



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。



博士論文

仔魚飼育用円形水槽内流れの定性的および定量的推察

平成 25 年 8 月

神戸大学大学院海事科学研究科

角田 哲也

論文要旨

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る。その目的は仔魚飼育用円形水槽内の流れ場の定性的性質および定量的推察を実施することにある。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形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。

第1章の緒論では本研究の背景について述べている。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、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する。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と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。さらに、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、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、流れ場が AR によってコントロールする可能性を示唆した。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。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 点の結果はこれまでの研究では報告例がない。なお、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 1 渦対系よりも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。この点については、Kuwagi 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。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展望として示した。

最後に、付録として水産学用語説明、本章で掲載しなかった図面、写真および数値計算法など資料を記載した。

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 従来研究の概観	2
1.2.1 水槽内流れに関する研究	2
1.2.2 飼育実験	3
1.3 本研究の特徴と意義	3
1.3.1 本研究の特徴	3
1.3.2 水産学的意義	4
1.3.3 工学的意義	5
1.4 本論文の構成	5
第1章の参考文献	7
第2章 仔魚飼育用円形水槽内流れの定性的推察	9
2.1 緒言	9
2.2 実験装置および方法	10
2.2.1 実験装置の概要	10
2.2.2 可視化方法	11
2.3 実験結果および考察	13
2.3.1 鉛直断面内におけるアスペクト比がフローパターンに及ぼす	

影響	13
2.3.2 鉛直断面内における水槽角部および円形側壁近傍の渦構造	17
2.3.3 鉛直断面内におけるフローパターンの推定法	19
2.3.4 鉛直断面内におけるフローパターンの分類	24
2.3.5 水平断面内のフローパターン	27
2.3.6 フローパターンと仔魚飼育との関連性	29
2.4 第2章の結言	32
第2章の文献	33
第3章 仔魚飼育用円形水槽内流れの定量的推察	36
3.1 緒言	36
3.2 数値計算および方法	39
3.2.1 解析モデル	39
3.2.2 数値計算法	42
3.2.3 格子数の最適性	42
3.2.4 数値解の安定状態の判定	45
3.3 結果および考察	46
3.3.1 鉛直断面内の流線図	46
3.3.2 鉛直断面内の速度ベクトル	49
(1) 大渦の速度ベクトル	49
(2) コーナー渦の速度ベクトル	51

3.3.3	鉛直速度分布	52
3.4	第3章の結言	57
	第3章の文献	58
第4章	仔魚飼育実験	60
4.1	緒言	60
4.2	飼育実験の対象魚種	61
4.3	飼育実験方法	62
4.4	飼育実験結果	63
4.4.1	体積一定の場合の飼育実験	63
4.4.2	同種類容器で水深変化させた場合の飼育実験	64
4.4.3	仔魚生産率	65
4.4.4	飼育観察	68
4.5	第4章の結言	71
	第4章の参考文献	72
第5章	結論	74
5.1	研究のまとめ	74
5.2	今後の課題と展望	77
5.3	本論文の使用記号	79
5.4	本研究に関する成果	80
	謝辞	82

付録	84	
付表-1	水産学および流体力学の用語説明	84
付図-1	魚の成長過程に対する名称	85
付図-2	超音波流速計のプローブ部分	86
付図-3	超音波流速計による飼育水槽鉛直断面内における流速の測定 例	86
付図-4	Ruttanapornvareesakul らによる仔魚飼育実験結果	87
付図-5	Ruttanapornvareesakul らによる仔魚飼育実験概念図	88
付図-6	$Q=10\text{mL/min}$ における可視化写真	89
付図-7	$Q=25\text{mL/min}$ における可視化写真	90
付図-8	塩谷らの流速測定および数値計算結果	92
付式-1	離散化した方程式を含めた数値計算法である HS-MAC 法に よる補足説明	93
付表-2	飼育実験中の水温データ	94

第1章 諸論

1.1 研究背景

本研究の目的は、仔魚飼育用円形水槽内の流れ場を定性的かつ定量的に推察することである。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形モデル水槽のことである。

わが国において、自主的な漁業管理が始まった要因として水揚げ量による価格変動や優良魚場での操業をめぐる魚場係争がある。このように資源管理型漁業は価格維持や異なる豊場への最適漁船配置などを目標としている。近年、魚種によっては乱獲や自然災害（たとえば、東日本大地震）によって枯渇の恐れがある。このため、特定魚介類の緊急かつ安定的な資源再生が急務ある。一般に、魚介類は、卵からふ化したばかりの仔魚を飼育水槽で稚魚まで生育させ、その後、天然海域に稚魚を放流して、親魚まで成長させる（付図-1 参照）。このサイクルによって安定的な水産資源が確保可能となる。一般に、もっとも生残率が低いとされる期間は卵から孵化したばかりの仔魚から稚魚になるまでの期間であるとされている。この期間に仔魚数が減少することを初期減耗という。飼料条件（量、種類、摂餌活動）、物理的環境（流れ、表面張力、光）や化学的条件（水質、溶存酸素）などを人為的に制御することにより、初期減耗を極力抑えることが課題となっている。すなわち、魚介類の養殖産業が成功するか否かは、いかにこの課題を解決するかにかかっている^{1), 2)}。初期減耗に及ぼす影響因子のうち、飼料条件および化学的条件は水産学に携わる研究者や技術者によって解決しつつあるが、物理的環境のうち、水槽内の水流が仔魚に与える影響はほぼ手付かずの状態である。この問題を解決するには飼育実験と水槽内の流れの両面から研究する必要がある。本課題では飼育水槽内の流れ場の推察に焦点を絞った。一般に、水産学の研究者および種苗生産技術者は生物学的な課

題解決を得意とするが、工学的な側面からの解決を苦手とする。このため、水槽内の流れ場について研究した例は少ない。従来の飼育水槽内の流れを研究した例は水槽形状やアスペクト比など実験条件が限定されている^{3)~9)}。さらに、測定原理上、(電磁流速計、超音波流速計)壁面近傍の流れ場は未解明のままである(付-図 2,3 参照)。

以上のことをふまえて、本研究では Y.Ruttanapornvareesakul et al⁹⁾ が実施した飼育実験の興味深い結果(付図-4,5 参照)を参照し、円形水槽内の流れ場を定性的かつ定量的に推察することにする。具体的な研究の進め方はまず通気量 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推察する。次に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する。最後にアカアマダイを対象とした飼育実験を実施し、水槽内の流れ場と飼育実験から初期生残率に及ぼす影響を推測する。

1.2 従来研究の概観

本節では、過去に実施された関連研究のうち、代表的なもののみ取り上げて既知の内容と問題点を挙げ、本研究の位置付けを明確にする。

1.2.1 水槽内の流れに関する研究

John R.Backhust&John H.Harker⁴⁾らは様々の形状(矩形、円形、コーナーを滑らかにした矩形形状、V形形状を伴う矩形水槽など)、エアレーター(円柱、球、数種類の長細い球形)および通気量を変化させた餌の懸濁状況との関係を調査した。

Shiotani et al⁵⁾は $AR=1$ の水槽において、飼育実験と流速分布測定に加えて実験結果を数値計算(二次元数値計算、差分法)で検証した。数値計算結果は速度分布と概ね対応するものの、後に説明するアスペクト比 AR によってフローパターンが変化することおよび水面と底面のコーナー付近に小スケールの

コーナー渦が存在することまでは見いだせていなかった。

阪倉らは⁷⁾ マハタを対象に円形水槽で飼育実験と速度分布測定を実施した。水槽寸法は上面内径 139cm, 底面内径 130cm で, 海水 1 トン (深さ 69cm) である, その時の AR は体積から平均半径を算出して求めると AR の値は約 1.0 であった。水槽内に流れ場は直径 5cm のエアストーンを水槽底部中央に設置し, 通気すると, エアストーンから気泡が上昇し, それに随伴して上昇流が生じる。実験では通気量を系統的に変化させた。その結果は通気量の値の大きさによらず, 左右に 1 対の循環流が認められた。マハタの場合, 通気量が $Q=200$ ml/min の場合が仔魚の生残率・成長・摂餌状況が最もよかった。すなわち, 仔魚の初期生産率と通気量との間には最適値が存在することを示唆した。

1.2.2 飼育実験

飼育実験は多数実験されているが, それらのうち, 本研究と関連する飼育実験として Y.Ruttanapornvareesakul et al⁹⁾ の研究に言及する。 $Q=50$ mL/min, 体積 V (100l) を一定にして水槽形状を変えた円形水槽でオニオコゼとマハタを飼育実験した。その時の AR は 0.74, 1.36, 3.27 であった。結果は両魚種とも最も AR が大きい水槽 (細長い水槽) において, 生残率は高い値を示した。この原因は $AR = 3.27$ の水槽は自由表面の面積が最も小さいため自由表面の表面張力で囚われて死ぬ, いわゆる浮上死が少ないためと推測している。しかし, この推測の仮定 “自由表面下の流れ場はすべての水槽で同じ流れパターンである” は実証されていない。

1.3 本研究の特徴と意義

1.3.1 本研究の特徴

飼育水槽内の流れは底面に設置されたエアストーンから放出される気泡によって生成される。実際の種苗生産現場ではエアストーンの数 1 個とは限らない。しかし, まず, 一番単純なケースについて精査すれば, 複数個のエアスト

ーンを設置した流れ場を明らかにする際のデータの蓄積となる。本研究では水槽底面に球形の1個のエアストーンを設置した場合に生じる流れ場を調査した。従来研究の結果と比較して以下の特徴がある。

① 従来、水産学研究では生物学的なアプローチが多いものの工学的なアプローチが少ない。本研究のように、水産学研究に流体力学的な手法（流れの可視化、数値計算）とアイデアを導入すれば、水産学上の未解決問題に対する基礎的知見の蓄積となる。

② 従来の飼育水槽の流れは水槽内に電磁流速計または超音波流速計を流れ場に挿入して速度分布を測定する^{3),6)~7)}。この場合、計測プローブと流れ場の相対的大きさによって誤差が生じるケースがある。すなわち、流れ場に計測プローブを挿入することによって流れ場が変化する可能性がある。プローブの体積に比べ十分容器体積が大きければ、水槽内の流れパターンが把握可能である。しかし、計測原理上、水面、側壁近傍および底面壁近傍の速度は計測不能である（付図-2,3 参照）。さらに、関連研究では定量化と定性化を同時に明らかにできるが、計測に多大な時間を要する。水槽内の定性的のみの研究であれば、流れの可視化の方が短時間で流れパターンが把握でき、実験条件が多くても対応可能である。それに加えて先行研究で計測できない箇所の定性的な性質を明らかにできる。このことは速度計測を実施する前の計測点を選択する際の基礎的資料となる。

1.3.2 水産学的意義

①従来研究では AR が1未満の条件で通気量を変化させて飼育実験と速度分布測定を実施している。欧州で使用頻度が高い $AR \geq 1$ の水槽について速度分布測定がほとんどない。Y.Ruttanapornvareesakul et al のオニオコゼとマハタを対象とした水量を一定として形状を変化させた飼育実験では $AR = 1.36$ と 3.27 の間で生残率の値が約4倍になっている（付図-4,5 参照）。

②従来の種苗生産現場では、たとえば、通気設定などは視覚など5感を働かせ

た職人芸的な側面があり、技術者によってそのノウハウが異なり、技術の伝承もスムーズに移項できず、飼育技術者が変われば、仔魚の生残率が低下することが多い。そこで、本研究のように流れ場を定性的かつ定量的に明らかにし、飼育実験結果と照合することにより、魚種に対する最適な通気方法が確立できれば、将来、種苗生産技術の伝承がスムーズになる可能性がある。

③従来研究で水槽内の流れ場の速度測定と数値計算を実施し、比較検討された。両者は定性的に一致するものの定量的には一致していない⁵⁾。これは数値計算手法に不適切な部分（たとえば、境界条件の設定など）があったためと思われる。このため、 Q や AR を変化させた場合の数値計算予想が不十分である。このため、より実際の流れ場に近い数値計算法の工夫によって現実に即した流れ場が予測可能になる。なお、数値計算法の適否については流れの可視化結果と比較・検証する。

1.3.3 工学的意義

本研究に類似する流れ場として、以下のようなことが考えられる。

- (1) 空気清浄機によって舞い上がったちりやほこりなどの密閉室内における流動予測
- (2) 化学反応を促進させる懸濁気泡塔内の流れの予測
- (3) 気泡浮力駆動を用いた攪拌（鉄鋼精錬，曝気槽）

本研究はこれらの分野における流れの制御に関する基礎的資料を提供することになる。

1.4 本論文の構成

本節では、本論文の構成とそれぞれの章で取り上げた内容について概要を述べる。

第 1 章では研究背景と本研究の目的を述べ、従来の関連研究を概観すること

により本研究の位置付けを明確にしたうえで、本研究の特徴および意義を述べる。

第 2 章では水槽底面中央にエアストーンを 1 個設置した場合の円形水槽内における流れ場を定性的に述べる。具体的には懸濁法と色素流脈法による流れの可視化実験を実施し、通気量 Q とアスペクト比 AR が流れパターンに与える影響を調べる。これにより、水槽の大渦構造のみならず、従来の研究で未解明である領域（水面、底面および側壁近傍付近）の流れパターンが明らかになる。

第 3 章では数値計算によって可視化で得られた流れ場の検証および定量化を試みる。数値計算に関しては、より現実の流れ場に沿うように塩谷らの計算⁵⁾を改良、発展させる。計算結果から水産学上、生残率に関連すると思われる事項について考察をする。

第 4 章では円形水槽でアカアマダイを対象とした飼育実験について考察する。なお、実験は 2 種類実施するが、そのうちの 1 つの実験では水深を調節して AR の値を*/第 2,3 章と一致させた。飼育実験の結果と第 2,3 章の結果を照合して流れ場と仔魚の生残率の関係を検討する。

第 5 章では第 2 章から第 4 章までに得られた結果を総括し、結論とする。

第 1 章の参考文献

- 1) 南卓志: 初期減耗研究の方法論 ; 研究の歴史, 田中克・渡邊良朗編, 魚類の初期減耗研究. 恒星社厚生閣, 東京, pp.9-20,1994.
- 2) Tucker Jr JW: The rearing environment. In: Tucker Jr JW ed., Marine Fish Culture. Kluwer Academic Publishers, London, pp.49-148, 1998.
- 3) 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: マハタ飼育水槽の検討例. 水産工学, 39: 205-212, 2003.
- 4) J. Backhurst and J.H. Harker: The suspension of feeds in aerated rearing tanks: the effect of tank geometry and aerator design. Aquacultural Engineering, 7: 379-395, 1988.
- 5) S.Shiotani, A.Hagiwara, Y.Sakakura and H.Chuda: Estimation of flow in a rearing tank of marine fish larvae by simplified numerical computation — a case of two-dimensional flow. Aquacultural Engineering, 32: 465-481, 2005.
- 6) Y.Sakakura, S.Shiotani, H.Chuda and A.Hagiwara: Improvement of the survival in the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* larvae by optimizing aeration and water inlet in the mass-scale rearing tank. Fish.Sci., 72: 939-947, 2006.
- 7) 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. 日水誌, 72: 267-270, 2006.
- 8) Y.Sakakura, S.Shiotani, H.Chuda and A.Hagiwara: Flow field control for larviculture of the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus*. Aquaculture, 268: 209-215, 2007.
- 9) Y.Ruttanapornvareesakul, Y.Sakakura and A.Hagiwara: Effect of tank proportions on survival of seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* (Thunberg) and devil stinger *Inimicus japonicus* (Cuvier) larvae. Aquaculture Res, 38: 193-200, 2007.

- 10) 流れの可視化学会: 新版 流れの可視化ハンドブック. 朝倉書店, 東京, pp.46-54,1991.
- 11) 可視化情報学会: 可視化技術の手ほどき. 朝倉書店, 東京, pp.86-114,1998.
- 12) 可視化情報学会: 流れの可視化入門. 朝倉書店, 東京, pp.98-112,1997.
- 13) 宮下盛: 種苗生産における浮上および沈降死.日水誌, 72: 947-948, 2006.
- 14) Y.Tanaka, K.Kumon, A. Nishi, T. Eba, H. Nikaido and S. Shiozawa: Status of sinking of hatchery-reared larval Pacific bluefin tuna on the bottom of the mass culture tank with different aeration design. *Aquaculture Science* , 57: 587-593, 2009.
- 15) S. Masuma, T. Takebe and Y. Sakakura: A review of the broodstock management and larviculture of the Pacific northern bluefin tuna in Japan. *Aquaculture* , 315(1-2): 2-8, 2011.
- 16) 武部孝行, 小林真人, 浅見公雄, 佐藤琢, 平井慈恵, 奥澤公一, 阪倉良孝: スジアラ仔魚の沈降死とその防除方法を取り入れた種苗量産試験. *水産技術*, 3(2): 107-114, 2011.

第2章 仔魚飼育用円形水槽内流れの定性的推察

2.1 序論

本章では円形飼育水槽内のフローパターンを流れの可視化によって定性的に調査し、アスペクト比 AR がフローパターンに及ぼす影響、通気量 Q がフローパターンに及ぼす影響について明らかにすることを目的とする。その結果、流れ場と初期減耗^{1),2)}との関係に関する基礎的知見の蓄積となる得る。

今日まで、世界中で飼育実験が実施されてきたが^{3)~9)}、飼育実験水槽内の流れに関する研究を概観すると、小規模な角形水槽内の流れの簡易計測や通気の効果を検討した例は見られるが⁴⁾、水槽内の流場を系統的に計測した例は少なかった。近年、マハタの種苗生産水槽内の流場を定量的に調べた一連の研究によって^{3),5)~8)}、1kL および 100kL 容量の円形水槽について中心軸を含む鉛直断面のアスペクト比 AR (以下、 AR と記す) が 1 以下の流れを超音波流速計で計測し、断面内で鉛直循環流が発生することが定量化された。さらに、同一水槽を用いた仔魚飼育実験を通じて通気により発生する流場と仔魚の生残率との関係が明らかにされ、各々の規模の水槽で仔魚飼育に最適な流場が求められるようになった^{3),6)~8)}。ただし、超音波流速計の計測原理上、壁面および水表面近傍の流れ場は未解明である(付図-2,3 参照)。また、Ruttanapornvareesakul ら⁹⁾ は通気量 Q (以下、 Q と記す) が 50mL/min、水量一定(100L)の下で、水槽半径と液深を変えた 3 種類の円形水槽において、マハタとオニオコゼの仔魚飼育実験を実施した。その結果、両種ともに仔魚の生残率は、直径が小さく液深が深い (AR が大きい) 水槽ほど高いことを報告(付図-4,5 参照)し、水槽内の仔魚の行動の目視観察から自由表面の面積が小さい水槽ほど表面張力で捕捉されて死ぬ、いわゆる浮上死の数が少ないことを見いだした。しかしながら、この研究では水槽内の流れと仔魚の水槽内の分布の関係までは調べられていない。

次に、円形水槽の鉛直断面内流れを 2 次元対称流と見なし、2 次元溝内部流れと比較することを試みる。溝内部の流れ場は 2 次元壁面流中の単一溝あるいは連続溝粗面流として多くの研究がなされている^{10)~13)}。それらのうち、Tani ら¹⁰⁾は溝内の表面圧力と速度分布の測定から、溝を越える流れは溝の深さと幅の比が 0.7 付近で著しく変化すると報告している。この結果を参照すると、円形飼育水槽内でも AR によってフローパターンが変化する可能性がある。これより、水槽内のフローパターンの変化を精査して制御できれば、上述した Ruttanapornvareesakul ら⁹⁾の飼育実験の生残率向上の要因に物理的要素、すなわち流れがどのように影響を与えているかを明らかにすることができると予想される。ところで、前述の Ruttanapornvareesakul ら⁹⁾の実験に利用した 3 種類の円形水槽はポリカーボネイト製(SPS-200,SPS-100,SLP-100)で、底面から上方に向かい直径がわずかに増加する形状である。そこで、便宜上、水の体積と液深から水槽平均半径を求めて AR を算出すると、その値はそれぞれ、 $AR = 0.74$, 1.36 および 3.29 になる。彼らの飼育実験結果（詳細は付図-4,5 参照）では、 $AR = 0.74$ と 1.36 の水槽では生残率はそれぞれ $5.3\sim 7.3\%$, $4.6\sim 7.3\%$ であるのに対し、 $AR = 3.29$ の水槽では $16\sim 36.4\%$ と高い値を示した。このため $AR = 1.36$ と 3.29 との間でフローパターンが著しく変化した可能性が推測できる（付図-5 参照）。

以上の点をふまえて、本研究では Q と水槽の AR を変化させた場合について、水表面、底壁面および側壁面のごく近傍までの広い領域のフローパターンを流れの可視化によって明らかにする。得られたフローパターンから、渦構造とその存在理由を簡単な解析から実証する。

2.2 実験装置および方法

2.2.1 実験装置の概要

実験に用いた円形水槽は、寸法が内径 $2r_i = 390\text{mm}$, 外径 400mm (厚さ 5mm), 高さ 590mm であり、材質は透明アクリル樹脂製である。水槽内の流体はフロ

一パターンの観察のみが目的のため、清水（水道水）を用いた。可視化実験の際、透過光の屈折による歪みを防止するために、円形水槽の外側に断面が 500mm × 500mm で高さ 500mm の角形水槽を設置し、その間に水を封入した。実験装置および装置の写真をそれぞれ図 2-1, 2-2 に示す。実験は水槽内に導入した空気の流量(通気量) Q を 10, 25 および 50mL/min の 3 種類とした。 Q はエアポンプ（テクノ高槻製, SPP-6GA）から送風される空気量を三方コックで調整し、必要空気量となるように制御した。なお、通気量は 1 分間当たりの吐出空気量を水槽内でピーカーを用いて直接捕集し、数回の計測の平均値とした。液深は投影断面内 AR ($=H/r_i$, H は液深, r_i は水槽半径) の値に応じて変化させた。なお、 AR は 0.5, 1.0 および 2.0 に変化させた。実験時の水温はおよそ 25°C の一定に調節した。

2.2.2 可視化方法

可視化方法は細部の状況を詳細に判別できるように、場合に応じて懸濁法と色素流脈法を併用した^{15)~16)}。まず簡単に、それぞれの可視化法について述べてお

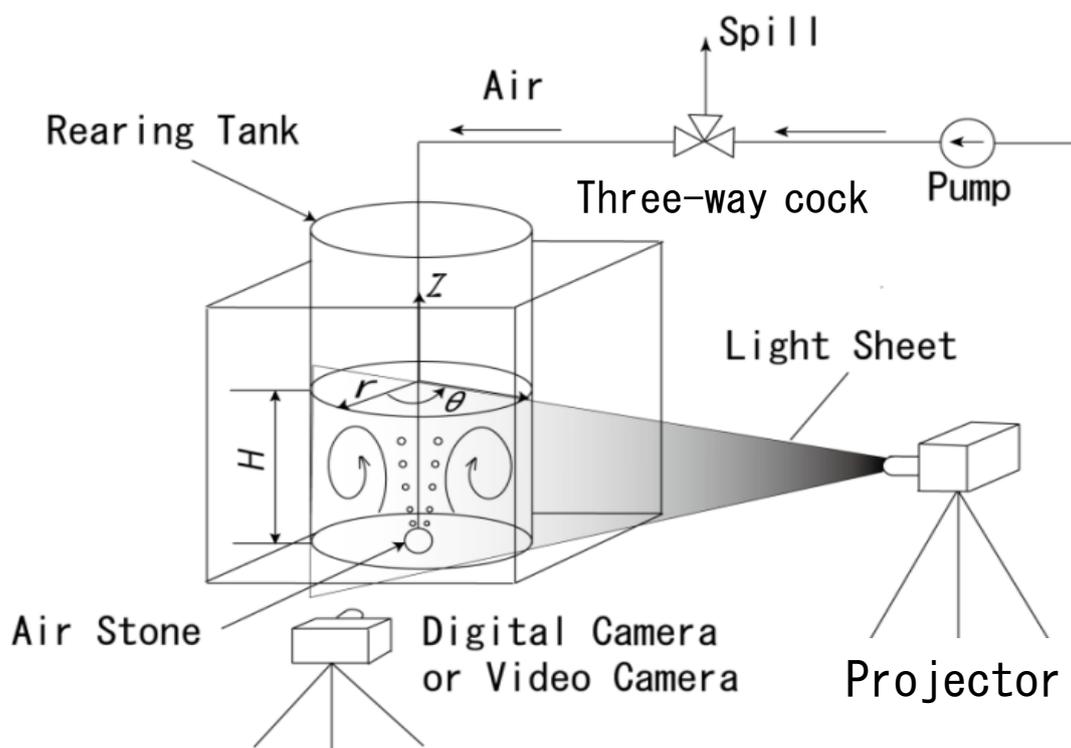


図 2-1 可視化実験装置および座標系



図 2-2 実験装置概観写真

く。色素流脈法は色素液をトレーサとして流れの中に注入し、トレーサの描く流脈を観察する方法である¹⁵⁾。色素液は光に対して蛍光するフルオレセインナトリウム溶液を使用した。実験に際して、色素液に少量のアルコールを混ぜて水の比重に一致するように調節した。色素液注入管は外径 1.06mm(内径 0.7mm)のステンレス管を観察に適した位置に配置し、注入管に接続する液タンクの位置ヘッドを利用して、色素液を流れ場になめらかに注入した。

一方、懸濁法とは流れ場中に微小の固体トレーサを直接注入し、水と懸濁させた後、そのトレーサを追跡観察してフローパターンを求める方法である¹⁵⁾。本実験に用いたトレーサは比重 2.7、平均粒径 $40\mu\text{m}$ のアルミ粉である。アルミ粉の拡大写真を図 2-3 に示す。アルミ粉と水との質量比は 4.31×10^{-7} に固定して実験した。アルミ粉と水との親和性をよくするため、アルミ粉をアルコールに混ぜてから水面下に注入した。なお、アルミ粉の沈降速度 U_g を Stokes の抵抗法則¹⁵⁾から評価すると、 $U_g = 1.64\text{mm/s}$ であり、極めて小さいので、沈降速度は無視した。可視化に用いた光源はスライドプロジェクター（理化学製、HILUX-HR）を使用した。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° の方向から¹⁶⁾デジタルカメラ(CANON製, D70)で撮影した。また、動画はビデオレコーダー(SONY製, HDR-SR12)で撮影するとともに、HDDレコーダー(SONY製, BDZ-T55)にも保存した。

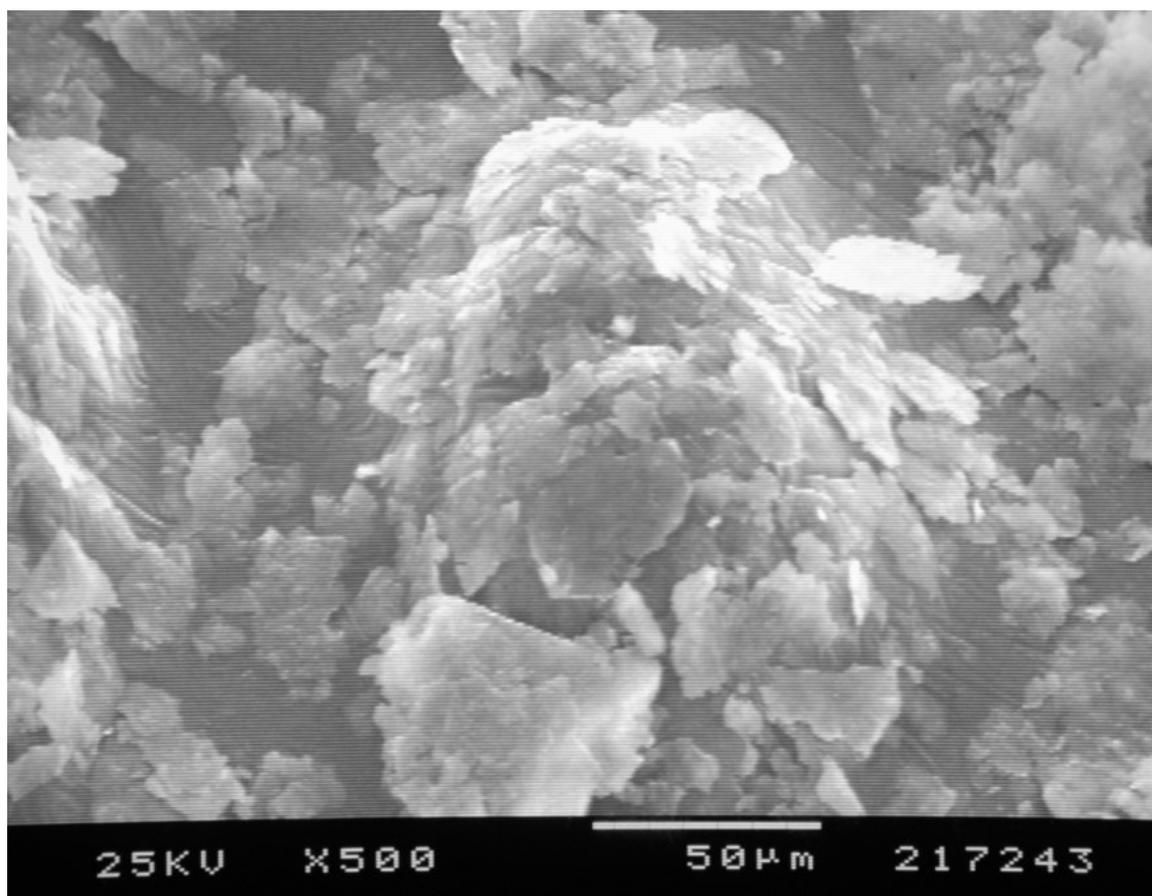


図 2-3 トレーサ粒子の拡大写真

2.3 実験結果および考察

2.3.1 鉛直断面におけるアスペクト比がフローパターンに及ぼ影響

水槽内の鉛直断面($r-z$ 面)全域にわたるフローパターンの可視化において、 $\theta=0^\circ$ (観察方向に対して鉛直となる面で、スリット光の照射面内)、 45°

