

図 8-8 固形化粘土⑧における経時変化

表 6 ①-アにおける形状維持試験結果

	30分後	1 時間後	2 時間後	3 時間後	5 時間後	6 時間後
①	崩壊					
②					崩壊	
③		崩壊				
④				崩壊		
⑤			崩壊			
⑥	崩壊せず					
⑦	崩壊せず					
⑧		崩壊				

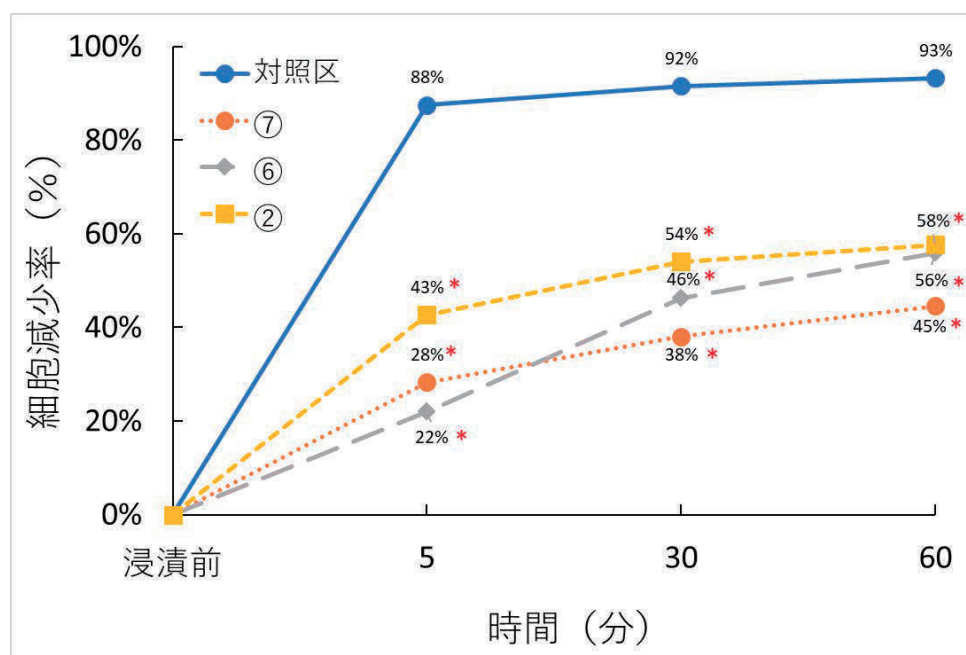


図 9 ①-イにおける *C. antiqua* の細胞減少率の推移

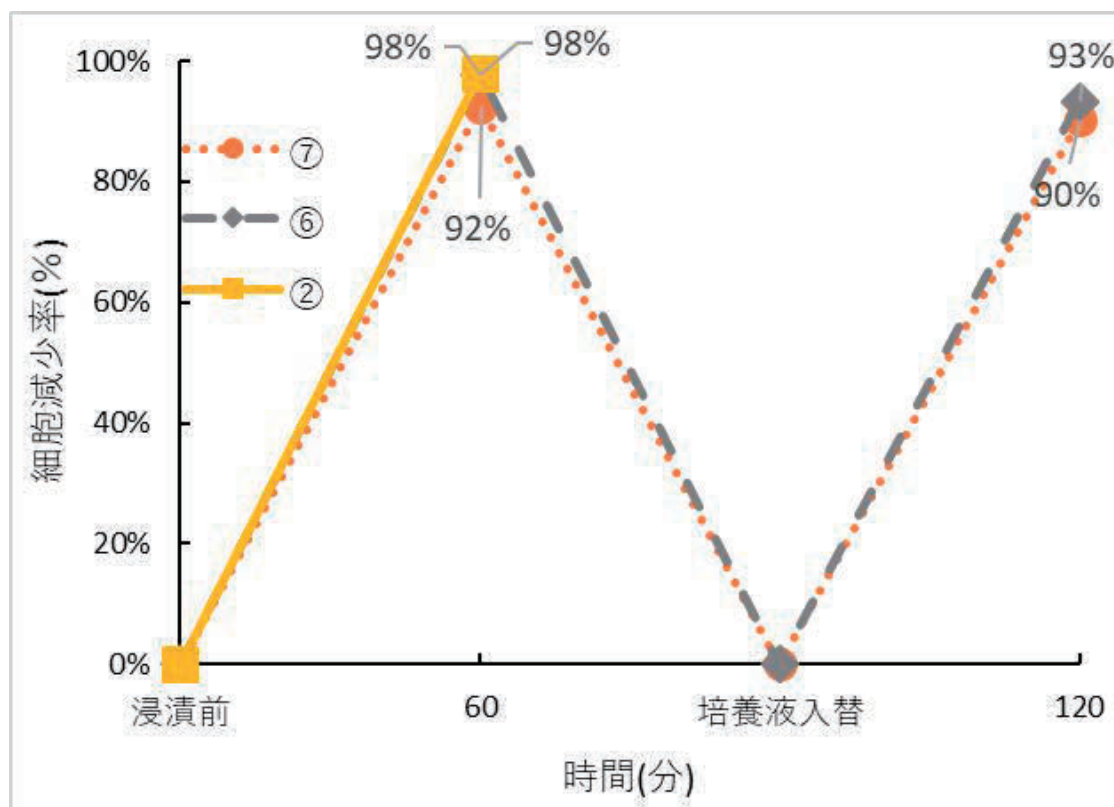


図 10 ①-ウにおける *C. antiqua* の細胞減少率の推移



図 11 ①-ウにおける培養液入替時の固形化粘土②の様子

室温19～22度、湿度47～69%の範囲の実験室に静置

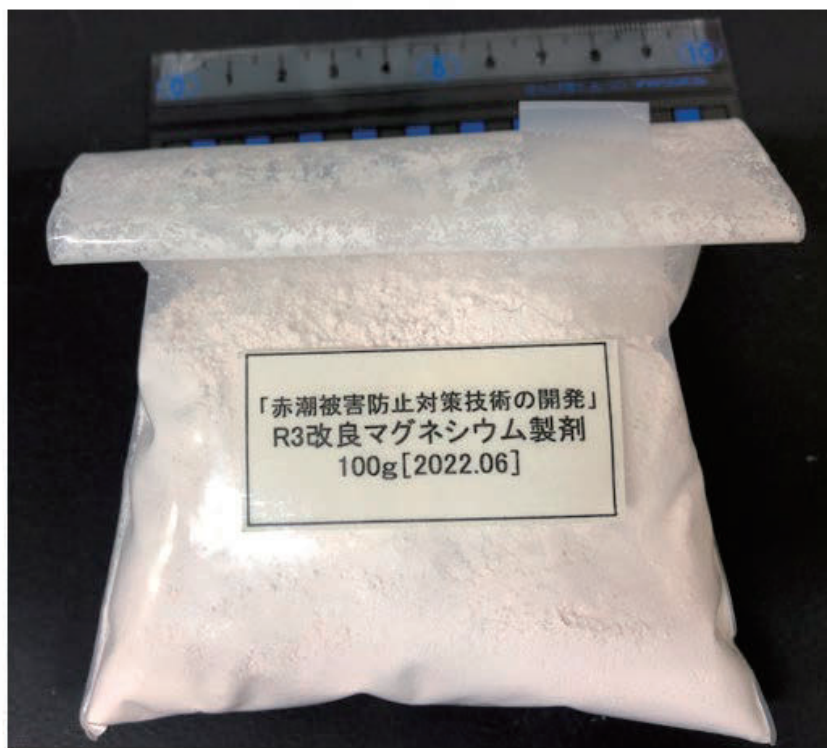


図 12 保存期間と *Karenia mikimotoi* 殺滅率試験に用いた R3 改良マグネシウム製剤
開封後は密封せず口を折り曲げて室温保存した

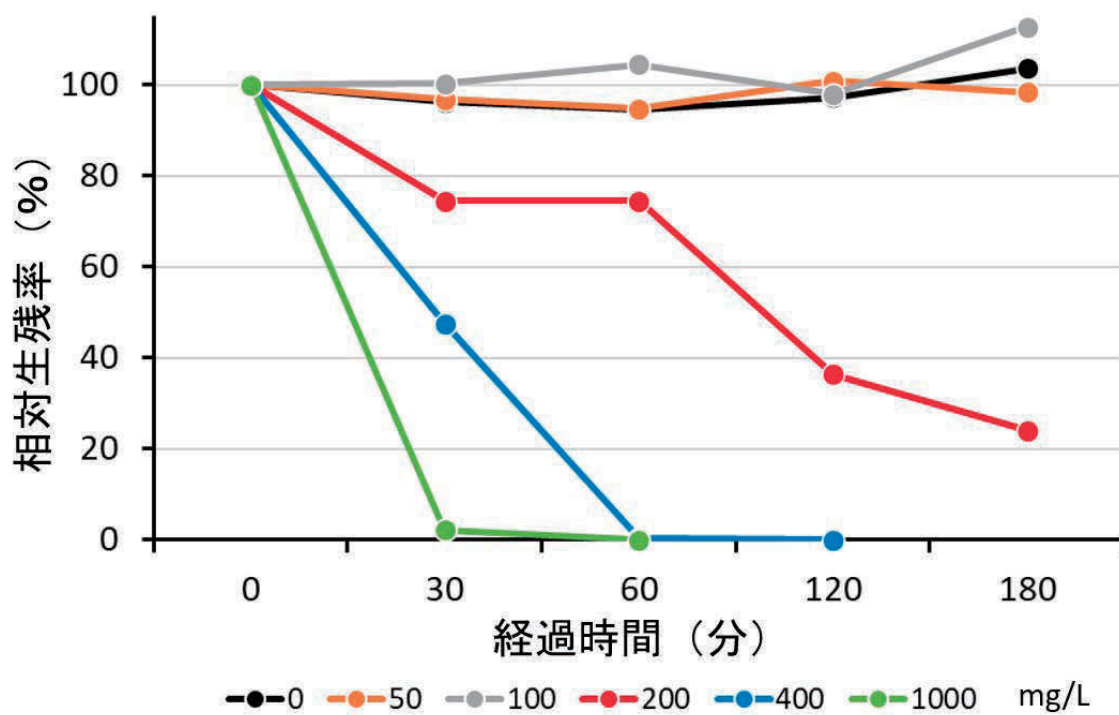


