



図 27 斃死した供試魚の様子

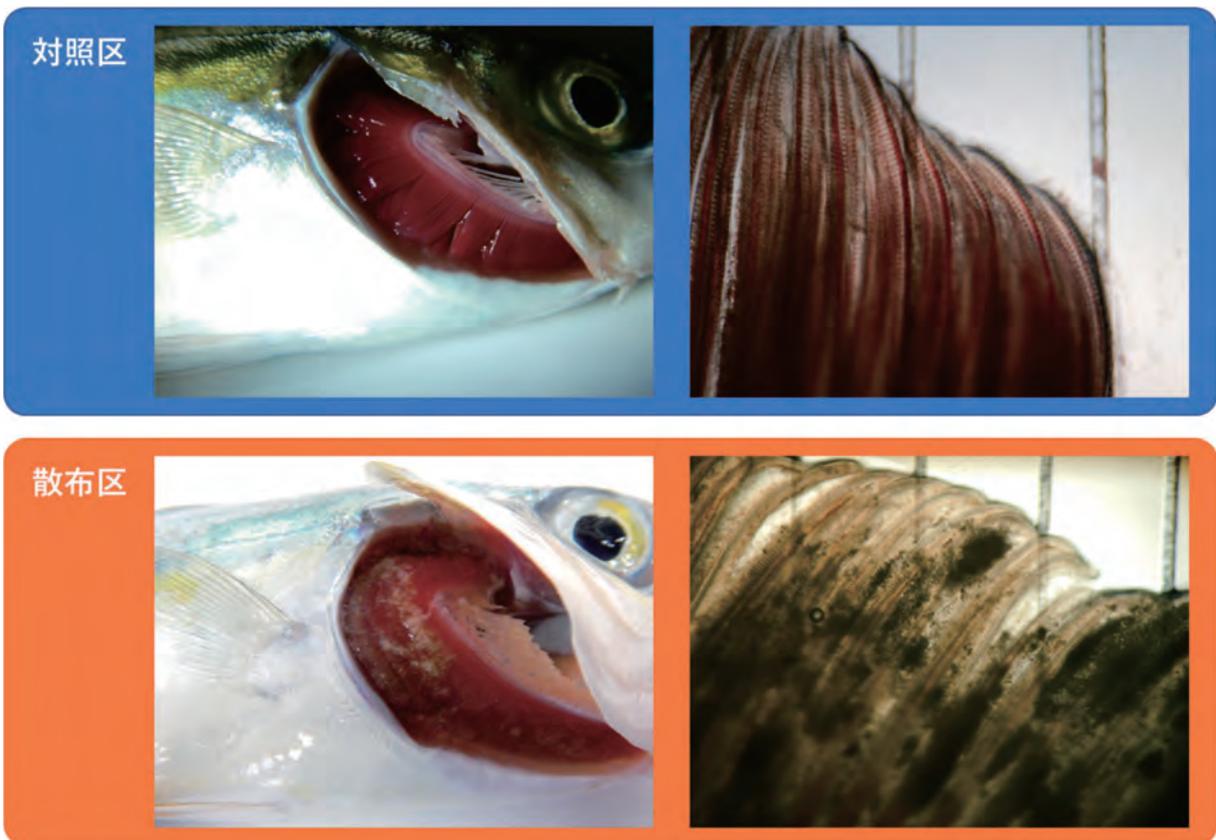


図 28 試験終了時（散布 3 時間後）における供試魚の鰓の観察結果

2) 有害赤潮の防除および漁業被害軽減のための技術開発

イ. 生簀等の魚介類を守る技術の開発・実証

④ 物理化学的防除策および過飽和救命策併用によるブリ類の救命

水産研究・教育機構 水産技術研究所

松山幸彦, 長副 聡

海洋エンジニアリング株式会社

伊藤信夫, 高木 洋

1 全体計画

(1) 目的

瀬戸内海, 土佐湾, 八代海海域, 鹿児島湾など西日本沿岸では, 近年, シャットネラ属, カレニア属, 及びコクロディニウム属による赤潮の発生規模が拡大していること, 赤潮の初期発生海域や時期, 発生環境に周期性が少なく, かつ赤潮発生規模が全海域に及ぶことから, これら予察技術の確立や餌止め, 避難の実施による赤潮駆除技術対策は手詰まりとなっているのが実情である。従来型の対策(生簀沈下, 避難, 餌止め)では, 赤潮による漁業被害を必ずしも抑制できていないことから, 何らかのブレイクスルーが必要である。有明海や八代海海域を中心に赤潮による漁業被害は未だに増え続けており, 魚病とともに魚類・貝類養殖業の主要な阻害要因となっている。