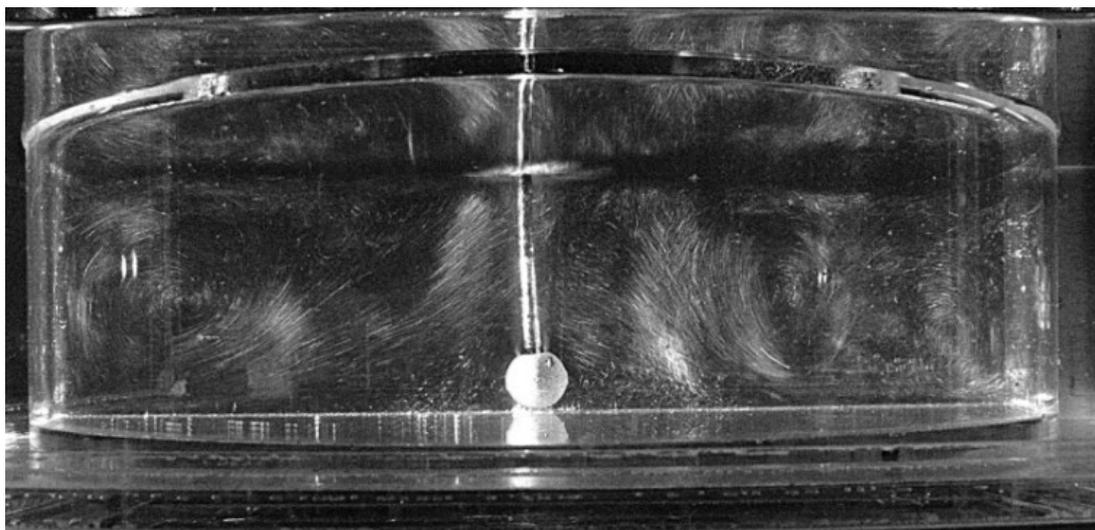


図 2-4 $AR=0.5$ における垂直断面の可視化写真

および 90° について予備実験をしたところ、 θ によらずほぼ同様の結果が得られた (図 2-12 を参照)。したがって、本論文では $\theta=0^\circ$ の結果を代表として報告する。また、後述するように本実験条件の範囲内ではフローパターンは通気量の値に依存しない (図 2-14 参照) ので $Q=50\text{ml}/\text{min}$ を代表として説明する。図 2-4, 図 2-5 および図 2-6 は、 $Q=50\text{mL}/\text{min}$ 一定における $AR=0.5$, 1.0 および 2.0 の場合の水槽内全域のフローパターンを可視化した写真を示す。写真では渦構造が判別しにくいですが、図 2-4 ($AR=0.5$) および図 2-5 ($AR=1.0$) では水槽内の左右領域に 1 対, 図 2-6 ($AR=2.0$) では左右領域の上段, 下段に 2 対の寸法の大きな渦構造が存在している (なお、フローパターンの模式図は後述の図 2-11 を参照) のが見られる。まず 1 対の渦構造を示す場合の代表として、図 2-4 の循環流れについて結果を述べる。なお、図示していないが動画観察を加えて検討する。水槽底部中央に配置した直径 20mm のエアストーンから発生した気泡の上昇に伴い、流体 (水) は水槽底面付近から水表面に向かい上昇し、水表面付近で向きを半径方向に転じ、円形水槽側面まで輸送される。円形側壁面に到達した水は側壁面に沿うように向きを変え下降し、水槽底面付近でさらにその向きを半径方向中心向きに転じる。この水の水槽内における大循環により大きな渦 (M) 構造が形成される。なお、水表面ではエアストーンからの気泡の

一部が大気中へ放出されるが、その放出量は水槽内の液深が浅いほど著しい。また、水表面の水は流動が抑制されほとんど淀んでいるが、水面パターンを注意深く観察すると緩やかながら複雑な流動を呈している。一方、水表面の直下すぐ近傍では、かなり大きい速度の流体が中心付近から半径方向放射状に移動している。また、水槽中央部にはエアストーンからの気泡上昇も明白に見られる。なお、図 2-5 の可視化写真の渦構造が不鮮明であるが、これは動画観察によると、この条件の場合、液深が浅いため水表面から多量の気泡が抜け、そのため水槽底面から水表面に向かう気泡とともに上昇する液体の速度（アルミ粉の動き）は小さくなり、ひいては渦の循環速度が小さくなったためと思われる。なお、液深と気泡の上昇速度の関係を別途計測（図示していない）しているが、上昇速度は液深が浅いほど緩やかであった。 $AR = 1.0$ の可視化写真を図 2-5 に示すが、その傾向は図 2-4 と同様であるが、中心付近の上昇速度が増加し、渦の循環速度も増すため、左右 1 対の大渦構造の存在が明白になった。

次に、2 つの渦対構造を示した $AR = 2.0$ の場合(図 2-6)について、フローパターンを述べる。図から明白に見られるように、上半面領域に左右 1 対の渦(N_1)とその下半面領域に左右 1 対の渦(N_1')が存在している。動画観察によると、上

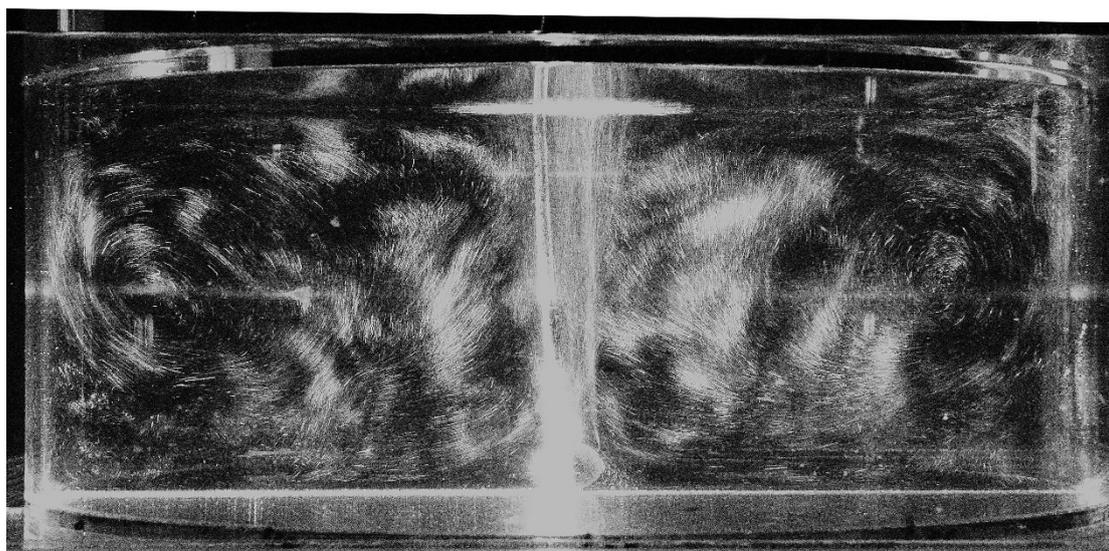


図 2-5 $AR = 1.0$ における垂直断面の可視化写真

半面側の 1 対の渦(N_1)は断面中心領域で上方に向かう流れであり、一方、下半面側の 1 対の渦(N_1')は断面中央近くで下方に向かう流れであり、両者の回転方向は反対である。なお、循環する渦構造がもつ速度は直視観察によれば、上半面側の方が大きい。以上に示したフローパターンの傾向は、 $Q = 10 \sim 50 \text{ mL/min}$ の範囲内では Q にほとんど無関係に、 AR のみに依存して変化する。 AR が 2.0 で見られる 2 対の渦構造フローパターンは従来の研究結果では報告されておらず^{3),5)~8)}、仔魚飼育技法にとり興味深い結果である。

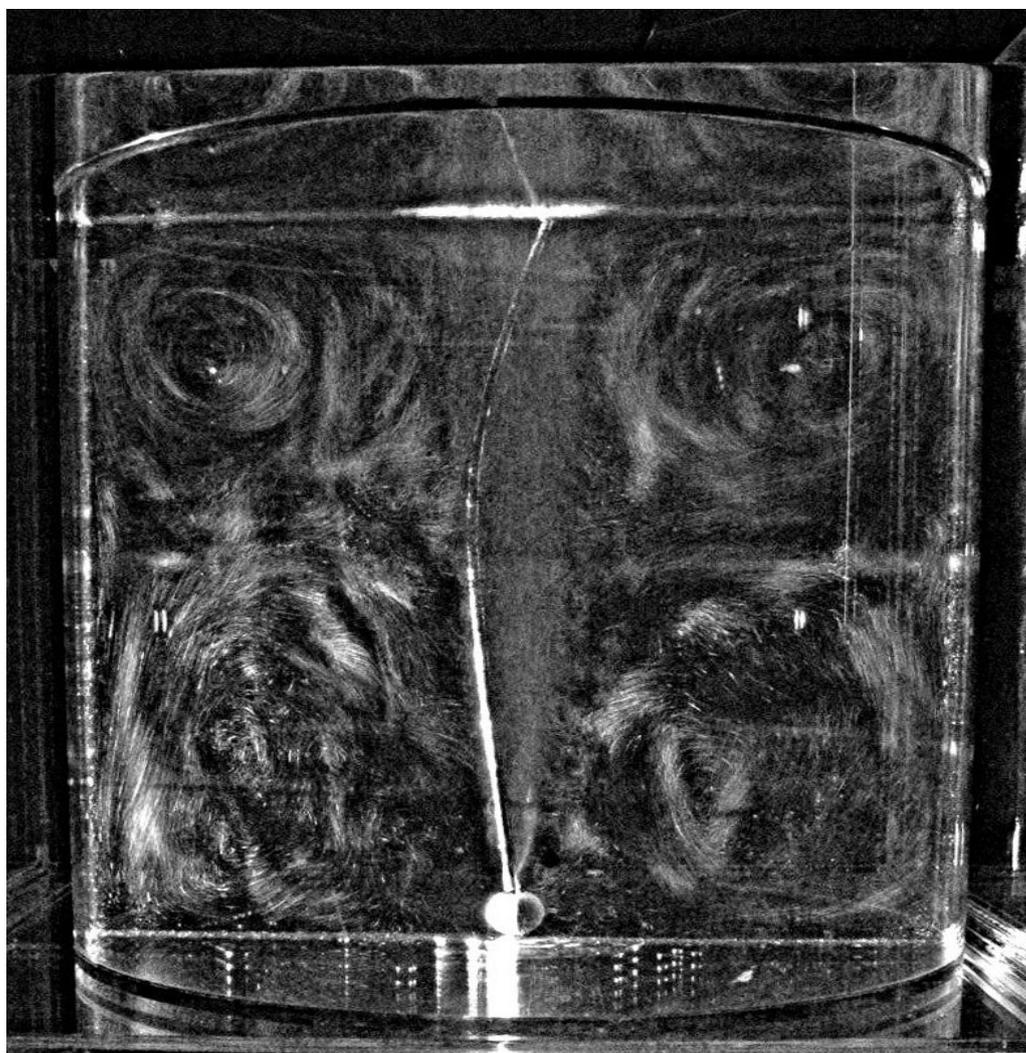


図 2-6 $AR = 2.0$ における垂直断面の可視化写真

2.3.2 鉛直断面における水槽角部および円形側壁面近傍の渦構造

2.3.1において、水槽全領域のフローパターン、特にスケールの大きい渦構造について説明した。その観察結果を詳細に吟味すると、これまでの研究^{3),5)~8)}では必ずしも明らかにされていない渦構造が、水槽角部の水表面付近と底壁面近傍および鉛直側壁面の局所位置に見られたので、これについて述べる。図 2-7~2-9は $Q = 50\text{mL}/\text{min}$, $AR = 2.0$ の場合における可視化写真である。図 2-7

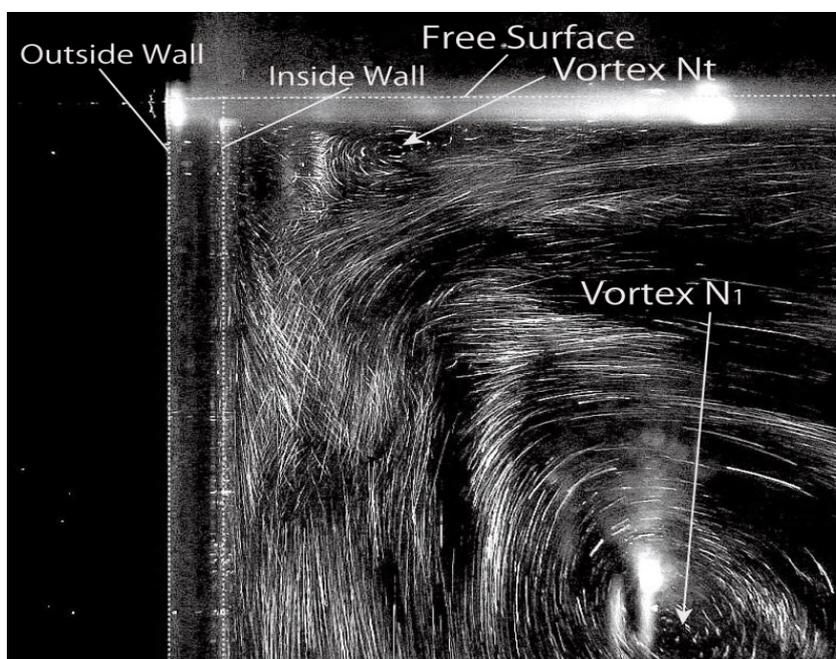


図 2-7 水表面コーナー渦の可視化写真

は水槽左側角部の水表面近傍における渦構造（水表面コーナー渦と呼ぶ）を示す。アルミ粉の軌跡は水表面付近では、水槽中央領域から円形水槽側壁に向かうにつれ向きを変え、下方に移動している。その際、水表面近傍角部で閉じた三角形状領域を形成し、渦構造（写真では時計回りの渦 N_t ）を呈している。この渦構造は円形水槽の縁の回りに形成されたリング状の渦輪の断面が可視化されていると推測できる。この水表面コーナー渦は本実験の範囲内で AR と Q を変化させた場合、常に観察され、また渦の回転方向は同一であった。なお、動画観察によるとコーナー渦の回転速度は著しく大きく、またその渦輪軸は時折、

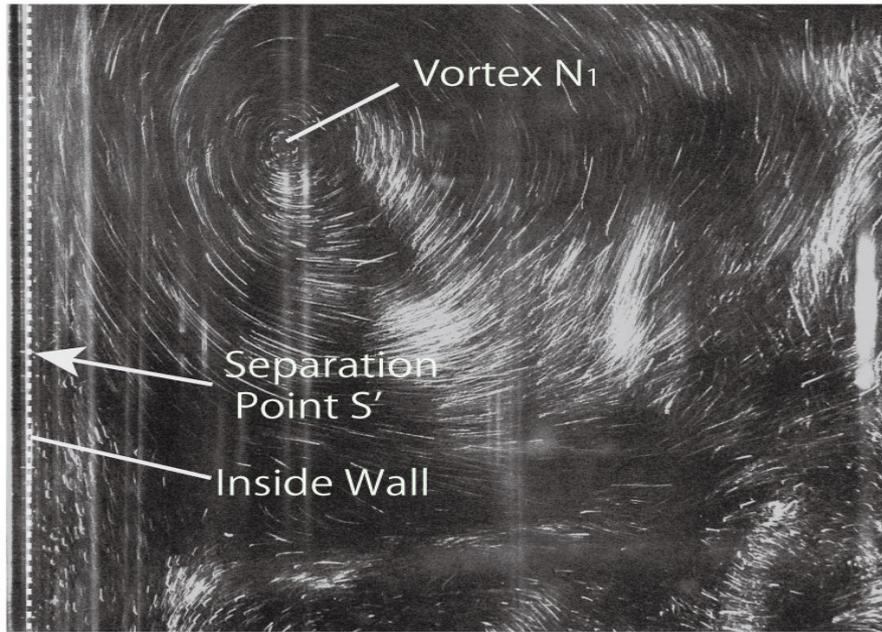


図 2-8 側壁面上におけるはく離点

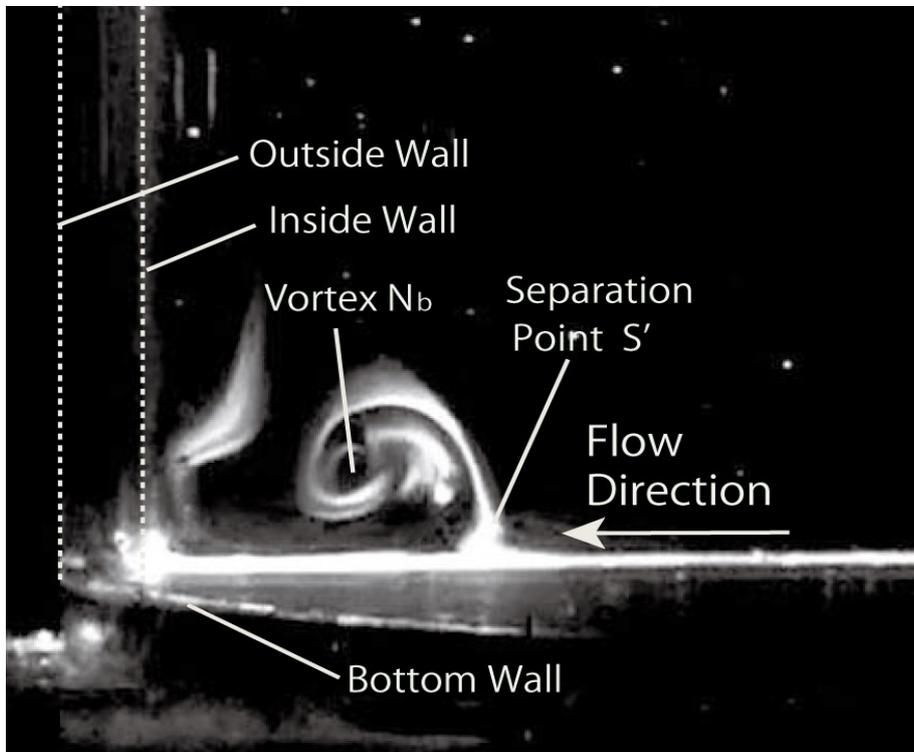


図 2-9 水槽左底面過度部のコーナー渦

円形(図 2-12 参照)から変形し、3次元性(花びら状)を生じている。なお、写真右下部に大渦構造 N_1 が観察されている。図 2-8 は円形左側壁面上のはく離点 S' と渦構造 N_1 を示す。この場合に観察されるのはく離点 S' は、 $AR = 2.0$ の場合であるので、水槽上半面と下半面の渦構造 N_1 と N_1' の境界として形成されたものである。はく離位置は、本実験条件の範囲内 ($Q=10\sim 50\text{mL}/\text{min}$) で通気量を変化させても概ね変化しなかった。

図 2-9 は色素流脈法によって可視化された水槽左側角部の底壁面近傍における渦構造 N_b (底面コーナー渦と呼ぶ) 壁面上のはく離点 ($AR = 2.0$) を示す。水槽底面中央付近から底面に沿って円形側壁方向に移動した水は、下半面領域に生成する大渦構造 N_1' (時計回り) を構成する。他方、水槽角部に近づくにつれて底面に沿う流れに逆圧力勾配が生じ、そこではく離 (はく離点 S') して流れが上昇する。はく離した上昇流は、次に円形側壁面上に再付着 (点 S') し (写真では識別困難、動画観察より)、この角部コーナーに反時計回りの渦 (N_b) が形成される。この渦構造の挙動は定常で安定しているが、極めて遅い循環速度である。そのため、アルミ粉末を懸濁する方法では露出時間の制約から明瞭に可視化できず、色素流脈法を用いて観察した。

2.3.3 鉛直断面内におけるフローパターンの推定法

可視化観察によるフローパターンの確認と概略的な模式図を示すため、Hunt ら¹⁷⁾ によるトポロジー的考察を適用する。ここで、この考察について簡単に説明する。

2次元の力学系は一般に式(2.1)で与えられる。Hunt は式(2.1)の行列の要素に流体力学の変形速度を適用した。すなわち、2次元定常流における流体点の運動は式(2.2)で表現される。式(2.2)は2次元曲線場の平衡点(よどみ点)近傍の挙動が線形化された式である。物体表面からの距離を0に近づけた流線を限界流線という¹⁵⁾ が、限界流線の接線はその点における表面摩擦応力の方向に一致する。

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

平衡点近傍の限界流線パターンは行列の各要素の組み合わせによって表現可能である。Hunt は空間中に出現する平衡点（鞍点，結節点）の他に物体表面上の平衡点を面内流れで見たときの点（半鞍点，半結節点）の概念を導入（付図-9 参照）し，流れ場に位相的なルール（平衡点の種類と個数の関係式）を適用している。物体を切断する平面上の面内流線に関して示したものが式(2.3)である。着目する流線に関して式(2.3)が成立すれば，推測したフローパターンが存在することを示したものである。これにより推測した渦構造が，現実の流れの可視化による観察から見られるものと同一であると解釈できる。式 (2.3) は Hunt et al の原著論文の式である。

$$\left(\sum_N + \frac{1}{2} \sum_{N'} \right) - \left(\sum_S + \frac{1}{2} \sum_{S'} \right) = 1 - n \quad (2.3)$$

ここで， \sum_N ， $\sum_{N'}$ ， \sum_S ， $\sum_{S'}$ ， n はそれぞれ Nodal Point (N)，Half Nodal Point(N')，Saddle Point(S)，Half Saddle Point(S')の総数および流れ場の連結数であり，それらは力学系で使用される用語である¹⁷⁾，また，連結数は複素関数論で用いられる。用語(任意の領域内 D にどんな単一閉曲線 C を描いても， C の内部が D の点ばかりであるとき， D を単一連結領域という)である¹⁸⁾。ちなみに，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。考察の前に，流れ場の対称性について説明しておく。図 2-10 は $Q = 50\text{mL/min}$ の大渦中心の位置を示す。渦中心位置は空間中で速度が 0 となる淀み点と定義する。結果を見ると，概ね鉛直断面内の流れ場は対称性を有することがわかる。なお，この傾向は Q を変化しても同様の傾向を示していた。これ故，Hunt らの式(2.3)

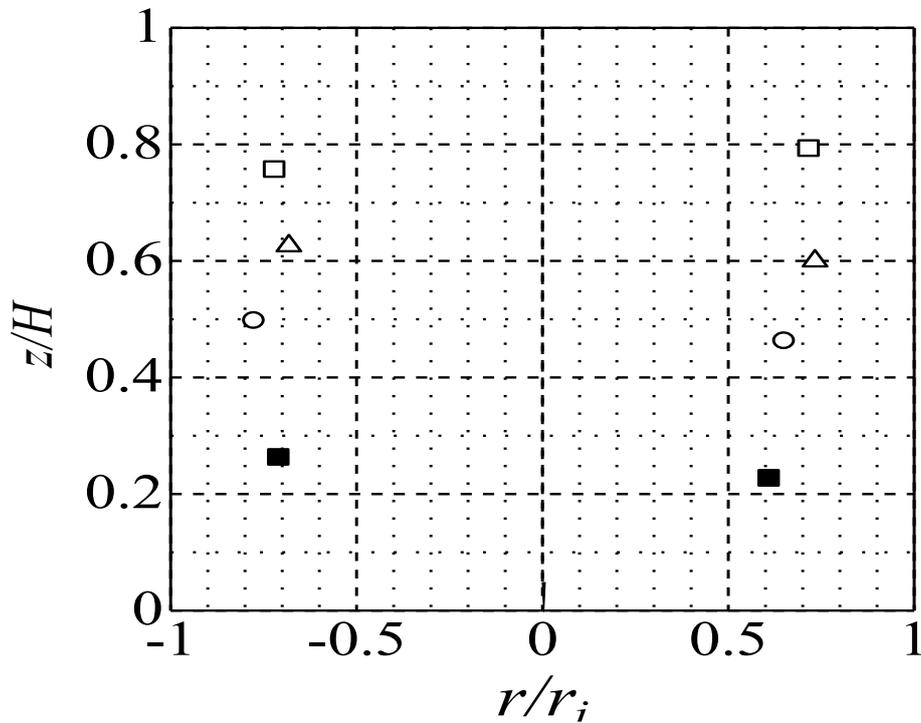


図 2-10 大渦中心位置の変化

〔 ○, △はそれぞれ $AR = 0.5, 1.0$ における大渦の中心位置を, □, ■はそれぞれ $AR = 2.0$ の上部大渦と下部大渦の中心位置を示す 〕

から図 2-11(a), (b)および(c)を, 静止画写真および動画から推測した。それぞれ $AR = 0.5, 1.0$ および 2.0 の場合の渦構造パターンの模式図を示す。なお, 図中の水面に描かれている矢印は水面上の流体の流動方向ではなく, 水面直下の流体の流動方向を示す。図 2-11 (a), (b)の半断面の場合 ($AR = 0.5$ および

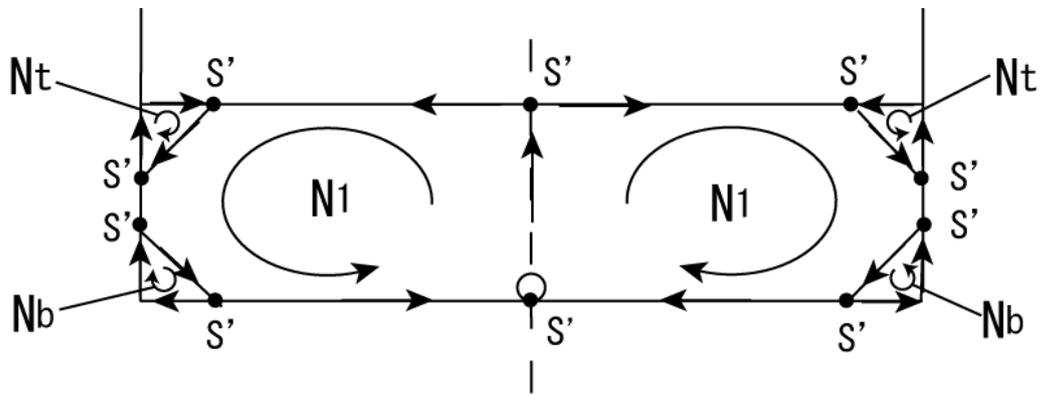
$$1.0), \quad \square_N = 3, \square_{N'} = 0, \square_S = 0, \square_{S'} = 6, n=1$$

