

ファインバブルを用いた赤潮防除システムの開発 ～実用化に向けたスケールアップ技術の構築～

五島 崇*, 吉村 幸雄¹⁾、藤田 純一¹⁾、赤塚 麻美²⁾、今吉 雄二²⁾

*国立大学法人鹿児島大学
鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40
tgoshima@cen.kagoshima-u.ac.jp

1) 鹿児島県工業技術センター

2) 鹿児島県水産技術開発センター

要旨

魚類養殖業に対して甚大な被害をもたらす赤潮の対策として、アマモなど海中に生育した藻類による赤潮発生の予防法、および緊急時に養殖魚の被害を低減する目的で薩摩川内市入来町に産出する活性粘土を用いた赤潮防除剤による発生した赤潮の駆除法がある。本研究では、ファインバブル(FB)技術を用いて得られた赤潮防除研究の成果を実用化するため、実際の大規模スケールにて使用できる FB 発生装置の設計と予防・駆除効果を最大化するための最適なシステム操作法の構築を図った。前者については、高ガス流量タイプの FB 発生器を設計することで、低ポンプ吐出圧にも関わらず高い総括物質移動容量係数 K_La を実現できることがわかった。後者については、赤潮駆除法を直径が 80mm、高さが 1m 超の塔型水槽を用いた赤潮暴露試験を実施し、構造を最適化設計した FB ノズルを用いて赤潮防除剤を含むモデル海水を暴露塔へ多段導入することにより、従来の赤潮防除剤散布法に比べて高い赤潮駆除効果と防除剤の安定分散化能が示唆される結果が得られ、実現場で利用できる FB 導入法の基盤技術を提案することができた。

1. 緒言

鹿児島県では、県下各地で発生し魚類養殖業に対して被害をもたらしてきた赤潮の対策として、アマモなど海中に生育した藻類による赤潮発生の予防法、および緊急時に養殖魚の被害を低減する目的で薩摩川内市入来町に産出する活性粘土を用いた赤潮防除剤による発生した赤潮の駆除法がある。前者は藻類の生育環境を整備し維持することが既存の方法では難しく、実用が進んでいない。一方で後者は、一時的な駆除効果があるものの防除剤が短時間で沈降するために散布回数の増加による手間とコスト等が課題となっている。鹿児島大学は水産技術開発センターと協働してファインバブル(FB)技術の利用に着手し、FB 発生装置と赤潮防除剤を組み合わせることで、気泡が持つ粉碎能、吸着能と pH 低下能によって防除剤が 1 次粒子まで微細化し、泡へ防除剤と赤潮プランクトンが吸着して長時間海水中に浮遊して効果が持続すること、また CO₂ 気泡の溶解収縮に伴い海水 pH が局所的に低下することによって、これまで以上に高い駆除効果を示すことを見出した(特願 2020-92851)¹⁾。使用した FB 発生装置(US 特許, Patent No.11110414)²⁾は液体ポンプと気泡発生ノズルのみを有するシンプルな構造であるため、大規模処理が見込める仕様となっている。

我々は、鹿児島大学、工業技術センター、水産技術開発センターで連携した研究グループとしてファインバブル赤潮防除研究会を立ち上げ、実環境で利用できる赤潮駆除法の開発を目指し検討を進めてきた。R3 年度は、中規模レベルで使用可能な FB 発生装置を工業技術センターが試作し、赤潮防除効果の実証データを取得した。本赤潮駆除法によって、従来の防除剤よりも効果時間が持続することを示唆する結果が得られた。R4 年度は、海洋域でできるように実用化に向けた検討を進めてきた。主な 4 つの課題を以下に示す。①FB 発生装置は船上での短時間操作、または大規模操作に対応できるように、これまでの循環操作から単通操作に変更して同等の効果を生み出せる装置に改良する。②本 FB 発生装置を用いて赤潮