本課題では, 西日本海域において頻発するシャットネラ属, カレニア属, 及びコクロディニウム属による赤潮に伴う漁業被害を必要最小限の費用で軽減し, 赤潮の防除, 漁場環境の保全に資することを目的とする。特に, シャットネラ属とコクロディニウム属は物理的防除で細胞の殺滅と魚毒性を軽減させることが容易であること, 物理的防除が困難なカレニア属であっても, 魚類の死亡が鰓の呼吸機能障害に起因すること, この影響緩和のために, 酸素の過飽和が有効であるとの既存試験結果が示されている。そこで, 赤潮プランクトンが魚介類の呼吸障害を引き起こす現象を軽減するため, 溶存酸素を高める手法を適用して, 赤潮が発生しても養殖魚を出荷して被害を軽減する等の実用策の可能性を模索することで, 漁業被害防止策の基礎を確立する。

2 令和2年度計画及び結果

(1) 目的

全体計画と同じ

(2) 方法

1) 高濃度酸素発生装置の改良

過年度までに効果が検証された試作品について、処理能力を高めるための改良を施した。さらに高濃度酸素供給装置を改良し、その溶存酸素濃度向上性能について評価した。

2) 赤潮海水を用いた救命試験の実施

赤潮分布情報システム等による赤潮モニタリング結果に基づき、試験に好適な時期と海域を事前に特定し、発生した赤潮海水を採取してすみやかに室内へ持ち込む、あるいは現地に簡易な試験生け簀等を敷設し、高濃度酸素水供給装置を用いた救命試験を実施した。試験中の魚毒性への影響等について、養殖対象種となる試験魚を買い上げて投入し、生残時間を指標として定量化することで判定した。

今年度は九州沿岸を含む西日本海域で魚類をへい死させるような有害赤潮による赤潮発生がみられなかったため、赤潮海中での救命試験は実施せず、魚類を投入して安全性を確認する試験を実施した。

3) 酸素供給装置の効果検証

赤潮防除試験と同時に、酸素供給装置の有無が致死赤潮存在下における魚類の延命にどの程度効果があるのか、天然赤潮海水を用いた室内試験で検討する予定であった。しかしながら本年は九州地方を中心に豪雨年（梅雨期は平年の2倍の降水量）となったため、有害赤潮プランクトンによる赤潮が発生しなかった。このため、溶存酸素上昇効果を確認するための稼働試験を数度実施した。また海域における試験毎に、到達する酸素濃度あるいは稼働停止後の減衰速度に差異が見られたことから、室内試験において各種条件下でナノバブル発生装置を可動させ、原因と要因について検討を行った。

(3) 結果及び考察

1) 高濃度酸素発生装置の改良

本課題では、採用する機器の選定、実海域における酸素濃度上昇速度の確認および高濃度酸素が養殖魚類に及ぼす毒性等についての検討を中心に行った。

採用する機器の選定については、魚類養殖の生け簀への適用性、作業性（軽量、コンパクト）、経済性（価格、レンタルサービス）を考慮し、株式会社ワイビーエムサービス社製のファビー（酸素ガス濃縮装置、オージネーター601）とフォームジェット（ナノバブル発生装置、Fjp-6-SP-02、ワイビーエム株式会社社製）を採用した。本装置による高濃度酸素生産手法の概念図は松山ら（2019）の図1に示した。

本装置は大きく水中ポンプ、酸素濃縮装置およびキャビテーションとコアンダ効果によるフォームジェット産生部からなり、すべて100Vの通常電源で稼働させることができる。酸素濃縮装置では、現地大気を吸引し、窒素ガス吸着タイプの特種な樹脂を通過させて酸素濃

