

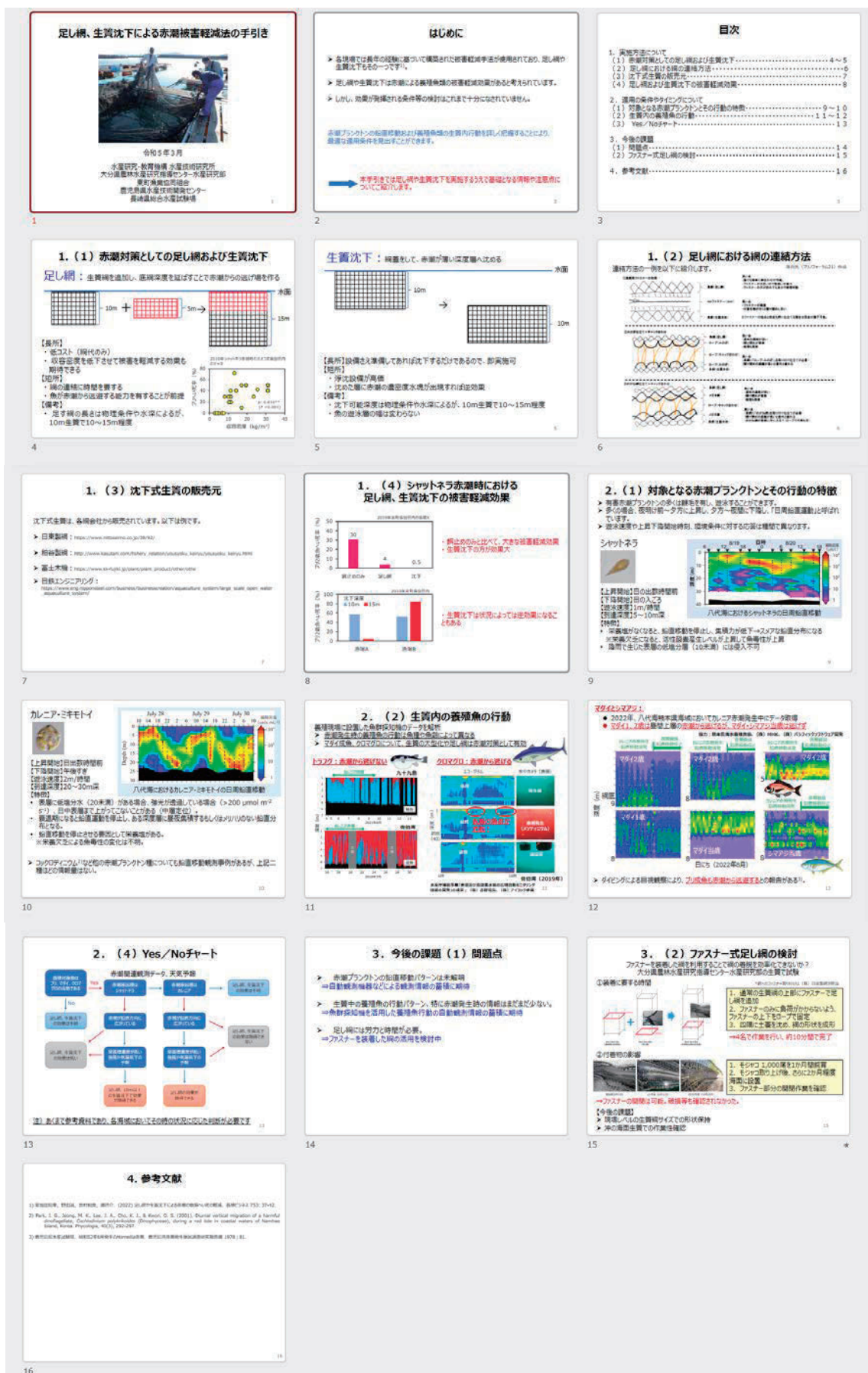


図8. 足し網、生簀沈下による赤潮被害軽減法の手引き.

2) 有害赤潮の防除及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

③ 改良粘土散布の実証試験及び新たなマグネシウム製剤の開発、対策実施マニュアルの作成

水産研究・教育機構 水産技術研究所

松山幸彦, 長副 聡

大分県水産研究指導センター

井口大輝, 中里礼大, 都留久美子, 宮村和良, 斉藤義昭, 野田 誠

長崎県総合水産試験場

山砥稔文, 平江 想, 山本佳奈, 中島吉洋

鹿児島県水産技術開発センター

赤塚麻美, 今吉雄二, 吉満 敏, 高杉朋孝, 東條智仁, 宮田翔也, 森島義明, 西 広海

宇部マテリアルズ株式会社

田中俊也, 小田康太, 渡辺国男

1 全体計画

(1) 目的

昭和 50 年代に、鹿児島県で開発されたアルミニウム含有酸性粘土の海面散布は、*Cochlodinium polykrikoides* に対して高い防除効果が得られる（鹿児島県水産試験場 1981, 水産庁・鹿児島県水産試験場 1982, 鹿児島県水産技術開発センター 2018）。しかし、それ以外の赤潮生物に対しては有効濃度が高いため、散布量が多くなるなど、コストの問題が指摘されていた。その後、有効成分であるアルミニウム濃度を高めるために、粘土に焼ミョウバンを補助的に添加することで、*Chattonella antiqua*（以下、*C. antiqua*）に対する駆除効果を高めるのみならず（田原ら 2012）、*Karenia mikimotoi*（以下 *K. mikimotoi*）に対しても有効であることが確認された（松山ら 2021）。