防除剤を有害プランクトンに暴露した検証をおこない、本 FB 法による駆除効果の有用性を確認する。③本駆除法の制御技術を構築し、駆除効果を最大化するための最適な操作法を提案する。④実現場を用いて本システムの実証実験をおこない、FB 赤潮防除法を開発する。開発現状として、①形状や大きさの異なる気泡発生部を製作し、供給流量 1t/h の単通操作でも循環操作と同等の赤潮粉碎能と高密気泡発生能を有するノズル構造の設計に成功した。②本赤潮駆除法の有用性確認に取り組んでいる。しかし、まだ実験室レベル（液容量が数 10L）での検証段階である。

一方で、FB 技術は(海)水中の生物や植物の成長促進に大きな効果が生じる事例が数多く報告されているため、FB を用いることで海草の生育環境が改善され、かつ成長を促進することで赤潮予防効果を高めることが期待される。我々はこれまでに、FB 発生装置を用いたアマモの生育実験を行ったところ、アマモの茎と根の長さが通常の空気供給法に比べて 1.3 倍程度増加した。もし FB 技術を予防および駆除へ併用した赤潮時防除システムを開発できれば、赤潮除去剤を散布する回数の増加による手間とコスト等を低減できることに加えて、水産業だけでなく養殖業を中心とした生産性の向上が見込める。予防法として FB 技術を活用した実用化を達成するうえでの課題は、大規模スケールにて海草の生育に使用できる高ガス流量タイプの FB 発生装置の設計製作、および予防効果を最大化するための最適なシステム操作法の提案である。

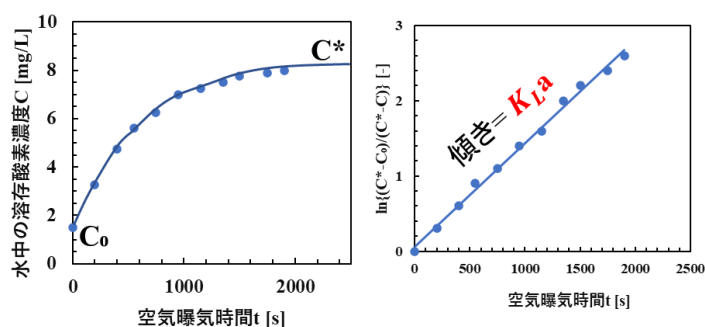
そこで本研究では、海洋域で使用するために少なくとも液容量 1t に対応できる FB 発生装置の設計、スケールアップ検証および本防除システムの操作法を構築し、鹿児島発の FB 赤潮防除システムを開発することを目的とする。取り組み課題は(A)FB 発生ノズル設計、(B)赤潮の予防・駆除効果を最大化するための最適なシステム操作法の提案、とする。

2. 実験

(A) FB 発生ノズル設計

(特許性に配慮し、ノズル設計の詳細、ガス流量や液流量の操作条件は割愛する。)

大ガス流量タイプの FB の設計を実現するためには、ポンプ 2 次側に FB を生成させるためのガス導入部を有する FB ノズルの設計が求められ、またガス供給は自吸式であることがより好ましい。今回、これらの要求を満たす新たな FB ノズル X を提案した。FB ノズルの性能を明らかにするため、気体置換法を用いて溶存酸素濃度の時間変化を調べ、総括物質移動容量係数 K_La によるノズル性能評価をおこなった。水槽内に水道水を所定量入れ、ガスポンプを用いて N_2 を曝気し、低溶存酸素濃度水を調製した。FB 発生装置を稼働して水槽内の水を循環運転し、FB 群を水槽内に発生させた。溶存酸素濃度(DO)メーターを水槽に設置して DO 値の経時変化を記録した。下記の式を用いて K_La を算出した。比較として、赤潮駆除試験に用いてきた FB ノズル Y(US 特許, Patent No.11110414)と高い気体溶解性を有するウルトラファインバブル発生用の FB ノズル Z(特許第 7094026 号)³⁾を用いて、低液ポンプ吐出圧一定の下でガス供給流量をパラメータとして気体溶解性能を比較した。ガス流量の大小関係は、ノズル X(ガス流量大)>ノズル X(ガス流量小), ノズル Y>ノズル Z である。



$$\ln \left(\frac{C^* - C_0}{C^* - C} \right) = K_L a t$$

$C^* \left[\frac{mg}{L} \right]$: 水中での空気中酸素の飽和濃度

$C_0 \left[\frac{mg}{L} \right]$: 水中での空気中酸素の初期濃度

$K_L a [s^{-1}]$: 液相基準の総括物質移動容量係数

$t [s]$: 空気曝気時間

(B) 赤潮駆除システムの最適化検討

(特許性に配慮し、使用した FB 発生ノズルの設計法や運転条件、また解砕した赤潮防除剤の粒子径や粒子密度、および FB の気泡径や気泡密度など詳細は割愛する。)

