

# 海水魚の閉鎖循環型大規模陸上飼育システムの構築

食品・環境科 専門研究員 大 脇 博 樹  
総合水産試験場 環境養殖技術開発センター 養殖技術科 科 長 山 本 純 弘  
水産加工開発指導センター 加工科 科 長 岡 本 昭  
株式会社 西日本流体技研 研究開発部 黒 川 由 美

養殖漁業の需要が年々増えていること、より高付加価値な魚種の生産が必要となっていること等から、陸上養殖の必要性は高くなっているが、生物濾過に依存した従来の閉鎖循環式陸上養殖システムには問題点も多く、海面養殖に対してコスト的にも不利なことから、閉鎖循環式陸上養殖はそれほど普及していないのが現状である。そこで本研究者は、海水を電解することによって生成する次亜塩素酸を利用した新規海水浄化装置の開発と、その新規浄化装置を利用した新規閉鎖循環式陸上養殖システムの構築を目指してきた。海水魚の長期間の陸上飼育を実現する上で重要な課題になるとと思われる二酸化炭素の蓄積を防止するために、新たな電解槽の試作と脱二酸化炭素の可能性について検討した。その結果、試作した電解槽を用いた処理により、飼育海水中の二酸化炭素を除去できる可能性が示唆された。

## 1. 緒 言

沿岸漁業による水揚げ量は年々減少しており、養殖による魚類生産が年々増えてきている。魚類養殖には、海面を利用する海面養殖と陸上で実施する陸上養殖があり、それぞれに長所と短所がある。

海面養殖は、自然に近い環境の下で育成でき、初期投資が陸上養殖に比べて安価であるという利点がある一方、台風や赤潮、気候等の自然による影響を受けること、作業が重労働であるという欠点があった。

陸上養殖は、飼育するための大規模な水槽や濾過システムの設置が必要であることから、大きな初期投資が必要となること、生物濾過を行うための大量の濾材の洗浄が非常に大変なこと、魚病に対する対策が大変なこと等の欠点はあるが、陸上で作業ができるため作業が楽であること、天候や赤潮等の外的要因を排除できること、といった海面養殖の問題点を解決できるほか、温度調節ができるため短期間で飼育魚を大きくできること（生産性の向上）、全ての飼育条件を管理できること、といった大きな長所がある。また、水産養殖業においては、出荷量の増大に伴って単価の下落が起こるため、より付加価値の高い魚種へと移行していく必要に迫られており、新しい魚種の種苗生産の要望が高いが、陸上でなければ種苗生産が困難な魚種もあり、陸上で海水魚を飼育できる技術が必要となっていた。

従来の閉鎖循環式陸上養殖システムは、魚から排出される糞や鱗等を飼育水から取り出すための物理濾過槽、魚にとって有害なアンモニアを、微生物を利用し

て害の少ない硝酸に変換するための生物濾過槽、蓄積する窒素成分を除去するための脱窒槽、脱色や殺菌を目的としたオゾン処理装置もしくは紫外線処理装置、過剰なオキシダントを除去するための活性炭槽、温度を調整するための熱交換器、飼育水槽中のタンパク質等を除去するための泡沫処理装置等、多くの装置を適直接続することで、陸上での海水魚の飼育を可能としてきた<sup>[1]</sup>。

本研究担当者は、平成18～20年度の3ヵ年、海水電解により生成する次亜塩素酸とアンモニアの反応により、アンモニアを直接窒素に変換させることで飼育水槽中に窒素成分を蓄積させない海水浄化システムを開発してきた<sup>[2] - [4]</sup>。このシステムは、微生物を利用する従来の濾過システムとは本質的に異なり、省スペースで低コスト、濾材の交換等の重労働が無い等、陸上養殖のための海水浄化技術を革新できるシステムとなりうる可能性を秘めている。

本研究開発では、この新規海水浄化システムを用いた大規模陸上養殖を実現することを目指し、実際の完全閉鎖循環式陸上養殖において問題になるとと思われる海水中への二酸化炭素の蓄積に対する対策について検討した。

海水に溶解した二酸化炭素は、海水のpHによって、炭酸 ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ )、重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ )、炭酸イオン ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) とその形態が変化し、一般的な海水pHである8付近では約90%が重炭酸イオン、約10%が炭酸イオン、炭酸は1%未満となっている。海水魚の陸上飼育において、飼育海水に溶存する二酸化炭素濃

度の上昇は、pHの低下、浮き袋の膨満<sup>[5]</sup>に伴う奇形の発生率上昇、飼育魚の呼吸阻害<sup>[6]</sup>等の問題に直結するため、所定の濃度以下にしておく必要がある。曝気による二酸化炭素の除去が試みられることが多いが、pH 8付近の炭酸の存在比は非常に小さく、曝気による除去効率は低いのが現状である。