種々の赤潮防除手法が提案されてきたなかで、漁業者でも実施できる簡便さと高い駆除効果には実績があり、実際の養殖漁場でも実施可能な赤潮被害低減策の基礎を確立することが期待される。

近年、中層で有害プランクトンの増殖が見られる等の新たな事象が見られ、これらに対応するため、本事業では、アルミニウムイオン等の濃度を増加した新型活性粘土（改良型粘土）の効果をさらに検証しつつ、赤潮海域でこれらの改良型粘土を用いた現場実証試験を実施し、その結果、経済性についても検証し、より有効な散布方法を確立したうえで対策実施マニュアルの更新を図る。

また、近年駆除が困難だった *K. mikimotoi* に対して、5 分間で 100% の駆除効果を示すマグネシウム製剤が開発された。この新規防除剤についても、室内試験で効果を検証し、高い駆除効果と安全性が確認され次第、これらの改良型マグネシウム製剤を用いた現場実証試験を実施し、その結果、経済性についても検証したうえで対策実施マニュアルを作成する。

これらの目標を短期間で達成するために、複数の公立試験研究機関と民間企業のノウハウも取り入れた共同研究体制で実施するため、本研究開発の目標設定は妥当かつ現性があると考ええる。

2 令和 4 年度計画及び結果

(1) 目的
全体計画と同じ

(2) 方法

【サブテーマ (①)】

1) 中層散布器試験

① 中層散布器の吐出量試験

昨年度に作成した中層散布器(ステンレス製：図 1)を用いて吐出量を確認した。

試験は令和 5 年 2 月 2 日に水産技術開発センター浮棧橋で固定した状態で実施した。試験では、改良型粘土（入来モンモリ＋焼ミョウバン）を表 1 のとおり海水 200 L に溶かし、攪拌しながら水中ポンプ（オーテック社製，EBARA PUMP：表 2）を用いて水深 3.5 m で吐出した。

中層散布器の吐出口から改良型粘土が放出され始めた時間と放出が終わった時間を計測し、吐出量を算出した。

② 固定器具を用いた中層散布器での航行試験

昨年度は試作した中層散布器の航行試験を実施した際に、中層散布器と船体をロープにて固定したが、旋回中に中層散布器が傾いて船体から離れそうになる、4 ノットで航行すると振動が大きくなり中層散布器が海面にずり上がる様子が確認された。

そこで、今年度は中層散布器と船体を固定する固定器具（図 3）を試作し、中層散布器を水深 4.5m で固定して航行試験を行った。試験は令和 5 年 2 月 8 日に水産技術開発センター沖にて実施した。

2) 防除効果持続技術の検討

① 改良型粘土における固形成の検討

昨年度は蒸留水 15 mL に焼ミョウバンを溶かし、入来モンモリ及びカルボキシメチルセルロース（以下，CMC）を均一になるように混合した物を手で練り、球体上に形成して自然乾燥させた。作成した試作品を蒸留水に浸漬し、形状変化を確認したが、浸漬直後から崩れ始め、10 分後には完全に崩壊した。

そこで、今年度は表 3 のとおり改良型粘土の固形成を検討した。入来モンモリ，焼ミョウバン及び展着材(アルギン酸ナトリウム及びポリアクリル酸ナトリウム)を混ぜ、濾過海水を添加し 5 分間練り合わせた。固形成活性粘土(以下，固形成粘土)①，②，⑤及び⑧については，形成できなかったために，ビーカーもしくはアルミホイルに空気を抜いて入れて 100℃で 3 時間乾燥させた。固形成粘土③，④，⑥及び⑦については，1g，2g 及び 3g 計り取り，手で球体状に形成し，100℃で 3 時間乾燥させた。固形成粘土①～③は令和 5 年 1 月 23 日に，④～⑧は 1 月 24 日に作成した。各試験区乾燥後は，試験ア，イ及びウに供するまで密栓保管した。

ア 形状維持試験

改良した固形成粘土の形状維持能力を確認するため，300 mL ビーカーに海水を 300 mL 収容し，固形成粘土を浸漬し，葉さじで軽く渦ができる程度に攪拌し，添加直後，5 分後，30 分後，1 時間後，2 時間後，3 時間後，4 時間後，5 時間後及び 6 時間後の状態を確認した。試験は令和 5 年 1 月 27 日に実施した。

イ 防除効果確認試験

試験アで長時間にわたり形を維持した固形成粘土②，⑥，⑦を用いて従来の粉末状態の改良型粘土と防除効果の比較を行った。試験は令和 5 年 1 月 31 日及び 2 月 1 日に実施した。

試験の供試プランクトンには，SWM-III 改変培地で培養した *C. antiqua* を用いた。SWM-

III改変培地で細胞密度を調整した *C. antiqua* 培養株（約 1,000 cells/mL）を 200 mL フラスコに 100 mL ずつ収容し、固形化粘土⑦、⑥、②及び粉末型の改良型粘土を 1,000 ppm + 100 ppm（入来モンモリノ焼ミョウバン）となるようにそれぞれ添加した後に、防除効果を確認した。粘土浸漬前、浸漬 5 分後、30 分後及び 1 時間後に細胞密度を計数し、時間経過による細胞密度の推移を確認した。計数前には十分にピペッティングし溶液を採取した。

ウ 防除効果持続確認試験

固形化粘土②、⑥、⑦を用いて長時間の防除効果の確認を行った。試験は令和 5 年 2 月 6 日に実施した。

試験の供試プランクトンには、SWM-III改変培地で培養した *C. antiqua* を用いた。*C. antiqua* の細胞密度はブリが致死する可能性がある最低致死細胞密度である約 50 cells/mL とした。