赤潮駆除法を直径が 80mm、高さが 1m 超の塔型水槽を用いたこれまでの赤潮暴露試験では、暴露塔の底部からのみ赤潮防除剤の含む FB 水を導入したが、赤潮防除剤と赤潮プランクトンによる重力の作用と FB による浮力の作用がつり合い、暴露塔の下部でのみ高い赤潮駆除効果を示す結果が得られていた。そこで今回、暴露塔の底部と中央部の 2 か所から FB 水を導入する方法を用いた。暴露塔内に所定の海水と赤潮プランクトンを入れ、赤潮防除剤（入来モンモリ+焼ミョウバン）を有効濃度（1,000ppm+100ppm）の 1/3 量となるように導入した。（Ⅰ）従来の散布法と（Ⅱ）提案する新規の FB 導入法に加えて（Ⅲ）FB ノズル無しの多段導入法を行い、赤潮プランクトンの死滅率の経時変化を塔の上部、中部、下部について調べた。

(C) アマモの生育試験（生育試験中のため、3. 結果及び考察では報告データ無し。）

100L スケールの小型水槽を用いてアマモの生育試験を開始した。（A）で設計した FB ノズルは ton スケール仕様のため本試験では比較的小スケールで利用できるノズル Y とノズル Z を用いた。海砂と培養土を収容した水槽内に鹿児島県与次郎ヶ浜長水路から採集したアマモを植え、モデル海水をかけ流しする条件の下で FB 水を供給した。Fig. 1 に、生育中のアマモの様子を示す。

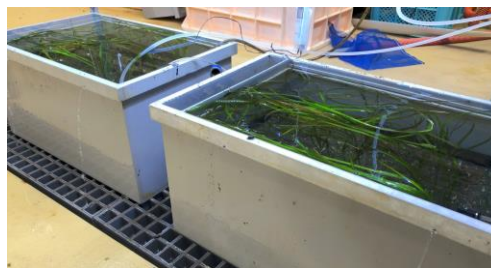


Fig. 1 生育中のアマモの様子（左：大気泡、右：FBs）

3. 結果および考察

(A) FB 発生ノズル設計

3 つの FB ノズル X, Y, Z を用いて得られた総括物質移動容量係数 K_La の値は、それぞれ以下の関係となった。 K_La の値を括弧[]で示す。

ノズル Z[0.0085] $\geq$ ノズル X(ガス流量大) $>$ ノズル Y [0.0036] $\gg$ ノズル X(ガス流量小)
水道水を用いた場合に各種 FB 発生器の K_La は、一般に 10^{-3} のオーダー程度になることが知られている⁴⁾ため、今回用いた評価装置と得られた結果は妥当であることが確認された。参考として、ノズル Y を用いて得られた試験結果を Fig. 2 に示す。