図 13 R3 改良マグネシウム製剤の濃度別の *K. mikimotoi* 殺滅率の変化（開封直後）

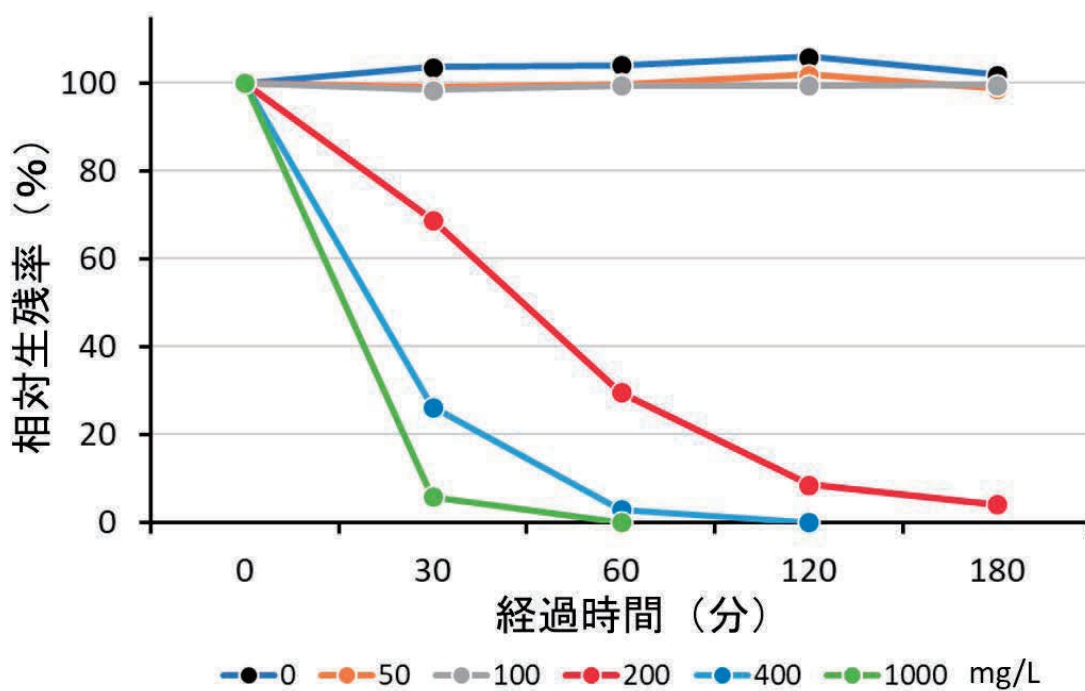


図 14 R3 改良マグネシム製剤の濃度別の *K. mikimotoi* 殺滅率の変化（開封 20 日後）

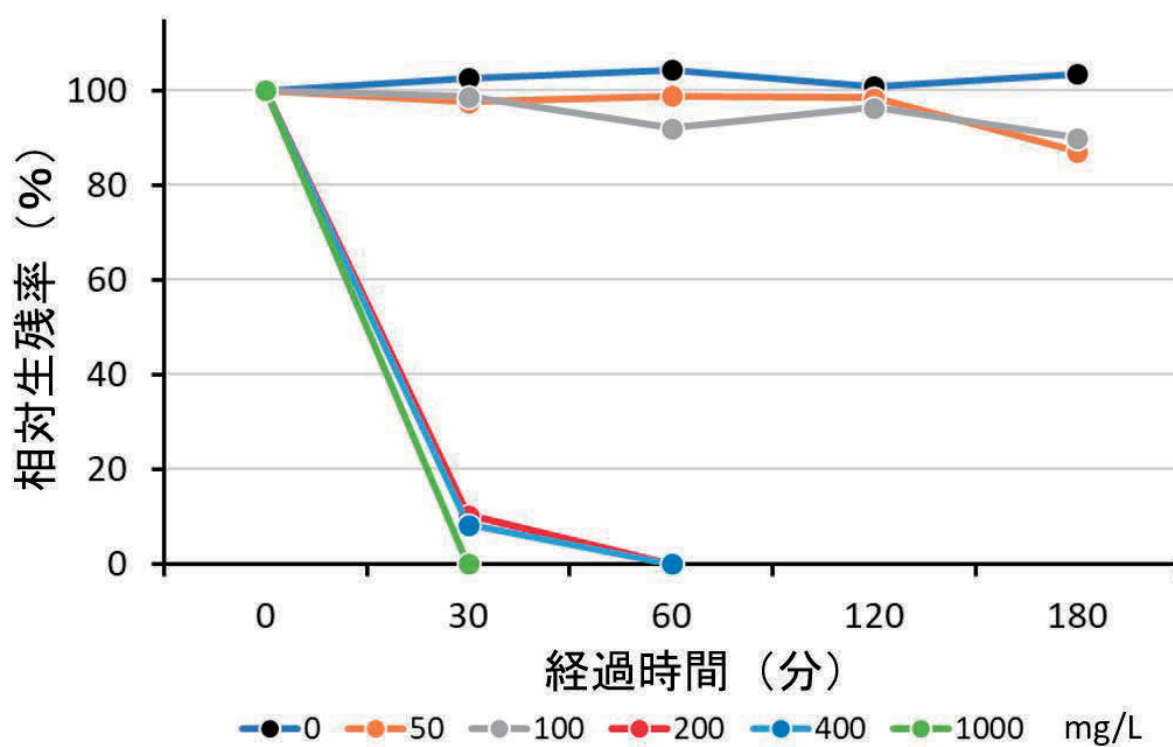


図 15 R3 改良マグネシム製剤の濃度別の *K. mikimotoi* 殺滅率の変化（開封 60 日後）

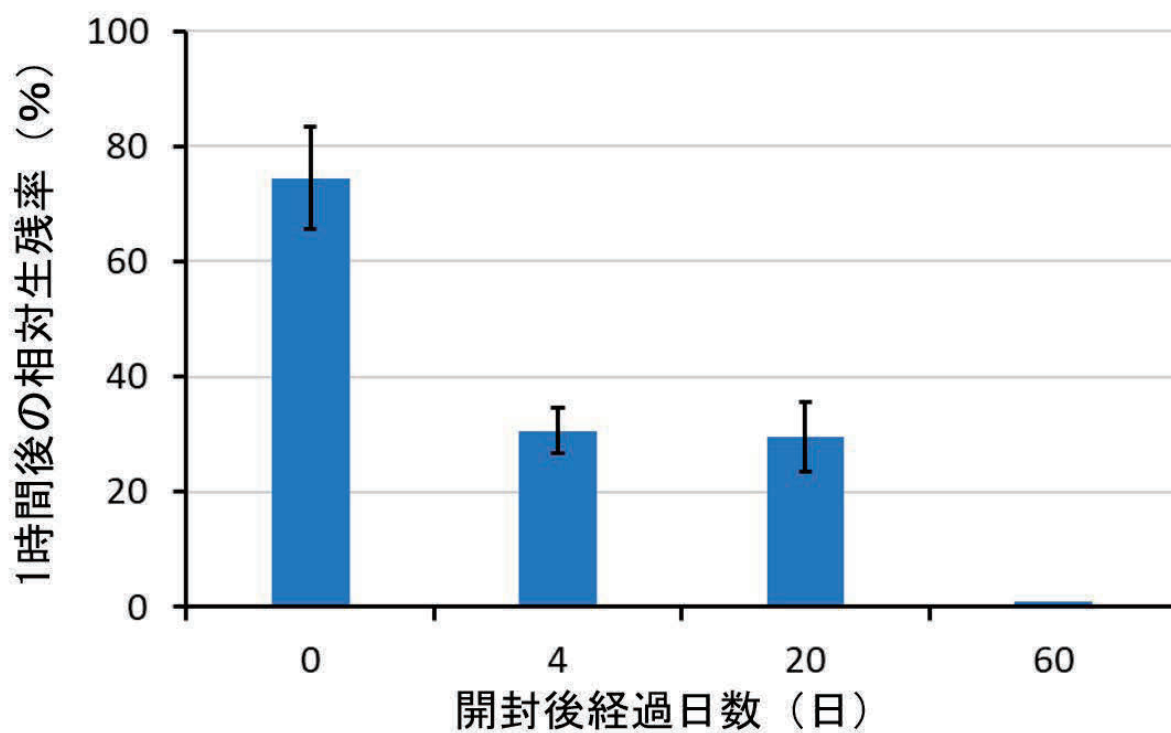


図 16 R3 改良マグネシム製剤の推奨濃度 (200 mg/L) におけるの *K. mikimotoi* 殺滅率の経日変化

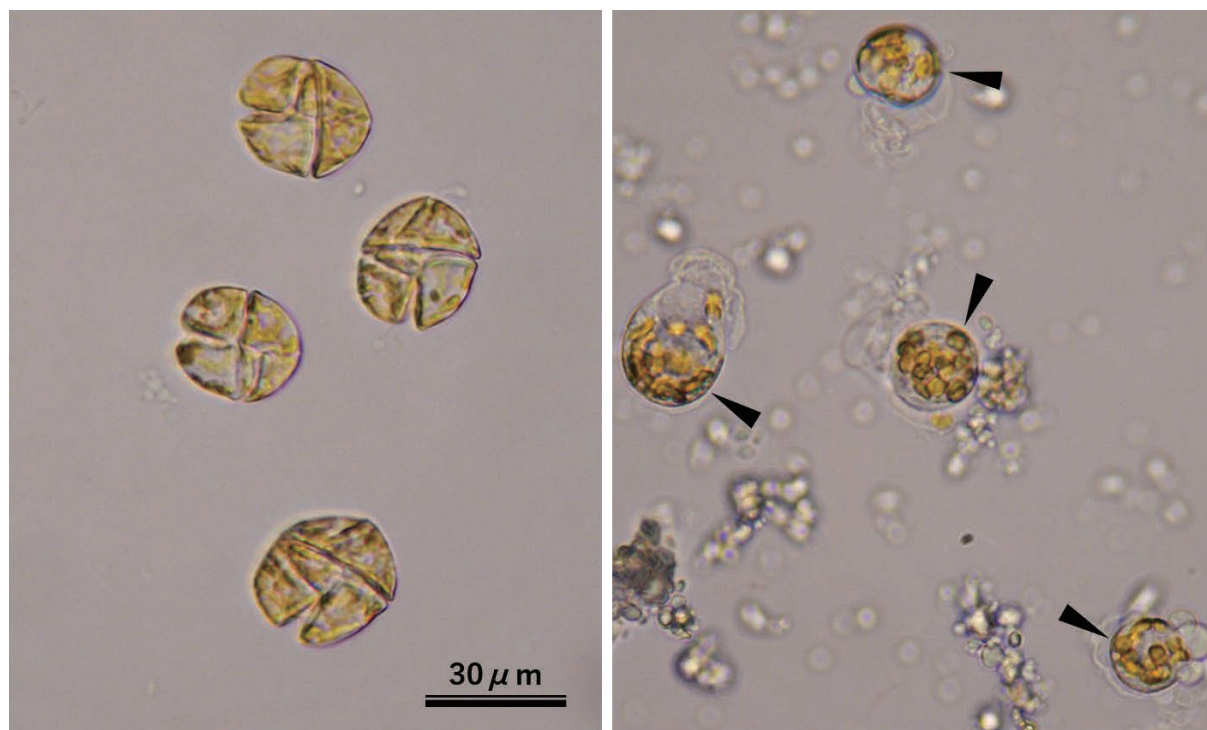


図 17 培養 *K. mikimotoi* (左) と R3 改良マグネシム製剤 (400 mg/L) に 30 分間曝露されて溶藻している *K. mikimotoi* (右, 矢印)



図 18 H30 及び R3 改良型マグネシウム製剤の写真