SWM-III改変培地で細胞密度を調整した *C. antiqua* 培養株を 200 mL フラスコに 100 mL ずつ収容し、試験区②は約 1.7g、試験区⑦、⑥は約 2 g を浸漬した。

粘土浸漬前、浸漬 1 時間後に細胞密度を計数し、固形化粘土を浸漬していた培地を破棄し、新たに *C. antiqua* 培養液（約 50 cells/mL）を添加し、浸漬開始 2 時間後に細胞密度を計数した。計数前には十分にピペッティングし溶液を採取した。

【サブテーマ（②）】

1) R3 改良型マグネシウム製剤の *Karenia mikimotoi* への殺滅効果試験（有効保存期間の検証）

過年度までに、渦鞭毛藻 3 種（*K. mikimotoi*, *Cochlodinium polykrikoides* 及び *Cochlodinium* sp. Type Kasasa）に対する H30 改良型マグネシウム製剤の高い駆除効果について確認している。R3 年度に開発された R3 改良型マグネシウム製剤については、*K. mikimotoi* 強毒培養株（NGU04, Kim et al. 2019）を用いて殺滅効果の確認試験を行った。強毒株を 100 mL 容のガラス製フラスコで培養し（60 mL, 22°C, 120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 14hL:10hD）、ろ過海水でおおよそ 4,000~8,000 cells/mL となるように調製し、直径 13 mm のガラスバイアルへ 1 mL ずつ収容した。さらに、目的の濃度の 2 倍濃度の R3 改良型マグネシウム製剤をろ過海水へ溶解して調製した。試験はこの 2 倍濃度の R3 改良型マグネシウム製剤を 1mL ずつ抜き取って *K. mikimotoi* 培養液へ添加し、数回吸引と吐出を繰り返して混合し、室温（22°C）で静置した（改良型マグネシウム剤の最終処理濃度 0, 50, 100, 200, 400 及び 1,000 mg/L）。各処理 3 試験区設けた。マグネシウム製剤混合後、0, 30 min, 1, 2 及び 3 時間後 *K. mikimotoi* 細胞を計数して平均生残細胞密度を求めた。細胞は遊泳しているもしくは顕微鏡下でゆっくりと動いて形態が通常の栄養細胞とそれほど変化がないものを計測し、不動細胞として球形化したり、あるいは変色・破裂しかけている細胞は死滅したと判断して計数しなかった。

R3 改良型マグネシウム製剤については、保存期間中に吸湿等による化学的変成を受けて、*K. mikimotoi* への殺滅効果が低下することが推定されたので、今年度は、開封後の日数と殺滅効果の経日変化について調査した。図 1 に示したように、開封後の R3 改良型マグネシウム製剤はビニール袋に封入された形態で配布されているが、開封後、容器の口を軽く 2 回折り曲げて、そのまま室温 19~22 度、湿度 47~69% の範囲の実験室に静置した。この状態から、開封直後、4 日後、20 日後、60 日後にマグネシウム製剤を秤量し、同様の殺滅試験を行って、効果の判定を行った。

2) R3 改良型マグネシウム製剤の安全性の検討（対象種：底生生物）

過年度までにブリ稚魚やアワビへの毒性を試験し、R3 年度改良型マグネシウム製剤につ

いては、魚毒性がほぼ低減していることを確認した。一方で、マグネシウム製材が海底へ降して、海底でどのような影響をもたらすのか確認するために、今年度は底生生物を用いた魚毒性試験を実施した。

試験に用いた供試生物は、マナマコとイトマキヒトデである。60 L のプラスチックコンテナにろ過海水（GF/C）を 50 L 注入し、これに平均全重量 23 g のマナマコ 3 個体、平均全重量 65g のイトマキヒトデ 5 個体を収容し、これに R3 年度改良型マグネシウム製剤を 10 g 溶解させて通気攪拌状態とした。ここに、それぞれの試験個体を投入し、96 時間生残状況を調べた。

(3) 結果及び考察

【サブテーマ (①)】

1) 中層散布器試験

① 中層散布器の吐出量試験

吐出された粘土は帯状に広く拡散した(図 3-1, 3-2)。各試験区での吐出時間は、約 1.7L/秒であった。1 秒間に吐出される改良型粘土の量を表 4 に示す。海水 200 L あたり入来モンモリ 4 kg と焼ミョウバン 0.4 kg を加え、中層散布器から横 2 m×縦 1 m×深さ 1 m の範囲の赤潮プランクトンの防除をする場合（図 4）、改良型粘土を有効濃度(1,000 ppm + 100 ppm)で散布するには、約 1 分が必要である。

また、例えば赤潮プランクトンがごく狭い層(10 cm)に存在しているときには、同条件で中層散布器から横 2 m×縦 1 m×深さ 10 cm（図 5）の範囲で改良型粘土を散布すると、有効濃度を散布するために約 6 秒必要となる。

このため、広範囲で赤潮が発生した場合は停船状態で潮上から散布する、または複数の船で同じ航路に複数回散布することが有効であると考えられる。

また、生け簀周りの赤潮プランクトンの細胞数を減少させるために、生け簀等に設置し散布することも有効であると考えられる。

本中層散布器は、*K. mikimotoi* のように中層で増殖する赤潮を集中的に防除できるひとつの手段になると考えられる。

② 固定器具を用いた中層散布器での航行試験

固定器具の取り付け及び設置等について図 6-1～6-3 に示す。4 ノットまで速度を徐々に上げながら航行したが、中層散布器と固定器具に破損や湾曲は見られなかった。