で, 式(3.3)が成立する。

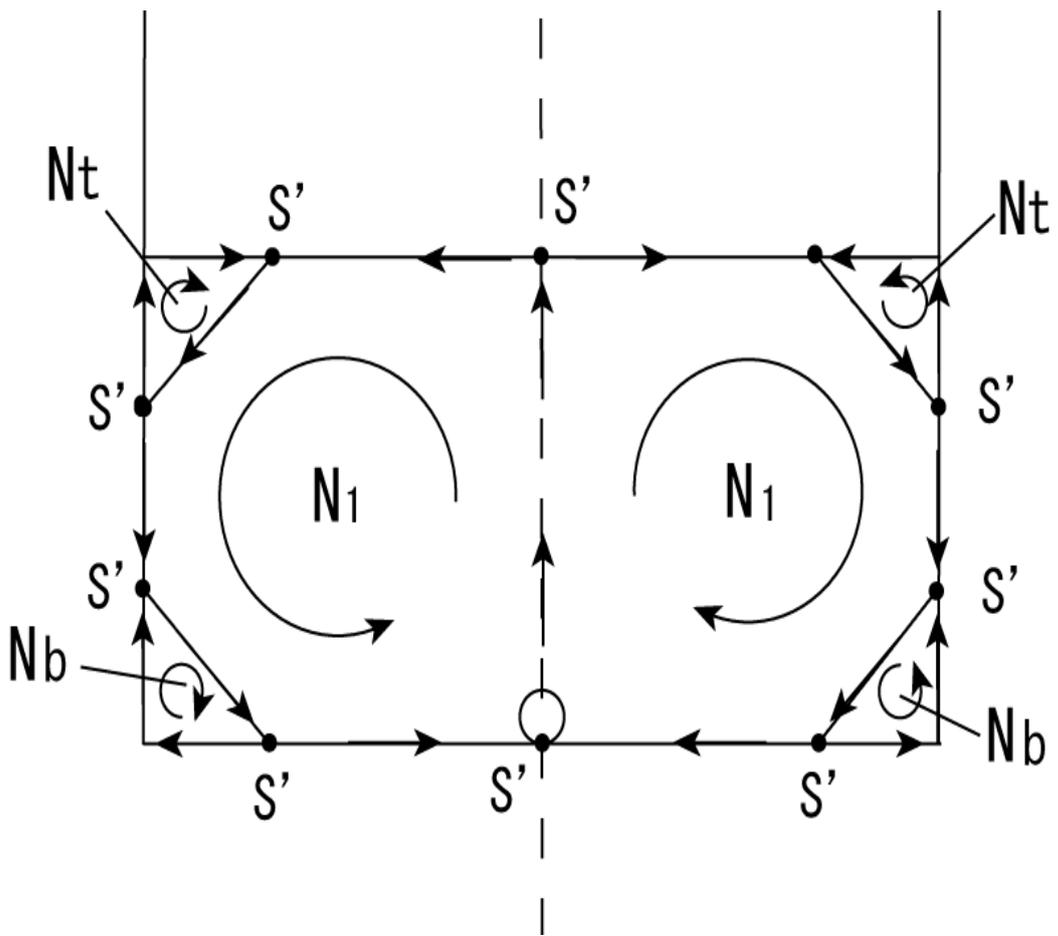
一方, 図 2-11(c)の半断面の場合 ($AR=2.0$),

$$\square_N = 4, \square_{N'} = 0, \square_S = 0, \square_{S'} = 8, n=1,$$

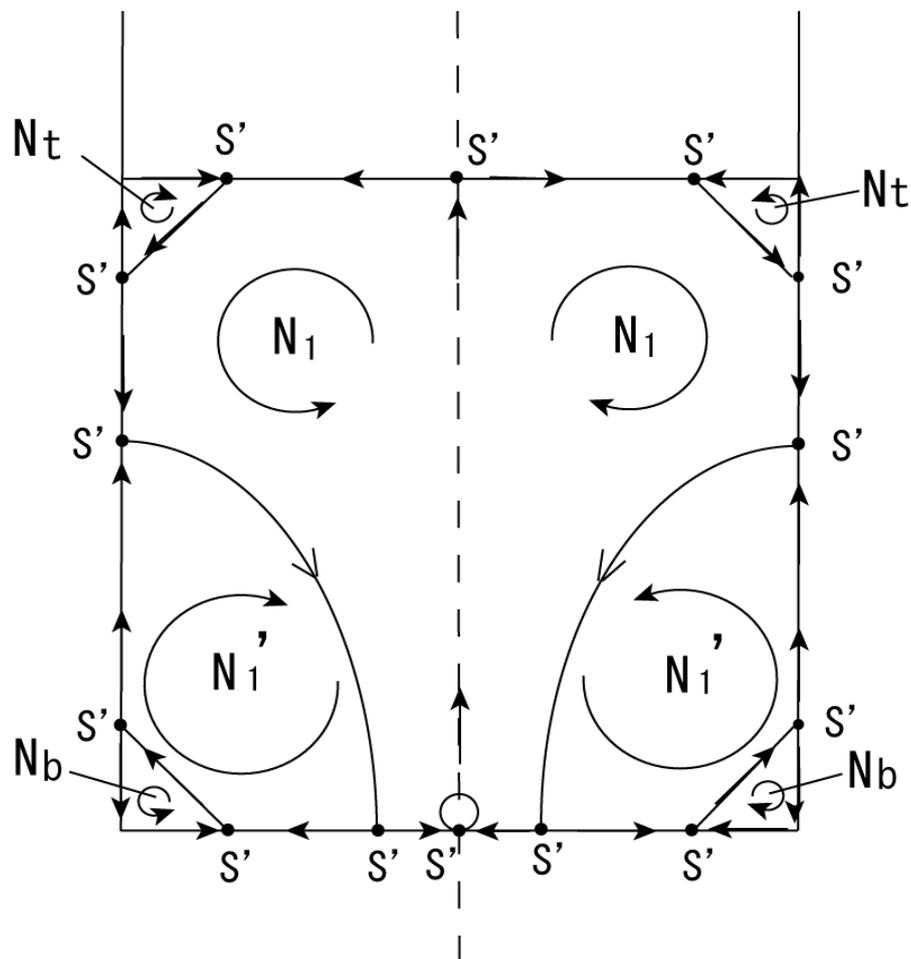
となり, 式 (2.3) が成立する。以上より, いずれの AR の場合でもそれぞれ



(a) $AR = 0.5$



(b) $AR = 1.0$



(c) $AR=2.0$

図 2-11 円形水槽内におけるフローパターンの模式図

の渦構造が生成しているものと推測される。図 2-11 を立体的に描くと図 2-13 のようになる。この図は可視化画像，**Hunt** らのトポロジー的考察，さらにはヘルムホルツの渦定理（渦は発生，消滅することはないため，渦の種類はリング状，自由表面と個体壁に渦の端を有する，もしくは竜巻のように渦管が 0 から無限になる）から大渦およびコーナー渦もリング状形状と推察される。このため，図 2-1 において観察角 θ によらず同じ渦構造になる。ただし，実際には水面から気泡が離脱する際の圧力伝搬やエアストーンに連結するビニールチューブの曲がり具合の影響でリングは波を打つ形状になる。従って， θ によっては渦構造は変わらないものの渦中心位置は若干変化する。

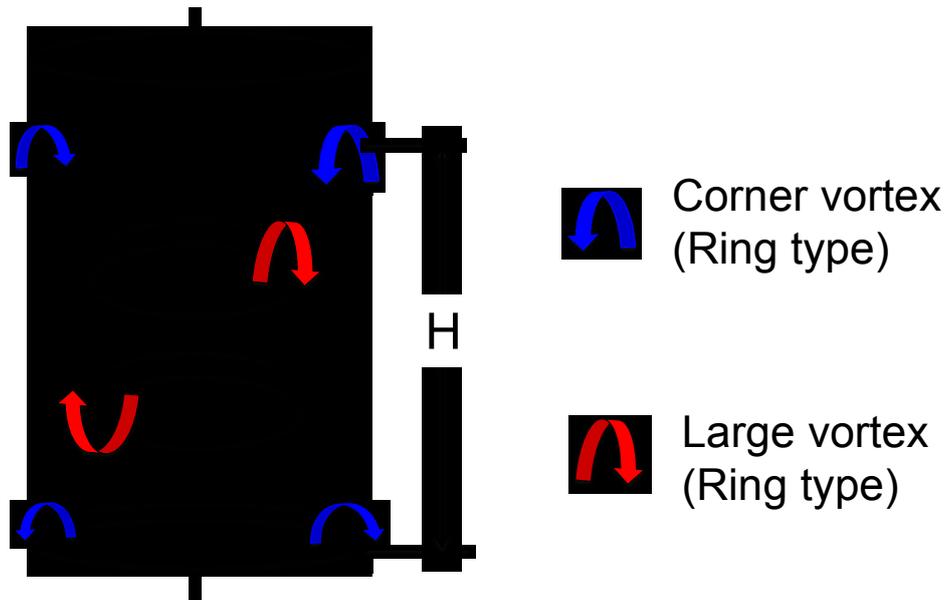


図 2-12 $AR = 2.0$ の三次元渦構造

2.3.4 鉛直断面内におけるフローパターンの分類

2.3.1 で鉛直断面内のフローパターンの傾向を述べたが、水槽内のフローパターンが AR によって変化する理由を考えてみる。本円形水槽の場合、図 2-13 (a) の黒線のように、静止流体中では側壁面上の圧力（静水圧）分布は深さ方向に直線的に増加し、鉛直下方に向かい正の圧力勾配を有する。ところが、水が循環流動している場合、流体が静止したときの圧力（静水圧）に流体の運動によって生じる圧力（流水圧）が加わるため²⁰⁾、円形側壁圧力分布は静水圧分布とは異なることになる。すなわち、水表面すぐ直下の流れは水槽中心付近から半径方向に流動するが、その際、円形側壁のせき止め効果により流速が減少する。つまり、水の流れが一部圧力ヘッド（静圧）に変換され、全圧に占める割合が大きくなる。したがって、図 2-13 の赤線のような分布になると推察される。この分布では側壁における自由表面近傍の圧力の方が訂面におけるそれより大きいため、圧力差によって自由表面から底面方向へ壁面に沿った下降流が生じ、大規模渦構造が発生するものと思われる。このようなケースは須恵器心が浅い $AR = 0.5$ と 1.0 の場合に生じる。次に液深が大きい $AR = 2.0$ の場合の側壁圧力分布を推察してみる。液体が静止した場合は、深さ方向に静水圧は増

加するので、図 2-13(b)のような分布になる。しかし、自由表面近傍の（流体が流動する場合は、図 2-13(a)と同様に自由表面近傍の圧力は大きく、その値は深さ方向に減少し、底面付近では自由表面の圧力よりも静水圧の値が大きくなる。側壁の圧力分布は図 2-13(b)の赤線のようにになると推察される。すなわち、赤線の圧力分布は自由表面付近と訂面付近では異なる圧力勾配を有し、極値を取る深さが剥離点位置であると想像される。図 2-13(b)の予想圧力分布(赤線の場合)、圧力差によって、自由表面から深さ方向に下降する流れと底面付近から自由表面方向へ上昇する流れが生じ、その結果 2 対の大規模渦構造が生じるものと予想される。したがって、水槽の断面内幾何形状を表す AR の値により、はく離が生じる場合 (AR が大きい場合) と生じない場合 (AR が小さい場合) の主要因は液体が流動している側壁圧力分布が極値を有するか否かである。ただし、以上の説明は推察であり、実証には至っていない。推察を(実証するには円形水槽の壁面圧力分布を測定する必要があるが、流速が低い流れなのでヘッド差が顕著に生じないので、測定は困難である、測定するための工夫が今後の課題となる。

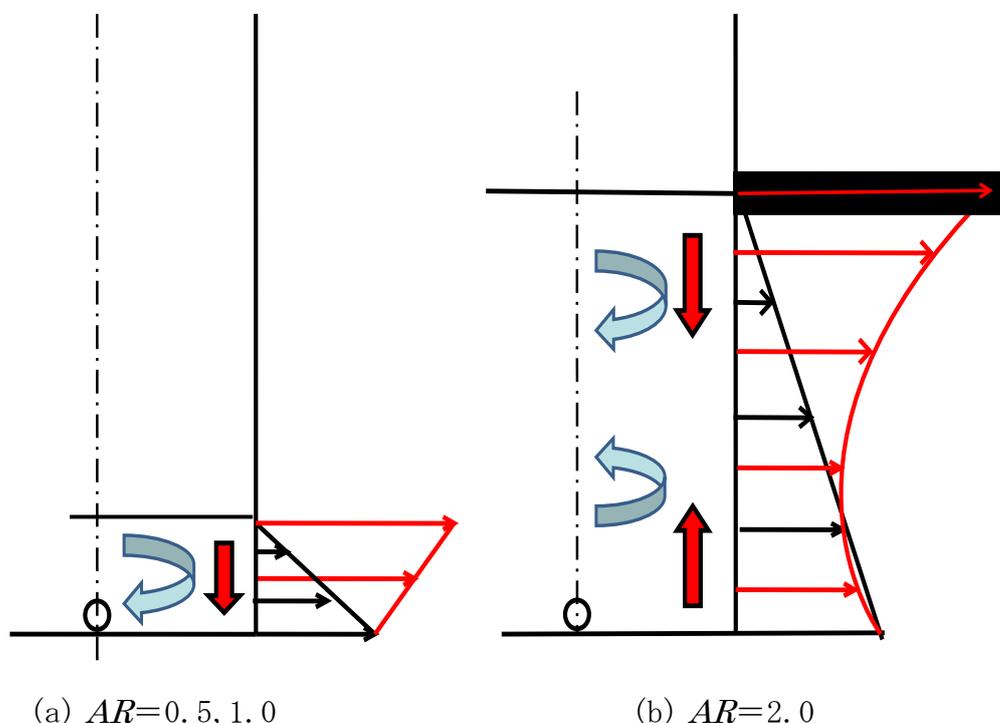


図 2-13 側壁圧力分布 (予想)

次に、渦パターンが変化する範囲を考えてみる。図 2-14 は横軸の Q を変化させた場合の各渦対系が生じる領域を示したものである。図中の境界を示す 2 本の実線は得られた実験データを最小二乗法で求めた曲線を示す。結果をみると、 $Q = 10 \sim 100 \text{ mL/min}$ の範囲では、1 渦対系および 2 渦対系を示す AR の値は変化せず、およそ一定であった。2 本の実線の外側はほぼ安定的な 1 渦対系もしくは 2 渦対系の大渦構造が存在する。しかし、2 本の実線の内側の領域では 1 渦対系とも 2 渦対系とも判定できない不明瞭の状態である。なお、 $Q = 0 \sim 10 \text{ mL/min}$ の範囲の曲線は $10 \sim 100 \text{ mL/min}$ 間の外挿であり、実際の流れを反映していない。希望する渦パターンを生成させるには、図 2-14 から通気量 Q とアスペクト AR 比を調節すればよい。

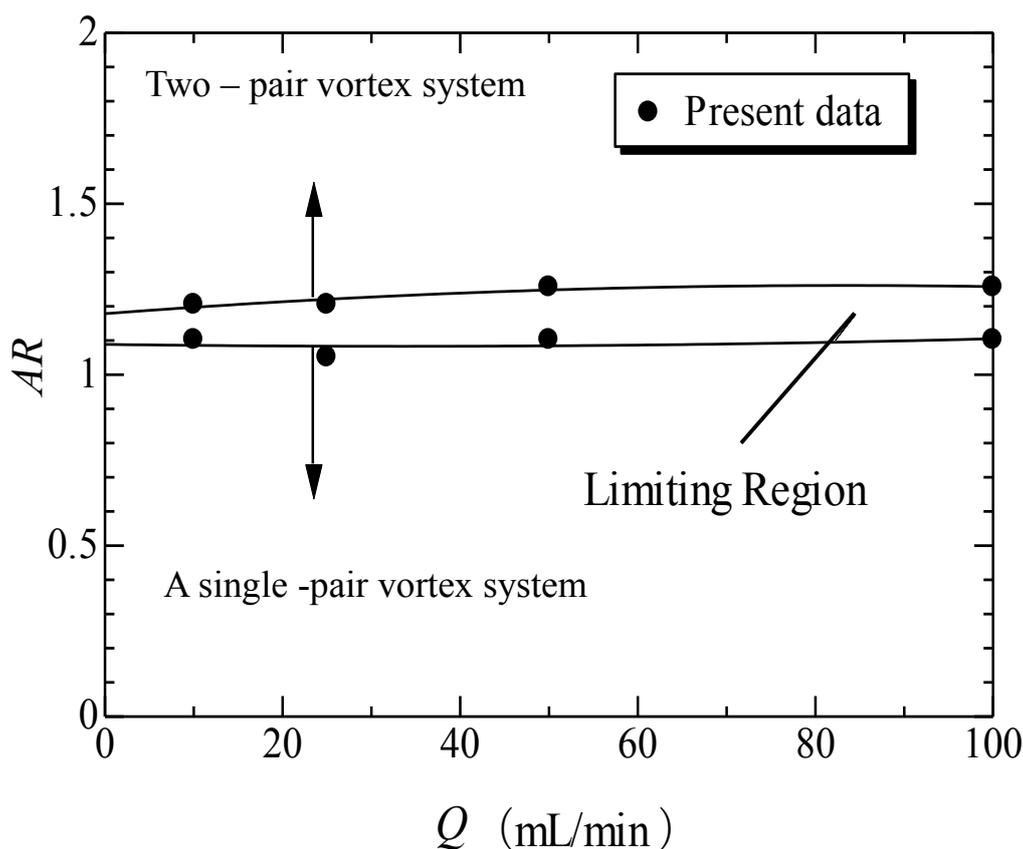


図 2-14 アスペクト比 AR , 通気量 Q と渦パターン形成との関係

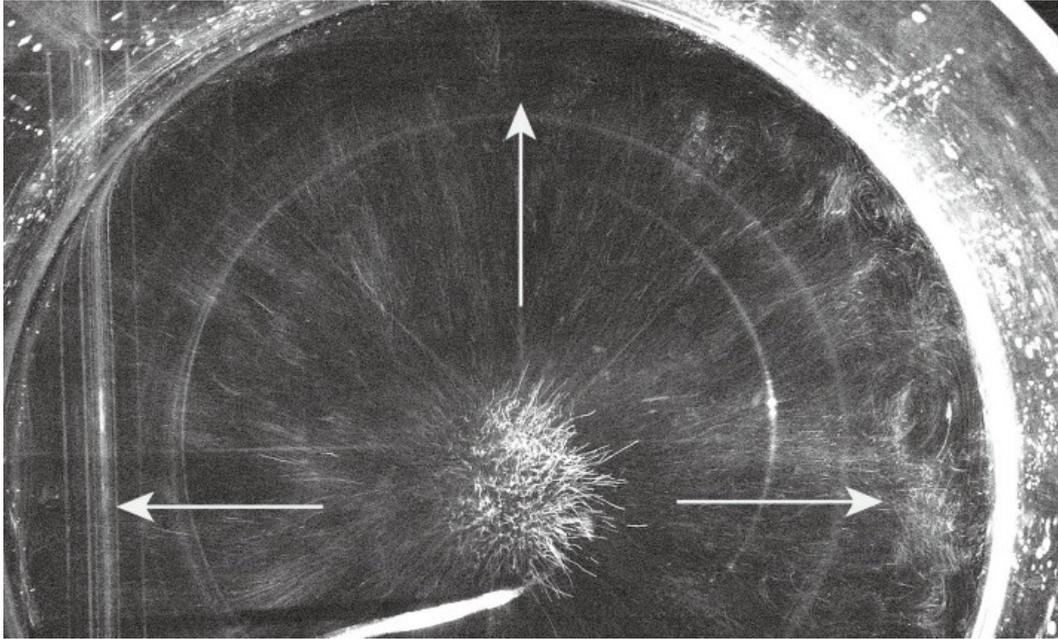
2.3.5 水平断面内のフローパターン

2.3.1において、鉛直断面内のフローパターンについて説明したが、ここでは水平断面 ($r - \theta$ 面) 内フローパターンについて説明する。代表として $Q = 50\text{mL/min}$, $AR = 2.0$ (2渦対系の場合) における水表面付近, 中央高さ付近および底面付近の可視化結果のみ図 2-15(a), (b)および(c)に示す。水表面付近 ($z/r = -0.03$) の図 2-15(a)を見ると, 中心付近に気泡の上昇 (動画の結果より) している領域が観察され, そこから放射状方向に気泡とアルミ粉とが移動している。また, 円形側壁近傍では種々のスケールの渦構造が観察 (動画の結果を利用) され, 円周方向に3次元性が見られる。中央高さ付近 ($z/r = -1.0$) の図 2-15(b)を見ると, 円形側壁付近ではアルミ粉は複雑な挙動を示しつつ, 比較的スケールのそろった渦構造 (下半面で見られる規模の大きい循環渦の頭頂部に相当) が見られる。全体のフローパターンは流れが中心向き (写真の矢印) に移動して (動画の結果を利用) いる。

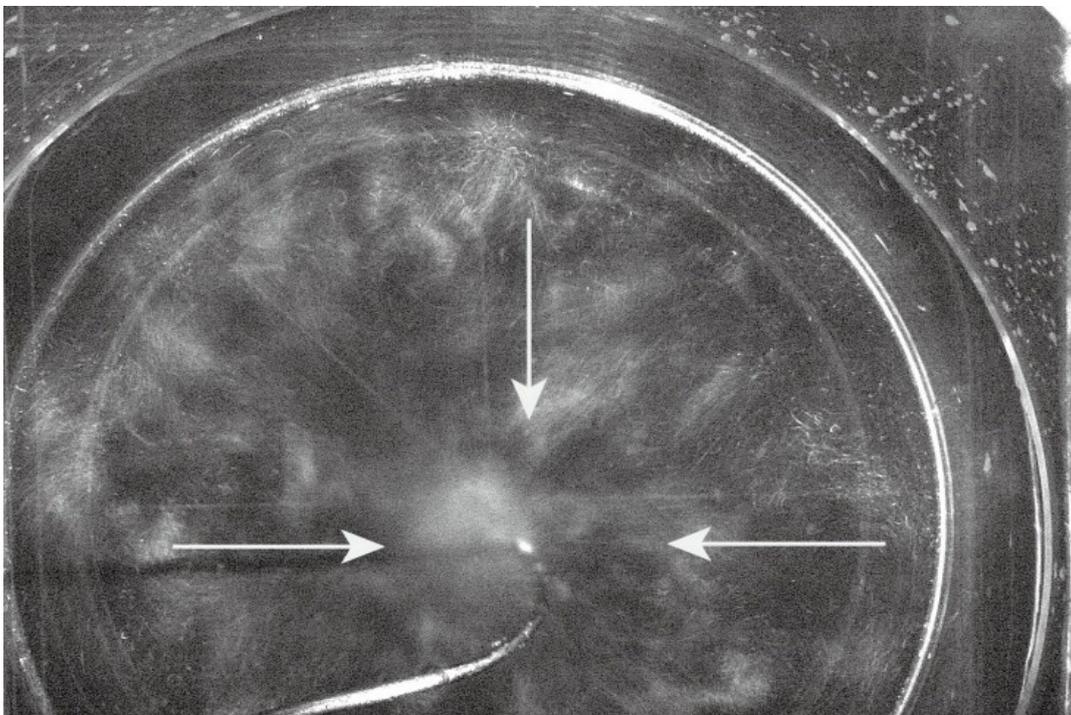
底面付近 ($z/r = -1.97$) の図 2-15(c)を見ると, 中心付近を除き, アルミ粉は放射状に外向き (写真の矢印) に向かっており, 流れは放射状外向きとなっている。

次に $AR = 0.5$ と 1.0 の水平断面内フローパターンを図 2-15(a),(c)を利用して説明する。 $AR = 0.5$ と 1.0 の水面付近のフローパターンは図 2-15(a)と同様である。すなわち, AR の変化によって鉛直断面内のフローパターンは2つに大別できるが, 水表面付近のフローパターンは変化しないようである。

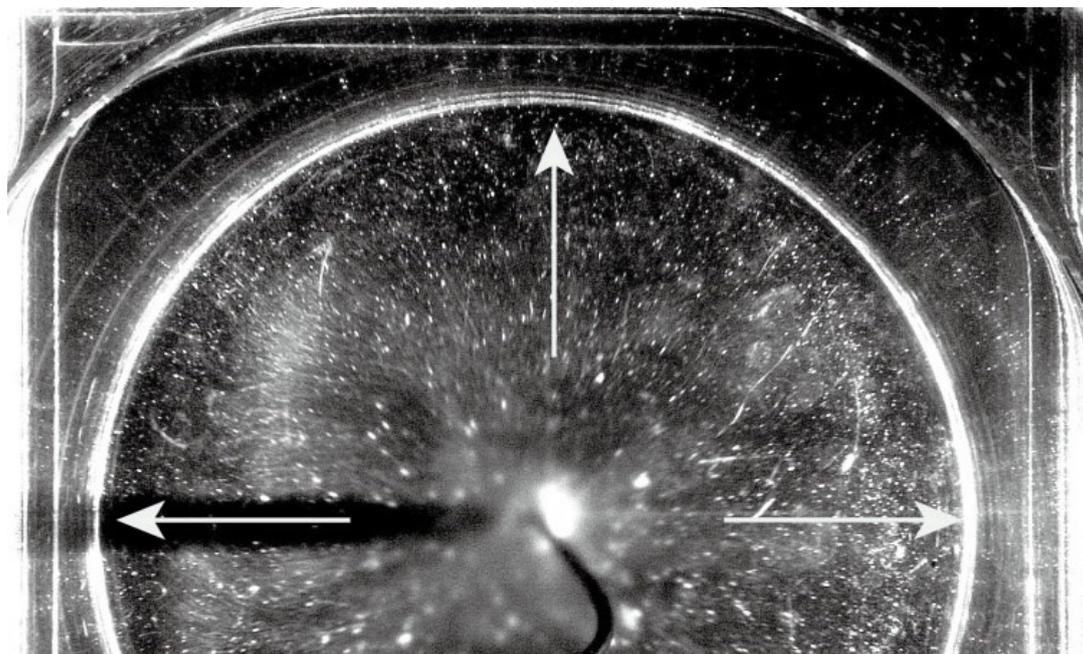
一方, $AR = 0.5$ と 1.0 の底面付近のフローパターンは図 2-13(c)と同様であるが, 流動方向は反対である。ところで, 本実験条件の Q の範囲内ではエアストーンから放出される気泡上昇によって誘起される水は水槽底部付近から水面付近まで輸送される。しかしながら, 通気量を極めて少なくすると, 水槽底部付近の水は水面付近まで上昇せずに本研究で観察されたフローパターンとは異なる可能性がある。



(a) $z = -5\text{mm}$ ($z/r = -0.03$)



(b) $z = -195\text{mm}$ ($z/r = -1.0$)



(c) $z = -385\text{mm}$ ($z/r = -1.97$)

図 2-15 水平断面における可視化写真

2.3.6 フローパターンと仔魚飼育との関連性

2.3.1 において、鉛直断面内のスケールの大きい渦構造は 1 渦対系と 2 渦対系に分類されると説明した。海産仔魚は基本的に遊泳力に乏しく、水流にしたがって水柱に分布する。仔魚のが稚魚に成長するまでの死亡の形態には大別すると浮上死と沈降死が存在する。両者のどちらの形態に依存するかは魚種によって異なる。Ruttanapornvareesakul ら⁹⁾は AR が 2.0 を超える水槽で仔魚の生残率が著しく高くなった理由に、水表面での仔魚の移動速度が速いために仔魚が表面張力に囚われる機会が少なくなり、その結果として浮上へい死が少なくなったことを挙げている。この考察は水面下の流れは全ての水槽で同じであると仮定のもとになされている。この点について水面下の流れパターンが浮上死に及ぼす影響について考察してみる。 $AR = 0.5, 1.0$ の流れ場の図 2-12 (a), (b) に示しているが、左右 1 対の渦構造が生成する流れ場の場合、エアストーンから放出される気泡上昇によって液体は水面付近まで輸送されその後半径方向、底面方向に方向転換し、底面中央付近へと輸送される。魚が水に passive である

とすれば、水面付近まで輸送される頻度が高いので浮上死数が増加すると予想される。一方、 $AR=2.0$ の図 2-12 (b) の場合、水面に側壁中央付近のはく離点によってそこから中心方向にかけて流れは分岐するので、魚は水面付近まで輸送される場合と下方の渦の巻き込まれるケースにわかれる。下方の渦に巻き込まれた渦は水面との接触によって生じるいわゆる浮上死が生じない。すなわち $AR=2.0$ の 2 渦対系の流れ場では 1 渦対系に比べ水面と接触する頻度が少なく、ひいては浮上死数が減少したと予想される。この実験ではオニオコゼとマハタを対象としているので、この魚種では浮上へい死による死亡が多い魚種と思われる。今後は実際に仔魚を収容した水槽で、これらの 2 対の渦構造に対して仔魚の移動がどのようになっているかを精査する必要があるだろう。近年、ハタ類仔魚に顕著に見られる浮上へい死に加えて、クロマグロなどで仔魚が夜間に遊泳を停止した際に水槽底に沈みそのままへい死する沈降死現象が大きな問題となっている^{21)~24)}。本研究で示されたような AR の高い水槽中の異なる渦構造のうち、特定の渦流に仔魚を留められるように通気量を調整することで、海産仔魚の浮上死や沈降死を防除できる可能性が期待できる。

次に、2.3.2 においてスケールの小さい渦構造についても説明したが、仔魚の飼育水槽内での水流に伴う移動において、小スケールの渦が仔魚の生残とどのような関わりを有するのかは、本研究では明らかにすることはできなかった。しかしながら、このような小スケールの渦が仔魚の移動とどのような関係があるのかについては、さらに小スケールでの仔魚の移動を、中間浮力をもつような材質で仔魚の模型を作り、その模型の動きを詳細に観察することで新たな知見が得られる可能性がある。

また、本研究を発展させるうえで、次のような課題がある。実際の種苗生産の現場では大型の水槽が使われている。たとえば、長崎県総合水産試験場で種苗生産に使用されている円筒水槽の寸法は直径 8m、深さ 2m で、飼育水量は 100 トン⁶⁾ である。この水槽の場合、 $AR = 0.47$ となる。この水槽を用いてマハタの種苗生産を実施した場合の通気装置は水槽底部中央に 1 個を設置し、その通気量は 630mL/min であった⁶⁾。本研究も同様に、円筒水槽にエアストーンを中

中央に1個配置した場合を取り扱った。そこで、本研究と Sakakura ら⁶⁾の使用した大型水槽を比較すると、大型水槽の AR の値は 0.47 であるので、本研究の図 2-4 の場合に相当し、必ずしも仔魚の生残が高くなるような AR ではないと予想される。したがって、 $AR = 2.0$ のような鉛直方向に二層の渦流は形成されないケースであろう。このような実用規模の水槽において、さらに液深を深く、あるいは浅くなるように設定した場合、 AR が仔魚の生残率に影響を与えるかどうかを明らかにする必要があると考える。さらに、次のステップとして、エアストーンの設定位置高さや個数などを工夫することにより、 AR の小さな水槽でも 2 渦対系のフローパターンが作成できる可能性を調査する。それにより、本研究の結果が種苗生産現場へ応用できる可能性が生まれるであろう。

2.4 第2章の結論

本章では仔魚飼育用円形水槽内のフローパターンについて、アスペクト比 AR および通気量 Q をパラメーターとして可視化実験した結果、水槽内の流れ場の定性的な特徴を以下に列挙する。

(1) 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、渦対系の変化に対する通気量の影響は弱い。

(2) 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。これより、水槽底面近傍の流れの方向は 1 渦対系の場合、円周付近から中心向き、一方、2 渦対系の場合、外向きとなる。

(3) 円形側壁面上に、渦 N_1 , N_1' , N_2 および N_b と関連する再付着点とはく離点が存在する。これらの渦対系は Hunt らのトポロジー的考察による解析結果を支持する。

(4) AR の高い水槽で仔魚の生残率が高いという Ruttanapornvareesakul ら⁹⁾の結果は、 AR が大きい水槽では 2 渦対系の流れ場が形成され、そのうちの下方の渦に仔魚が取り込まれることによって水面と接触する頻度が減少したため、浮上死数が減少した可能性があるかと推察される。

第2章の参考文献

- 1) 南卓志: 初期減耗研究の方法論 ; 研究の歴史, 田中克・渡邊良朗編, 魚類の初期減耗研究. 恒星社厚生閣, 東京, pp.9-20,1994.
- 2) Tucker Jr JW: The rearing environment. In: Tucker Jr JW ed., Marine Fish Culture. Kluwer Academic Publishers, London, pp.49-148, 1998.
- 3) 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: マハタ飼育水槽の検討例. 水産工学, 39: 205-212, 2003.
- 4) J. Backhurst and J.H. Harker: The suspension of feeds in aerated rearing tanks: the effect of tank geometry and aerator design. Aquacultural Engineering, 7: 379-395, 1988.
- 5) S.Shiotani, A.Hagiwara, Y.Sakakura and H.Chuda: Estimation of flow in a rearing tank of marine fish larvae by simplified numerical computation — a case of two-dimensional flow. Aquacultural Engineering, 32: 465-481, 2005.
- 6) Y.Sakakura, S.Shiotani, H.Chuda and A.Hagiwara: Improvement of the survival in the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* larvae by optimizing aeration and water inlet in the mass-scale rearing tank. Fish.Sci., 72: 939-947, 2006.
- 7) 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. 日水誌, 72: 267-270, 2006.
- 8) Y.Sakakura, S.Shiotani, H.Chuda and A.Hagiwara: Flow field control for larviculture of the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus*. Aquaculture, 268: 209-215, 2007.
- 9) Y.Ruttanapornvareesakul, Y.Sakakura and A.Hagiwara: Effect of tank proportions on survival of seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* (Thunberg) and devil stinger *Inimicus japonicus* (Cuvier) larvae. Aquaculture Res, 38: 193-200, 2007.