本研究開発では、海水電解により酸性水を単離して、その酸性水に曝気することで効率よく飼育水に溶存する二酸化炭素を除去するシステムを開発することを目的とした。なお、このシステムでは、二酸化炭素と同時にアンモニアも除去できるシステムとなる予定である。

## 2. 実験材料及び実験方法

### 1) 実験材料および使用機器

実験には、長崎県総合水産試験場の砂ろ過海水を使用した。電解槽は独自に設計・製作したものを使用し、電極として白金修飾チタン（田中貴金属(株)製）を使用した。

海水の電解実験の際の電源には、直流安定化電源（菊水電子工業(株)製 PMC-18-5A）を用いた。

pHの測定には、東亜ディーケーケー(株)製 HM-26Sを使用し、次亜塩素酸の濃度は SBT 法<sup>[7]</sup>を用いた簡易測定キットを用いて測定した。

### 2) 実験方法

図1に示した循環水槽に砂ろ過海水をかけ流し状態にし、その海水を循環ポンプを用いて所定の流速で流した。電解槽内で分離した海水は、陽極側と陰極側から所定の流量で流れ出るようにバルブを調整し、1～3Aの電流を通電した。電解後の海水を所定時間毎にサンプリングし、pH、次亜塩素酸濃度、水温を計測した。

実験に使用したろ過海水の滴定曲線は、50mlのろ過海水に0.1N-HCl溶液を滴下し、その際のpHの変化を計測して作成した。

計算機による電解槽内の流れの三次元シミュレーションは、FLUENT6.3 (ANSYS, Inc.) を利用し、入口および出口境界条件は速度一定、壁境界条件は非すべり壁、乱流モデルは無し（層流と考える）、流体の物性値は25℃の海水の密度および粘性係数を使用、という条件で計算を実施した。また、圧力場の計算にはSIMPLE法を用い、圧力の補間には線形スキームを、その他の変数は一次精度の風上差分法を使用した。

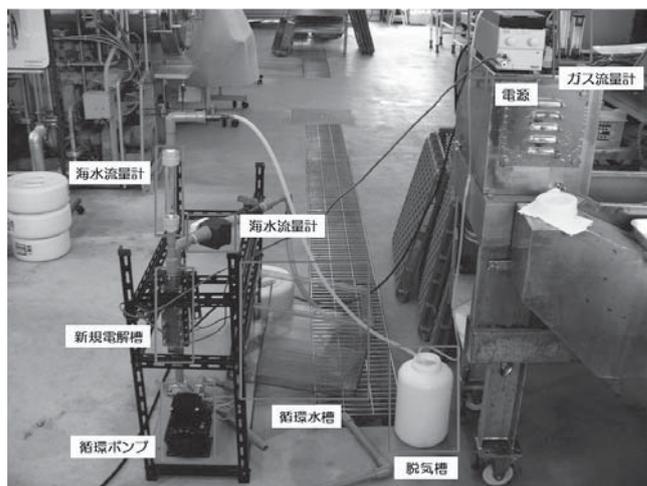


図1 新規電解槽の評価システム

## 3. 結果と考察

### 1) 電解槽の試作

図2に試作した電解槽を示した。電解槽には隔膜を設置していないが、流れのコントロールにより陽極水と陰極水を分離できるように工夫した。この電解槽を使用して、以下の実験を行った。

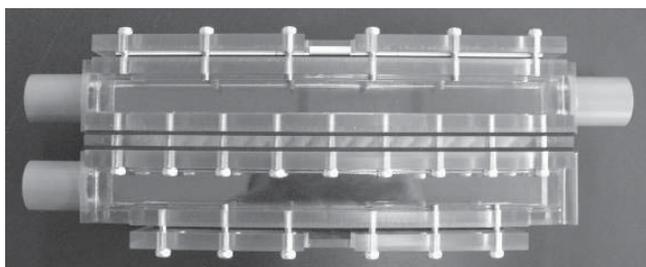


図2 試作した電解槽

### 2) 電解後の海水 pH の評価

図3に、試作した電解槽（図2）を使って電解した陰極側海水と陽極側海水のpHを示した。電解電流値が高くなるに従って、陽極側海水のpHが低下し、陰極側海水のpHが若干高くなった。海水の電解により、陽極側では次亜塩素酸と塩酸が生成することでpHが低下し、陰極側では水素が発生することでpHが高くなる。隔膜を使用していないこの電解槽で、陰極側と陽極側で海水を分離できていることが確認された。陰極側海水のpH上昇が、陽極側海水のpH低下に対して小さい原因は、本報では詳細な条件は示さないが、陰極側海水の流量が陽極側海水の流量よりも大きいためであると思われる。