4 ノットで航行しても中層散布器が海面にずり上がることはなかったが、旋回中には固定部分に圧がかかり、固定器具が外れそうになった。

以上の結果から、本中層散布器及び固定器具を用いて粘土散布を行う場合は、直進しながら散布し、旋回を行う際は速度を落とすもしくは中層散布器を水中から取り上げる必要がある。

2) 防除効果持続技術の検討

① 固形化粘土の検討

作成した固形化粘土を図 7 に示す。また、球体に形成した試験区の乾燥後重量は表 5 のとおりとなった。

ア 形状維持試験

各試験区の浸漬直後からの様子を図 8-1～8-8 に、形状維持時間を表 6 に示す。形状が維持されているかの確認は、攪拌後に葉さじで固形のまま動かせるかで確認した。

浸漬から 6 時間後も形状が維持されていた試験区は固形化粘土⑥、⑦であった。この 2 つの試験区は、試験後も形を保っており、大型化や板状に形成することで実海域でも形状を維持できる可能性がある。

イ 防除効果確認試験

各試験区及び粉末型の改良型粘土における *C. antiqua* の細胞減少率の推移を図 9 に示す。

細胞減少率は粉末区では開始後 5 分で約 90% まで上昇したが、固形化粘土②、⑥は開始後 60 分で約 60% であり、固形化粘土⑦では開始後 1 時間で 45% にとどまった。開始後 5 分、30 分、1 時間において、粉末区と固形化粘土区の細胞減少率に有意に差が見られた ($p < 0.05$)。

本試験では、粉末状態の改良型粘土に比べ、固形化した改良型粘土の防除効果が低いという結果となったが、これは固形化した粘土が全て溶け出していないためだと考えられる。固形化粘土区であっても *C. antiqua* の細胞数を約半分まで減少させているため、固形化粘土の大型化もしくは使用量を増やすことで長時間での防除効果が見込まれると推察する。

ウ 防除効果持続確認試験

各試験区の改良型粘土における *C. antiqua* の細胞減少率の推移を図 10 に示す。細胞減少率は開始後 60 分で 90% を超えていた。新しい *C. antiqua* 培養液に取り替える際に、コニカルビーカーを傾け、試験済みの培養液を廃棄する際に試験区②は形状が崩れた (図 11) ため、試験区②は 60 分で試験終了とした。

試験区⑥と⑦については、*C. antiqua* の培養液を取り替えた 60 分後に再度計数を行ったところ、細胞減少率は 90% を超えていた。

以上の結果から、固形化粘土は長時間にわたり防除能力を維持する可能性が示唆された。実海域において生け簀周りに設置することで、少しずつ溶け出し緩やかに細胞密度を減少させる効果が見込まれる。

【サブテーマ (②)】

1) R3 改良型マグネシウム製剤の *K. mikimotoi* への殺滅効果試験 (有効保存期間の検証)

K. mikimotoi 培養株に R3 改良型マグネシウム製剤 (図 12) を 6 段階の濃度で添加して 3 時間様子を観察した結果を図 13 に示した。*K. mikimotoi* は 1,000 及び 400 mg/L では添加後まもなくほとんどが不動・球形化細胞となり、いずれも 1 時間後にはほぼすべての細胞が溶藻して全滅した。推奨濃度である 200 mg/L では、1 時間後に生残率が 75%，2 時間後に 36%，3 時間後に 24% となった。開封 20 日後の結果を図 14 に示した。推奨濃度である 200 mg/L では、1 時間後に生残率が 30%，2 時間後に 9%，3 時間後に 4% となり、開封直後より殺滅に要する時間が短縮される傾向がみられた。次に開封 60 日後の結果を図 15 に示した。推奨濃度である 200 mg/L では、30 分後で既に生残率が 10% となり、1 時間後には全滅した。図 16 に推奨濃度の 200 mg/L における 1 時間後の殺滅率の経日的な推移を示した。これをみると、開封直後の殺滅率が最も弱く、開封 4 日後から 20 日後までは同様の殺滅率を示したのち、60 日後にはさらに殺滅率が上昇していた。一方、推奨濃度の半分である 100 mg/L では、すべての試験で殺滅率の上昇はみられず、開封 60 日後の 3 時間後でも 90% の生残率であった。このことから、開封後少なくとも 2 ヶ月間は、推奨濃度 (最小有効濃度) 自体は変わらず、殺滅に要する時間は開封直後より徐々に短縮される傾向がみられた。当初吸湿による化学的变化を受けて殺滅活性が低下する可能性を想定していたが、実際は殺滅効果は上昇した。この理由としては、吸湿により粒径が崩れやすくなり、結果的に細粒分が増えて *K. mikimotoi* との接触頻度が上昇したことが影響したものと推察した。いずれにしても、R3 改良型マグネシウム製剤については、密封状態で配布されれば効果は維持され、開封後の保存状態がある程度ラフな状態 (常温かつ通常湿度) であっても、少なくとも 2 ヶ月間は *K. mikimotoi* に対して殺滅効果を維持していると考えられる。

2) R3 改良型マグネシウム製剤の安全性の検討（対象種：底生生物）

マナマコとイトマキヒトデを用いて 96 時間の曝露試験を実施したが、いずれもへい死は確認されず（表 7）、弱った個体も確認されなかった。このことから、本マグネシウム製剤が散布後に海底へ沈降・堆積しても、主要なベントス相への悪影響はないものと推察された。

3 5ヶ年のまとめ

【サブテーマ（①）】

（1）中層散布赤潮に対する効果的な散布方法の検討

1) 塩ビ管を用いた中層への粘土散布

令和元年に塩ビ管を用いて改良型粘土を中層散布することで目的層における *K.mikimotoi* の防除効果を確認した。曳航試験では、曳航開始後すぐに中層散布器が水面まで浮上するため、停船状態での防除手段として有効な手段であると考えられる。