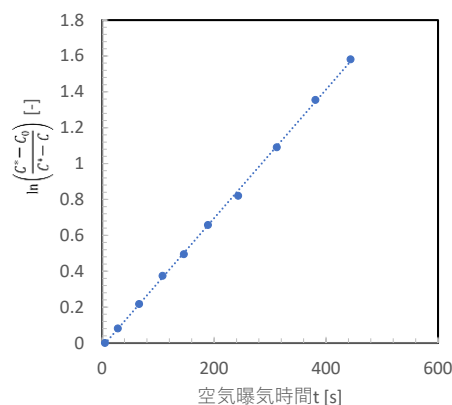


Fig. 2 気体置換法を用いたノズル Y の気体溶解性能評価

ノズル X について、ガス流量の増加に伴い K_{La} は増加し、気体の急速溶解が支配的なノズル Z と同等な値となった。ノズル Y は加圧溶解式的一种であるため気体の溶解度に依存したガス供給量の上限值が決定される。ノズル X は理論上気体の溶解度に依存した上限値はなく、今回設定したノズル X (ガス流量大) のガス流量はノズル Y の数倍となる。また、ノズル X は装置構造の特性上スケールアップをすればするほど、粗大な気泡生成を抑制しつつガス供給流量を増加できるという特徴を有しているため、FB の溶解を促進しノズル Z と同様の K_{La} が得られたと考えられる。一方で、ノズル Z はウルトラファインバブルの発生に適性が高いため、マイクロバブルを含む FB 群の発生量(液の濁度)はノズル X $\gg$ ノズル Z となる。

以上から、アマモの生育など水産分野で利用するために必要条件となるスケールアップ適性の高い FB 発生ノズル X の設計が可能となった。

(B) 赤潮駆除システムの最適化検討

(特許性に配慮し、死滅率が 90%を超えるように最適化された運転条件での試験結果は記載しない。)

Fig. 3 に、FB 導入法と散布法における赤潮プランクトン死滅率の経時変化の一例を示す。(I) 従来の散布法では、塔上部にて暴露時間が 5 分から 10 分では死滅率 50% 程度に達したが、それ以外の暴露時間および塔中部と塔下部では死滅率が 20% を下回った。一時的な死滅率の増加は、赤潮防除剤の散布により一旦赤潮プランクトンが塔下部まで運ばれ、死滅効果が低いことでプランクトンが上部に泳いで戻ってきたと推察される。(II) FB ノズルを用いた多段導入法では、暴露時間とともに死滅率が単調に増加し、かつ塔上部、中部、下部にて同程度の値となった。また、(III) FB ノズル無しでの多段導入法では、死滅率は (I) と同程度であるものの (II) と同様に塔高さによらず同程度の値となった。

以上より、(II) の FB 多段導入法は暴露時間の増加により死滅率がさらに増加することが予想され、FB ノズルを用いた高い赤潮防除剤の粉碎能と高気泡密度での気泡生成能にもとづき、暴露塔へ FB 水導入法を多段化したことで、対象とする水深で赤潮プランクトンの防除効果の維持が図られる可能性があることがわかった。

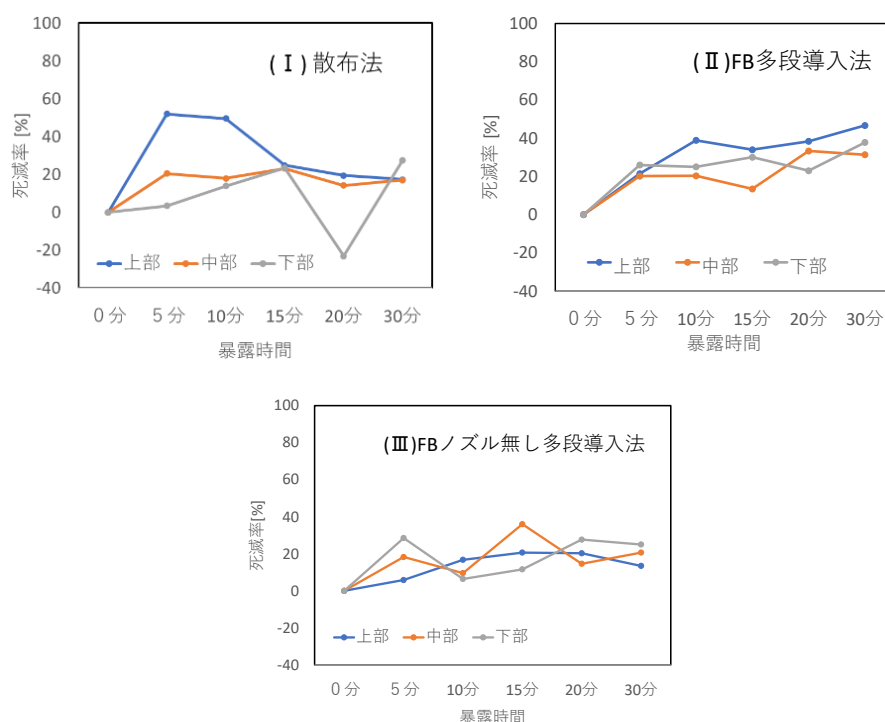


Fig. 3 赤潮プランクトン死滅率の経時変化

4. 結論

魚類養殖業に対して甚大な被害をもたらす赤潮の対策として、ファインバブル(FB)を用いた赤潮防除システムの設計を目指し、実用化に向けたスケールアップ技術の構築を図ることによって以下の知見が得られた。