この時の陰極側海水の次亜塩素酸濃度は、0.04～0.11ppmであった。海水の電解により生成した次亜塩

素酸量（陽極側海水の次亜鉛酸濃度×陽極側流量+陰極側海水の次亜塩素酸濃度×陰極側流量）に対する陰極側海水の次亜塩素酸量は、0.1%未満であり（データの詳細は示していない）、この電解槽による海水の分離の効率が高いことが確認された。

海水の電解によって生成する次亜塩素酸と塩酸の量は、計算によって導くことができる。その計算結果と実験に使用した海水に塩酸を滴下した際のpH変化(図4)から、電解によって誘起される海水のpH変化予測と、実際の実験結果との比較を行った。

比較結果を表1に示した。実験結果は計算結果とよく一致していることが確認された。

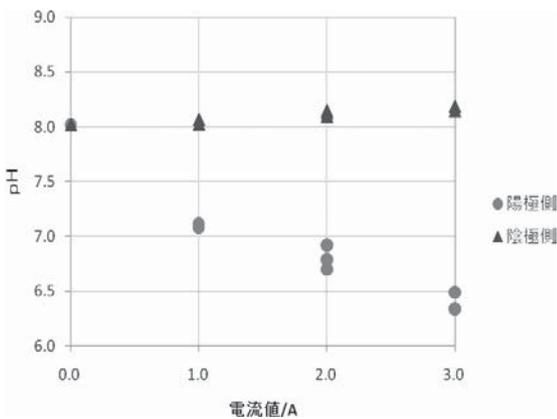


図3 電解後の電解槽出口の海水pH

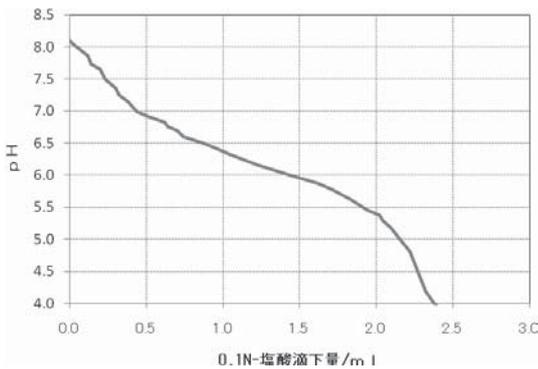


図4 実験に使用した海水の滴定曲線

表1 海水電解におけるpH変化の実験結果と計算結果の比較

電流値 (A)	実験結果	計算結果
1.0	7.1	7.2
2.0	6.8	6.8
3.0	6.4	6.4

### 3) 試作した電解槽内の流れのシミュレーション

図4に試作した電解槽内の流れの流速ベクトル図を、図5に試作した電解槽内の静圧分布図を示した。

図4では、電解槽内に流入した海水は、その大部分が陰極側の電解槽出口から流出していたが、一部の海水は陰極側の流出口付近で陽極側へ移動し、陽極側流出口から流出していることが確認された。陽極側流出口付近では、再度陰極側の流れと合流する様子も一部に見られた。

