

赤潮、貝毒対策としての環境改善への取組について

峰寛明（株エコニクス）、不動雅之（水産庁計画課）、牧野稔智（（一社）全日本漁港建設協会）、末永茂則（大石建設株）、今井一郎（北大院水産科学院）、稲葉信晴（寒地土木研究所）、長野章（環境維持保全工法研究会）

1. はじめに

平成30年6月に政府は、水産政策の改革を定め、同年12月には漁業法が70年ぶりに改正された。その大きな柱として、養殖業の振興を目的とした海面利用制度の見直しがある。それを受けて、水産基盤整備では毎年の予算で養殖業の推進のための防波堤や支援施設整備に重点がおかれている。また養殖技術においては、漁業現場に新技術を普及加速するため、水産新技術現場実装推進プログラムが定められている。しかし、基盤整備及び技術推進分野においても養殖業の最大のリスクの一つである赤潮・貝毒の発生については対策がなされていない。

本報告では、赤潮・貝毒の発生への対策として、近年の研究、対策手法及び基盤整備のあり方について述べるものである。

2. 赤潮・貝毒発生状況と対策⁽¹⁾

1) 発生状況

植物プランクトンのうちある種は増殖や集積により赤潮を形成して魚介類を大量斃死させ、またあるものは細胞内に毒を持ち食物連鎖を介してその毒が二枚貝類、動物プランクトンや魚介類等の高次生物に転送・蓄積され、人間を含む高次捕食者（魚類、鳥類、海産哺乳類）を死亡させる等、大きな問題の原因となっている。

加えて、人間活動と赤潮の発生は大変密接な関係にあり、沿岸域の富栄養化と赤潮は地球環境問題として捉え対応を考える必要がある。

赤潮被害をもたらすプランクトンのうち *Chattonella*、*Heterosigma* などは生活史の一部を休眠期細胞(シスト)で過ごすものがある。シスト

は海底に長く留まることから継続的な赤潮発生の一因となる。これら「シスト型」赤潮に対し、*Karenia*、*Heterocapsa* などはシストを形成せずに栄養細胞として水中で生活史を終える。

対策を講じる場合は要因となるプランクトンの生活史に加え対象海域の物理特性や漁業制約条件等を踏まえた上で工法を検討する必要がある。

2) 養殖業振興施策における赤潮・貝毒対策

漁港漁場整備長期計画及びそれに基づく令和3年度政府予算の水産基盤整備の分野では、養殖業振興のために生産拠点を総合的に整備することと、養殖適地確保のため沖合域において静穏水域を整備することとしている。また、生息環境整備として藻場や干潟の整備を行っている。しかし、赤潮・貝毒の対策として位置づけた整備となっていない。

養殖業の技術推進分野では、施設、給餌清掃等、成長コスト管理、リスク管理及び水揚げの一連作業を技術開発し推進することとしている。その中でリスク管理として、赤潮の予測等表示技術が掲げられており、これから開発実証する段階である。しかし、漁業者が望む対策は、赤潮の発生情報の取得に関する技術ではなく、赤潮の発生制御の技術である。

赤潮・貝毒は養殖業において大きなリスクで、このリスク管理は、基盤整備においても技術推進においても、リスクの発生コントロールを行うべきと考える。

3. 赤潮・貝毒の発生原因の除去

1) 基本原理

赤潮、貝毒被害に対しては有害有毒プランクト

ンの増殖抑制、または低減がその目標となる。しかし、既に大量発生した有害有毒プランクトンを除去することは科学的にもコスト的にも非現実的であることから、生物を活用してこれらの除去・抑制を行い、赤潮や貝毒、アオコ等の発生リスクを低減することを基本とするべきである。

そのため、筆者らは、対策の工法としては現在①薄層浚渫によるシスト除去②藻場やアマモ場の造成による貝毒発生予防（増殖抑制細菌の供給場）③海底耕耘による水柱への珪藻添加の3方法について効果やコストの検証、計画技法や環境影響および副次的な環境効果などを検討している。

2) シスト除去

(1) シストを形成するプランクトン

赤潮の原因であるシャットネラ (*Chattonella*) は、海底の表層より厚み 3 cm のところにシストを多く形成し、特定の海域にシストが高密度で分布しているところがある。

この海域のプランクトンのシストを除去することにより湾全体のシスト密度を下げ、赤潮の発生を抑える対策が効果的であると考えられる。



図-1 シャットネラの生活史

赤潮の発生海域は、毎年発芽した有害なプランクトンの量を測定し、大量のプランクトンが発生した海域から養殖場に到達するまでに赤潮対策の措置を講じる事ができるが、養殖場の横で突然、赤潮が発生すると赤潮対策を講じる暇もなく、大規模な被害にあってしまう。