- 10) I.Tani,M.Iuchi and H.Komoda: Experimental investigation of flow separation associated with a step or a groove, Aers. Res. Unst.,Univ. Tokyo,Rep.,364: 119-136,1961.
- 11) 亀田孝嗣, 大坂英雄, 望月信介: k形粗面乱流境界層の粗さ要素近傍構造に対する粗さピッチ比の影響.日本機械学会論文集, 70-697, B: 2303-2310,2004.
- 12) 亀田孝嗣, 是石一任, 望月信介, 大坂英雄: 2次元矩形粗面境界層の粗さ要素近傍における運動量交換機構(溝内部渦の可視化観察).日本機械学会論文集. 71-710, B: 2401-2406,2005.
- 13) 井上暢, 吉田尚史, 渡辺崇, 稲村純平: キャビティを過ぎる自律振動流の底面駆動を用いた制御の数値解. 第21回数値流体力学シンポジウムCD-ROM, E7-1,2007.
- 14) 流れの可視化学会: 新版 流れの可視化ハンドブック. 朝倉書店, 東京, pp.46-54,1991.
- 15) 可視化情報学会: 可視化技術の手ほどき. 朝倉書店, 東京, pp.86-114,1998.
- 16) 可視化情報学会: 流れの可視化入門. 朝倉書店, 東京, pp.98-112,1997.
- 17) J.C.R.Hunt, C.J.Abell, J.A.Peterka and H.Woo: Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; applying topology to flow visualization.J. Fluid Mech.,86: 179-200, 1978.
- 18) 中村育雄: 流体解析ハンドブック. 共立出版, 東京, pp.500-501, 1998.
- 19) 古谷茂, 島津秀雄, 木内誠, 八田秀三郎, 松本和夫, 丸山求, 道脇義正, 矢野嘉銘介: 解析学.大日本図書, 東京, pp.197-198,1975.
- 20) 今井功: 流体力学 前編. 裳華房, 東京, pp.53-54, 1988.
- 21) 宮下盛: 種苗生産における浮上および沈降死.日水誌, 72: 947-948, 2006.
- 22) Y.Tanaka, K.Kumon, A. Nishi, T. Eba, H. Nikaido and S. Shiozawa: Status of sinking of hatchery-reared larval Pacific bluefin tuna on the bottom of the mass culture tank with different aeration design. Aquaculture Science, 57: 587-593, 2009.
- 23) S. Masuma, T. Takebe and Y. Sakakura: A review of the broodstock

management and larviculture of the Pacific northern bluefin tuna in Japan. *Aquaculture*, 315(1-2): 2-8, 2011.

- 24) 武部孝行, 小林真人, 浅見公雄, 佐藤琢, 平井慈恵, 奥澤公一, 阪倉良孝: スジアラ仔魚の沈降死とその防除方法を取り入れた種苗量産試験. *水産技術*, 3(2): 107-114, 2011.

第3章 仔魚飼育用円形水槽内の流れの定量的推察

3.1 序論

魚類の生活史において、最も死亡率の高い時期は、一般に卵から孵化した仔魚が稚魚になるまでの初期生活史の期間に相当し、初期減耗と呼ばれる。初期減耗の主要因として、天然水域の場合、飢餓、被食および物理的条件（たとえば、海流などによる不適切な環境への輸送）が挙げられている¹⁾。本研究の目的は、初期減耗の各種要因のうち、通気による種苗生産水槽内の流れが仔魚の生残率に及ぼす影響に関する基礎的知見を数値計算から得ることである。

一般に、魚類の種苗生産水槽では水槽内の流れを通気装置によって制御する方法がとられるが、その水流の管理は目視や音など飼育者の経験と勘に頼ってきた。したがって、厳密でかつ再現性のある流れ構造を作成するための通気設定の方法は確立されていない。このような状況下で通気設定を緩い基準で管理すると、たとえば、飼育水が槽内の一部で停滞し、浮上死や沈降死などの仔魚の大量へい死に繋がる可能性がある²⁾。一方、仔魚飼育には最適な通気量が存在することも示唆されてきた³⁾。この点から種苗生産水槽内で適切な流れ場の環境を確保するための通気制御方法が確立できれば、通気量が初期減耗に与える影響が改善できる可能性がある。これにより、種苗生産のより効率的な技術が開発できると同時に、基礎的知見を与えるものとなろう。具体的には、種苗生産水槽の使用状況に応じた水槽内のフローパターンの作成、および実測に基づく速度分布とシミュレーションによる結果の類似性が十分な精度で認められれば、通気による種苗生産水槽内の流れ場を明確に制御できることになる。

仔魚の飼育実験に関する研究を概観すると、Ruttanapornvareesakulら⁴⁾は水槽半径 r_i と液深 H を変化させた3種類の円形水槽において、マハタ *Epinephelus septemfasciatus* とオニオコゼ *Inimicus japonicus* の仔魚飼育実験

を実施した。その結果、直径が小さく液深が深い、アスペクト比 $AR (=H/r_i)$ 以下、 AR と記す)が大きい水槽の場合、両種の仔魚の生残率が高いことを見いだした。しかしながら、水槽内の流れ場の詳細と仔魚の存在する局所位置との関係は未調査であり、その種のデータの取得が強く望まれている。

ところで、第2章⁵⁾で円形水槽内のフローパターンを流れの可視化によって調査した。その結果、水槽内の流れは通気量 $Q=10\sim 50\text{ml/min}$ の範囲では、 AR の値が1.0と2.0の間で、中心軸を含む鉛直断面内で大きな渦が1渦対系から2渦対系へと変化すること、さらに水表面と側壁および底面と側壁との間にコーナー渦が存在することなども明らかにした。第2章の水槽内のフローパターンとRuttanapornvareesakulら⁴⁾の仔魚の生残率の結果を単純に照合してみると、2渦対系のフローパターンの方が1渦対系の場合よりも仔魚の生残率が高いことがいえるようである。ところが、第2章において、水槽内の流れ場を定性的に明らかにしたものの、気液二相流における速度測定の著しい困難さから水槽中心を含む鉛直断面内でさえ、速度分布の定量的評価は得ていない。したがって、円形水槽内の流れ場の詳細と仔魚の生残率との因果関係は不明瞭のままである。このため、数値解析によって水槽内の流れ場を定量的に推測し、可視化実験結果と比較することは極めて意義があるものと思われる。

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^{3),6)~8)}があるが、Shiotaniら⁶⁾は、仔魚飼育水槽内の流れ場を单相流として取扱い、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⁶⁾の数値計算結果と著者らの可視化結果⁵⁾を照合してみると、両者の対応は必ずしも良くなく、場合によっては説明し難い結果を示している。たとえば、Shiotaniら⁶⁾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。この不備の第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⁹⁾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。この点については、Kuwagiら¹⁰⁾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、本章では高い精度を考慮した数値計算によってShiotaniら⁶⁾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する。さらに、計算機の演算速度、容量の性能を考え、本数値計算ではShiotaniら⁶⁾の解析よりも格子数を著しく増加させた。

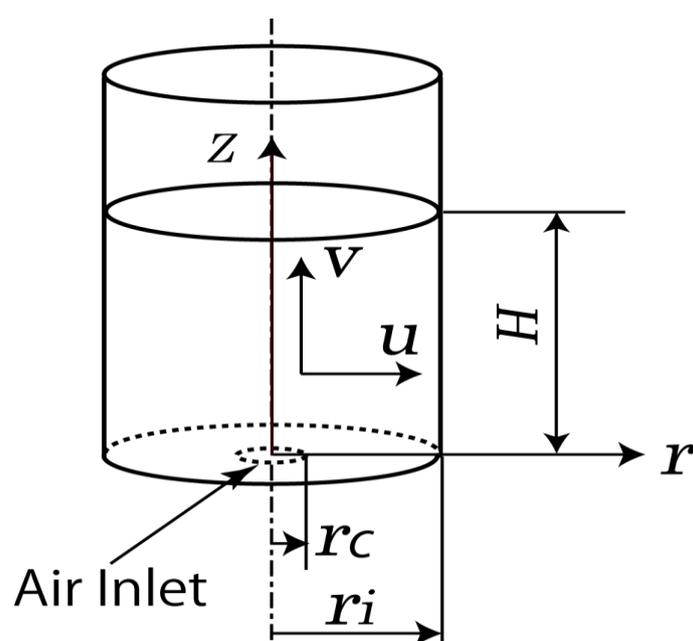


図 3-1 解析モデルおよび座標系

3.2 数値計算および方法

3.2.1 解析モデル

第2章の実験装置を参照して、図3-1のような解析モデルを考えてみる。半径 $r_i=195\text{mm}$ の円形水槽において、その鉛直断面内で、 AR が0.5, 1.0および2.0 となるように液深 H (以下、 H と記す) を97.5mm, 195mmおよび390mmに設定した。底面中央部はエアストーンと同径 r_c の通気口を想定し、そこから通気 (空気を流入) させる。本研究では安定解が得られた通気量 Q (以下、 Q と記す) の範囲のうち、代表として $Q=10\text{mL/min}$ の計算結果を報告する。したがって、数値計算結果を検証する基礎資料として $Q=10\text{mL/min}$ の場合の可視化写真を参照するが、前報で報告したように、 $Q=10\sim 50\text{mL/min}$ の範囲では Q の変化に対する水槽内のフローパターンの変化はない。可視化実験装置および方法の概要は前報と同様である。数値計算に際して、以下の仮定を用いることにする。

- ・ 気液間における相変化は考慮しない。
- ・ 液相, 気相ともに密度は一定 (非圧縮) とする。
- ・ 流れは軸対称の条件を課している。
- ・ 解析領域内の温度は一定とする。
- ・ 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。

本研究では水槽内の流れを気液二相流として取り扱うが、気液二相流の計算で利用される二流体モデルは気相と液相それぞれに対して運動方程式をたてて解析をするため、単相流モデルよりも詳細な解析が可能となる¹¹⁾。二流体モデルに限っても、一般的に用いられている一圧力モデル (気相, 液相の両相にかかる圧力は等しい) は二圧力モデル (気相, 液相の両相にかかる圧力は異なる) のように、各相の圧力に対する構成方程式を必要とはしない¹²⁾。そこで、本研究では気液二相流の数値計算モデルとして一圧力モデルを採用することとした。以下に一圧力モデルによる基礎方程式を記述する。なお、式中のボールドフォ

ントはベクトルを表示している。なお、使用記号の説明は5・3に記載している。

(1) 連続の式

前述の仮定を考慮して連続の式を考えてみる。ボイド率 ε 、添字を $k = g$ （気相）、 l （液相）として連続の式を表現すると、次のようになる。

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_k u_k) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_k v_k) = 0 \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_l + \varepsilon_g = 1 \quad (3.2)$$

式(3.1)を g と l について記し、両式の和をとり、そこに式(3.2)を適用すれば非定常項が消去され、式(3.3)が得られる。

$$\left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_g u_g) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_g v_g) \right\} + \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_l u_l) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_l v_l) \right\} = 0 \quad (3.3)$$

(2) 運動量の式

基礎方程式としてDurstの一圧力モデル¹³⁾に仮想質量 F_{VM} と揚力 F_L を考慮したものを用いる。各相について以下のようなになる。

(液相)

$$\varepsilon_l \rho_l \frac{D\mathbf{v}_l}{Dt} = -\varepsilon_l \nabla p + \varepsilon_l \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_{VM} + \mathbf{F}_L - \rho_l \mathbf{g} \varepsilon_l \quad (3.4)$$

(気相)

$$\varepsilon_g \rho_g \frac{D\mathbf{v}_g}{Dt} = -\varepsilon_g \nabla p - \mathbf{F}_D - \mathbf{F}_{VM} - \mathbf{F}_L - \rho_g \mathbf{g} \varepsilon_g \quad (3.5)$$

式(3.5)中の右辺第1項は圧力勾配による力を表しており、第2項は気液界面間抗力、第3項は仮想質量力、第4項は揚力、第5項は重力による力を示す。式(3.4)中の右辺第2項は粘性力で、第3～5項は、式(3.5)の第2～第4項の力の反作用により生じる力である。

(3) 気液界面力の構成方程式

① 仮想質量力

単位体積当たりの仮想質量力 \mathbf{F}_{VM} は式(3.6)のように記述できる。

$$\mathbf{F}_{VM} = \varepsilon_g \rho_l C_{VM} \left(\frac{D\mathbf{v}_g}{Dt} - \frac{D\mathbf{v}_l}{Dt} \right) \quad (3.6)$$

ここで、 C_{VM} は仮想質量係数であり、球形気泡に対する値として1/2を用いた。

② 粘性力

粘性拡散項 \mathbf{F}_v は粘性係数 μ が一定でない場合、各成分で表示すると次式のようになる。

$$F_{vr} = \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu \frac{\partial u_l}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left(\frac{\partial v_l}{\partial r} + \frac{\partial u_l}{\partial z} \right) \right\} - 2\mu \frac{u_l}{r^2} \quad (3.7)$$

$$F_{vz} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r\mu \left(\frac{\partial v_l}{\partial r} + \frac{\partial u_l}{\partial z} \right) \right\} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v_l}{\partial z} \right) \quad (3.8)$$

ここで、 μ は粘性係数であり、Taylorによれば¹⁴⁾、以下のようなになる。

$$\mu = \mu_c \left\{ 1 + 2.5\varepsilon_d \left(\frac{\mu_d + 2/5\mu_c}{\mu_d + \mu_c} \right) \right\} \quad (3.9)$$

ここで、 c : 連続相、 d : 分散相であり、気泡流においては、 $c=l$ 、 $d=g$ であり、 $\mu_l \gg \mu_g$ なので、次式が得られる。

$$\mu = \mu_l (1 + \varepsilon_g) \quad (3.10)$$

③ 揚力

速度勾配をもつ流体中を気泡が運動するとき、抗力 \mathbf{F}_D 以外に揚力 \mathbf{F}_L が働くが、 \mathbf{F}_L に対する構成式として、Drewらのモデル¹⁵⁾を用いた。

$$\mathbf{F}_L = C_L \rho_l \varepsilon_g \mathbf{v}_r \times (\nabla \times \mathbf{v}_l) \quad (3.11)$$

ここで、 C_L は揚力係数であり、単一気泡に対する値の1/2を用いた。また、 \mathbf{v}_r は気液速度差であり、 $\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_g - \mathbf{v}_l$ である。

④ 気液界面間抗力

単位体積当たりの抗力 \mathbf{F}_D は、次式のように表される。

$$F_D = \frac{3 C_D \varepsilon_g \rho_l \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r|}{4 d} \quad (3.12)$$

抗力係数 C_D は実験により数多くのモデルが提唱されているが、本計算では以下の Stokes と Schiller Naumann の関係式を用いる。

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}) \quad (\text{Re} \geq 2) \quad (3.13)$$

ここで、 Re は気泡レイノルズ数であり、 $\text{Re} = \rho_l d \mathbf{v}_r / \mu_l$ で定義される。以上の構成方程式を考慮する際に、Kuwagi ら¹⁰⁾ による論文を参考にした。

3.2.2 数値計算法

本数値計算には差分法を適用し、時間差分には陽解法を、圧力場の解法には HS-MAC 法を、対流項の解析には QUICK 法を用いた。なお、支配方程式の離散化および計算方法については Kawahara ら¹⁶⁾ を参考にした。初期条件としては、液相は静止 ($u_i = v_i = 0$) しているものとし、解析領域内に気泡は含まれない ($\varepsilon_g = 0$) とした。自由表面は液面一定とし、液相は no-slip 条件(速度=0)、気相は自由表面よりそのまま水槽外に離脱するとした。また、水槽固体壁の境界条件については、液相は no-slip 条件とした。気泡径 d を本計算では一定とし、 $d = 2.0\text{mm}$ とした。 $d = 1.0\text{mm}$ の場合も計算したが、結果は $d = 2.0\text{mm}$ の結果とほぼ同様であった。さらに、計算領域を表す液深を 3 種類にわたり変化させたが、それに対応する計算に使用した格子数 ($r \times z$) は、 $AR = 0.5, 1.0$ および 2.0 に対し、それぞれ 121×242 , 242×242 および 242×484 である。 r 方向は公比 1.05 の等比級数により分割した不等間隔、 z 方向は等間隔とした。1 例として、図 3-2 に $AR = 2.0$ の場合の格子分割を示す。

3.2.3 格子数の最適性

一般に、格子数を少なくすると格子間隔は大きくなり計算時間が短くなる反面、計算結果が粗くなり詳細な流れ現象を反映しない場合がある。逆に、格子数を多くすると格子間隔が小さくなり詳細な計算結果が得られる反面、計算負

荷が大きくなる。したがって、とらえたい流れ場に対し、最適な格子数が存在することになる。Shiotaniらは⁶⁾ $AR = 1.0$ に近い円形水槽の計算領域（半径695mm，深さ680mm）に 25×25 の等間隔格子を用いて水槽内の流れを計算した。Shiotaniらは⁶⁾ $AR = 1.0$ に近い円形水槽の計算領域（半径695mm，深さ680mm）に 25×25 の等間隔格子を用いて水槽内の流れを計算した。その場合の格子間隔は r 方向および z 方向でそれぞれ28mm，27mm/meshである。本研究の場合，塩谷らの計算よりも格子数を大幅に増加（格子間隔は小さく）することによって，より詳細な解を得ることを試みた。ここでは $Q = 10\text{mL}/\text{min}$ ， $AR = 1.0$ の場合を例にとり，最適な格子数の値を求めてみる。具体的方法としては，格子数を数種類変化させ，それぞれの数値計算結果を可視化写真と比較検討した。

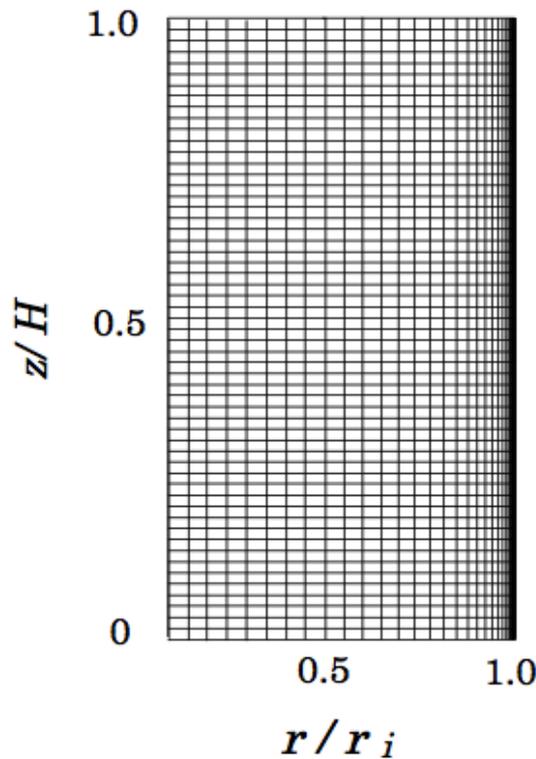


図 3-2 格子分割例 ($AR = 2.0$)

図3-3は格子数を 61×61 、 121×121 および 242×242 に変化させた場合の液相の流線図を示す。格子数が 61×61 の流線図を示す場合、大きな渦（第2章で記号 N_1 および N_1' と記述，以降，大渦と略記する）のみが存在する。この格子数ではコーナー渦（第2章で示した $AR = 0.5$ 、 1.0 および 2.0 の場合に生じた水表面と側壁角部の近傍および底面壁と側壁角部の近傍に生じる渦で，以後，前者を水表面コーナー渦，後者を底面コーナー渦と呼ぶ）が見られない。この理由はコーナー渦が存在する（動画および直視観察でその存在を確認）領域内の計算格子数が不足しているためと思われる。次に格子数を 121×121 まで増加した場合，水表面コーナー渦は認められるが，底面コーナー渦は見られない。これは底面コーナー渦の循環速度が小さい（動画観察より）ので，値を拾うことができなかったためと思われる。格子数を 242×242 まで増加させた場合，大渦，水表面コーナー渦および底面コーナー渦がともに認められる。このように 242×242 まで格子数を増やすと，所望の各渦の存在を計算結果に反映できるようになった。なお，図示していないが，さらに格子数を増加させても流線図は 242×242 と概ね同様の結果であった。したがって， $Q = 10\text{mL}/\text{min}$ ， $AR = 1.0$ の場合を数値計算する最適な格子数は 242×242 であるといつてよい。

同様の手法で $AR = 0.5$ および 2.0 の場合の最適な格子数を求めたところ，それぞれ 121×242 ， 242×484 であった。本研究の格子間隔をShiotaniらの⁶⁾それと比較するために単純に等間隔として算出すると，たとえば， $AR = 1.0$ の水槽の計算格子間隔では r および z 方向で $0.8\text{mm}/\text{mesh}$ となり，Shiotaniらの場合より約 $1/34$ に小さくなっていることになる。なお，本数値計算のクーラン数 $C (= u \cdot \Delta t / \Delta z)$ ， u ：速度， Δt ：時間刻み幅， Δz ： z 方向のメッシュ間隔）は $0.06 \sim 0.10$ で，通常の数値計算で認められている値である。

なお，使用した計算機の仕様はCPUがXeon 3.33GHz，Kbcache 6コア $\times 1$ ，Memoryは4G $\times 6$ GBで計算時間は1条件につき3~6日ほど要した。

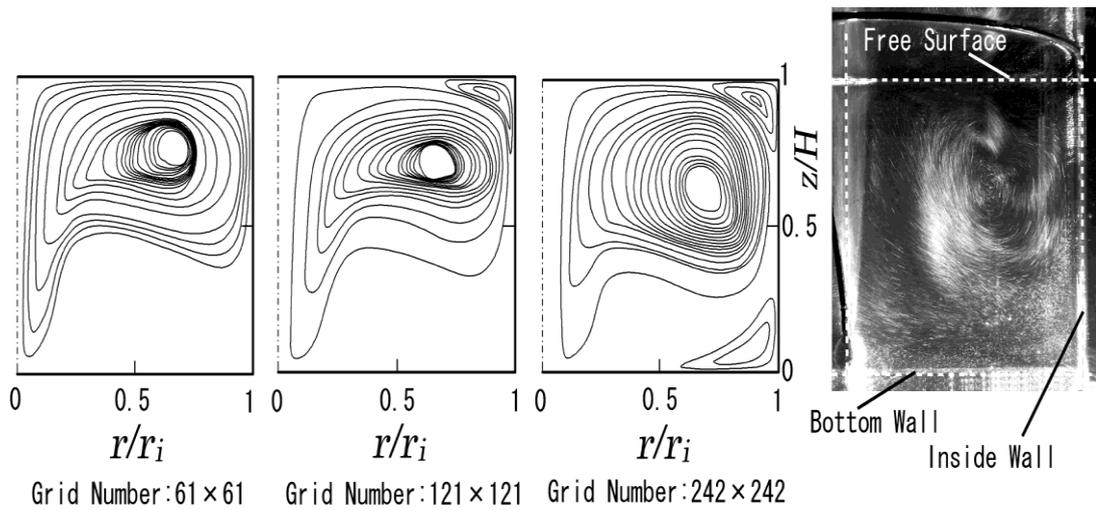


図 3-3 液相の流線が格子数に及ぼす影響

3.2.4 数値解の安定状態の判定

$AR = 2.0$ の場合で、代表として $(r/r_i, z/H) = (0.051, 0.82)$ の位置における鉛直速度の時間変化を計算してみた。ここで、前記の座標は通気口外縁で、しかも水槽の上半面領域で生成される渦中心高さ位置に相当する。計算結果を図3-4

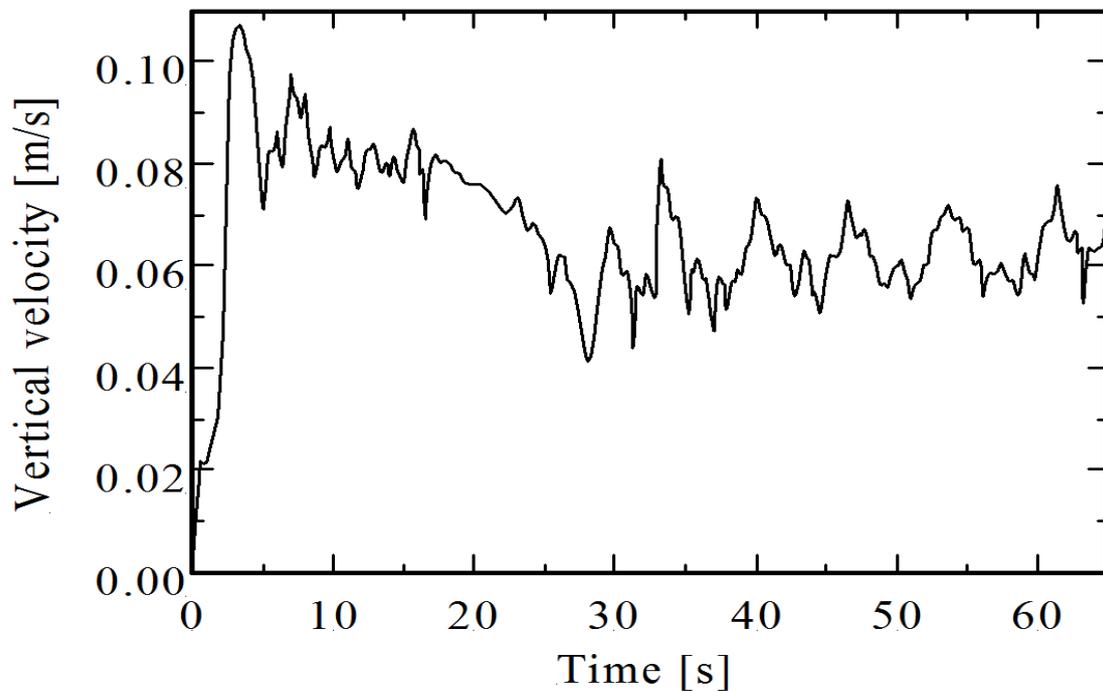


図 3-4 任意の 1 点における時間に対する鉛直速度の変化

に示す。 $t=40\text{sec}$ 以降，渦中心高さがほぼ $\pm 2\%$ の範囲で変動する周期性をもつ波形を示した。本研究では，時間に対して鉛直速度がほぼ周期性をもったとき，安定した解が得られる状態になったとみなすことにした。なお，座標位置を半径方向へ 10mm および 20mm ほど増加させた場合の同様の計算結果において，解が得られる状態になるまでの時間は $(r/r_i, z/H)=(0.051, 0.82)$ の場合とほぼ同様であった。以後に示す図面は，この安定状態に達したときの計算結果である。