松山ら（2022）の図 26 の再掲

表 7 本事業において試作されたマグネシウム製剤の各種水生生物への魚毒性の確認

対象魚種	H30 改良型マグネシウム製剤	R3 年改良型マグネシウム製剤
ブリ	×	○
ヒラメ	○	—
カワハギ	△	○
アワビ	×	○
ヒオウギ	○	—
マナマコ	—	○
イトマキヒトデ	—	○

×：致死性あり，△：200 mg/L 以上で弱い致死性あり，○：致死性なし，—：データなし

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開発と実証

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，北村充彰，久野華子，小林 創^{*}，吉永 潔，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，死亡魚の抑制と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致死的密度で存在していても，溶存酸素を高度に上昇させる手法を駆使して，赤潮が発生しても養殖魚の被害を軽減して，安心して出荷できる手法開発を模索することで，漁業被害防止策の基礎を確立する。

2 令和4年度計画および結果

(1) 目的

全体計画と同じ

(2) 方法

1) 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計画した。試験中の魚毒性への影響等については，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することとした。

2) 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，現地での試験を積み重ねてきた。その結果をもとに実海域レベルでの高濃度酸素発生装置の活用について検討を行った。

装置については，過年度の試験結果より，

- ・溶存酸素の濃度（救命のためには14～15 mg/L以上の酸素濃度が必要）を確保できる条件であ

れば、ほとんどの *Chattonella antiqua* 赤潮発生時でも出荷サイズのブリを救命できることが実証されたこと。

・過年度において珪藻類を主体とした海水で溶存酸素濃度の上昇が抑制される減少を観察したが、昨年度、少なくとも *C. antiqua* と *Karenia mikimotoi* ではこうした抑制作用は認められなかったことから、漁業被害を与える赤潮プランクトン発生時に、酸素濃度の上昇が抑制されるというリスクはないことが確認できたこと。

等の結果が得られたことから、5×5×5 m および 10×10×10 m 規模の生簀において、溶存酸素の濃度が 15 mg/L 以上にするための必要時間を試算した。

3) 酸素供給装置の効果検証

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、天然赤潮海水もしくは培養プランクトンを用いた室内試験を計画した。試験魚にはブリの稚魚等を用いることとした。

(3) 結果および考察

1) 赤潮海水を用いた救命試験の実施

今年度は *Karenia mikimotoi* による赤潮が、8 月上旬から中旬にかけて発生し、大きな漁業被害をもたらした。本赤潮は突発的に発生したことから、養殖対象種となる試験魚を準備することができず、急遽、8 月 22 日に 3~4 kg のブリ 20 匹を準備・運搬し、有害赤潮が発生するだろうと考えられる楠浦湾の養殖生け簀に收容し、新たな赤潮発生に備えた（図 1）。しかしながら、その後は赤潮の発生は見られず、今年度は赤潮海水を用いた救命試験は実施できなかった。

