として、Shiotaniらは、仔魚飼育水槽内の流れ場を単相流として取り扱い、差分法により速度分布を二次元計算して実測値と比較している。ところが、Shiotaniらの数値計算結果と著者の第2章の可視化結果を照合してみると、両者は必ずしも対応しない。たとえば、Shiotaniらの結果は  $AR$  の値に対するフローパターンの変化、特に大きな渦の生成個数は1種類のみしか結果を得ていない。さらにコーナー渦の存在は数値解析結果には反映できていない。この第1の原因は、計算を同一流体による乱流噴流混合として扱ったことが考えられる。第2の原因は、境界条件として水槽中心の鉛直速度および水表面での slip 速度を付加している点にある。これは必然的に、水表面と側壁の間に形成されるコーナー渦が計算結果に反映されない。

一方、飼育水槽内の流れ場では、水槽中心線付近の流れは底面に設置されたエアストーンから水中

氏名	角田哲也
----	------

に気泡が放出される気液二相流であり、気泡に付随して水が水表面付近まで上昇し大渦構造が形成されている。さらに、可視化観察によれば、自由表面上の速度はほとんどよどんでいる。

以上の点をふまえて、本研究では高い精度を考慮した数値計算によって Shiotani らによる計算方法を改良し、円形水槽内の流れ場を数値的に検証することを試みている。具体的には水槽中心付近の流れ場を実際の流れ場と同様の気液二相流として取り扱い、かつ境界条件をできる限り実際の流れ場に沿うように改良した数値計算を実施している。その結果、数値計算結果は可視化実験結果と良好に対応し、可視化結果を数値計算から検証できている。また、数値計算から渦の強度の差異を明らかにするとともに水槽流れが仔魚及ぼす応力負荷が大きいつまを予測した。

以上のように、本研究は、水槽内の流れ場の解明を工学的観点から解決することに努力し、新規性がある。しかも、これまでの先行研究で解明できなかった流れの特性を、可視化実験により厳密に調査し、新しい現象を把握している。

さらに、気液二層流の数値計算手法を用い、厳密に流れの数値計算を実施している。計算結果から、先行研究では把握できなかった、詳細な流れを定量的に評価することができた。また、数値計算結果と可視化実験結果との比較から、飼育水槽内の流れの解明が定性的および定量的に明らかにしている。

このように、論文は新規性、独創性および得られた結論は高く評価できる。以上の内容を3編の有審査論文として発表しており、国際会議においても申請者本人が発表している。以下の(1)および(2)はわが国の代表的な水産工学の学会で有り、権威がある。特に、(3)は国際ジャーナルで、種苗生産関係のトップレベルのジャーナルで有り、インパクトファクターも1.3程度ある優れた雑誌である。他に、参考論文として、Full ペーパー査読の国際会議 ISOPE であり、国際会議で口頭発表している。

<論文の内容を構成する有審査論文>

- (1) 角田哲也, 川原秀夫, 塩谷茂明, 阪倉良孝, 萩原篤志: 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 第48巻 第2号, P99-108, 2011.
- (2) 角田哲也, 川原秀夫, 塩谷茂明, 阪倉良孝, 萩原篤志, 山本健也: 仔魚飼育モデル水槽内の数値計算, 水産工学 第49巻 第3号, P155-165, 2013.
- (3) Tetsuya Sumida, Hideo Kawahara, Shigeaki Shiotani, Yoshitaka Sakakura, Atsushi Hagiwara: Observations of Flow Patterns in a Model of a Marine Fish Larvae Rearing Tank, Aquacultureral Engineering (06/12/2013, Accepted) in Press.

<参考論文>

- (1) Tetsuya SUMIDA, Hideo KAWAHARA, Shigeaki SHIOTANI, Yoshitaka SAKAKURA and Atsushi HAGIWARA: Estimation of Flow Fields in a Model of Rearing Tank for Marine Fish Larvae by Numerical Calculation, ISOPE-2013, July.

3名の審査委員より慎重に審査を実施した結果、本論文は種苗生産分野の仔魚飼育に関する研究において、流体力学的観点から行った研究は画期的、独創的であり、学位論文に値する優れた研究であるものと判断した。