3.3 結果と考察

3.3.1 鉛直断面内の流線図

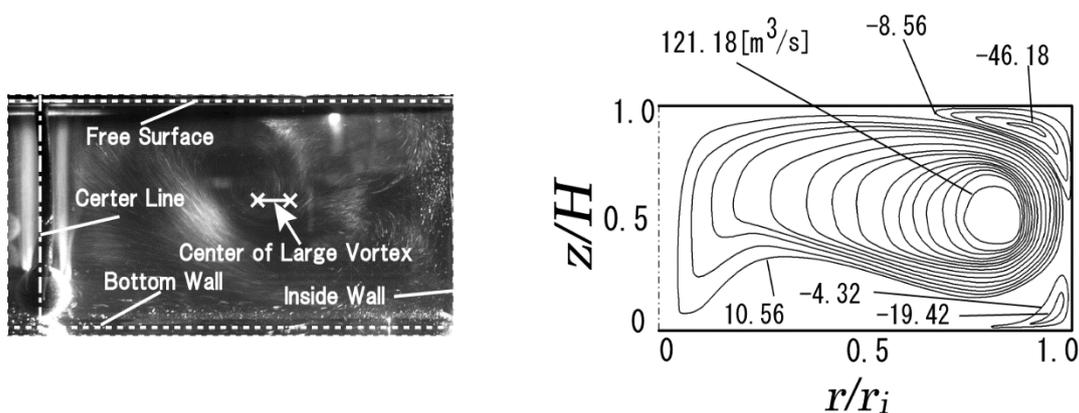


図 3-5 可視化写真と液相の流線図との比較 ($AR = 0.5$)

図3-5，3-6および3-7は $Q = 10\text{mL/min}$ の $AR = 0.5$ ， 1.0 および 2.0 における水槽鉛直断面内の可視化写真と同断面内における液相の流線図（数値計算結果）を対比したものである。両者を比較する際に参考にした種子田の可視化結果の評価によると，渦中心（渦度が最大となる位置）と流線図における閉曲線群の中心位置とは一致しないと強調して説明されている¹⁷⁾。ただ，渦の存在や渦の輪郭形状は概ね推定できるようである。図3-5の $AR = 0.5$ の場合，可視化写真では不明瞭で判断しがたいものの，大渦は存在している。これは流れの様子動画を繰り返し調査し，加えて可視化観察の直視結果から確認した。渦中心位置を速度が0となるよどみ点位置と定義すれば，それは図中の2個の×印を実線

で結んだ領域に存在すると推測される。なお、大渦とコーナー渦の両渦の同時撮影はできていない。これは動画で観察された両渦を比較すると循環速度が異なっていること、およびカメラの露出、シャッター速度と光源の強度、広がりなどの条件を適切に見出せなかったためである。一方、図3-5の右側に描いた流線図を見ると、大渦が1個存在している。大渦の形状は自由水表面と円形側壁および底壁面で構成される境界面で流れが拘束されるため、 AR が小さい場合、 r (半径) 方向へ伸張されているのがわかる。また、水表面コーナー渦および底面コーナー渦は計算できており、その存在が流線図で明瞭に示されている。

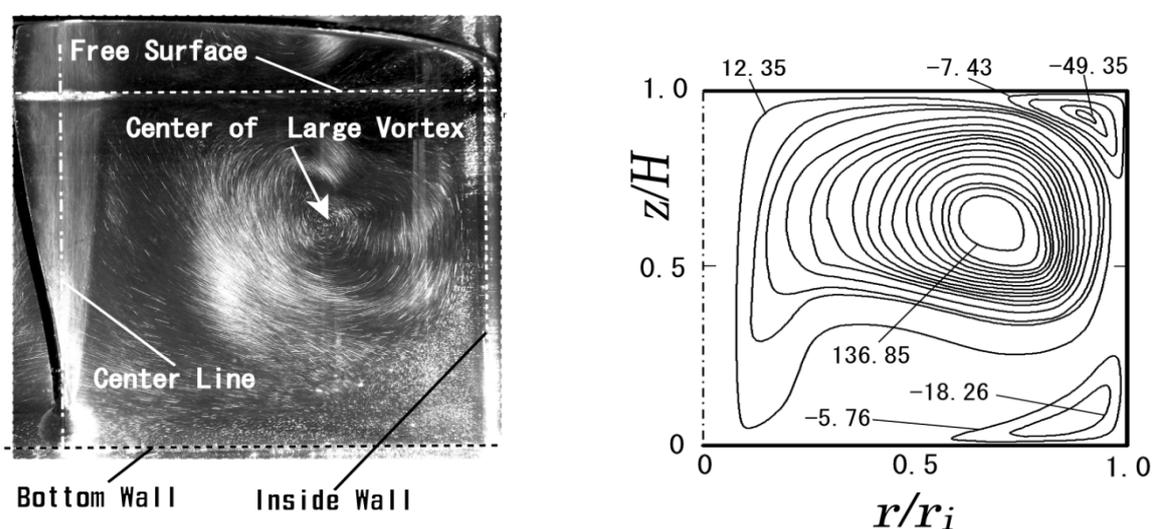


図 3-6 可視化写真と液相の流線図との比較 ($AR=1.0$)

次に、図3-6の $AR = 1.0$ の可視化写真を見ると、水槽中心線領域で鉛直速度が増加 (図3-13で詳述する) し、循環速度も増加したので大渦が鮮明に描写されている。写真からみた渦形状は $AR = 0.5$ の場合よりも液深が2倍深くなっているため、 z (鉛直) 方向へ伸張されているのがわかる。なお、この AR の場合も2種類のコーナー渦を可視化できていないが、動画観察および直視観察からはその存在を確認している。図4-7の流線図をみると、 $AR = 0.5$ の場合と同様の渦パターンを示し、大渦の寸法は可視化のそれと同程度である。

図3-7の $AR = 2.0$ の可視化写真をみると、大渦が水槽上半面領域と下半面領域に2個観察されている。これ以降、前者の渦を上部大渦 (*Upper Large Vortex*) および後者を下部大渦 (*Lower Large Vortex*) と呼ぶことにする。また、この場合も水表面コーナー渦を適切に可視化することができなかったが、動画観察および直視観察からその存在を確認している。一方、 $AR = 2.0$ の流線図でも大渦が上半面領域と下半面領域に2個存在しており、本解析方法で可視化結果と同様の渦形状を表現できていることが確認された。これらの結果を総合すると、水槽底面中央に1個のエアストーンを設置した場合、 $AR = 1.0$ と 2.0 の境界で、水槽内のフローパターンが1渦対系から2渦対系へと変化することが数値解析によ

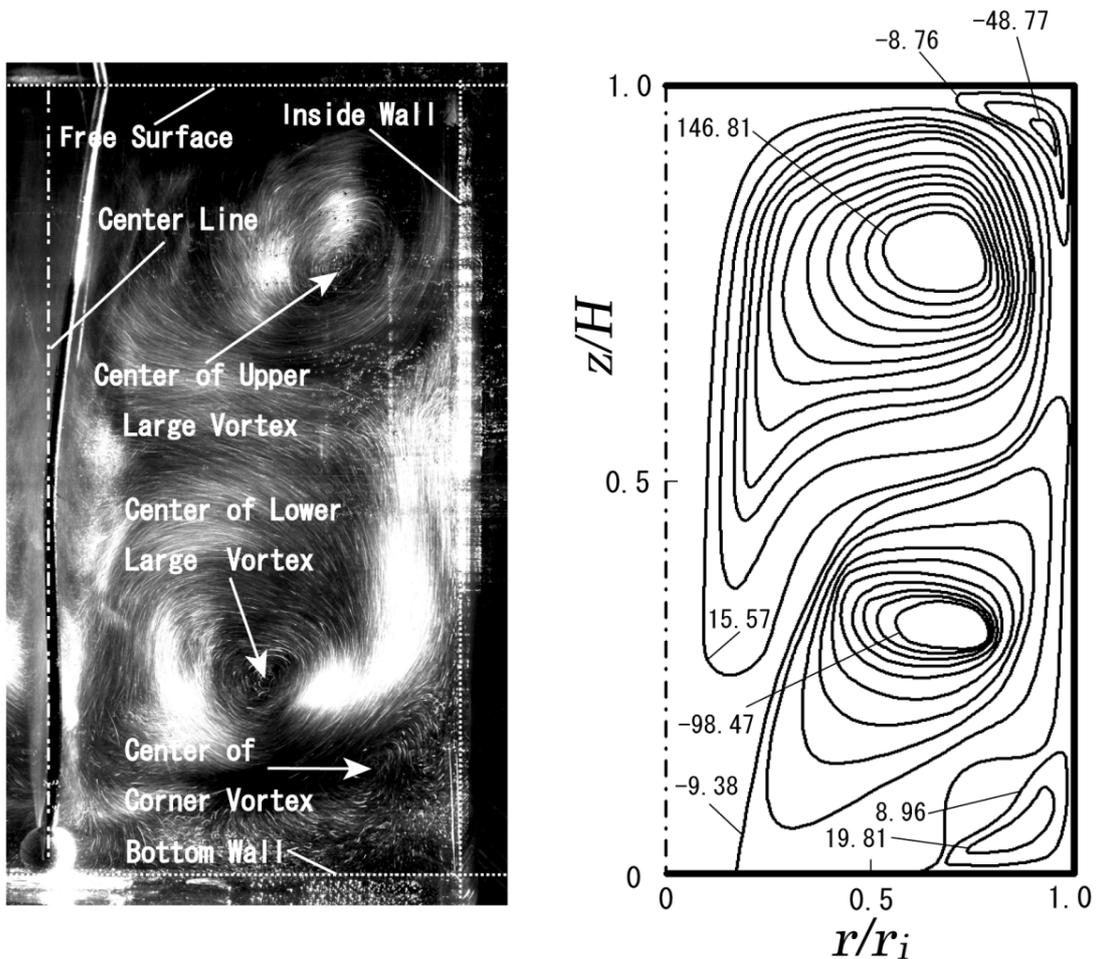


図 3-7 可視化写真と液相の流線図との比較 ($AR = 2.0$)

っても検証することができた。なお、Shiotaniらの数値計算結果⁶⁾では AR によって水槽内のフローパターンが変化することは表現できていない。また、可視化結果と数値解析から求められた渦寸法を比較してみると、概ね一致しているようである。

3.3.2 鉛直断面内の速度ベクトル

第2章および本章のここまでの範囲では、水槽内のフローパターンを定性的に説明してきたが、以降、数値計算によって得られた水槽内の流れ場を定量的に考察することを試みる。

(1) 大渦の速度ベクトル

$Q=10\text{ml/min}$ で $AR=0.5, 1.0$ および 2.0 の場合の液相の速度ベクトルを図3-8に示す。図中の×印は可視化結果から求められた渦中心(よどみ点)位置を示す。なお、 $AR=0.5$ の場合の図3-8(a)については渦の循環速度が小さく、渦中心位置を明確に特定できなかつたため、渦中心位置が存在すると思われる領域を2個の×印を実線で結んだ。図3-8は速度の基準尺度の大きさを 0.195m/s として描いている。図3-8(a)の $AR=0.5$ において、大渦が1個形成されているようである。渦中心位置高さは概ね一致するものの、渦中心半径方向位置については隔差が生じている。大渦形状は速度ベクトル図から推測すると、水平方向へ伸張され、その中心位置は側壁の方に位置する。大渦の周辺速度は比較的大きく、特に円筒側壁と大渦中心の間の領域では下降流が顕著である。 $z/H \doteq 0.24$ の高さでは、流体は水槽側壁から中心付近に近づくとつれ、水槽底部の通気口付近の低圧に誘引され下方へ流れる。しかし、すぐ上方の $z/H \doteq 0.3$ では水槽中央付近に向かい水平移動した後、上昇する。図3-8(b)の $AR=1.0$ の場合、速度ベクトル図は $AR=0.5$ と概ね同様である。ただ、渦形状は液深が増すため z (深さ)方向に伸張されている。大渦下方の $z/H \doteq 0.38$ の流体は水槽側壁から中心に向けて水平移動する間に、中央付近($r/r_i \doteq 0.24$)で急激にその向きを下向きに転じた後その向きを上方へ変化させる。可視化から求められた渦中心位置は $(r/r_i, z/H)=(0.63, 0.61)$ であり、ベクトル図における渦中心位置とほぼ一致する。図3

-8(c)に示す $AR=2.0$ の場合、上半面と下半面に2つの渦が対をなして存在する。上半面の渦（上部大渦）は水槽中心付近で上昇するのに対し、下半面の渦（下部大渦）は下降しており、両渦の回転方向は逆向きとなっている。なお、可視化観察から求められた渦中心位置は上部大渦と下部大渦について、それぞれ $(r/r_i, z/H) = (0.72, 0.82)$, $(0.52, 0.27)$ であり、ベクトル図のそれと概ね一致している。可視化実験と数値計算から得られた渦中心位置を総括すると、渦中心半径方向位置は AR が大きい場合は一致する傾向を示すが、 AR が小さい場合は一致せず、まだ数値計算などに改良の余地がある。

次に仔魚に作用する応力負荷について考えてみる。塩谷らは水槽中央部および水面近傍は流れが速く、仔魚に対する物理的ダメージが大きい環境であると推測している³⁾。その箇所以外に仔魚に大きなダメージを与える場所を図3-8から推測すると、大渦周辺（特に大渦と側壁との間）、それに加えて、 $AR = 2.0$ の場合は上部大渦の下側領域および下部大渦の上側領域で速度が大きい。すなわち、これらの位置についても仔魚に作用する応力負荷が大きいことが推測される。

(2) コーナー渦の速度ベクトル

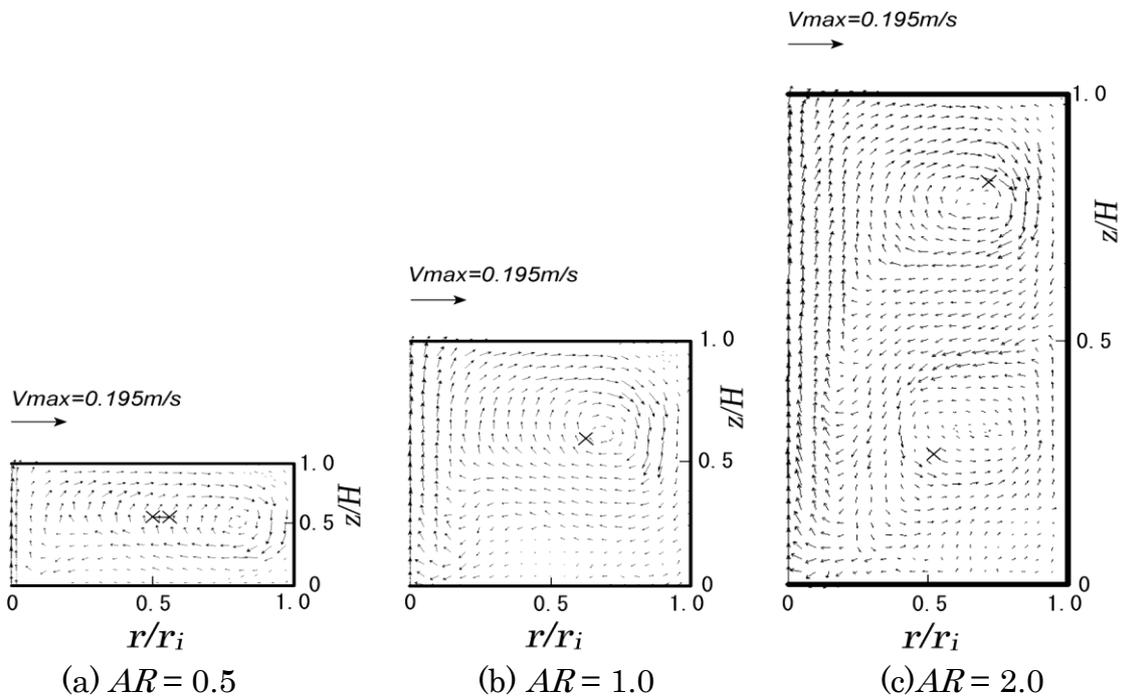


図 3-8 鉛直断面内における液相の速度ベクトル図

第2章において、従来研究^{3),6)~8)}で明らかにされてこなかったコーナー渦が、 AR の値によらず円形水槽において存在することを可視化実験で明らかにした。一方、Shiotaniら⁶⁾の数値計算ではコーナー渦は予測されなかった。Kuwagiら¹⁰⁾は自由表面上の境界条件をslipおよび no-slipとした場合のコーナー渦生成に及ぼす影響について報告している。ただ自由表面をno-slip条件にした場合、

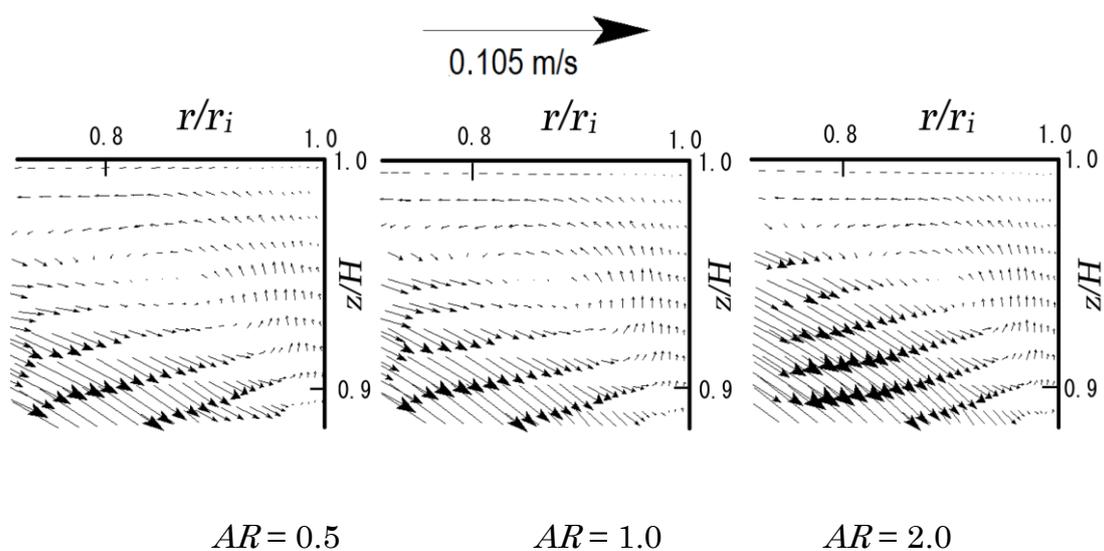


図 3-9 水表面コーナー渦

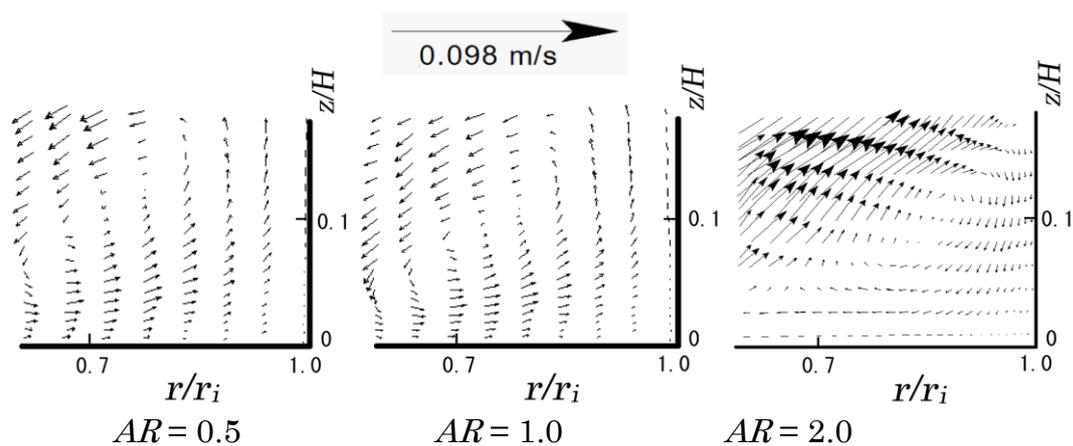


図 3-10 底面コーナー渦

水表面コーナー渦は予測しているものの、底面コーナー渦については何も言及していない。動画観察によれば、大渦とコーナー渦の循環速度は異なり、それ

ぞれの渦の存在を示す適切な速度の尺度が存在するものと思われる。図3-8の速度の縮尺は大渦の存在を示すには適切な尺度であるが、コーナー渦の存在を示すには不適切である。そこで、速度の尺度を変更してコーナー渦の速度ベクトルを表示した。

図3-9は速度の基準尺度を変更（0.105m/sを基準にとる）して、水表面コーナー渦を表示した速度ベクトル図である。 $AR = 0.5 \sim 2.0$ のすべての場合において、水表面コーナー渦を示す速度ベクトルが確認でき、その回転方向は反時計向きである。図3-10は底面コーナー渦の速度ベクトル図を示す。この場合の速度の基準尺度は0.098m/sである。 $AR = 0.5$ および1.0の場合、底面コーナー渦の回転方向は反時計方向であるのに対し、 $AR = 2.0$ の場合は逆に時計方向回転を示す。これは $AR = 0.5$ と1.0の場合、1渦対系であるのに対し、 $AR = 2.0$ の場合には2渦対系となるため、下部大渦の下方に生成する底面コーナー渦の回転方向は逆向きになる⁵⁾ためである。以上述べたように、数値計算された $AR = 0.5, 1.0$ および2.0のすべての場合、水表面および底面近傍でコーナー渦が存在する結果を示すことができた。その結果は、第2章で報告した可視化結果を妥当に支持するものである。

3.3.3 鉛直速度分布

塩谷ら³⁾の報告によると、マハタ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）中心付近は無通気状態と同じ環境となり、これが生残率の低下の原因であることを推測している。さらに水槽中央部の上昇流が水槽内の循環流の速度よりも100倍程度高い値になり、その流れが仔魚に与える負荷を相当大きくすることが報告されている。このため、大渦の半径方向速度分布を定量化することは意義がある。図3-11は可視化写真から求めた大渦の中心高さ位置における鉛直方向速度成分の半径方向分布の計算結果を示す。

$AR = 0.5$ の場合で、水槽中心位置（ $r/r_i = 0$ ）における値は空気噴流の上昇に付随する液相の上昇速度を示す。中心から $r/r_i = 0.13$ までは液相の上昇速度は減少するが、 $r/r_i = 0.13 \sim 0.27$ では時計回転方向に回転する大渦の吹き上げのた

め鉛直方向速度は増加する。 $r/r_i=0.27$ で上昇速度の極大値をとった後、半径方向にその値は減少し、 $r/r_i \doteq 0.68$ で速度は0となる。 $r/r_i=0.68$ 以降、鉛直速度は負となり、特に $r/r_i=0.82$ 付近から急減少するが、これは上部大渦の吹き下ろしのためである。さらに $r/r_i=0.88$ で最小速度を取った後、円筒側壁面における粘性のため、壁面上 ($r/r_i=1.0$) で0となる。 $AR=1.0$ の場合の速度分布の傾向も $AR=0.5$ の場合と同様の傾向を示す。

$AR=2.0$ の場合、すでに述べたように、大渦は水槽上半面と下半面領域に2個存在する（上部大渦と下部大渦）。 $z/H=0.82$ の分布は上部大渦の中心高さ断面における鉛直速度分布を表すが、その傾向は $AR=0.5, 1.0$ と同様の傾向を示す。ただし、上部大渦中心（グラフの黒色の線の値が0になる半径方向位置）における速度勾配 $\partial v / \partial r$ は AR が増すほど増加する。このことは AR が増すほど

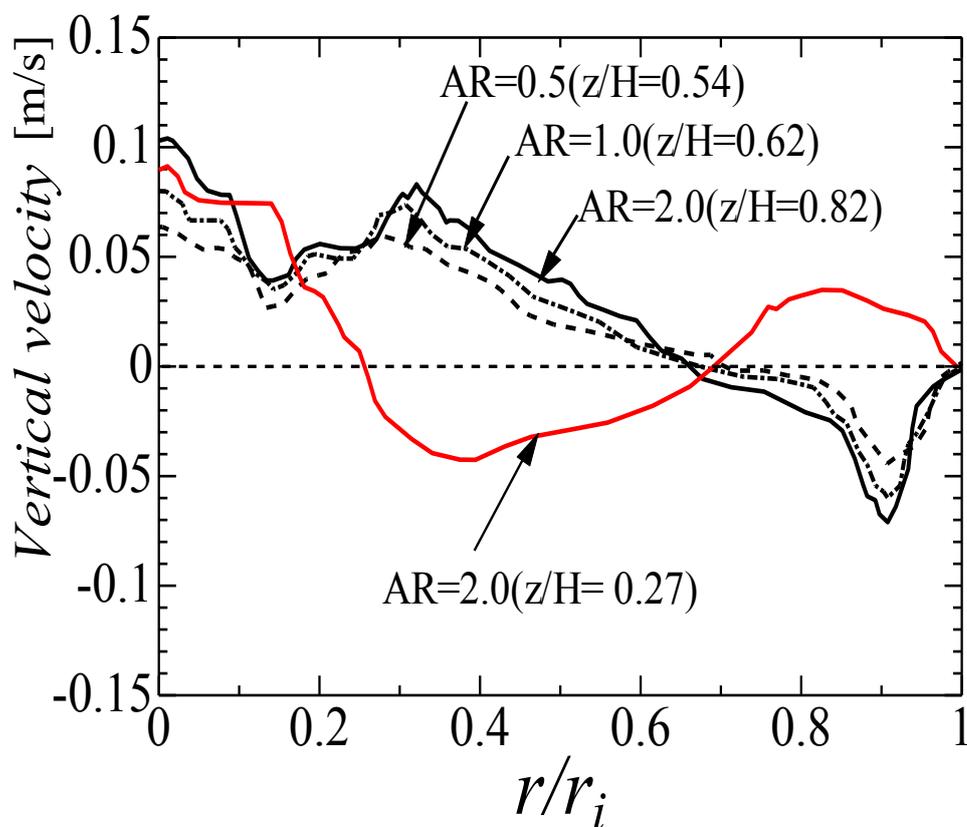


図 3-11 大渦中心における鉛直方向速度分布（水槽の右半面）

大渦の循環速度が増すことを示唆する。赤色の実線は $z/H = 0.27$ の分布で、下半面領域に存在する反時計回転方向の下部大渦の中心高さにおける鉛直方向速度分布を示す。水槽中心線上で速度は最大値をとり、中心から離れるにつれ速度は減少する。 $r/r_i \doteq 0.13$ 以降、反時計回転方向の下部大渦による吹き下げのため速度は急減少する。 $r/r_i \doteq 0.37$ において、負の速度のピーク値をとり、その後、 r/r_i の増加とともに速度が急上昇する。この鉛直速度の増加の原因は下部大渦の吹き上げによると思われる。下部大渦の吹き上げのため、 $r/r_i \doteq 0.82$ において、速度は正のピーク値をとり、その後、側壁における粘性のため速度は減少し、側壁上で0となる。

次に、数値計算された速度データから渦の強度を示す渦度 $\Omega (= \partial v / \partial r - \partial u / \partial z)$ の値を図3-12に示す。 Ω は水槽の直径を含む鉛直断面内について求めたもので、渦度の符号は正の場合時計方向回転を、負の場合反時計方向回転

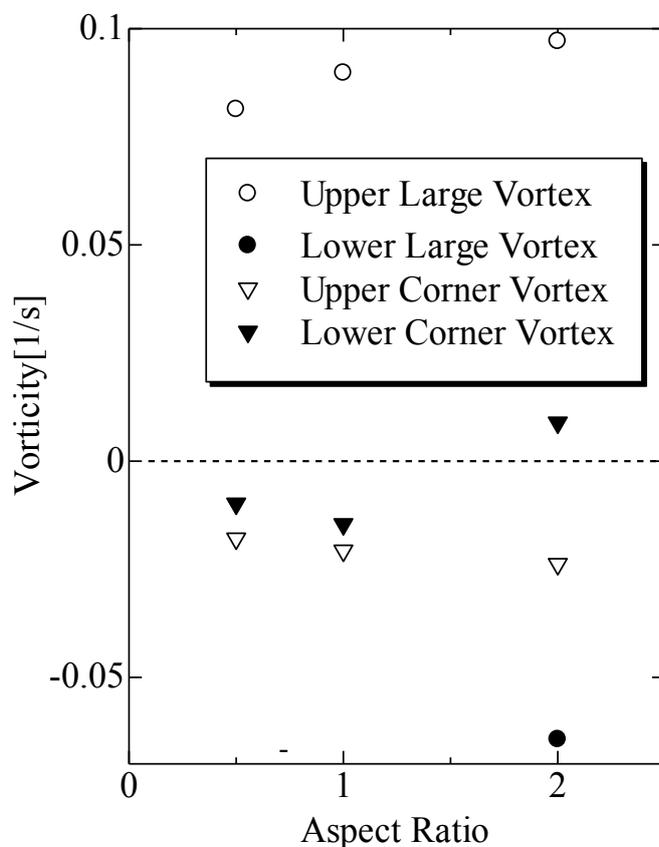


図 3-12 渦度とアスペクト比との関係 (水槽の右半面)