度のみを上昇させ（およそ 94%まで上昇）、この高濃度酸素をフォームジェット内部で海水と気液混合して 100 nm 程度まで微細化することで、高濃度酸素海水を生成する。高濃度酸素の給気速度は処理量を最大限化するために、100 L の通水量に対して 6 L (6%(v/v)) に設定した。水中ポンプとフォームジェット発生部分はインシュロックで固定して一体化させてあり、ロープで水中を上下できるようにしてある。酸素濃縮装置は船上に固定し、チューブを經由してフォームジェットへ濃縮酸素を供給するシステムである。コンパクトな装置であるため、セッティングに関してウインチなどの重機は不要である。発電機の音以外は非常に静穏で、試験中に魚が音や微細気泡に反応して暴れることはない。

図 1 に令和 2 年度新長崎漁港において現地稼働試験を実施した時の様子を示す。今年度作製した生け簀の大きさは 2 m×2 m×2 m（生簀仕切りシートは長さ 2 m）であり、側面はブルーシートで覆われている。底部は網のみで解放されている。現地にて高濃度酸素装置を可動させた試験結果を図 2 に示した。試験開始直後から生簀内部の酸素濃度は徐々に上昇し、開始後 27 分で 14.6 mg/L 前後に到達した。過年度までの結果で、赤潮海中での魚類の救命のためには最低 14 mg/L 以上の溶存酸素が必要であるが、この値に到達するにはおおよそ 30 分間の稼働が必要であった。運転停止後溶存酸素は徐々に低下し、運転停止 1 時間後で値が約 23%低下した。過年度は生簀を覆うシートの隙間から未処理の海水が浸入し、運転停止後の溶存酸素の急低下が観察されていたが、今年度の生簀ではこうした現象は確認されなかった。生簀の底部が解放状態であっても、溶存酸素はかなり維持されることが分かった。

なお、AAQ と RINKO 式の卓上型溶存酸素濃度計の計測値を比較すると、両者の計測値に 5 mg/L 程度の差違が認められたが、これは AAQ の計測限界を超えているためと判断されたので、以後は RINKO の数字を中心に考察する。また、RINKO 式の卓上型溶存酸素濃度計とウインクラ式の酸素濃度測定結果を比較すると、直線性は認められるが、傾きが異なるので、以後の計測値は補正した数字を採用している。

2) 赤潮海水を用いた救命試験の実施

本年度の有明海から八代海における有害赤潮は、沿岸海域有害赤潮広域分布情報および現地漁業協同組合を通じ情報を確認したものの、魚類が致死するような赤潮の発生は 9 月上旬までみられなかった。また伊万里湾あるいは九州西岸の内湾についても発生状況について監視したものの、有害プランクトンによる赤潮の発生はみられなかった。従って、魚類を用いた有害赤潮発生時の救命試験を実施することができなかった。代わりに現地での救命試験を新長崎漁港で行った予備試験と同じ条件で行った。この際、購入したブリも投入して試験を実施し、安全性の確認を行った。

試験は八代海の枝湾で、同海域で赤潮発生が頻発する楠浦湾の 1 漁場で実施した。試験には現地養殖業者の全面協力を得て実施した。2 m 規模の試験生簀を現地で組み立て、畜養用の試験筏に浮かべて試験を実施した（図 3）。電源は陸から配線して稼働させた。養殖現場に

近い条件で試験を行うため、試験魚として3 kgのブリを生簀に10尾投入した状況で酸素の濃度確認の試験を行った。高濃度酸素の稼働結果について図4に示した。

試験海域での溶存酸素濃度は徐々に増加し、稼働開始30分後に15 mg/L程度まで上昇して平衡状態となった。試験中ブリの異常行動は認められず、ガス症の発症も認められなかったことから、高濃度酸素が養殖魚類（ブリ類）に及ぼす毒性等はないと考えられた。一方で、試験中波浪はほとんど無かったにも拘わらず、運転停止後に溶存酸素濃度が急激に低下し、23分後には10 mg/Lも低下して稼働前の溶存酸素濃度に戻る現象が見られた。この現象はブリを投入する前の稼働試験でも同様であり、新長崎漁港における稼働試験時とは異なる結果であった。試験当時の楠浦湾はキートセロス属を中心とした軽い珪藻赤潮状態で、試験生簀内のクロロフィル濃度が4.3~7.6 μ g/L前後であった。稼働中生簀表面に珪藻由来と思われるフロックの形成が見られたことから、これらがナノバブルの発生を抑制させた可能性も想定されたことから、室内で予備試験を実施することとした。