これは、前年に赤潮が発生後、シストが養殖場近くに高密度で堆積していた為とみられる。

養殖場を赤潮発生の際に移動させるには、労力と費用が掛かるため、こういった海域に薄層浚渫技術を施すのも一つの赤潮対策と思われる(図-1)。

(1) サマリクリーナー(SMC)工法

サマリクリーナー (SMC) 工法は、海底の土砂及び浮泥を濁らず (密閉式の為 2 次拡散することがなく) 底質の表面から 10 cm 除去する新技術である。

サマリクリーナー工法は、密閉吸引式薄層浚渫で海底の底質を表層から厚み約 25 cm をジェットでかき混ぜ、本体内に舞い上がった細かいシルトだけをサンドポンプで吸い上げて、底質を厚み約 10 cm 除去できる (図-2)。

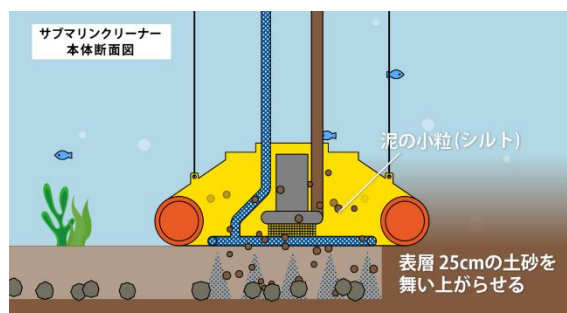


図-2 海底での施工の様子 (模式図)

また、大型の起重機船が入らない漁港内では、潜水士船 (SMC 専用船) にサブマリクリーナーを取付けてシストの除去も可能である (図-3)。



図-3 ミドルクリーナー (φ2,500)

(2) 藻場、アマモ場による赤潮・貝毒発生予防

赤潮や貝毒の原因プランクトンを殺滅、増殖阻害する細菌 (増殖抑制細菌) を用いた生物学的防除に関する研究が世界各地で進められている。これら細菌は、赤潮消滅過程の海水中で大幅に増加

する事が確認されており、赤潮消滅における重要な役割が指摘されている。一方で、具体的な現場への応用手法については、未だに確立していないのが現状である。近年、増殖抑制細菌が1gのアマモ葉体あるいは海藻あたり最大で 10^8 CFU (colony-forming unit) と高密度で生息する事やそれら細菌を含むアマモ場海水の *Chattonella* 赤潮抑制効果が示され、新たな赤潮・貝毒の発生予防対策としてのアマモ場や藻場の造成が提案されている⁽²⁾。アマモ場や藻場は「海の揺り籠」と呼ばれ、様々な魚介類の産卵場や仔稚魚期の生育場、餌場としての重要な役割を担う事は周知の事実であるが、栄養塩の吸収や懸濁有機物の吸着・分解による水質浄化の場としても機能しており、沿岸生態系の環境悪化を軽減している事なども知られている。最近では、アマモ場・藻場の炭素固定機能(ブルーカーボン)が評価され、地球温暖化の緩和対策としてもこれら沿岸生態系の回復・増大が肝要という世界的な動きも拡大している。

今後は、赤潮・貝毒予防機能という新たな機能を含めた多岐にわたるエコロジカルサービスを享受する上で、アマモ場や藻場をどのように維持・管理すべきかの議論、そして、それら機能の理解を深めるための検討が必要である(図-4)。

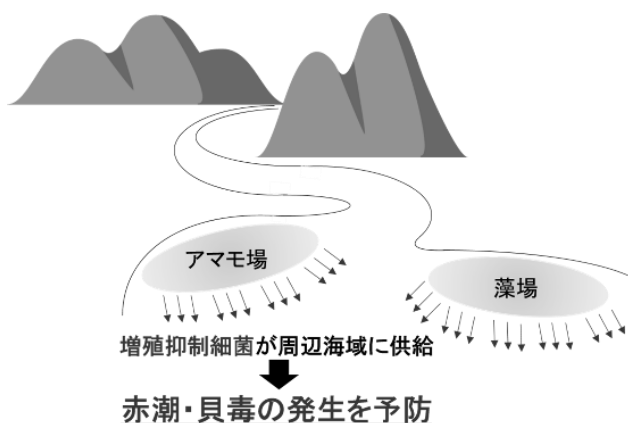


図-4 新たなアマモ場・藻場のエコロジカル機能

4. 湾奥水域(港湾漁港)の赤潮リスク対策事例

1) 湾奥水域の赤潮リスク⁽³⁾⁽⁴⁾

港湾等の閉鎖的な浅海の内湾域において夏季を

中心に成層が起こると、躍層下部～底層は貧酸素化し海底泥からアンモニウム塩やリン酸塩等が溶出して底層水中に蓄積される。有害赤潮鞭毛藻類には日周鉛直移動を行なうものが多く、昼は表層付近で光合成を行い、夜間は底層あるいは海底に到達して豊富な栄養塩を吸収する。一方で強力な競争者である珪藻類は遊泳能力を持たず、表層の貧栄養環境中での生息を余儀なくされるので、本来は高い増殖能力を持つが日周鉛直移動を行なう鞭毛藻類に比べ競争的に不利となる。この事により、本来は競争的弱者であるはずの鞭毛藻類が赤潮を形成する事が可能となる(図-5)。