を示す。 $AR = 2.0$ の場合のみ、上半面と下半面の両方の渦に渦度の値が見られ、しかもその符号が異なることが明らかである。上部大渦の渦度の大きさは AR が増すと若干増加する。 $AR = 2.0$ の場合、上部大渦の強度は下部大渦の約1.5倍となっている。水表面および底面コーナー渦の強度は大渦のそれに比べるとかなり小さく、 AR の増加とともに微増する。底面コーナー渦は図3-10で示したように $AR = 2.0$ のみ回転方向が反転する。このため、図3-12における底面コーナー渦の渦度の符号も $AR = 2.0$ で反転する。大渦およびコーナー渦のアスペクト比 AR に対する強度が計算から評価できたものの、仔魚の生産率との関係は未解明であり、今後は飼育実験などと照合してそれらの関連性を精査する必要がある。

最後に水槽中心線上における液相の最大鉛直速度について考えてみる。Ruttanapornvareesakulら⁴⁾の飼育実験結果によると、マハタとオニオコゼの仔魚の生残率は AR が大きい水槽で高いことが報告されている。その要因の1つとして、自由表面の面積が小さい水槽ほど表面張力で捕捉されて死ぬ、いわゆる浮上死の数が少ないためと述べている。仔魚生残率に及ぼす影響因子は多数あると思われるが、著者らは AR の変化に伴う水槽内のフローパターンの劇的変化が重要であると予想している。これに関連して、塩谷ら³⁾は流速測定とマハタ仔魚の飼育実験から仔魚の生残率が高くなる最適な通気量が存在することを報告している。しかしながら、たとえ、同一通気量であっても水槽の液深が変化すれば中心線上の鉛直上昇速度は変化することが予想される。このため、同一通気量、水槽半径一定の下で液深を調節した場合における AR の変化と中心線上の鉛直上昇速度との関係を調べることは重要であると考えられる。図4-13は AR に対する水槽中心線上での無次元最大鉛直速度の変化を示す。 AR の増加（すなわち、液深の増加）とともに液相の鉛直上昇速度は増し、 $AR = 2.0$ の最大鉛直速度は $AR=0.5$ の場合の約1.6倍となっている。このことは、各魚種の仔魚の生育に対する最適な上昇速度が特定できたとしても、同じ通気量 Q に対して水槽の液深 H が変われば、水槽中心線上の鉛直上昇速度は変化することになる。たとえ、仔魚に作用する応力負荷は同一通気量であっても、 AR の値によ

り変化することになる。したがって、種苗生産水槽の中心線上における流速を生育に最適な値にするには Q と H の両方を調節する必要がある。

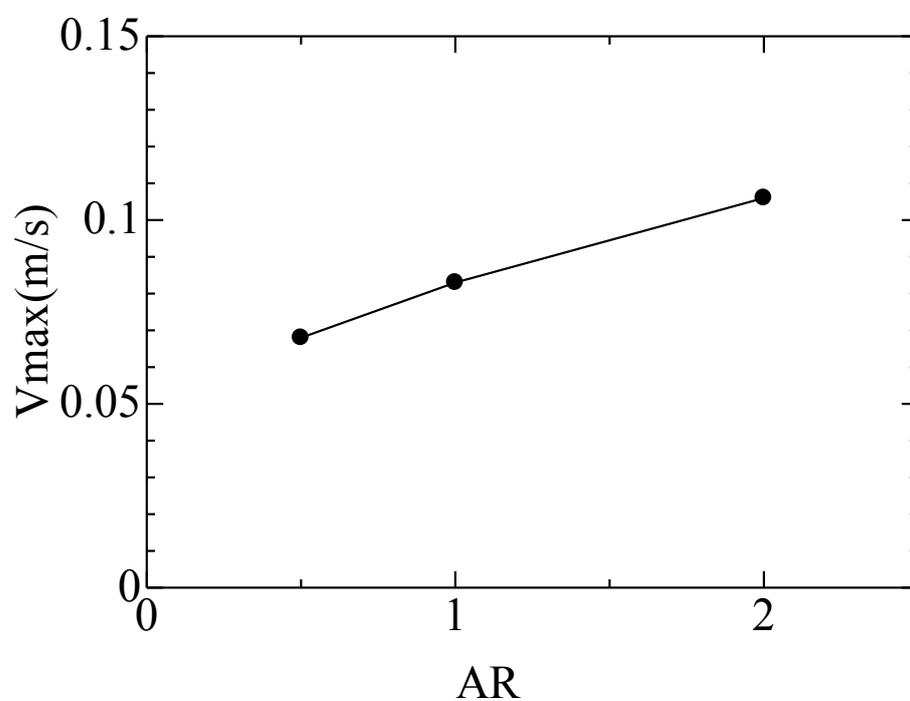


図 3-13 中心線上における鉛直最大速度とアスペクト比との関係

3.4 第3章の結論

$Q=10\text{ml/min}$ の下で円形水槽モデル内の速度分布を数値計算した結果,可視化結果と良好に対応していることが確認できた。以下に,本研究範囲から推察できる結果を述べる。

(1) 水槽の直径を含む鉛直断面内で見られる大渦は前報で明らかにした $AR=1.0$ と 2.0 の間で1渦対系から2渦対系へと変化する結果を数値計算から確認できた。

(2) 本数値計算により,水槽内の直径を含む鉛直断面内で,水表面コーナー渦および底面コーナー渦の存在を確認した。

(3) 上部大渦の渦度は AR が増加 (液深が増加) すると大きくなる。2渦対系の $AR=2.0$ の場合,上半面領域に生成される上部大渦の渦度は下半面領域に生成される下部大渦よりも大きい。

(4) 表面および底面コーナー渦の強度は大渦のそれに比べるとかなり小さく, AR の増加とともに微増する。底面コーナー渦は $AR=2.0$ のみ回転方向が反転するため,渦度の符号も $AR=2.0$ で反転する。

(5) 同一通気量,水槽内径一定の下で液深 H を調節して AR を変化させた場合,水槽中心線上における最大鉛直上昇速度は AR の増加とともに増す。これは仔魚の生育に最適な鉛直上昇速度を作成する場合, H と AR の両者を同時に考慮しなければならないことを示した。

第3章の参考文献

- 1) 南卓志：初期減耗研究の方法論；研究の歴史，田中克・渡邊良朗編，魚類の初期減耗研究．恒星社厚生閣，東京，pp.9-20, 1994.
- 2) Tucker Jr JW: The rearing environment. In: Tucker Jr JW ed., Marine Fish Culture. *Kluwer Academic Publishers*, London, pp.49-148, 1998.
- 3) 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：マハタ飼育水槽の検討例．水産工学, **39**: 205-212, 2003.
- 4) Y.Ruttanapornvareesakul, Y.Sakakura and A.Hagiwara : Effect of tank proportions on survival of seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* (Thunberg) and devil stinger *Inimicus japonicas* (Cuvier) larvae. *Aquaculture Res*, **38**: 193-200, 2007.
- 5) 角田哲也・川原秀夫・塩谷茂明・阪倉良孝・萩原篤志：仔魚飼育水槽内のフローパターンの観察．水産工学, **48** : 99-108, 2011.
- 6) S.Shiotani, A.Hagiwara, Y.Sakakura and H.Chuda : Estimation of flow in a rearing tank of marine fish larvae by simplified numerical computation : a case of two-dimensional flow. *Aquacultural Engineering*, **32**: 465-481, 2005.
- 7) Y.Sakakura, S.Shiotani, H.Chuda and A.Hagiwara : Improvement of the survival in the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* larvae by optimizing aeration and water inlet in the mass-scale rearing tank. *Fish.Sci.*, **72**: 939-947, 2006.
- 8) Y.Sakakura, S.Shiotani, H.Chuda and A.Hagiwara : Flow field control for larviculture of the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus*. *Aquaculture*, **268**: 209-215, 2007.
- 9) 赤司信義・斎藤隆：鉛直二次元衝突流れによる洗掘に及ぼす気泡混入の影響．土木学会論文集, **387** : 163-170, 1987.
- 10) K.Kuwagi, S.Kusu and H.Ozoe : Transient three-dimensional

numerical analyses of shallow bubble column. *Chemical Engineering Journal*, 78:5-11, 2000.

- 11) 秋山守・有富正憲：新しい気液二相流数値解析. コロナ社, 東京, pp.114, 2002.
- 12) 片岡勲・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 : 132-141, 1993.
- 13) F.Durst, B.Schönung, K.Selanger and M.Winter : Bubble-driven liquid flows. *J.Fluid Mech*, 170:53-82, 1986.
- 14) G.Taylor : The viscosity of a fluid containing small drops of another fluid. *Pro.Roy.Soc*, A138:41-48, 1932.
- 15) D.Drew and R.Lahey : Application of general constitutive principles to the derivation of multidimensional two-phase flow equations. *Int. J. Multiphase Flow*, 5:243-264,1979.
- 16) H. Kawahara, Al. M. Morega and M. Morega: Heat transfer in electroconductive fluids. A Highly simplified mark & cell simulation. *Rev. Roum. Sci. Techn. – Electrotechn. Et Energ.*, 54:1 67-76, 2009.
- 17) 種子田定俊：画像から学ぶ流体力学. 朝倉書店, 東京, pp.35, 1989.

第4章 飼育実験

4.1 序論

第2章で飼育水槽内の流れ場を定性的に、第3章では数値計算によって定量的に評価した。両章の結果、飼育水槽内の流れ場は AR がある値を越えると劇的に変化することを示唆した。初期減耗に関わる実験的研究には実験室内での小規模な飼育実験に加えて、エンクロージャーと呼ばれる半自然的な条件下での野外実験や、海産魚の種苗放流に関連した実験や調査が含まれる。初期減耗の研究においては野外での観察から生み出された仮説が、野外での調査や実験と室内での実験の相互補完により、仮説と検証のフィードバックを通じて総合的に体系づけられることが必須である。この際、初期減耗の過程を定性的に捉えるだけでなく、定量的に捉える視点が必要で、この定量的把握にこそ、実験的研究の貢献すべき部分である¹⁾。今日まで国内外でさまざまな魚種の飼育実験が実施されてきた^{2)~14)}。Ruttanapornvareesakul らは日本の長崎大学において、マハタとオニオコゼを対象とした飼育実験を実施した⁹⁾。その実験では水量を一定として水槽形状を変化させた。その場合、水槽形状を変化させることはひいては水槽の AR を変化させることになる。その飼育実験結果は細長い水槽形状では (AR が大きい場合)、仔魚の初期生残率が劇的に高かった (付図-4,5 参照)。この結果を第2,3章の結果と単純に照合すると、2渦対系のフローパターンの場合には初期生残率が高いことになる。しかしながら、水槽の AR を調節する手段は2通り存在する。まず第1は長崎大学のように、水量一定で水槽形状を変化させる方法である。この場合、水量一定のため、飼育実験の仔魚数は一定に保つことができる。一方、本研究の第2,3章の実験と同様に同じ水槽で、液深を変化させることによって AR を調節方法も存在する。後者の場合、水量が変化するので飼育実験で仔魚の数を一定に保てない。従って、 AR が初期生残率に及ぼす影響を調査するためには仔魚の密度が一定になるように仔魚の

数をコントロールする必要がある。本飼育実験では第 2 章と 3 章の結果と照合するためにほぼ同径の縦長水槽の水深を変化させ、*AR* を調節した。本章では主に第 2 章の可視化実験と第 3 章の数値計算結果と飼育実験結果を照合して水流が仔魚生産率に及ぼす影響について考察する。

4.2 飼育実験の対象魚種

本研究で実施した飼育実験の対象魚種は、養殖で利益価値の高いアカアマダイとした。その理由は、第 1 に初期飼育が困難な魚種のうち、ハタ類やクロマグロでは卵を採取するための親魚を数年かけて準備する必要がある。一方、アカアマダイは産卵期（6～11 月）であれば、天然魚にホルモン処理することにより、容易に卵を採取する技術が開発されており、高級魚の割に飼育実験の準備が少なく済む。第 2 に、長崎大学の飼育実験ではマハタであったが、初期飼育に関して、基本的にハタ類と類似しているため実験結果を比較するのに都合がよい。第 3 に、ハタ類同様にアカアマダイの飼育技術が開発途上であることである。アカアマダイを含めたアマダイについて簡単に以下に言及する。

（甘鯛，尼鯛）は、スズキ目キツネアマダイ科アマダイ属 *Branchiostegus* に分類される魚の総称である。おもにインド太平洋の大陸棚を中心に生息する底生肉食魚である。日本では南日本近海で 5 種が見られる。産卵期は秋から冬で、水深 30 メートルから 140 メートルの砂泥地に生息。砂泥地の小山になっているあたりに巣穴を掘り、エサを待ち受け、集団で巣穴を作る。雄の方がやや大きい。1 歳で 16～19 センチ，2 歳で 22～23 センチ，3 歳で 25～26 センチ，4 歳で 30 センチあまりになる。雄で最大 60 センチ弱，雌で 45 センチ前後。関東では現在もっとも値段の高い魚で、キロ当たり 10000 円以上になることも珍しくない。国内で主に食用となるアマダイには 3 種類で、シロアマダイ，アカアマダイ，キアマダイ)。昔はシロアマダイが最高値，最上位にあるとされたが，近年はアカアマダイと変わらない。キアマダイは珍しく，一定の評価はないが，高級魚である。一般に「アマダイ」といえば，アカアマダイのことを意味する。

4.3 飼育実験方法

平成22年10月～平成23年3月にわたってアカアマダイの飼育実験について経験豊富な山口県水産研究センターの山本健也研究員の下で、飼育実験を二回実施した。実験は水量一定の下（100L）で仔魚数を1443匹に固定した場合と縦長容器で深さを変化させ、 $AR=0.5,1.0,2.0$ に調節して実験した2通り実施した。

実験で使用した飼育水槽は市販（株式会社田中三次郎商店）のポリカーボネイト製水槽（パンライト）を3種類ほど使用した。その型式と寸法を表4-1に示す。パンライトとはポリカーボネイト樹脂容器を示し、屋内の飼育実験に多用される容器である。その特長はガラスの200倍以上の耐衝撃性を持ちながら重量は1/2と軽く、耐熱性、透明性、耐候性、保湿性加工性にも優れている。なお、通気量 Q は可視化実験用水槽とサイズが異なるため、従来通りの経験則に基づいて設定した。感覚的には実験で使用した通気量 $Q=10,25\text{ml/min}$ では通気が弱すぎて水流がほとんど生じず、 $Q=150\text{ml/min}$ では通気が強すぎる印象であった。このため通気量は水槽の種類及びアスペクト比 AR によって40～60 ml/min に調節した。エアストーン径は25 mm のものを水槽中央底面に設置した。縦長の水槽の場合、チューブの浮力によってエアストーンが底面からわずかに浮くため紐でエアストーンを押しえつけているのでビニールチューブは水中で真直ぐにはなっていない。

表4-1 飼育水槽の寸法

型式	容量 (L)	底面直径 (mm)	上面直径 (mm)	高さ (mm)
SPS-100	100	570	680	430
SPS-200	200	710	850	555
SLP-100	100	420	450	880

4.4 飼育実験結果

4.4.1 体積一定の場合の飼育実験

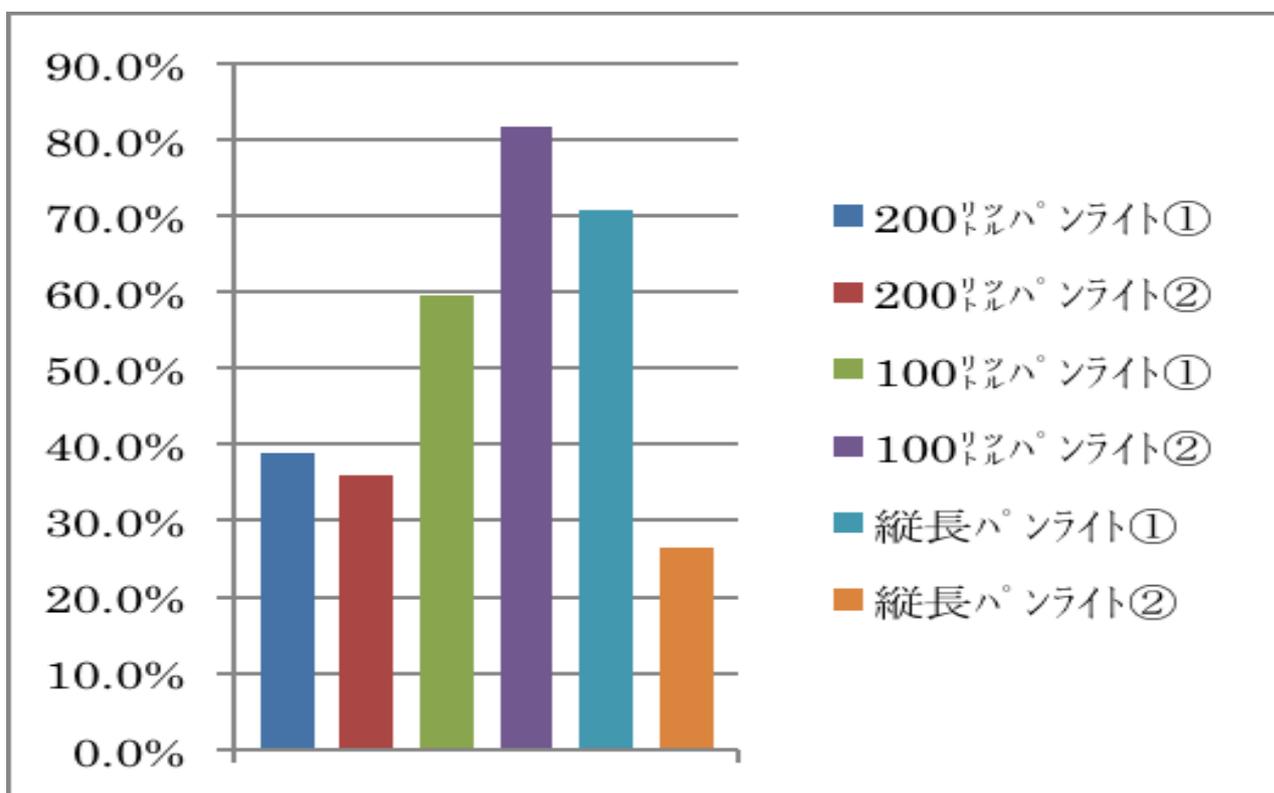


図 4-1 体積一定の生産率結果

生残率は 100L パンライト②が一番高い。縦長パンライト②の場合、実験中、水圧によって通気が止まるトラブルがあったため生残率が一番低くなった。。100, 200 パンライトおよび縦長パンライトの AR の値を算出すると、それぞれ 1.04, 0.65, 3.09 であった。縦長パンライト②のデータを通気トラブルのため除去し、生残率の平均値を比較すると、 $AR = 0.5$ の値が 37.4%, $AR = 1, 2$ の値はともに 70.7% であった。直視観察結果によれば、1 対の渦パターンには 2 通り存在し、100L パンライト水槽では渦が水槽表面近傍から底面まで広く分布する。一方、200L パンライト水槽では水深が浅く、気泡に付随して上昇する水の鉛直方向速度が小さいため (図 3-13 参照)、底面から水面方向へ輸送される流体は水面近傍まで到達しないと思われる。このため水面近傍で半径方向へ転じ

た放射状の流れも側壁まで到達しないことが想像される。このような流れの存在を一部の種苗生産現場の技術者から認められるが、可視化実験と数値計算では確認できておらず、通気量の強さに比べ水槽直径が大きい場合に生ずるものと思われる。従って、後者のような流れは仔魚の生産率を高める可能性があり、今後の課題である。

4.4.2 同種類容器での水深変化させた場合の飼育実験

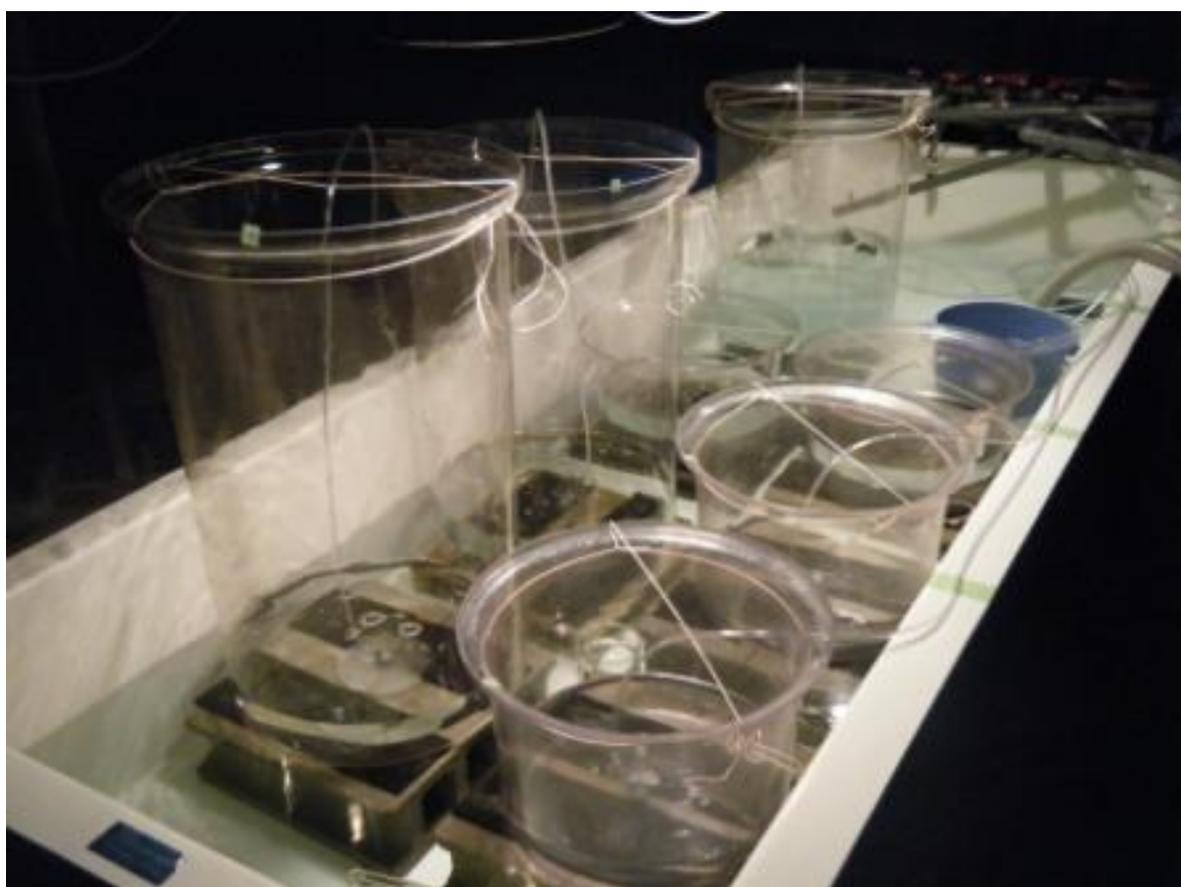


図 4-2 飼育実験中の写真

容器の水深を $AR = 0.5, 1.0, 2.0$ になるように系統的に液深を調節した。この時の写真を図 4-2 に示す。実験に際して、液深によって水量が変化するため、これに応じて仔魚の数も変化させた。また、液深が最も浅い $AR = 0.5$ の場合、水量が少ないため外気温に敏感に反応する可能性がある。このため、実験中の水温を測定した。飼育実験時の水温データを図 4-3 に示す。図より測定日の気

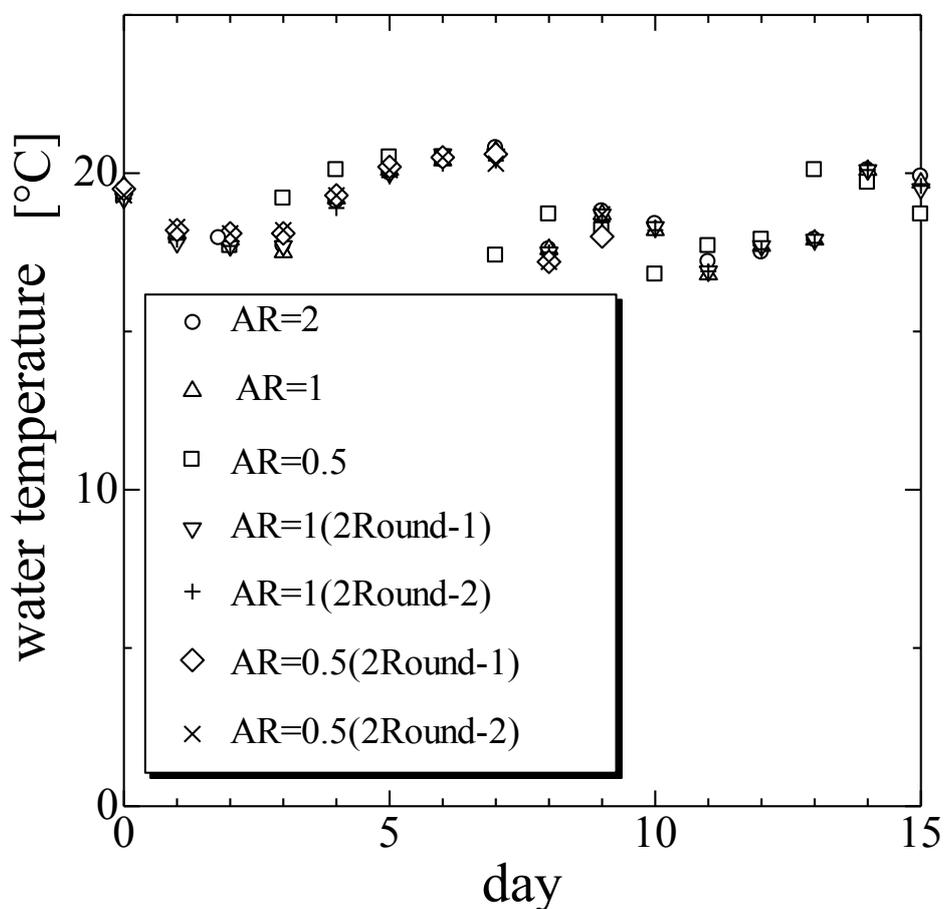


図 4-3 実験時の水温変化（縦長パンライト SLP-100 使用時）

温変化によって水温も変化するが、同一日の水温変化は $AR = 0.5$ を除けば少ない。これは、 $AR = 0.5$ の場合は水深が浅くて保有水量が少ないため周囲の温度変化に敏感なためと思われる。水温の最大偏差は約 $\pm 1^\circ\text{C}$ であった。それ以外のケースでは同一日の飼育実験はほぼ同一水温で実施されたことになる。なお、 $AR = 0.5$ の場合のうち、10 日齢以降データがないのは、仔魚が 10 日齢時に全部死滅し、その時点で実験を中止したためである。

4.4.3 仔魚生残率

生残率とは特定の時点に存在した個体数に対する一定時間経過後における生存個数の比のことである。表 4-2 に 15 日齢における仔魚の生残率の数値データ

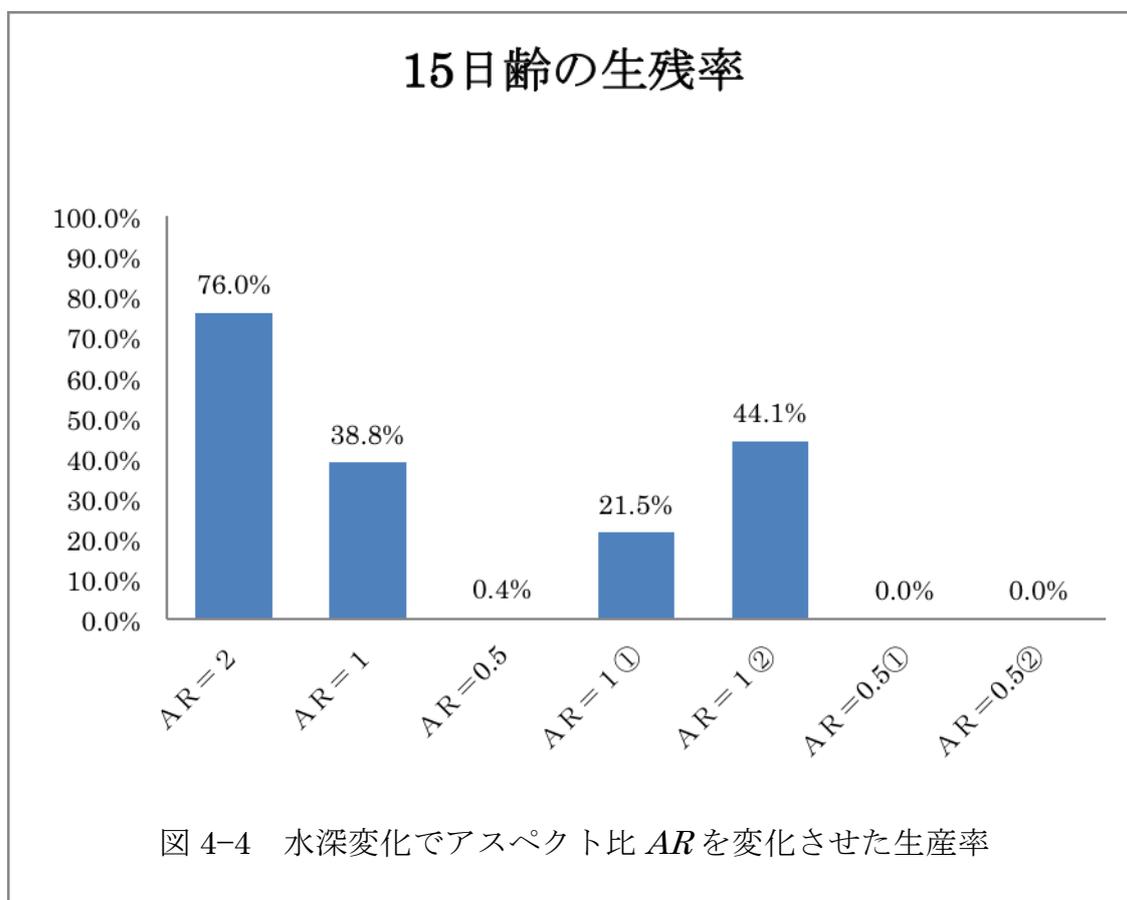
を示す。図中の丸数字は同一寸法の形状の水槽番号を示す。従って、 $AR=1.0$ の場合は、2 個の水槽で同時測定していることを示す。 $AR=0.5$ の場合は魚の密度を 2 パターンにした実験で、仔魚の数を 165 匹、丸数字を記していない方は仔魚が 240 匹で実験した場合である。結果を見ると、 $AR=0.5$ の場合はほとんど死滅状態である。 $AR=1.0$ の場合、生産率の値が多少変化 (21.5~44.1%) するものの平均の生残率は 34.8% である。