3) 酸素供給装置の効果検証

フォームジェットによるナノバブル発生に関する室内試験について、ワイビーエム株式会社（佐賀県唐津市）の全面協力を得て、1月19~20日にかけて実施した（図5）。まず気液混合比を確認するために、水道水を試験液とし、2L-O₂/100L 試水、4L-O₂/100L 試水および6L-O₂/100L 試水の条件で試験を実施した。装置は最初の2分間稼働させ、その後装置を停止させて1時間ほど溶存酸素濃度の低下速度を調べる方法で実施した。試験用の試水は角形水槽に30L収容し、これを装置で循環させることでナノバブルを発生させた。試験中、水槽内部の溶存酸素濃度をRINKO式の卓上型溶存酸素濃度計で計測した。また、装置稼働停止後、試水を300 mL分取してプラスチック容器に収容し、密封せずに静置してさらに1時間溶存酸素濃度の変化を調べた。

試験結果を図6に示した。水道水での試験では、2L-O₂/100L 試水では上昇速度と到達溶存酸素濃度が低く推移したものの、4L-O₂/100L と6L-O₂/100L 試水の条件ではほとんど差が見られなかった。新長崎漁港と八代海楠浦湾での試験は6L-O₂/100L 試水の条件で実施しているため、酸素の供給速度が低かった可能性は排除された。次に淡水と海水の差異を比較した。海水は水産技術研究所長崎庁舎内で使用されている、砂ろ過海水（塩分34前後）をさらにGF/Cで精密ろ過したものを持ち込んで実施した。稼働条件は4L-O₂/100Lとした。その結果、淡水中での溶存酸素濃度が22 mg/L前後まで上昇するのに対して、海水中では30 mg/L前後まで上昇した。淡水での稼働とは異なり、海水での稼働は装置の出口から微細な気泡が発生して水槽全体が白濁することから、より多くのナノバブルが発生していることが推定された。従って、海水中に大量に含まれる塩類がナノバブル発生を抑制することはない、むしろ高めることが分かった。最後に天然海水とろ過海水の比較を行った。天然海水は1月19日に伊万里湾に面した大浦漁港奥で採水された表層海水を使用した。本海水に含まれていた植物プラン

クトンの細胞密度を表1に示した。採水された海水を未処理で試験したところ、溶存酸素濃度が20 mg/Lまでしか上昇しなかった。これは淡水での試験結果に近い上昇幅であり、ろ過海水と比較すると8 mg/Lも低い値であった。天然海水での稼働では水槽の表面が泡立ち、植物プランクトン由来の粘液と気泡が複合体を形成していることが推定された。

ナノバブルは海水中にとどまって、容易に上昇して空気中に逸散しないが、粒径の大きなバブルはすぐに空気中に逸散して溶存酸素濃度を下げてしまう。従って、楠浦湾の珪藻赤潮中で観察された稼働停止後の急激な酸素濃度の低下要因については、珪藻類の存在によって粒径の大きな気泡がほとんどとなり、これらがすぐに空気中へと逸散してしまった可能性が推定された。2019年に伊万里湾で発生した *Karenia mikimotoi* 赤潮海水での稼働試験でも、溶存酸素濃度が15 mg/Lまでしか上昇しない現象を認めている。ただ2019年の試験時は用いた生簀や高濃度酸素発生装置のスペックが異なるため厳密な比較は難しいものの、高密度の *K. mikimotoi* の存在が酸素濃度を抑制した可能性もあり、今後の検討が必要である。