2) ステンレス管を用いた中層への粘土散布

ステンレス管に固定器具を用いて直接船に取り付けることで、航行しながら中層散布が可能であることが確認できた。

（2）防除持続効果持続の検討

1) 活性粘土の加工

シラスバルーンを用いた浮遊型、増粘剤に CMC 及びアラビアゴムを用いた固成型を作成した。

浮遊型については、粉末状態の改良型粘土と同様の防除効果が得られたが、実海域では波浪等の影響によって沈降が早まり、防除効果が低くなると考えられた。

増粘剤に CMC を用いた固成型は長時間にわたり形状を維持する固形化粘土を作成できたが、防除効果が低い結果となった。

また、増粘剤にアラビアゴムを用いた固成型は、形状維持能力が低いため、実海域での使用には耐えられないと考えられた。

2) 改良型粘土の加工

改良型粘土に蒸留水と CMC を添加し自然乾燥させた CMC 型と改良型粘土に海水と展着剤を添加し、100℃で 3 時間乾燥させた展着剤型を作成した。

CMC 型は浸漬試験を行うと、短時間で形が崩壊した。展着剤型は浸漬試験の結果から長時間にわたり形状が維持された。また、展着剤型は粉末状態の改良型粘土に比べると防除効果が低い、形状が長時間にわたり維持されているため、徐々に赤潮プランクトンの細胞密度を低下させる効果が見込まれた。

（3）飼育環境の異なる水産生物に対する改良型粘土の安全性確認試験

1) 屋内飼育

餌止め期間の異なる水産動物に対し、改良型粘土の暴露試験を実施した。供試魚には 1 kg のブリを使用した。餌止め期間は、餌止めなし、3 日間及び 9 日間とした。暴露濃度は改良型粘土(入来モンモリ+焼ミョウバン)を 500 ppm+50 ppm 及び 1,000 ppm+100 ppm となる量を散布した。

本試験では、改良型粘土 1,000 ppm+100 ppm において餌止めなし及び餌止め 3 日間のブリを暴露させたところ斃死が確認された。

2) 野外飼育

餌止め期間の異なるブリに対し、改良型粘土 1,000 ppm+100 ppm となる量を散布した。餌止め期間は餌止めなし、3 日間及び 9 日間とした。本試験では、全ての試験区で異常行動及び斃死は確認されなかった。野外飼育環境下における改良型粘土への暴露試験では餌止めの有無に関わらずブリの斃死は確認されなかったが、粘土散布により鰓に多少の刺激を与えていると考えられるため、生け簀周辺度は必要以上の濃度で散布しない必要がある。

【サブテーマ (2)】

1) 改良マグネシウム剤の調製及び有害プランクトンへの殺滅効果試験

平成 30 年度の試験において、推奨濃度である 200 mg/L とその半量である 100 mg/L の濃度が 5 種赤潮プランクトン (*Karenia mikimotoi*, *Cochlodinium polykrikoides*, *C. sp. Type-Kasasa*, *Heterosigma akashiwo*) に与える影響について検討を行った (松山ら 2019, H30 年改良型マグネシウム製剤を使用)。その結果 (松山ら 2019, 図 16) によれば、推奨濃度である 200 mg/L では、*K. mikimotoi* は 90% 以上殺滅されており、半量の 100 mg/L でも 60% 以上が殺滅されていた。次に *C. polykrikoides* は推奨濃度の 200 mg/L では完全に殺滅され、半量濃度の 100 mg/L でも 90% 以上が殺滅された。従って、本剤は *K. mikimotoi* のみならず、*C. polykrikoides* に対しても強い殺滅効果を示すと考えられる。一方で、*C. polykrikoides* の類縁種である *C. sp. Type Kasasa* では、推奨濃度では 50% 前後の殺滅率となっており、*C. polykrikoides* と比較すると感受性が低かった。ラフィド藻である *H. akashiwo* については、改良マグネシウム剤に対する感受性はほとんど認められなかった。データは示していないが、*Chattonella antiqua* に対する殺滅活性もほとんどみとめられない。以上のことから、本剤は無殻の渦鞭毛藻へ比較的広範囲に殺滅効果を示すことが期待される。本剤を添加された *K. mikimotoi* の細胞を図 17 に示した。マグネシウム製剤による殺滅メカニズムについては詳細に明らかにすることができなかったが、本剤を曝露された *K. mikimotoi* はまず細胞の表面にマグネシウム製剤の微粒子が付着したりすると遊泳性を失って徐々に沈降し、細胞の萎縮、色素体の脱色、細胞の球形化、細胞質の漏出という流れで徐々に溶藻する。溶解液のろ過液では殺滅効果がないことから、本剤との直接接触で殺滅効果が現れていると推定される。細胞表層へのマグネシウム粒子の付着により、細胞のイオン透過性にアンバランスが生じている可能性が推定される。

2) 改良マグネシウム剤の魚毒性の評価

H30 年に開発されたマグネシウム製剤と R3 年に改良されたマグネシウム製剤の魚毒性について表 7 に示した。H30 年改良型は *K. mikimotoi* に対する殺滅効果が高い反面、ヒラメとヒオウギガイ以外の水産生物に対する魚毒性が高かった (松山ら 2020)。最も感受性の高いブリで調べたところ、改良マグネシウム剤の存在下で、pH を魚の生存に安全な範囲まで低下させても延命効果が全く認められなかったことから、少なくとも pH 上昇によるアルカローシスがブリ稚魚の生残に悪影響を与えた可能性は考えられない。また、GF/C ろ過によって完全に懸濁物がろ過された海水では、pH が上昇し、かつ溶解したマグネシウムイオンはフィルターにトラップされていないにも拘わらず、魚毒性は完全に消失していた。よって、魚毒性は非溶解性の粒子の付着と閉塞によって引き起こされていると推定された。