表 4-2 仔魚生残率

水槽のアスペクト比 AR とその数	ふ化仔魚数 (尾)	15 日齢生残数 (尾)	15 日齢生残率 (%)
$AR=2$	1008	766	76.0%
$AR=1$	487	189	38.8%
$AR=0.5$	240	1	0.4%
$AR=1$ ①	331	71	21.5%
$AR=1$ ②	331	146	44.1%
$AR=0.5$ ①	165	0	0.0%
$AR=0.5$ ②	165	0	0.0%

飼育実験では浮上へい死の数をカウントしたが、沈降死などの数は人手不足のためカウントできなかった。そこで総死亡数-浮上へい死数=浮上へい死以外の要因による死として取り扱い、浮上へい死および浮上へい死以外の総死亡数に対する割合を図 4-5 に示す。結果は $AR=2.0$ では浮上死以外の要因による死亡率が浮上へい死のその約 2.3 倍であった。このことは $AR=2.0$ の水槽では生産率に及ぼす浮上へい死による影響は少ないと思われる。 $AR=1.0$ の水槽では魚の密度が同じ 331 匹の場合と 487 匹にした場合、多少値がばらつくものの浮上へい死と浮上へい死以外の要因の影響は概ね同程度である。 $AR=0.5$ では浮上へい死の割合が極端に小さいので浮上へい死以外の要因がほとんどと言える、この場合、水深が浅く、鉛直方向上昇速度が小さいため仔魚が自由表面ま

で輸送される回数が少ないため浮上へい死の要因が低いと想像した。一方、鉛直方向上昇速度が小さいため、水槽底面に接触する回数が増える。よって、仔魚の死亡原因のうち、沈降死の比率が支配的になったと考えられる。以上から推察されるのは極端に水深が浅い $AR = 0.5$ の水槽である。ある程度、水深が深くなると、鉛直方向上昇速度が増加するので自由表面まで仔魚が輸送される回数が増し、浮上へい死の比率が増加する。このため、水面で補足されて仔魚が死ぬ、いわゆる浮上へい死数が増し、両者の影響は同程度になる。水深が更に深い $AR = 2.0$ では、2渦対系の渦パターンのため、下方の渦に捉えられた仔魚は水面と接触する回数が減少するので浮上へい死による影響が少ないと思える。また下方の渦は上方の渦よりも強度が小さいので水槽壁面で仔魚が接触してもそれほどダメージが少なく、沈降死も減少する可能性もある。以上から、 $AR = 2.0$ の水槽では渦パターンが変化することにより仔魚の生残率が向上したものと推察される。 $AR = 2.0$ の場合、生残率が 76% と高く、 $AR = 1.0$ の約 2 倍高い値を



示す。なお、山口県外海水産研究センターにおける過去 2 年間におけるアカアマダイの飼育実験では 38~58%であった。

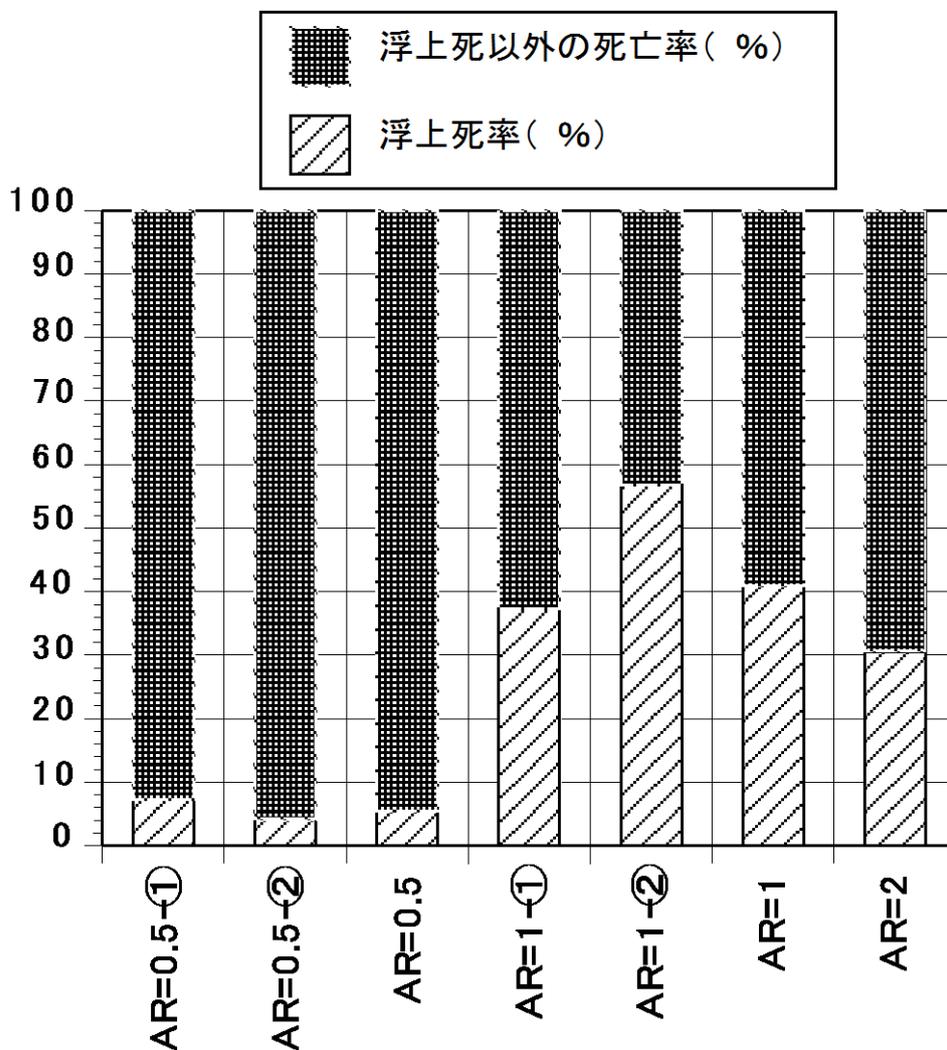


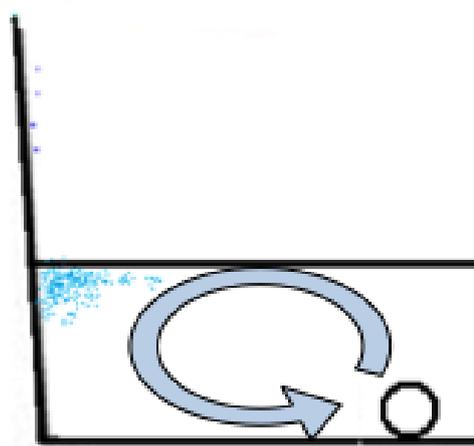
図 4-5 仔魚死亡率の内訳

4.4.4 飼育観察

第 2,3 章で述べたコーナー渦が仔魚生残率に及ぼす影響は現時点では数値データで明らかにできていない。ここでは観察記録から推測してみる。ふ化後 6 日まで水槽外周に仔魚が多数死亡していた。これは浮上へい死した仔魚が流れによって水槽外周に集積されたことが考えられるが、特徴的なことは水面外周で死亡した仔魚は大部分が頭を上にして斜め方向に突き刺さったような状態で

ある。このことは水槽外周で小スケールのコーナー渦が存在するが、一般に、水面上よりも水面と側壁の間に形成される表面張力の大きさは大きい。仔魚は中央付近からコーナー付近に輸送されると、コーナー渦によって表面張力の値が大きい側壁付近で補足されて死亡する可能性が生じる。この現象はふ化後 6～10 日以降は生じない。水面が外周で死亡するケースの仔魚サイズと死亡の形態が共通する点である。

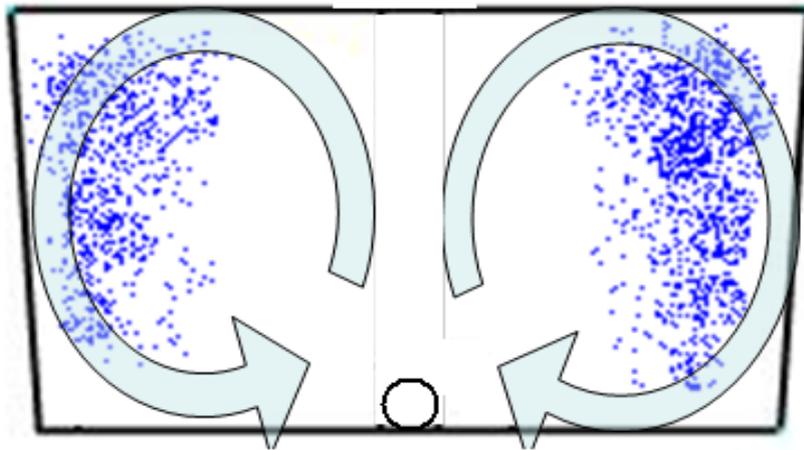
次に目視で仔魚が水槽内に分布する箇所を点で示すと図 4-6～8 になる。図中の点は目視による仔魚の分布を示す。ただし、図中の点の数が仔魚の数そのものを表しているものでもなく、かつ仔魚が分布する座標位置を正確に表現したものではない。目視による感覚的な仔魚分布点であり、点が多い箇所は仔魚の密度が大きいと観測された箇所である。図 4-6 の $AR=0.5$ 場合、仔魚は水槽縁の表層付近に多く分布する。また、縁から中心付近にも自由表面より下に少数の仔魚が点在する。 $AR=1.0$ の図 4-7 の場合、水槽の上下に広く分布仔魚が分布し、中心線上付近には仔魚の分布が少ない。これは中心線上付近の速度は大きく、仔魚に作用する応力負荷が大きいため仔魚が中心付近を避けているもの



○ エアストーン

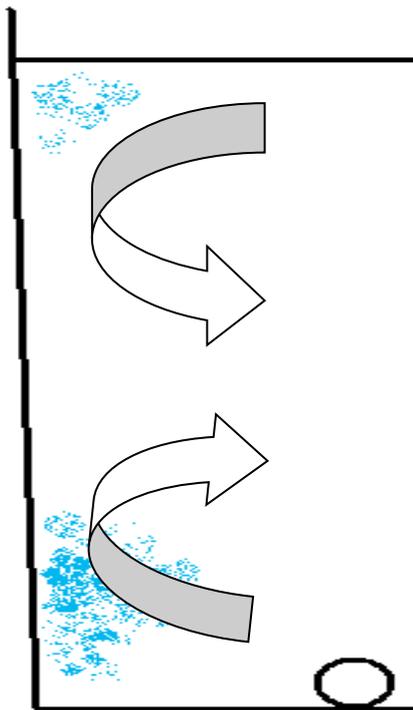
図 4-6 $AR=0.5$ における仔魚の分布

と思われる。 $AR=2.0$ の図 4-8 の場合ではコーナー渦付きさらには上部大渦と下部大渦の境界付近に仔魚が多く分布している。上部大渦と下部大渦の境界付近は剥離点近傍で速度が遅い箇所なので流れによって仔魚が流速の遅い箇所に流されてくるのかそれとも速度の遅い箇所が仔魚にとって環境の良い箇所かもしれない。この点については飼育実験を重ねて詳細に観察する必要がある。



○ エアストーン位置

図 4-7 $AR=1.0$ における仔魚の分布



○ エアストーン位置

図 4-8 $AR=2.0$ における仔魚の分布

第4章の結論

アカアマダイを対象とした飼育実験結果から以下のこと推察される。

(1) 水量一定の下で、飼育水槽の形状を変えて AR の値を調節したところ、縦長パンライト ($AR=2.0$) の通気トラブルを差し引いて考えると、 $AR=1.0$ と 2.0 では同程度である。この結果は Ruttanapornvareesakul らの飼育実験と異なる。この原因として実験室レベルの小型水槽では AR が 1.0 と 2.0 の間でフローパターンが変化した。一方、Ruttanapornvareesakul らの飼育実験では $AR=1.36$ と 3.27 の間でフローパターンが変化したと予想される。すなわち、フローパターンが変化する AR の限界値は水槽サイズによって若干異なる可能性があるものと推察している。

(2) 縦長パンライトの水槽の直径は第2,3章で実施した水槽直径と概ね同じサイズであったため、 $AR=2.0$ の水槽の仔魚生残率は $AR=1.0$ の約2倍であった。縦長パンライト ($AR=2.0$) の水槽の仔魚の生残率が一番高い要因として、浮上へい死数の減少が考えられる。仔魚の死亡要因は多数存在するが、それらのうち、浮上へい死と沈降死が挙げられる。浮上へい死と沈降死のどちらが支配的な要因となるかは魚種によって異なる。例えば、クロマグロでは沈降死が生産率に及ぼす影響が支配的にあるのに対しハタ類では逆に浮上へい死が支配的と言われている。今回の飼育実験で対象としてアカアマダイはハタ類と生態が似ているため、浮上へい死が生残率に与える影響が大きいと予想した。

第4章の参考文献

- 1) 南卓志: 初期減耗研究の方法論 ; 研究の歴史, 田中克・渡邊良朗編, 魚類の初期減耗研究. 恒星社厚生閣, 東京, pp.9-20,1994.
- 2) Tucker Jr JW: The rearing environment. In: Tucker Jr JW ed., Marine Fish Culture. Kluwer Academic Publishers, London, pp.49-148, 1998.
- 3) 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: マハタ飼育水槽の検討例. 水産工学, 39: 205-212, 2003.
- 4) J. Backhurst and J.H. Harker: The suspension of feeds in aerated rearing tanks: the effect of tank geometry and aerator design. Aquacultural Engineering, 7: 379-395, 1988.
- 5) S.Shiotani, A.Hagiwara, Y.Sakakura and H.Chuda: Estimation of flow in a rearing tank of marine fish larvae by simplified numerical computation — a case of two-dimensional flow. Aquacultural Engineering, 32: 465-481, 2005.
- 6) Y.Sakakura, S.Shiotani, H.Chuda and A.Hagiwara: Improvement of the survival in the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* larvae by optimizing aeration and water inlet in the mass-scale rearing tank. Fish.Sci., 72: 939-947, 2006.
- 7) 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. 日水誌, 72: 267-270, 2006.
- 8) Y.Sakakura, S.Shiotani, H.Chuda and A.Hagiwara: Flow field control for larviculture of the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus*. Aquaculture, 268: 209-215, 2007.
- 9) Y.Ruttanapornvareesakul, Y.Sakakura and A.Hagiwara: Effect of tank proportions on survival of seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* (Thunberg) and devil stinger

- Inimicusjaponicus* (Cuvier) larvae. *AquacultureRes*, 38: 193-200,2007.
- 10) 宮下盛: 種苗生産における浮上および沈降死. *日水誌*, 72: 947-948, 2006.
 - 11) Y.Tanaka, K.Kumon, A. Nishi, T. Eba, H. Nikaido and S. Shiozawa: Status of sinking of hatchery-reared larval Pacific bluefin tuna on the bottom of the mass culture tank with different aeration design. *Aquaculture Science*, 57: 587-593, 2009.
 - 12) S. Masuma, T. Takebe and Y. Sakakura: A review of the broodstock management and larviculture of the Pacific northern bluefin tuna in Japan. *Aquaculture*, 315(1-2): 2-8, 2011.
 - 13) 武部孝行, 小林真人, 浅見公雄, 佐藤琢, 平井慈恵, 奥澤公一, 阪倉良孝: スジアラ仔魚の沈降死とその防除方法を取り入れた種苗量産試験. *水産技術*, 3(2): 107-114, 2011.

第5章 結論

5.1 研究のまとめ

本研究では種苗生産現場で使用される仔魚飼育用円形水槽内の流れ場を定性的かつ定量的に推察した。この研究は乱獲、天災および自然環境の変化などに伴う水産資源を保つための基礎的知見を与える。最近では BRICS に代表される成長著しい国まで水産資源の大量捕獲および摂食によって日本はもちろん世界的にも水産資源の確保が困難になりつつある。この問題を解消するのは養殖技術の向上が不可欠であるが、未だ種苗生産現場では技術者の経験と勘に頼る技術伝承が主流である。また、水産学研究は生物学的な見地からアプローチされることが多く、種苗生産現場の直面する諸問題に工学的な手法とアイデアを導入することによって解決可能なケースも考えられる。本課題は種苗生産の課題のうち初期減耗の因子の一つである流れ場と仔魚の生産率に与える影響を理解するために水槽内の流れ場について研究した。もし、流れ場の解明によって仔魚の生産率が向上すれば、希少価値の魚介類の再生の可能性に繋がる。本研究で実施した研究はまず第1章で研究背景、意義などについて示した。

第2章では飼育用円形水槽内のフローパターンを流れの可視化によって定性的に調査し、アスペクト比 AR がフローパターンに及ぼす影響、通気量 Q がフローパターンに及ぼす影響について明らかにした。今まで水産学上、扱われなかったアスペクト比 AR の概念を導入することによって、新規の設備を付加しなくてもアスペクト比 AR の値によって流れ場がコントロールできる可能性を示した。その主な結果は以下に示すとおりである。

- (1) 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の影響は弱い。

- (2) 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。これより、水槽底面近傍の流れの方向は 1 渦対系の場合、円周付近から中心向き、一方、2 渦対系の場合、外向きとなる。
- (3) 円形側壁面上に、渦 N_l , N'_l , N_t および N_b と関連する再付着点とはく離点が存在する。これらの渦対系は Hunt らのトポロジー的考察による解析結果を支持する。
- (4) AR の高い水槽で仔魚の生残率が高いという既報の結果⁹⁾は、水槽内に 2 渦対系の流れ場が形成され、そのうちの 1 渦対系に仔魚が取り込まれることによって起こった可能性が高いと考えた。

第3章では2章の結果を基にして、数値計算によって円形水槽内の流れ場を推察した。安定解が得られる範囲のうち、代表として、 $Q = 10\text{ml/min}$ の下で円形水槽モデル内の速度分布を数値計算した結果、可視化結果と良好に対応していることが確認できた。その主な結果を以下に示す。

- (1) 水槽の直径を含む鉛直断面内で見られる大渦は前報で明らかにした $AR = 1.0$ と 2.0 の間で 1 渦対系から 2 渦対系へと変化する結果を数値計算から確認できた。
- (2) 本数値計算により、水槽内の直径を含む鉛直断面内で、水表面コーナー渦および底面コーナー渦の存在を確認した。
- (3) 上部大渦の渦度は AR が増加 (液深が増加) すると大きくなる。2 渦対系の $AR = 2.0$ の場合、上半面領域に生成される上部大渦の渦度は下半面領域に生成

される下部大渦よりも大きい。

(4) 表面および底面コーナー渦の強度は大渦のそれに比べるとかなり小さく、 AR の増加とともに微増する。底面コーナー渦は $AR=2.0$ のみ回転方向が反転するため、渦度の符号も $AR=2.0$ で反転する。

(5) 同一通気量、水槽内径一定の下で液深 H を調節して AR を変化させた場合、水槽中心線上における最大鉛直上昇速度は AR の増加とともに増す。これは仔魚の生育に最適な鉛直上昇速度を作成する場合、 H と AR の両者を同時に考慮しなければならないことを示す。

第4章では第2章と3章で得られた結果と実際の飼育実験との対応を調査する目的でアカアマダイを対象とした飼育実験を実施した。その結果を以下に示す。

(1) 水量一定の下で、飼育水槽の形状を変えて AR の値を調節したところ、縦長パンライト ($AR=2.0$) の通気トラベルを差し引いて考えると、 $AR=1.0$ と 2.0 では同程度である。この結果は Ruttanapornvareesakul らの飼育実験と異なる。この原因として実験室レベルの小型水槽では AR が 1.0 と 2.0 の間でフローパターンが変化した。一方、Ruttanapornvareesakul らの飼育実験では $AR=1.36$ と 3.27 の間と予想される。すなわち、フローパターンが変化する AR の限界値は水槽サイズによって若干異なる可能性があるものと推察している。

(2) 縦長パンライトの水槽の直径は第2,3章で実施した水槽直径と概ね同じサイズであったため、 $AR=2.0$ の水槽の仔魚生産率は $AR=1.0$ の約2倍であった。縦長パンライト ($AR=2.0$) の水槽の仔魚の生産率が一番高い要因として、浮上死数の減少が考えられる。仔魚は多数の要因によって死んでいくが、それらのうち浮上死と沈降死が挙げられる。浮上死と沈降死のどちらが支配的な要因となるかは魚種によって異なる。例えば、クロマグロでは沈降死が生産率に及ぼ

す影響が支配的にあるのに対しハタ類では逆に浮上死が支配的と言われている。今回の飼育実権で対象としてアカアマダイはハタ類と生態が似ているため、浮上死が生産率に与える影響が大きいと予想した。

5.2 今後の課題と展望

本論文を締めくくるに当たり、研究の進展を考えたときに必要と思われる今後の展望と課題について、以下に列挙する。

(1) 飼育水槽内の流速測定

飼育水槽内の流れは気液二相流であるため（特に中心断面付近）、流速測定は技術的に困難である。これを実現するには非接触で高価な測定装置（たとえば、ボイド率計、PIV、LDV など）が必要である。現時点ではこれらの装置を研究室に保有していないため、可視化実験と数値計算で流れ場を定性的かつ定量的に推測した。数値計算結果と可視化結果との対応は良好であったが、実際的水槽内の流れ場と数値計算の結果がどのくらいの精度で対応するのかは不明である。この点を明らかにするには水槽内の速度を実測する必要がある。平成 25 年度に可視化レーザー光源および PIV ソフトを購入する予定（科研費による購入）である。今後は PIV による流速測定を実施し、流れ構造を解明する。

(2) 流れ場の相似性

将来的な実用性を考慮すると、水槽の幾何学サイズ、エアストーンのサイズ、流速変化に対する流れ場の相似性の成立の可否を明らかにする必要がある。

(3) 飼育実験

飼育実験は産卵の回数と時期を考慮すると、あまり実験回数が重ねられず、現時点では飼育実験は 1 回のみ実行しただけである。飼育実験を複数年にわたり実施することで飼育実験結果の精度が向上するものと思われる。また、飼育

実験に関して仔魚の水槽内の分布状態を定量的に研究する必要がある。このためには水産学研究者の理解との連携が必須である。

(4) 水槽の幾何学形状が流れ場に及ぼす影響

本研究では円形水槽について実施したが、種苗生産現場では円形以外に角形水槽も使用される。このため角形水槽の流れ構造を明らかにする意義がある。

(5) 適用可能魚介類の特定およびその条件

水槽内の流れ場を流体力学的に解明するとともに飼育実験結果と照合することによって、もし、各魚種に対する最適通気量、水槽形状などを特定出来れば、希少価値の魚介類（例えば、ミルクイ、あさり、はまぐり、ハタ類など）の再生の可能性がある。

(6) コーナー渦が仔魚生産率に及ぼす影響

第2章および3章でコーナー渦が存在することをあきらかにしたものの、コーナー渦が仔魚の生産率に及ぼす影響については不明のままである。この点についてはコーナー渦に主眼をおいた飼育実験および中間浮力を持つ仔魚模型の流れの観察が必要である。

5.3 本論文の使用記号

AR : アスペクト比 ($=H/r_i$)

C : クーラン数 ($=u \cdot \Delta t / \Delta z$)

C_D : 抗力係数

C_L : 揚力係数

ε : ボイド率

H : 液深(mm)

Q : 通気量(mL / min)

r : 半径方向座標(mm)

r_c : 通気孔半径(mm)

r_i : 水槽内径(mm)

t : 時間 (s)

u : 半径方向速度成分 (m / s)

v : 鉛直方向速度成分 (m / s)

v_g : 気泡速度

v_l : 液体速度

V_{max} : 中心位置における最大鉛直速度 (m / s)

z : 液深方向座標(mm)

\mathcal{G} : 気体

F_{VM} : 仮想質量力

F_L : 揚力

Re : 気泡レイノルズ数 $Re = \rho_l d v_r / \mu_l$

V_r : 気液速度差 ($v_g - v_l$)

θ : 周方向座標(mm)

ρ : 密度 (kg/m^3)

μ : 粘性係数 (Pa・s)

Ω : 渦度 (1/s)

添字 l : 液体

添字 g : 気体

5.4 本研究に関する成果

【査読付き論文】

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 Vol.48, No2 : pp99-108, 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流れの数値計算, 水産工学 Vol49, No3, pp155-165, 2013.
3. Tetsuya SUMIDA, Hideo KAWAHARA, Shigeaki SHIOTANI, Yoshitaka SAKAKURA and Atsushi HAGIWARA : Estimation of Flow Fields in a Model Fish Rearing Tank by Numerical Calculation, International Society of Offshore and Polar Engineering in arasuka, July, Conference, 2013.
4. Tetsuya SUMIDA, Hideo KAWAHARA, Shigeaki SHIOTANI, Yoshitaka SAKAKURA and Atsushi HAGIWARA : Observations of Flow Patterns in a Model of a Marine Fish Larvae Rearing Tank (Ref No: AQUE-D-12-00067). Aquacultural Engineering, 2013. (In Press)

【講演】

1. 角田哲也, 川原秀夫, 仔魚飼育水槽内の流れパターンに関する研究, 平成 22 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, pp121, 2010.
2. 角田哲也, 川原秀夫, 高松紗依加, 本庄孝光, 仔魚飼育水槽内のフローパタ

ーンの観察，平成 22 年度日本水産学会中国・四国支部大会講演要旨集，pp3, 2010.

3. 角田哲也，川原秀夫，山本健也，仔魚飼育水槽内流れの数値計算と飼育実験，平成 23 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集，pp126,2011.

4. 角田哲也，川原秀夫，流れの可視化による仔魚飼育水槽内のフローパターンの解明，平成 23 年度日本水産学会春季大会講演要旨集，pp211,2011.

5. 角田哲也，川原秀夫，塩谷茂明，数値計算による仔魚飼育水槽内の流れ，平成 25 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集，pp121,2010.

【その他】

1. 角田哲也，本庄孝光，気泡上昇を伴う円筒容器内の流れに関する研究，平成 20 年度大島商船高等専門学校研究紀要 P11-14.