- ・高ガス流量タイプのFB発生器を設計することで、低ポンプ吐出圧にも関わらず高い総括物質移動容量係数 K_La を実現できた。
- ・構造を最適化設計したFBノズルを用いて赤潮防除剤を含む海水を暴露塔へ多段導入することにより、有効濃度(1,000ppm+100ppm)である1/3の濃度の粘土散布かにおいて、従来の赤潮防除剤散布法に比べて高い赤潮駆除効果と防除剤の安定分散化能が示唆される結果が得られた。

実際の大規模スケールにて使用できるFB発生装置の設計と予防・駆除効果を最大化するための最適なシステム操作法の基盤が構築できたと考えられる。今後これら検証結果をもとに鹿児島発のFB赤潮防除システムを実装したい。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成をしていただいた公益財団法人サンケイ科学振興財団に感謝いたします。また、本研究におけるアマモの採集および提供につきまして、国立大学法人鹿児島大学水産学部の寺田竜太教授に深く感謝申し上げます。

6. 参考文献

- 1) 五島崇, 吉満敏, 高杉朋孝, 宮田翔也, 森島義明, 西広海: 赤潮防除剤、赤潮防除剤の製造装置、赤潮防除剤の製造方法及び赤潮防除方法, 日本, 特願 2019-113265 (2020 年 5 月 28 日), 特開 2021-187764 (2021 年 12 月 13 日)
- 2) Takashi Goshima: BUBBLE GENERATION DEVICE, TUBULAR MEMBER, BUBBLE GENERATION METHOD, AND METHOD FOR MANUFACTURING BUBBLE GENERATION DEVICE, United States, PCT/JP2017/026463 (2019 年 1 月 24 日), WO2018/021182 (2018 年 2 月 1 日), US Patent No.US11110414 (2021 年 9 月 7 日)
- 3) 五島崇, 高倉蓮, 深谷天: 気泡形成装置, 日本, 特願 2019-523436 (2018 年 5 月 23 日), WO2018/225510 (2018 年 12 月 13 日), 特許第 7094026 号 (2022 年 6 月 23 日)
- 4) Nishino, et al., 日本混相流学会年会講演会 2006 講演論文集, 276 (2006)

Development of the Method to Control a Red Tide Using Fine Bubbles

Takashi Goshima*, Yukio Yoshimura¹⁾, Junichi Fujita¹⁾, Mami Akatsuka²⁾, Yuji Imayoshi²⁾

*Kagoshima University

tgoshima@cen.kagoshima-u.ac.jp

1) Kagoshima Prefectural Institute of Industrial Technology

2) Kagoshima Prefectural Fisheries Technology Development Center

As a countermeasure against red tides, which cause severe damage to the aquaculture industry, there are methods to prevent the occurrence of red tides by algae such as eelgrass growing underwater, and methods to eradicate red tides using active clay produced in Iriki, Satumasendai City, with the aim of reducing damage to farmed fish in emergencies. This study aimed to design an FB generator that can be used at actual large scales and construct an optimal system operation method to maximize prevention and eradication effects, for commercializing the findings of research to control red tides using Fine Bubble (FB) technology.

For the former, it was found that designing a high gas flow rate type of FB generator could achieve a high overall mass transfer coefficient (K_La) despite low pump discharge pressure. On the other hand, for the latter, red tide exposure tests using the column with a diameter of 80mm and a height of more than 1m was conducted. By introducing model seawater containing red tide control agents into the exposure tower in multiple stages using an optimally designed FB nozzle, it was confirmed that this method achieves a higher red tide eradication effect and stable dispersion of the control agent compared to the conventional method to apply a red tide control agent, thereby proposing the core technology of an FB introduction method that can be used in actual field conditions.