こうしたことから、粒径を大きくすることで魚毒性を軽減できる可能性が示唆されたため、図 18 に示したように、令和 3 年度に粒径を調整した改良版を作成した。R3 年改良型は、H30 改良型の粒径を大きくするために、加工温度を変化させることにより粒径が大きく、粉体の混入率が 15% 程度と、粗粒分の割合が向上した。この R3 改良型マグネシウム剤を推奨濃度の 200 mg/L で添加してブリ稚魚の生残を調べたところ、R3 改良型マグネシウム製剤では魚毒性は認められず、改良によって粒径を大きくしたことで、魚毒性を抑制

することに成功した。同様に、アワビに対する毒性も消失していた。

このように、マグネシウム製剤の *K. mikimotoi* に対する殺滅効果が高いものの、魚毒性を引き起こすという欠点を回避するために、本事業内で改良に取り組み、*K. mikimotoi* への殺滅効果を維持した状態で、魚毒性を大きく低減させることに成功した。

3) マイクロコズム内におけるマグネシウム製剤の現地散布試験

室内曝露試験は閉鎖環境下での影響評価であるため、マグネシウム製剤の水質や魚毒性に対する影響を過大評価する可能性が高い。このため、半閉鎖的な現場海域での予備的な散布により、水質への影響を定量的に把握する必要がある。H30 年改良型と R3 年改良型のいずれも、現地での予備的な散布試験を実施した。

H30 年改良型については、令和 2 年度に大分県海域と長崎県でマイクロコズム試験（1 m 径もしくは 1 m 角の寸胴タイプ）を実施した（松山ら 2021, 図 20～26）。大分県海域では、散布直後に pH が最大で 9.5 付近まで上昇する水深帯が観察された。散布後 1 日経過後までに極大値が 9.0 まで減少したものの、対照区とほぼ同じ pH に回復するまでに 5 日間を要した。長崎県海域でも、散布直後から表層から底層（9 m 深）まで pH が速やかに上昇した。散布区の 5 m 以浅の pH は試験終了時の 24 時間後まで対照区よりも高い状態が続いたが、底層直上 1 m のみ、散布 1 時間半後に対照区と同等の値となった。長崎県海域では、マイクロコズム内にブリの稚魚を投入して生残を調べたところ、散布後 3 時間以内に全数が死亡するなど、魚毒性がみられた。試験終了後、各試験区の供試魚を解剖し、鰓の状況を観察すると、散布区の個体の鰓に散布したマグネシウム製剤を含む粘着物が付着している状況が観察された（松山ら 2021）。

これを受けて、令和 3 年度に、魚毒性を低減させた R3 年改良型を同様に大分県及び長崎県海域でマイクロコズム内散布試験に供した。大分県海域では、マグネシウム製剤散布直後に最大で 9.3 付近まで上昇する水深帯が観測された。また、散布後 5h までは表層から底層（約 15 m 深）まで散布区の pH が高く、底層よりも表層付近でその差が顕著であった。散布後 1 日経過後には、顕著な差は見られなくなったものの、散布区の pH が高い状況は継続していた。長崎県海域では、マグネシウム製剤散布直後、表層において pH が 9.5、2 m 層で 8.7 まで上昇していた。表層から 2 m 層まで pH が 8.5 を超える状態は散布後 30 分後まで確認されたが、その後徐々に対照区との差が縮小し、3 時間後には対照区とほぼ同じ pH となった。R3 改良型のマグネシウム製剤の散布試験では、H30 改良型マグネシウム製剤のようなブリ稚魚の異常行動は認められず、試験終了の 20 時間後まで全数が生残するなど（松山ら 2022, 図 36）、室内試験同様に高い安全性を確認することができた。この要因としては、R3 改良型マグネシウム製剤の粒径が大きく水中の浮遊時間が短いこと、また鰓の二時鰓弁への侵入や付着が弱いことが想定された。いずれにしても、水槽試験の結果と、半閉鎖系のマイクロコズム試験の結果は良く類似しており、実際の赤潮発生時に散布する場合の基礎的データが収集できた。

4) *K. mikimotoi* 防除剤としてのマグネシウム製剤の実用性について

本事業において、新たに *K. mikimotoi* に対する強く殺藻活性を有した防除剤が開発された。防除剤の安全性については、水生生物への毒性以外にも、環境中で沈降・堆積した場合のベントス相への影響も懸念される。特に、酸性物質の投入は硫化水素発生の誘発のみならず、海洋酸性化の議論とも関連して今後議論を呼ぶ可能性がある。しかしながら、マグネシウム製剤に関してはアルカリ性物質であり、元々海底の底質改良材として開発されてきた経緯もあるため（吉田・西野 2005）、底質中の AVS 含量が高い海域で赤潮駆除を行う場合は、沈降したマグネシウム製剤が pH をアルカリ側へ振ることで、硫化水素の発生を抑制し、結果的に二枚貝をはじめとしたベントス群集を保全する役割についても期待される。今後は複数の赤潮防除剤の優劣と海域特性を加味して、複合的な防除対策を確立す