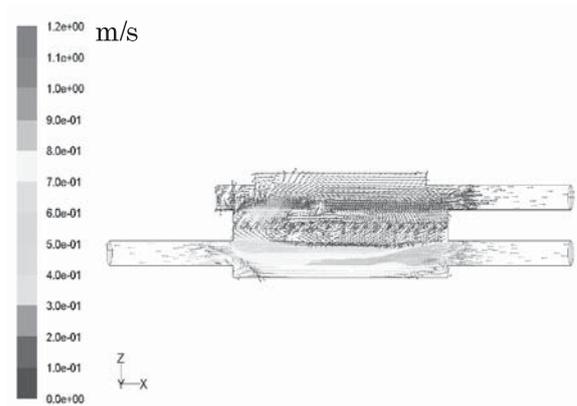


図4 試作した電解槽内の流れの流速ベクトル図

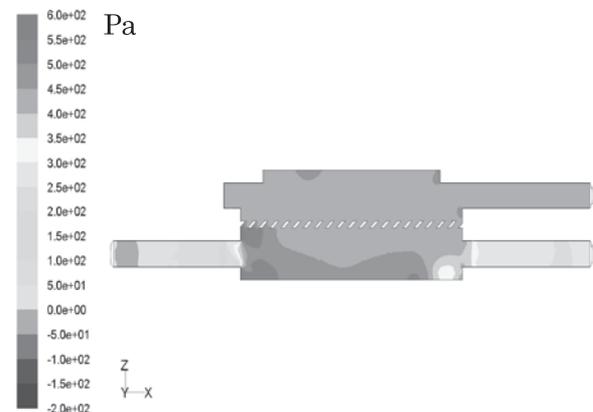


図5 試作した電解槽内の静圧分布図

図5では、電解槽に流入した直後の電解槽の角に圧力が低くなる箇所が見られた。この部分では流れが剥離していると考えられた。流れの剥離は、内部流れにおける圧力損失の増加や、振動現象といった悪影響を及ぼす可能性があり、これらの影響が無視できない場合には、流入部の位置を変更するか、角の無い形状にする必要がある。一方、陰極側から陽極側に多くの海水が流入している部分（図5電解槽の左部分）に、圧力が高くなる箇所が見られた。この高圧力の影響により、陽極部への流入量が多くなったものと思われた。

実際の電解実験では、陰極表面で水素が生成するが、電解電流値が高くなるに従って発生する水素量が多くなり気泡を目視で確認することができる。その気泡の動きが今回のシミュレーション結果と定性的に一致していたことから、今回のシミュレーションが実際の流れをほぼ再現できていたことが確認された。

#### 4. 結 言

海水魚の閉鎖循環式陸上養殖のための脱二酸化炭素を行うために、本研究開発では海水電解による低pH海水の分離と、分離した低pH海水の曝気による方法を検討した。

昨年度製作した電解槽ではpHの低下は1程度であったが、今年度試作した電解槽は陽極側と陰極側の海水の分離度が高く、陽極側海水ではほぼ理論値通りのpHの海水を分離することができた。しかしながら、電解電流値3Aの電解であっても、陽極水のpH6以下にはならなかった。電解電流値を上げることで陽極側海水のpHを下げることは可能であると思われるが、これに伴って次亜塩素酸の生成量は多くなる。飼育海水を電解する目的は、生成した次亜塩素酸とアンモニアの反応による脱アンモニアを行うことも含まれており、飼育水に含まれるアンモニアとの反応に使用された次亜塩素酸は分解されることになるが、過剰の次亜塩素酸が残ることはその後に通過する活性炭に負担をかけることになるため好ましくない。昨年度の報告<sup>[8]</sup>では、海水中に溶存している二酸化炭素の濃度を効率良く減少させるためには、海水のpHを5以下まで下げる必要がある、としたが、pH6であっても効率は若干悪いものの二酸化炭素の除去は可能であったことから、電解電流値を無理に上げてpHを下げるよりも、除去効率は低くとも安全なレベルでの電解を選択したほうが、実用化を想定した場合は好ましい。

前述したが、陽極側海水に含まれる高濃度の次亜塩素酸は、実際の飼育海水に含まれるアンモニアとの脱

アンモニア反応で消費されて低減されるが、飼育魚にとって影響のない濃度まで下げるために活性炭槽を通し、更に分離前（電解前）のpHに戻すために陰極水と混合されてから飼育水槽に戻されることになる。

本年度の研究では、コンピュータシミュレーションによる電解槽内の流れの解析を実施した。このシミュレーションによる電解槽内の流れの解析では、ほぼ実験結果を再現できており、今後の電解槽開発に際して有力なツールとして利用出来ることを確認した。

今回の評価で、構造を工夫した電解槽による海水電解によって、養殖海水中に蓄積する二酸化炭素を除去できる可能性が高いことがわかった。今後、装置化に向けた検討を継続する予定である。

#### 参考文献

- [1] 山本光章：養殖、35（6）、50-54（1998）。
- [2] 大脇博樹、山口正美、山本貴弘：長崎県工業技術センター研究報告36、65-66（2007）。
- [3] 大脇博樹、山口正美、山本貴弘：長崎県工業技術センター研究報告37、58-59（2008）。
- [4] 大脇博樹、安元進、岡本昭、山本純弘、山口正美、山本貴弘：長崎県工業技術センター研究報告38、38-42（2009）。
- [5] 閉鎖循環式陸上養殖システムの開発（環境創出型養殖技術）技術資料、マリノフォーラム21、23（2003）。
- [6] 岡本昭、後藤孝二、谷山茂人、橘勝康：長崎県総合水産試験場研究報告36、25-30（2011）。
- [7] R. Sakamoto, D. Horiguchi, T. Ikegami, M. Ishiyama, M. Shiga, K. Sasamoto and Y. Katayama, *Analytical Sciences*, 19, 1445-1447（2003）。
- [8] 大脇博樹、山本純弘：長崎県工業技術センター研究報告39、50-51（2011）。