高濃度酸素発生装置を筏の上で稼働させる場合、運用コストとして電源供給が課題となる。赤潮の発生期間中24時間稼働させることはコストやメンテナンスの関係上現実的ではないので、クロロフィル濃度を監視して、魚類の致死濃度になったら稼働させ、救命に必要な15 mg/Lの酸素濃度に達したら運転を停止するなどの間欠運転により、電源装置のガソリン消費量を抑制することが望ましい。今年度の結果として、植物プランクトンの存在によってナノバブルの発生量が左右され、結果的に高濃度酸素濃度の維持が阻害されることが推察された。次年度は室内実験で、赤潮プランクトンの種類によって高濃度酸素発生量の差異がどのように変化するのか、確認を行ってゆきたい。

引用文献

松山幸彦, 永江 彬, 栗原健夫, 中野昌次, 橋本和正, 塚本達也, 長副 聡, 藤浪祐一郎, 堀田卓朗, 吉田一範, 野田 勉, 河野芳巳, 太田耕平, 松原孝博, 清水園子. 1) 有害プランクトンによる魚介類へい死機構解明. 平成 28 年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業 赤潮・貧酸素水塊対策推進事業「九州海域での有害赤潮・貧酸素水塊発生機構解明と予察・被害防止等技術開発 4. シャットネラ等の魚介類への影響, 毒性発現機構の解明」報告書, 2017; 平成 29 年 3 月, 157-174.

松山幸彦, 長副 聡, 伊藤信夫, 吉永 潔. ④) 物理化学的防除策および過飽和救命策併用によるブリ類の救命. 平成 31 年度漁場環境改善推進事業のうち赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発 2) 有害赤潮の防除および漁業被害軽減のための技術開発. イ. 生簀等の魚介類を守る技術と実証 赤潮被害防止対策技術の開発報告書, 2020; 令和 2 年 3 月, 337-347.