ることも必要であろう。

5ヶ年の成果のまとめとしては、既存の粘土に焼ミョウバンを添加した改良粘土の性能と毒性評価が行われ、*Cochlodinium* 属のみならず、*Chattonella* 属や *K. mikimotoi* に対しても高い防除効果が認められた。本事業成果に基づき、鹿児島県では「改良型粘土を用いた赤潮被害防止マニュアル」の更新が行われ、令和3年度と令和4年度に八代海で発生した *C. antiqua* 赤潮と *K. mikimotoi* 赤潮に対して、漁業者が粘土散布を実施して赤潮防除対策を実施したところである。また、長崎県でも *K. mikimotoi* 赤潮発生時に改良粘土の試験的な散布を実施するとともに、「伊万里湾赤潮対策ガイドライン」の策定において、改良粘土による *K. mikimotoi* 防除が推奨されることとなった（伊万里湾赤潮対策検討会議2018）。また、改良マグネシウム製剤についても、本事業で得られた成果をとりまとめで、実海域での散布を想定したマニュアルの作成と提示に取り組んでいるところである。

引用文献

Kim D, Wencheng L, Matsuyama Y, Cho K, Yamasaki Y, Takeshita S, Yamaguchi K, Oda T.

Extremely high level of reactive oxygen species (ROS) production in a newly isolated strain of the dinoflagellate *Karenia mikimotoi*. *Eur. J. Phycol.* 2019; **54**(4): 632-640.

鹿児島県水産試験場. 粘土散布による赤潮被害防止マニュアル, 1981.

水産庁, 鹿児島県水産試験場. 粘土散布による赤潮被害防止マニュアル. 「赤潮対策技術開発試験成果集 (3)」, 水産庁, 東京, 1982; 31 pp.

鹿児島県水産技術開発センター. 改良型粘土を用いた赤潮被害防止マニュアル, 2018; 20 pp.

田原義雄, 西 広海, 中村章彦. 既存赤潮防除剤の効果的使用方法の検証及び赤潮防除剤の改良 平成 23 年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業赤潮・貧酸素水塊漁業被害防止対策事業「シャトネラ属有害プランクトンの漁業被害防止・軽減技術に関する研究」報告書, 水産総合研究センター西海区水産研究所, 鹿児島県, 熊本県, 長崎県, 九州大学, 片山化学工業研究所 2012; 3-9.

松山幸彦, 長副 聡, 井口大輝, 中里礼大, 都留久美子, 山本佳奈, 平江 想, 山砥稔文, 宮田翔也, 高杉朋孝, 森島義明, 西 広海, 田中俊也, 渡辺国男. 2) 有害赤潮の防除及び漁業被害軽減のための技術開発 ②生簀等の魚介類を守る技術開発と実証 ウ. 改良粘土散布の実証試験及び新たなマグネシウム剤の開発, 対策マニュアルの作成. 平成 30 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 赤潮共同研究機関, 2019; 285-303.

松山幸彦, 長副 聡, 中里礼大, 井口大輝, 山砥稔文, 山本佳奈, 中島吉洋, 宮田翔也, 吉満 敏, 田中俊也, 小田康太, 渡辺国男. ③改良粘土散布の実証試験及び新たなマグネシウム剤の開発, 対策マニュアルの作成. 2) 赤潮の防除・被害軽減手法の開発 イ. 生け簀の魚介類を守る技術の開発・実証 . 平成 31 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 赤潮共同研究機関, 2020; 318-336.

松山幸彦, 長副 聡, 中里礼大, 井口大輝, 山砥稔文, 山本佳奈, 中島吉洋, 東條智仁, 高杉朋孝, 吉満 敏, 渡辺国男, 田中俊也. ③改良粘土散布の実証試験及び新たなマグネシウム剤の開発, 対策マニュアルの作成. 2) 赤潮の防除・被害軽減手法の開発 イ. 生け簀の魚介類を守る技術の開発・実証 令和 2 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 赤潮共同研究機関, 2021; 278-297.

松山幸彦, 宮村和良, 野田 誠, 山砥稔文, 山本佳奈, 中島吉洋, 吉満 敏, 高杉朋孝, 東條智仁, 田中俊也, 小田康太, 渡辺国男. ③改良粘土散布の実証試験及び新たなマグネシウム剤の開発, 対策マニュアルの作成. 2) 赤潮の防除・被害軽減手法の開発 イ. 生け簀の魚介類を守る技術の開発・実証 令和 3 年度漁場環境改善推

進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 赤潮共同研究機関, 2022 285-307.
吉田 彰, 西野伸幸. マグネシウム系無機材料による底質・水質の浄化技術. *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan* 2005; **12**: 548-553.
伊万里湾赤潮対策検討会議. 伊万里湾赤潮対策ガイドライン 2018; 17 pp.



図 1 中層散布器

表 1 吐出量試験の試験条件

単位 : kg/200L				
	①	②	③	④
入来モンモリ	1.0	2.0	3.0	4.0
焼ミョウバン	0.1	0.2	0.3	0.4

表 2 水中ポンプ仕様(50DWT6.4SA...荏原製作所製)

相	出力	周波数	口径	ポンプ	
				吐き出し量	全揚程
単相	0.4kw	60Hz	50mm	235L/min	3.0m
				30L/min	11.7m



図 2 固定器具

表 3 固形化粘土の配合

試験区	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
入来モンモリ (g)	10	10	20	26.4	26.4	25.2	23.2	23.2
焼ミョウバン (g)	1	1	2	2.6	2.6	2.5	2.3	2.3
展着材 (含有量)	0	0	0	0.9 (3%)	0.9 (3%)	2.3 (7.5%)	4.5 (15%)	4.5 (15%)
濾過海水 (mL)	11	22	11	15	30	15	15	30