2) 高濃度酸素発生装置の改良

本課題では、過年度にわたる試験において効果が認められたフォームジェット方式の高濃度酸素発生装置について、実海域レベルでの活用方法について検討を行った。過年度における溶存酸素の上昇結果を以下に示した。いずれの試験でも高濃度酸素発生装置は、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製）を採用した（松山ら 2020）。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 100 V 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、チューブを経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。

3 5か年のまとめ

1) 高濃度酸素発生装置の改良および室内・屋外での試験運転

本事業においては、当初赤潮プランクトンの物理化学的処理と高濃度酸素法を併用した救命技術に取り組んだ。赤潮プランクトンの殺滅については、キャビテーションとサイクロン法が *Chattonella* 属や *Cochlodinium polykrikoides* に対して有効である反面（松山ら 2017）、*Karenia mikimotoi* に対してはほとんど殺滅効果を示さなかった。過酸化水素の添加も、*K. mikimotoi* に対して有効ではなかった。一方で、平成 31 年度の試験結果によれば（松山ら 2020、図 9 および 9）、ブリの稚魚を用いて *C.*

antiqua と *K. mikimotoi* の室内曝露試験を行う過程で、原因プランクトンが致死濃度で存在していても、海水中の溶存酸素が通常時の 2 倍以上 (12~15 mg/L) 存在すると、魚毒性が消失することが判明した。*K. mikimotoi* については、高濃度酸素環境下では延命するが、曝露直後に元の海水に戻すとへい死した。これは、高濃度酸素環境下では、*K. mikimotoi* の毒性で鰓組織の壊死による傷害が発生しているものの、酸素濃度が高いために窒息せず延命していたことを示す。しかしながら、*K. mikimotoi* の曝露が終了して 4 時間ほど経過すれば、鰓のガス交換機能が回復して、通常海水に戻しても死亡することはなかった。以上の室内実験結果に基づき、本事業では、赤潮プランクトンの殺滅処理を行うことなく、生簀内部の酸素濃度を高濃度に保つことで、養殖魚の救命技術が可能と判断し、装置の改良と現地予備試験を 5 ヶ年かけて行った。

採用する機器の選定については、魚類養殖の生簀への適用性、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（酸素濃縮器：高濃度酸素ガスを発生させ溶存酸素量を向上させる）とフォームジェット（ガスの高効率溶解装置）を採用した。本装置による高濃度酸素生産手法の概念図を図 2 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、すべて通常電源で稼働する。酸素濃縮装置では、現地空気を窒素吸着タイプの樹脂を通過させて酸素濃度を 94% 以上まで上昇させ、これをフォームジェット内部で海水と混合することで、高濃度酸素海水を生成する（松山ら 2020）。水中ポンプとフォームジェット部分は水中にあり、酸素濃縮装置は船上に固定し、細いチューブを経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。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。

令和 2 年度に実施した水槽試験結果（松山ら 2021, 図 64）によれば、フォームジェットの吐出口での溶存酸素濃度は溶媒によっても異なり、水道水で 22 mg/L 前後、ろ過海水では 30 mg/L 前後となる。この時用いた天然海水では水道水並に低い数字となっていたが、珪藻類が優占していた海水であり、海水も泡立った。このように、プランクトンの存在量によっても上昇する酸素濃度が変わる可能性があったため、松山ら（2022）においては、同報告表 3 に示したように、培養された *C. antiqua* と *K. mikimotoi* 存在下で同様に試験を実施したが、この 2 種については、赤潮濃度下で存在しても、溶存酸素濃度は 30 mg/L 以上を示すなど、到達濃度の上限が低下する現象はみられなかった。よって、有害鞭毛藻では、赤潮濃度でも十分な高濃度酸素環境を発揮できると判断される。なお、同報告表 2 に示したように、*C. antiqua* についてはワンパスで 1/3 の細胞が破砕されるようであるが、これは過年度に実施した試験の結果から推定すると、主に水柱ポンプのキャビテーションによる破砕と推定される。*K. mikimotoi* については、ほとんど殺滅されることはなく、顕微鏡下で観察すると、装置を通過後は一時的に鞭毛が損傷しているため運動性が停止しているが、細胞の形態は通常と変わらず、30 分も経過すればまた盛んに遊泳するようになる。

次に現地での小規模試験結果を示す。平成 30 年度は、松山ら（2019）の図 4 に示したように、長崎県の新長崎漁港内において、1.5 m×1.5 m×1.5 m（生簀仕切りシートは長さ 3 m）、体積 6.75 m³ の生簀を使用した（側面はブルーシートで覆われ、底部は網のみで解放）。生簀内部の酸素濃度は約 10 分にて上限値 12.7 mg/L に到達した（松山ら 2019）。なお、この年度の試験では、酸素濃度の計測は AAQ を用いた為、数値上は 12.7 mg/L が上限であったが、実際はもっと高濃度に達していたと推定される。また、通気を停止しても溶存酸素は 30 分以上は維持されていた。なお、酸素供給から停止後 30 分間におけるブリ幼魚は、全く異常が認められなかったことから、高濃度酸素が養殖魚類に及ぼす悪影響は無いと判断された（松山ら 2019）。