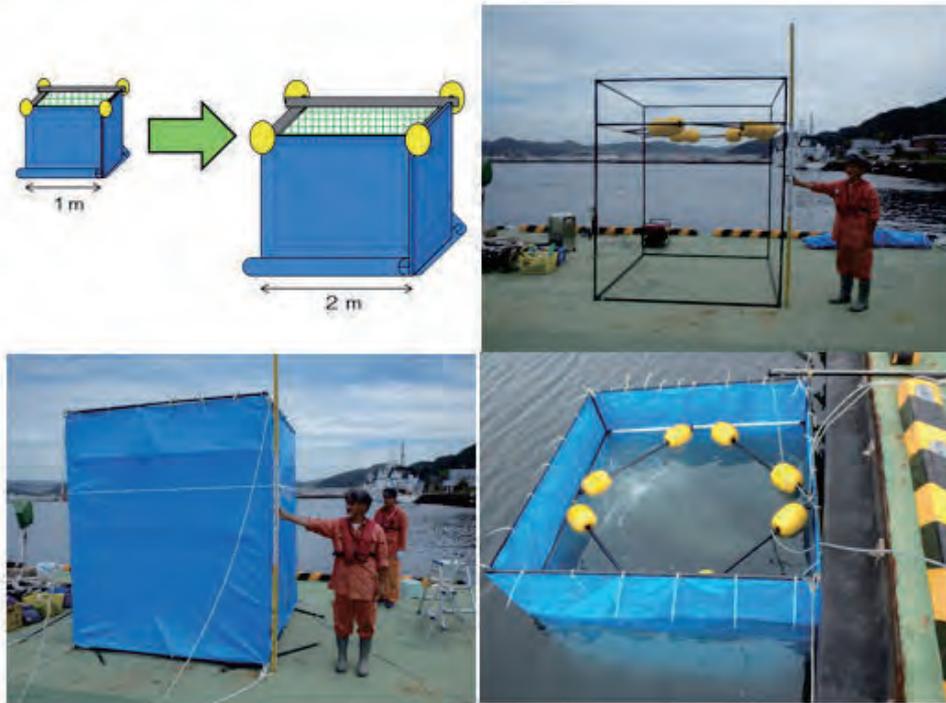


図 1 今年度作製した試験生簀および新長崎漁港における稼働試験の状況

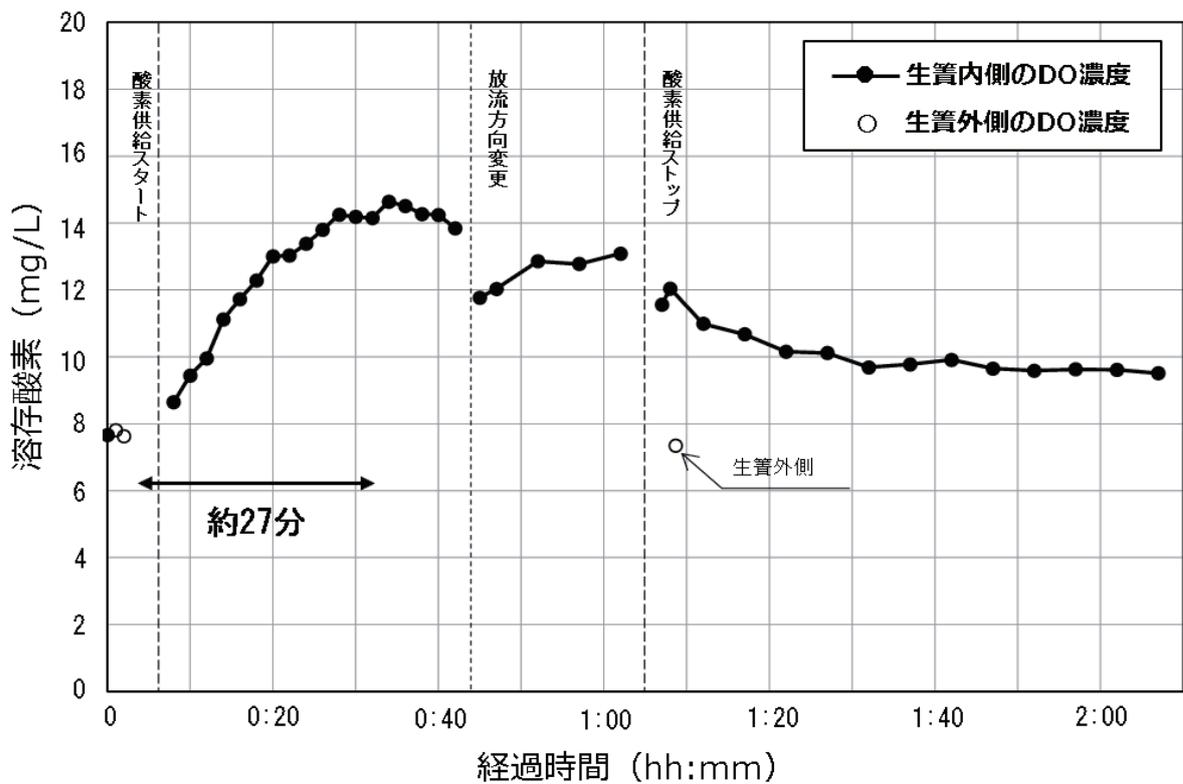


図 2 新長崎漁港内における試験生簀内部の酸素濃度上昇