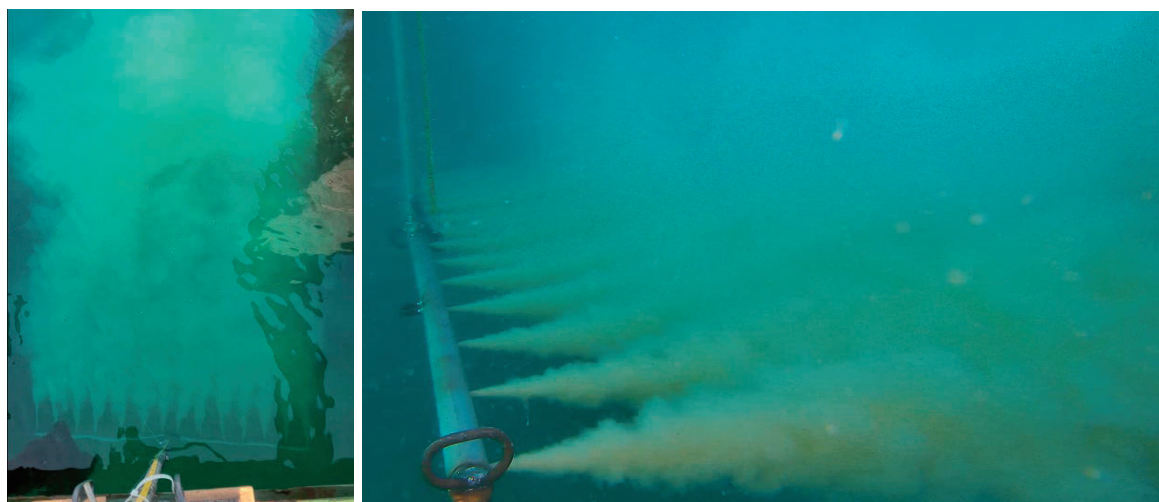


図 3-1 散布状況(海上) 図 3-2 散布状況(水中)

表 4 試験 1)-1 における改良型粘土の含有量及び 1 秒間あたりの吐出量

各試験区に溶かしている量					
	入来モンモリ (kg/L)	焼ミョウバン (kg/L)		入来モンモリ (kg/秒)	焼ミョウバン (kg/秒)
①	0.005	0.0005	1 秒あたりに出る量	①	0.0085
②	0.01	0.001		②	0.017
③	0.015	0.0015		③	0.0255
④	0.02	0.002		④	0.034

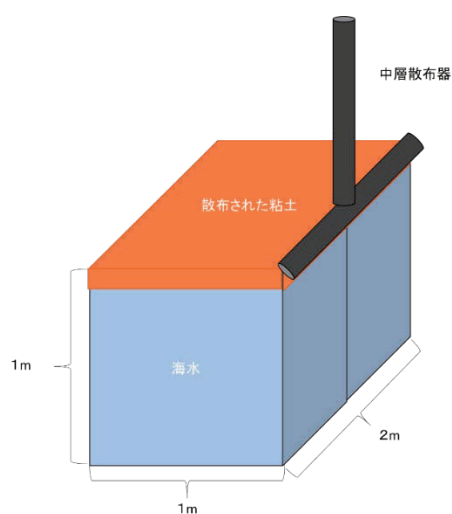


図 4 1 m 層までの散布イメージ

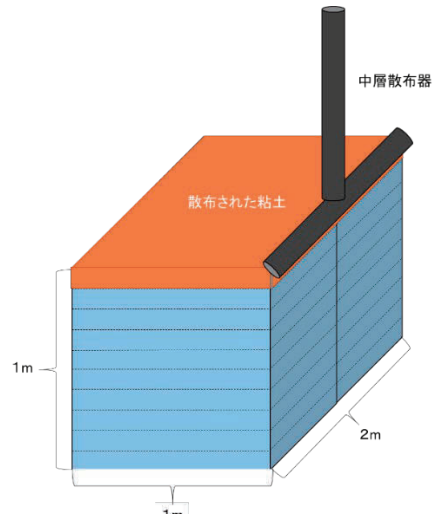


図 5 10 cm 層での散布イメージ

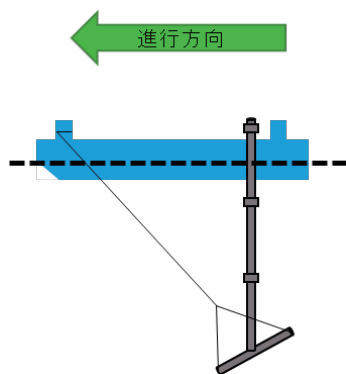


図 6-1 取り付けイメージ

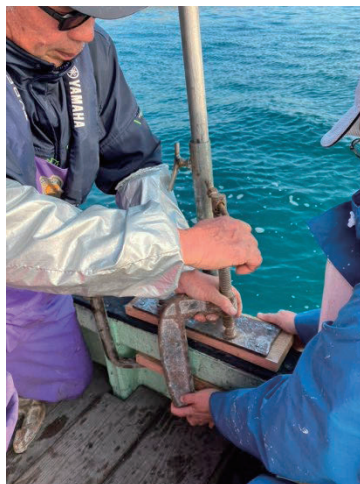


図 6-2 固定器具取り付け



図 6-3 設置写真



固形化粘土①



固形化粘土②



固形化粘土③



固形化粘土④



固形化粘土⑤



固形化粘土⑥



固形化粘土⑦



固形化粘土⑧

図 7 乾燥後の固形化粘土

表 5 乾燥前後における粘土重量

単位 : g

	乾燥前重量	乾燥後重量
③	1.0	0.74
	2.0	1.34
	3.0	2.00
④	1.0	0.69
	2.0	1.39
	3.0	2.08
⑥	1.0	0.09
	2.0	1.38
	3.0	2.08
⑦	1.0	0.69
	2.0	1.36
	3.0	2.06