令和元年度は、熊本県の八代海樋島漁協前において、1.5 m×1.5 m×1.5 m（生簀仕切りシートは長さ 1.5 m）、体積 3.375 m³ の生簀を使用した（松山ら 2020, 図 2-3, 側面はブルーシートで覆われ、底部は網のみで解放）。生簀内部の酸素濃度は約 4 分で 20 mg/L 以上、10 分で 30 mg/L 以上に到達した。

令和 2 年度は長崎県の新長崎漁港内において、2 m×2 m×2 m（生簀仕切りシートは長さ 2 m）、体

積 8 m^3 の生簀を使用した（側面はブルーシートで覆われ、底部は網のみで解放）。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。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% 低下したが、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（松山ら 2020, 図 1-2）。

現地試験の結果、基本的には生簀の容積と使用する器材の組み合わせで溶存酸素濃度の上昇が決定される傾向にあった。基本的にナノバブル状態で酸素濃度の上昇が起きているため、通常空気のように、大気中に拡散して酸素濃度が急速に元に戻っていく現象はほとんどみられなかった。一方で、生簀を囲うカーテンの縫合部などの隙間から外部の海水が侵入したり、船の航跡で大きな波が到達したりすると海水交換が促進されて酸素濃度が元に戻っていく現象もみられた。ただし、そうした環境下であっても、装置を連続稼働しておけば溶存酸素を高く保つことは十分可能である。

2) 赤潮発生海域におけるブリ類の救命試験の実施

平成 30 年度から令和 4 年度にかけて現地試験を行うため、赤潮ネットおよび各県から発信される赤潮発生状況について情報収集し、赤潮発生タイミングに合わせて、試験魚を調達するなど、現地試験の準備を毎年行なった。試験実施海域は、現地漁業者団体との協力関係が得られ、かつ赤潮発生頻度の高い伊万里湾と八代海を候補地として選定した。伊万里湾では 5 ケ年のうち 3 ケ年 *Karenia mikimotoi* が致死的濃度で赤潮を形成し、八代海では *Chattonella antiqua* が 2 ケ年、*K. mikimotoi* が 1 ケ年致死的濃度で赤潮を形成した。令和元年度と令和 4 年度の八代海では、赤潮発生に合わせて現地試験の準備を進めていたが、試験魚の調達などに日を要するため、いずれも試験日には赤潮の密度が致死的レベルを下回っており、ブリを用いた現地試験は実施できなかった。一方、令和元（2018）年度の伊万里湾と令和 3（2021）年度の八代海では、試験日にそれぞれ *K. mikimotoi* と *C. antiqua* が高密度で赤潮を形成しており、現地試験を実施できた。この 2 ケ年の実施状況について述べる。

令和元（2018）年 6 月中旬より、長崎県と佐賀県の県境に位置する伊万里湾において、*K. mikimotoi* の大規模赤潮が発生した。松山ら（2020）の図 4 に示した定点に敷設されている遊魚用筏で救命試験を実施することとした。同報告図 5 に示したように、現地は広範囲で緑褐色に着色しており、顕微鏡で検鏡すると、最大 $14,875 \text{ cells/mL}$ の *K. mikimotoi* が発生していた。同報告図 7 に試験結果を示した。無通気の場合、溶存酸素濃度は $8 \sim 9 \text{ mg/L}$ で推移した。現場海域の溶存酸素濃度が通常時より高い理由は、高濃度の *K. mikimotoi* の光合成活性によるものである。この状況でブリ稚魚を 5 尾収容したものの、25 分過ぎから横転が始まり、40 分後には 5 尾全数が死亡した。次に囲い網を施した状態で通気を行ったものの、この試験で用いた酸素濃縮装置が最も小型のタイプであり、水中ポンプの威力も小さかったため、溶存酸素濃度は $10 \sim 11 \text{ mg/L}$ までしか上昇せず、上昇幅が想定よりかなり低かった。この状態でブリ稚魚を収容したものの、35 分過ぎから横転が始まり、59 分後には 5 尾全数が死滅した。最後に、試験生簀を遮水カーテンで覆い、同様の試験を実施したところ、溶存酸素濃度が $13 \sim 15 \text{ mg/L}$ を維持することができた。この状態でブリ稚魚を収容したところ、試験終了時の 2 時間 30 分後まで全数が生残するなど、顕著な延命効果が認められた。このため、少なくとも *K. mikimotoi* に関しては、溶存酸素濃度を 13 mg/L 以上に保つことで、致死的濃度の *K. mikimotoi* が存在しても、延命させることが可能と判断された。

次に令和 3 年度の八代海における現地試験結果について述べる（松山ら 2022）。この年は、6 月下旬以降に八代海の広域で *C. antiqua* の初期出現がみられるようになり、7 月 12 日以降、北部海域で 100 cells/mL を超えて赤潮化した。松山ら（2022）の図 2 に令和 3 年度現地救命試験を実施した定点（ 32.40739235N , 130.41504599W ）を示した。赤潮の発生が養殖漁場のない球磨川河口に集中したことから、試験生簀を組み立てるスペースがなく、協力養殖業者の保有船舶のうち、活魚運搬用の大型船の生け間が 8.7 m^3 と、予定された試験生簀の 8 m^3 と大きく変わらないことから、赤潮海域まで装置一式を載せて移動したのち、この生け間に赤潮海水を導入して試験を実施した。試験日の