2. 角田哲也，マハタ仔魚飼育水槽内の流れに関する研究，平成 21 年徳山高専産学交流会にて講演

【助成金】

1. 山口県応援ファンド「はつらつ長州」(.西京銀行)平成 24～25,代表者：角田哲也

2. 科学研究費基盤 (c)，課題番号：25450287:，流体力学的手法による仔魚の生残率を高めるための飼育水槽内流れの制御，平成 25～28 年，代表者：角田哲也

謝 辞

本論文は著者が神戸大学大学院自然科学研究科博士課程海洋ロジスティクス科学専攻在学中に、神戸大学大学院自然科学研究環 塩谷茂明 教授のご指導のもとに行った研究成果をまとめたものです。

本研究を遂行するにあたり、塩谷茂明教授から賜ったご教示、ご鞭撻ならびにご助言に対し深謝の意を表します。副査の福田勝哉 教授および笹健児 准教授には多忙のところ時間を割いていただき、なおかつ有益なコメントを頂き感謝しています。また、共同研究者で水産学上の基礎的知識および数々の助言を頂いた長崎大学大学院水産・環境化学総合研究科の萩原篤志教授に感謝の意を表します。同じく長崎大学大学院水産・環境化学総合研究科の阪倉良孝教授には論文投稿時、査読時および海外論文投稿時に適切なアドバイスを多数いただきました。ここに感謝いたします。神戸大学塩谷研究室および長崎大学大学院水産学部研究室の方には厚く御礼申し上げます。山口県外海水産研究センターの山本健也氏には多忙なところ、実験内容の重要性を理解してもらい、飼育実験に協力していただきました。また、水産学上の基礎知識および経験上のアドバイスをいただき感謝しています。

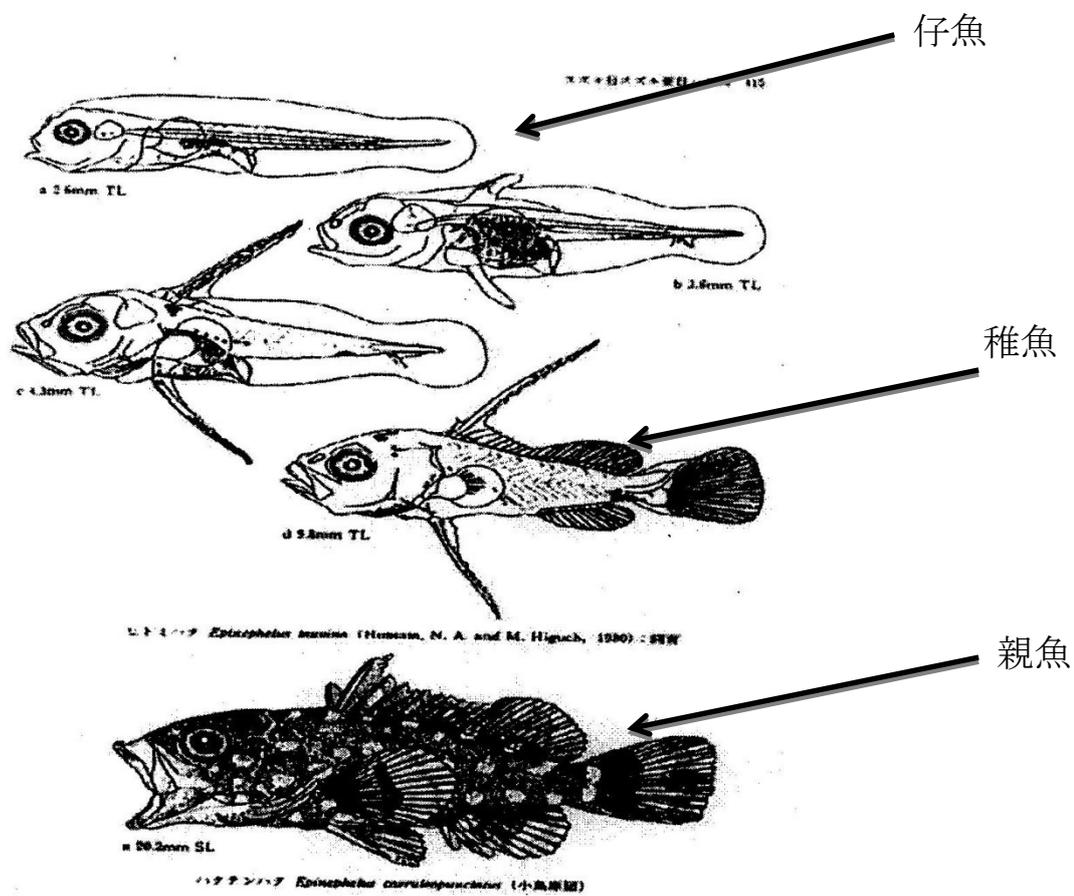
著者が 30 才代から今日まで流体力学の基礎、実験方法および研究者としてのイロハを長年ご指導承りました、元山口大学大学院工学研究科の大坂英雄教授には心より深く感謝申し上げます。先生からは研究者としての姿勢など細部に渡りご指導いただきました。同研究室所属の山口大学大学院工学研究科の望月信介教授ならびに亀田孝嗣講師（現、近畿大学工学部流体研究室、准教授）のには流体力学上のアドバイスを多数いただきました。また、山口大学工学部流体研究室の方にはお世話になりました。山口大学工学部流体研究室に関連して徳山高専機械電機工学科藤田重隆教授、張間貴史准教授、広島工業大学機械工学科の中西助次教授、福島千春教授、知識機械工学科の宇都宮浩司准教授お

よび技官の桜井元康氏には多数の助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。大島商船高等専門学校の元校長の久保雅義先生および現校長の石田廣史校長には学位取得に際して校務分担軽減など配慮していただきありがとうございました。商船学科長の岩崎寛希教授には研究遂行上，多大な理解をいただき感謝しています。また共同研究者で同僚の川原秀夫准教授には研究面および公私ともお世話になりました。最後に大島商船高等専門学校の商船学科の教員の皆様に対しては，校務分担の軽減をしていただき感謝しております。

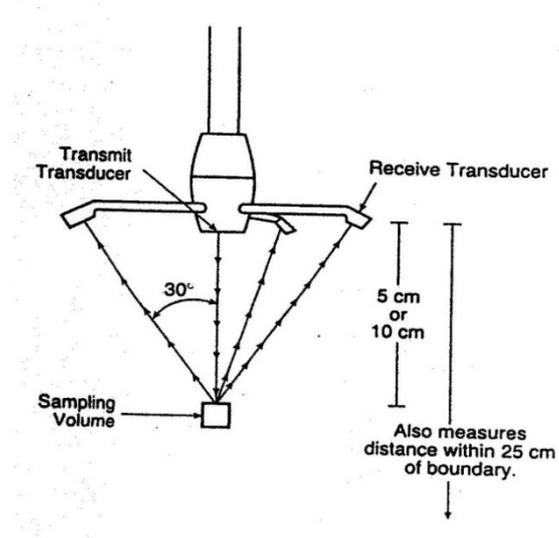
付録

付表-1 水産学および流体力学の用語説明

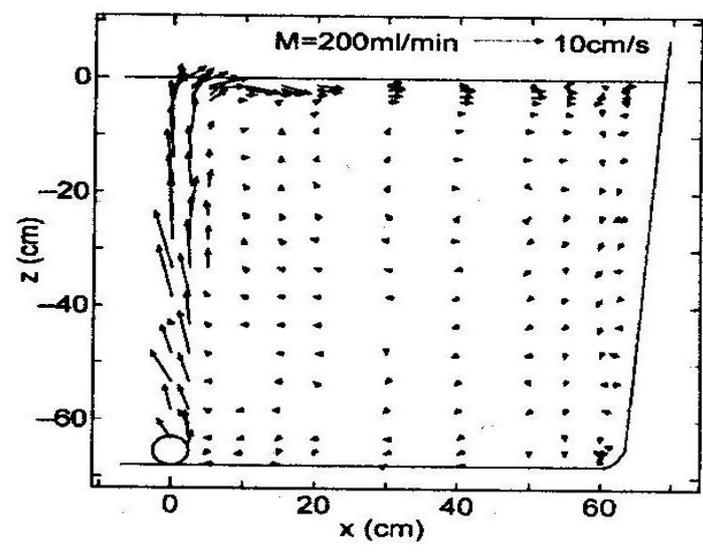
用語	説明
生残率	生残率＝生存する魚の個体数／飼育水槽に収納した魚の個体数。魚の養殖では仔魚から稚魚に成長する段階で最も生残率が低い。養殖が成功するかどうかの鍵は仔魚をいかに稚魚まで死滅させずに成長させることである。
飼育水槽	魚を養殖するための水槽のこと。魚の成長段階に応じて、水槽の大きさ、水槽への通気方法、エアストーンの大きさと数、魚の収容数を変える。
飼育実験	多様な条件（水温、光源、PH、通気量などを系統的に変化させる）の下で、養殖用の水槽で実際に卵から魚を孵化させ、どの成長段階で何割の魚が生存するかを調査する実験。
仔魚	卵からふ化してから、成魚と同じ形態になるまでをいう。アカアマダイでは、ふ化してから15mm程度に成長するまでをいう。
アカアマダイ	水深30～150mの砂泥質の海底にすむ。警戒心の強い魚で日本では高級食材として扱われ、珍重されている。
マハタ	硬骨魚綱スズキ目ハタ科に属する海水魚。店への入荷は養殖ものが多く、天然ものは少ない高級魚。天然、養殖ともに価格が高い。
懸濁法	流体中にトレーサー（アルミ粉やおがくずなど）を混入し、トレーサーの動きによって流れパターンを把握する方法。
PIV	流体中に水と同じ比重の粒子を複数個混入し、移動する複数個の粒子を統計的処理によって追跡し、各場所における速度を求める方法。



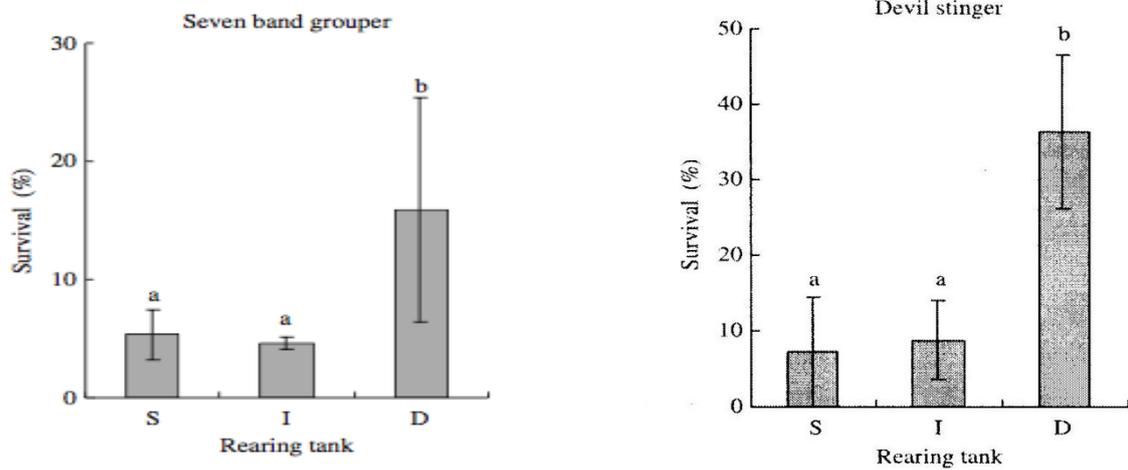
(平成 19 年度神戸商船大学卒業論文より抜粋)



付図-2 超音波流速計のプローブ部分
 (Aquacultural engineering 32(2005),465-481 より抜粋)



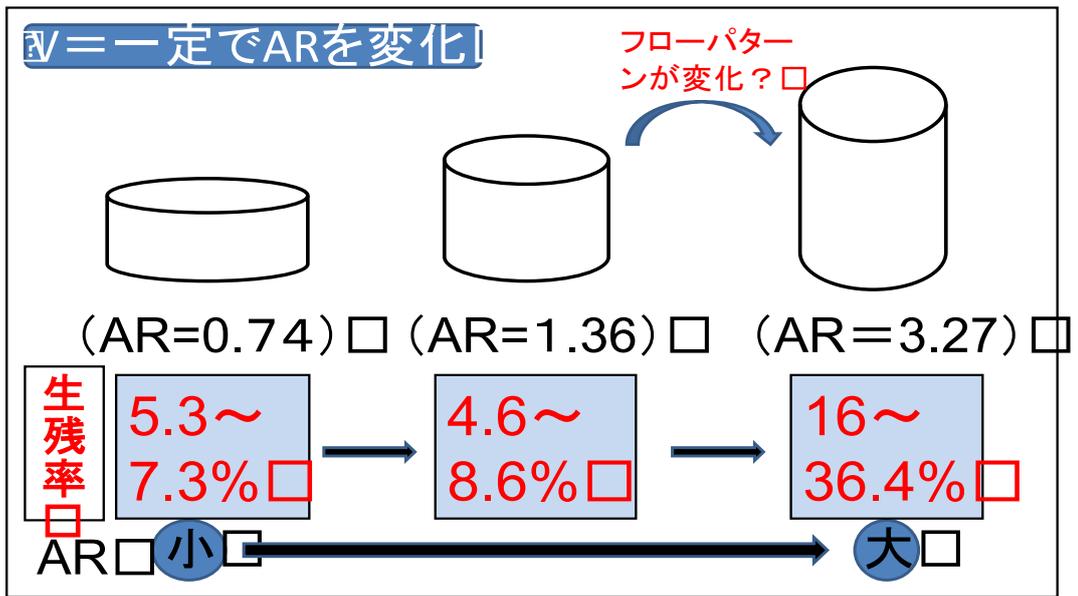
付図-3 超音波流速計による飼育水槽鉛直断面内における流速の測定例



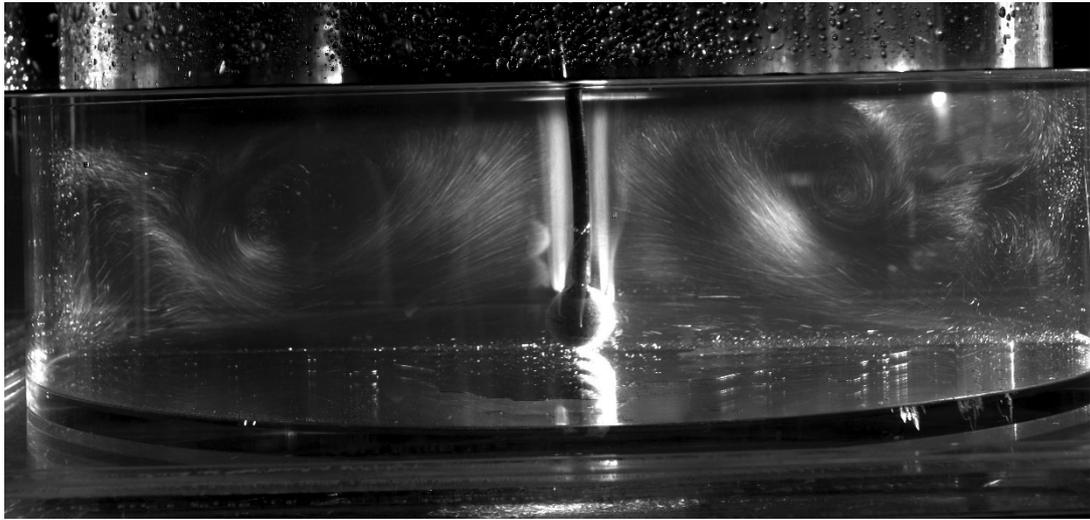
付図-4 Ruttanapornvareesakulらの飼育実験結果

Survival rate of seven band grouper and devil stinger larvae in three differently shaped rearing tanks. Column and bar indicate average and standard deviation respectively (n=3). Column with different letters above them show significant differences between the samples (Fisher's protected least significant difference test, $P < 0.05$).

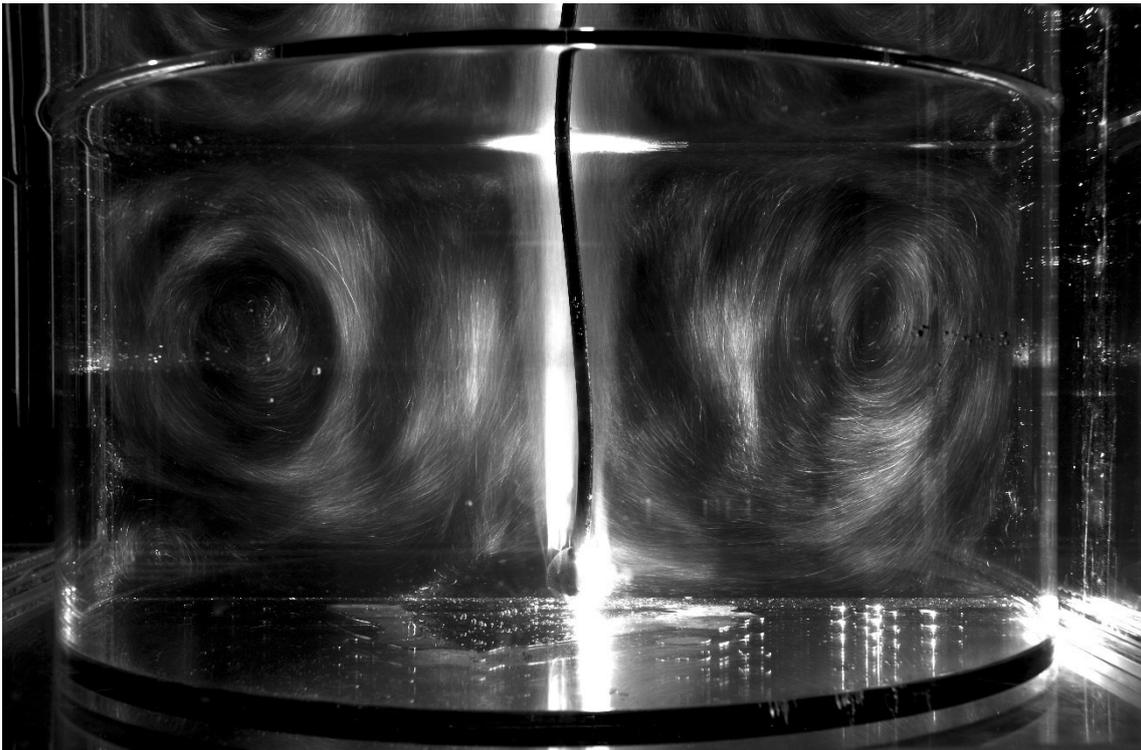
(Aquaculture Research, 2007, 38, 193,200 より抜粋)



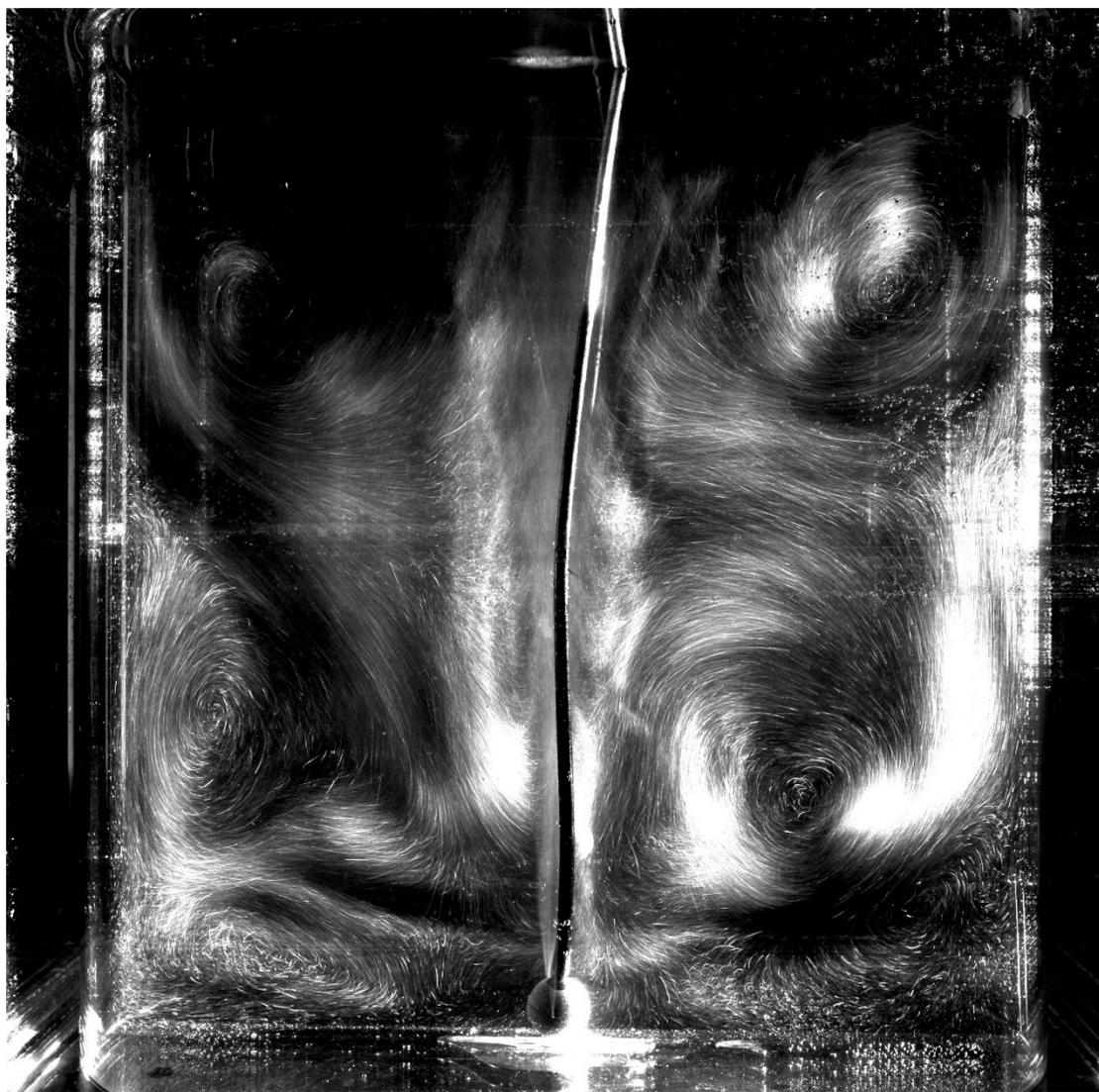
付図-5 Ruttanapornvareesakul らの実験概念図



($Q=10\text{mL}/\text{min}$, $AR=0.5$ の可視化写真)

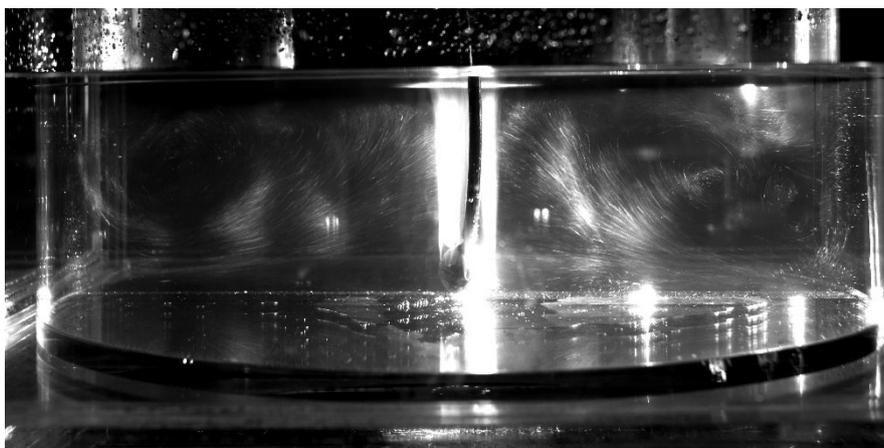


($Q=10\text{mL}/\text{min}$, $AR=1.0$ の可視化写真)

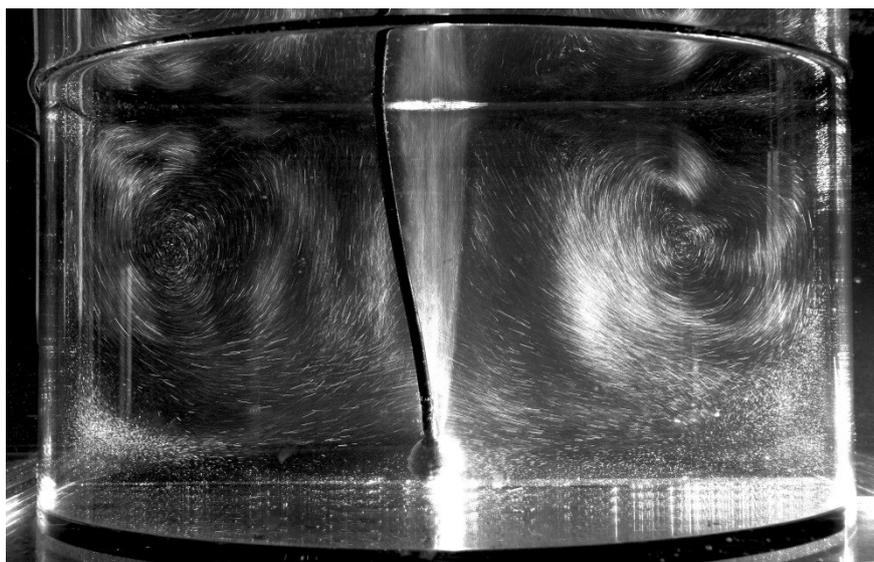


($Q=10\text{mL/min}$, $AR=2.0$ の可視化写真)

付図-6 通気量 $Q=10\text{mL/min}$ の可視化写真



($Q = 25\text{mL/min}$, $AR = 0.5$ の可視化写真)



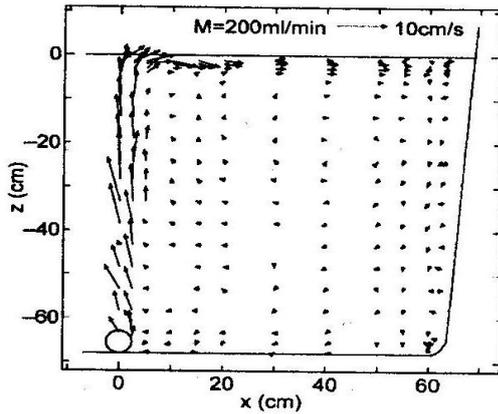
($Q = 25\text{mL/min}$, $AR = 1.0$ の可視化写真)



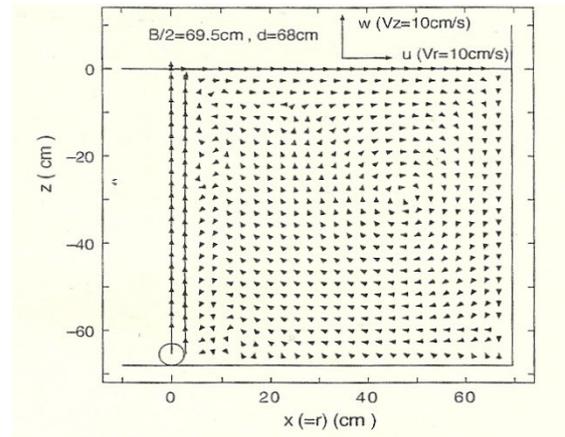
($Q = 25\text{mL/min}$, $AR = 2.0$ の可視化写真)

付図-7 通気量 $Q=25\text{mL/min}$ の可視化写真

一部, 対応していない



(a) 計測結果
(超音波流速計による)



(b) 数値計算結果
($r \times z$) = 25×25

付図-8 塩谷らの速度測定および数値計算

(Aquacultural engineering 32(2005), 465-481 より抜粋)

付録-離散化した方程式を含めた数値計算法である HS-MAC 法による計算方法の補足説明。

HS-MAC 法は連続式を満たすように速度と圧力を同時に補正し反復的に解く方法である。具体的な計算方法を以下に示す。

- Step1 : 前時刻の圧力及び速度を用いて、運動方程式より仮の速度 u^* 、 v^* を算定する。

$$u^* = u^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial x} + \Delta t \cdot F(u^n, v^n)$$

$$v^* = v^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial y} + \Delta t \cdot G(u^n, v^n)$$

ここで、 n は時間ステップ数で、対流項及び拡散項は簡略化して $F(u, v)$ 、 $G(u, v)$ として表わす。

- Step2 : 連続式が成立するように、速度及び圧力を補正し反復計算をする。
先ず、速度 u^* 、 v^* から現時刻の圧力 P^{n+1} 、速度 u^{n+1} 、 v^{n+1} を算定する。

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n - \frac{\rho}{2\Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} \left(\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} \right)$$

$$u^{n+1} = u^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial x} + \Delta t \cdot F(u^n, v^n)$$

$$v^{n+1} = v^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial y} + \Delta t \cdot G(u^n, v^n)$$

次に全格子において連続条件を満たすように、収束条件値 ε を下回っているかどうかを判断する。それを満足していなければ反復計算を行い、満足していればその時間ステップの解が得られたと判断し、次の時間ステップに進みます。

$$\Delta P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n+1} \Big|_{k+1} - P_{i,j}^{n+1} \Big|_k \leq \varepsilon$$

ここで、 k は反復ループ数、 ε は一定値（速度や計算格子長によって適宜設定す

る) である。

本数値計算には差分法を適用し，時間差分には陽解法を，圧力場の解法には HS-MAC 法を，対流項の解析には QUICK 法を用いた。なお、支配方程式の離散化及び計算方法については下記の論文を参考にした。

付表-2 飼育実験時の水温データ

朝7~9時に測定																	
	0日齢	1日齢	2日齢	3日齢	4日齢	5日齢	6日齢	7日齢	8日齢	9日齢	10日齢	11日齢	12日齢	13日齢	14日齢	15日齢	平均
AR=2	19.5	18.1	18.0	17.7	19.1	20.0	20.4	20.8	17.6	18.8	18.4	17.2	17.5	17.9	20.1	19.9	18.8
AR=1	19.6	18.1	17.9	17.5	19.2	20.1	20.4	20.7	17.6	18.7	18.3	17.1	17.6	17.9	20.1	19.9	18.8
AR=0.5	19.3	18.0	18.0	17.7	19.2	20.1	20.5	20.5	17.4	18.7	18.2	16.8	17.7	17.9	20.1	19.7	18.7
AR=1①	19.2	17.8	17.7	17.7	19.2	20.0	20.6	20.6	17.5	18.7	18.3	16.9	17.7	17.9	20.1	19.5	18.7
AR=1②	19.2	17.9	17.7	18.0	18.9	19.9	20.3	20.4	17.5	18.5	18.2	16.9	17.6	17.8	20.1	19.6	18.7
AR=0.5①	19.5	18.2	18.1	18.1	19.3	20.1	20.5	20.6	17.2	18.8							19.0
AR=0.5②	19.3	18.30	18.10	18.20	19.30	20.10	20.50	20.30	17.20	18.70							19.0