試験開始時の DO : 9.2 mg/L (RINKO) , 27 分後 : 14.6 mg/L

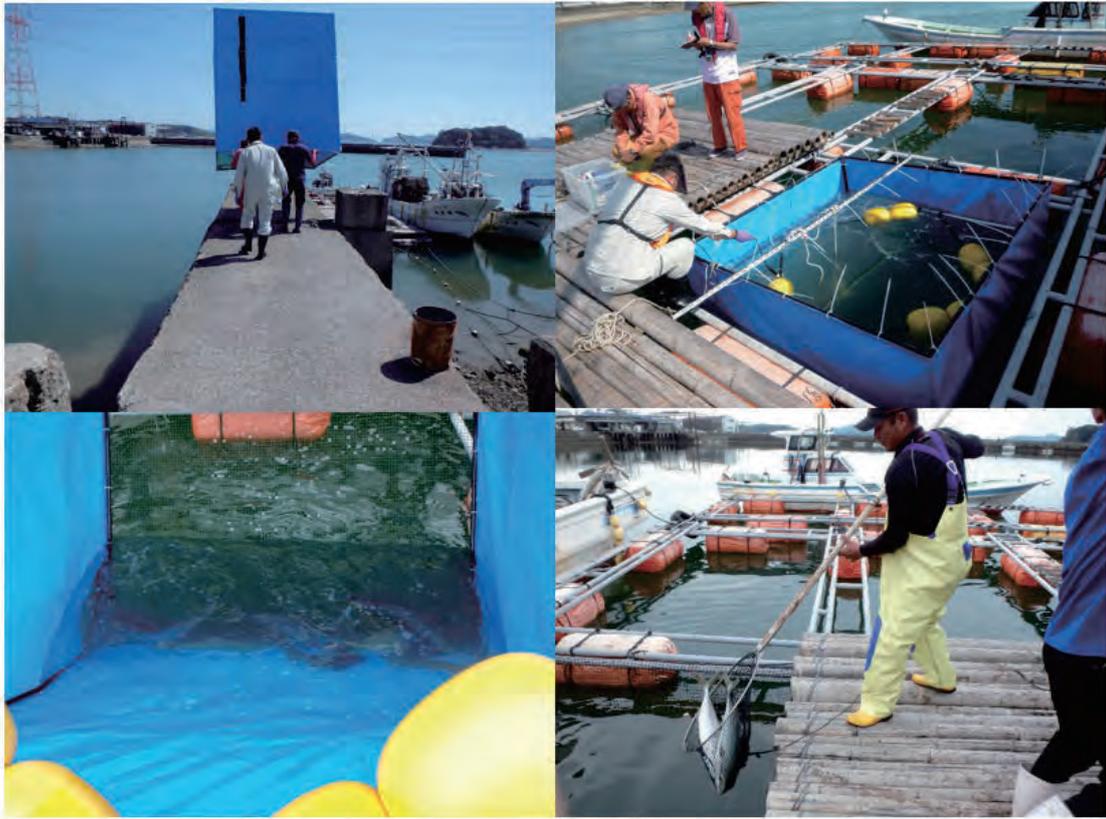


図3 八代海楠浦湾における現地試験の状況

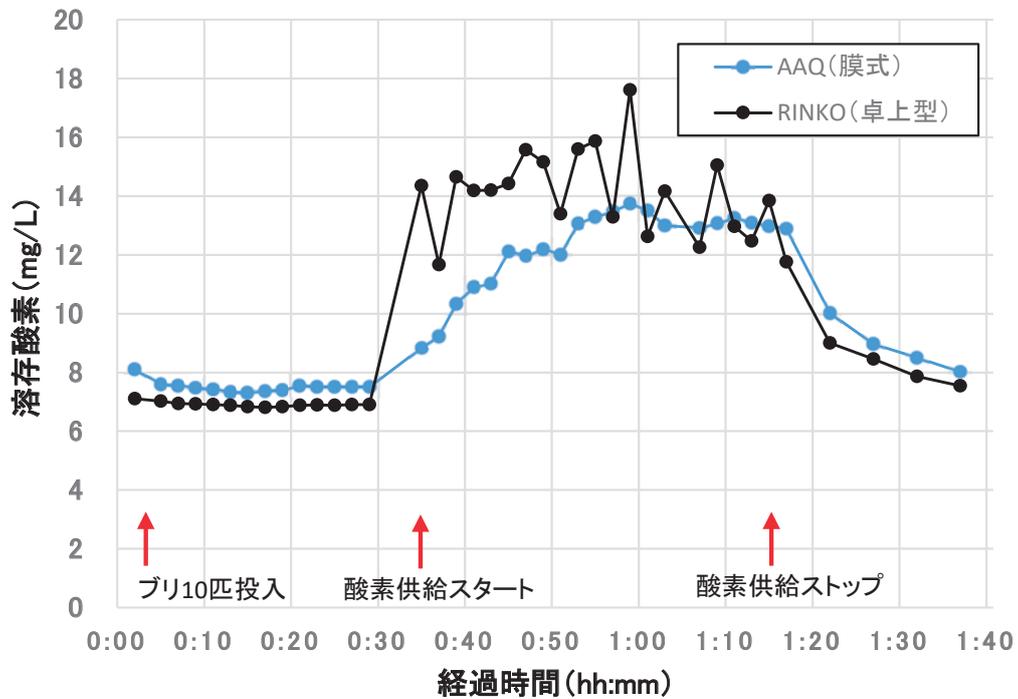


図4 八代海楠浦湾における試験生簀内部の酸素濃度上昇