7月17日は曇天で小雨が混じり、*C. antiqua* は光を求めて表層に濃密に蟄集している状態であり、赤潮盛期であった。現地の AAQ-RINKO で計測されたクロロフィル蛍光値から間接的に推定された *C. antiqua* 細胞密度は、表層で 1,200~7,600 cells/mL の範囲にあった。試験は同報告表 1 に示した条件で全 3 回実施した。第 1 回は開始時の *C. antiqua* 細胞密度が 3,009 cells/mL であった。現地試験の実施状況は同報告図 6 に示した。まず対照区 1 として、生け間の栓を抜いて船底から赤潮海水をほぼ無攪拌で導入した。通気は漁船に備え付けのエアコンプレッサーで実施した（通常の活魚運搬時の状況を再現）。供試する試験魚を減らして試験回数を増やしたため、いずれの試験も 1 回あたりの注水量は概ね 3 m³ であった。図 3 に第 1 回（対照区 1）の試験結果を示した。溶存酸素濃度は試験開始時に 9.9 mg/L と高く、通気によって徐々に低下して 7.0 mg/L で安定した。これは、*C. antiqua* の赤潮が高密度であるために、赤潮海水の溶存酸素が *C. antiqua* の光合成活性によって過飽和になっているためである。クロロフィルは試験開始時に約 45 µg/L と高かったが、その後は 35~40 µg/L の間で変動していた。ブリ稚魚は試験開始 23~40 分後にかけて供試した 5 尾すべてがへい死した。ブリ成魚については稚魚よりも遅れて異常がみられた。試験開始 36~1 時間 1 分後にかけて供試した 3 尾すべてがへい死した。図 4 に第 2 回（対照区 2）の試験結果を示した。この試験は対照区とほぼ条件だが、赤潮海水を高濃度酸素装置で使用する水中ポンプで揚水して生け間へ注水したため、ポンプのよる若干の *C. antiqua* 細胞破裂が起きている。対照区 1 同様に溶存酸素濃度は開始時に 9.7 mg/L と高く、通気によって徐々に低下して 7.0~7.1 mg/L で安定した。クロロフィルは試験開始時に 32~34 µg/L であったが、試験開始後 10~24 分後にかけて一旦減少したのち、その後は 30 µg/L 前後で変動していた。ブリ稚魚は試験開始 30~46 分後にかけて供試した 5 尾すべてがへい死した。ブリ成魚については稚魚よりも遅れて異常がみられた。試験開始 55 分後~1 時間 25 分後にかけて供試した 4 尾すべてがへい死した。図 5 に第 3 回（高濃度酸素試験区）の試験結果を示した。この試験区が高濃度酸素区の試験である。溶存酸素濃度は開始時に 38.9 mg/L と高く、その後の連続通気によって 1 時間分ほどかけて徐々に上昇して 22 mg/L 前後で安定した。クロロフィルは試験開始時に 37 µg/L 前後であったが、試験開始後 50 分ほどかけて徐々に減少して 29 mg/L 前後となり、その後は 25~30 µg/L の範囲で変動していた。ブリ稚魚は試験中異常なく遊泳しており、ブリ稚魚とブリ成魚のいずれも、試験終了時の 2 時間 6 分後まで全尾生残した。同報告図 10 に全試験区における、ブリ稚魚と成魚の生存率の推移を示した。一般的に、ブリは稚魚よりも成魚で赤潮プランクトンへの感受性が高まることが知られている（Matsuyama and Oda 2020）。松山ら（2022）の八代海における試験で用いたブリの稚魚については、前日まで給餌飼育されていたこと、一方、成魚については、試験日まで 12 日間餌止めされていたことから、この餌止め期間の差異がへい死時間に影響したことが考えられる。また、形態異常を引き起こした *Chattonella* 細胞は魚毒性が低下することが知られているが（Matsuyama and Oda 2020）、今回高濃度酸素の発生装置として用いた水中ポンプは小型でキャビテーション発生が弱かったせい、7 割ほどの細胞が通常形態を保っていたことから、対照区 1 と対照区 2 の間で、魚毒性の大きな差異に繋がらなかったものと思われる。高濃度酸素区の試験では、ブリの異常行動が全く認められず、通常の海水で遊泳しているように、ゆっくりと水槽内を巡回している状態で、低酸素状態に陥った時に顕著な背側の黒化も試験終了時まで全く観察されなかった。試験終了時に通常海水に換水しても状態に変化は見られなかったことから、致死濃度の 28 倍もの *C. antiqua* に 2 時間曝露されたにも拘わらず、何ら傷害を受けていない状況であった。通常ブリの養殖場でここまで高濃度の赤潮海水が流入することは希な現象なので、溶存酸素の濃度（救命のためには 14~15 mg/L 以上の酸素濃度が必要）を確保できる条件であれば、ほとんどの *C. antiqua* 赤潮発生時でも出荷サイズのブリを救命できることが実証された。