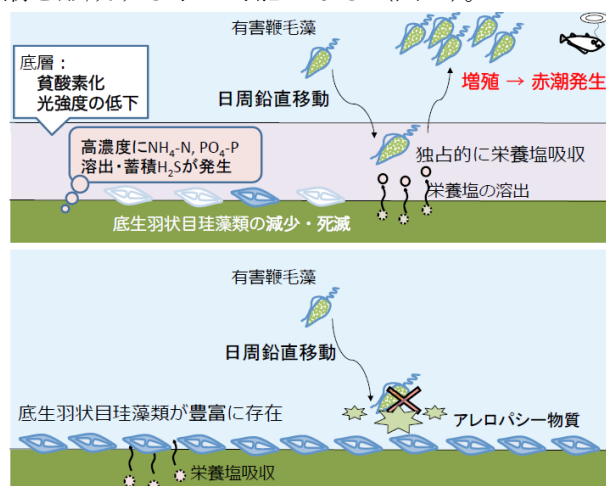


図-5 閉鎖湾奥域における赤潮リスク

また、水深を確保するために浚渫が行われた沿岸域の港湾においても底層の貧酸素化や無酸素化が起こり、それに伴い *Chattonella* 等が赤潮を形成する。広島県福山市の田尻港はそのような港湾であり、以下にそのような鞭毛藻赤潮の発生を紹介する⁽³⁾。また、密閉容器(深さ3m)を用いて現場でメソコズム実験を行い、珪藻類の影響を評価した結果を述べる。

広島県福山市田尻港においては2017年6月22日～7月31日に海底堆積物試料を採取し、同時に水温、塩分、Chl. *a* 蛍光値、溶存酸素、光強度を測定した。堆積物試料中の底生珪藻と珪藻休眠期細胞は、終点希釈法(MPN法)と落射蛍光顕微鏡を用いた直接検鏡法により計数を行った。

田尻港の海底泥中には珪藻休眠期細胞が $6.0 \times$

10² – 6.7 x 10⁴ MPN /g 湿泥で検出され、7月7日と21日に高密度であった。底生羽状目珪藻は、直接検鏡法で 0 – 1.5 x 10⁴ 細胞 /g 湿重、培養計数法で 0 – 1.8 x 10² MPN /g 湿重であり、共に7月12日以降検出されなかった。水柱の植物プランクトンは7月7日に赤潮渦鞭毛藻の *Prorocentrum shikokuense* が卓越し、12日は珪藻 *Skeletonema* spp. が優占した。7月31日にはラフィド藻 *Chattonella antiqua* が2m層で 8.3x10³ 細胞/mL の赤潮状態となった。溶存酸素は 0.6 – 13.4 mg/L の範囲であり、底層で7月12日と31日に 1 mg/L 以下で、底生珪藻は消失した。このように、底層の貧酸素化で珪藻類が死滅し、栄養塩が底層に溶出すると、日周鉛直移動する鞭毛藻赤潮の培養水域になると考えられる。

高密度の珪藻休眠期細胞 (1.5x10⁵ MPN /g 湿泥) を含有する海底泥をメソコズムの海水中に接種し、それを2017年7月24日から31日まで広島県田尻港の棧橋に設置した。メソコズムの中と外で環境要因を測定して海水サンプルを採取し、珪藻や *Chattonella* 等の植物プランクトンの計数を行った。また栄養塩類の濃度も測定した。

メソコズムの外で有害ラフィド藻 *Chattonella* が顕著に増加した (最大 8.3x10³ 細胞/mL)。一方、メソコズム中では珪藻類が優占し、*Chattonella* は非常に低い密度で推移した。メソコズムは浅く、珪藻休眠期細胞の発芽に十分な光が底まで到達した。さらに、メソコズムにおける底部の水中の溶存酸素濃度 (2.0 – 4.8 mg /L) は、メソコズム外部の底層水中の酸素濃度 (0.6 – 4.4 mg /L) よりも高い値で推移した。以上からメソコズム内では、加えた海底泥中の珪藻休眠期細胞は底部で発芽し、生じた珪藻栄養細胞は鞭毛藻よりも圧倒的に速く増殖し、*Chattonella* ブルームの発生が防止されたことが示された。

夏季に貧酸素化 (さらには無酸素化) する沿岸の港湾である田尻港内において *Chattonella* 赤潮の発生が確認された。その赤潮の水塊は港外へ供給され、環境条件が合えば灘単位の赤潮の発生源と

なりうる。岡山県片上湾においては数年前から *Chattonella* 赤潮が夏季に発生しており、2020年も底層の無酸素化に伴って赤潮が発生した⁽⁴⁾。

夏に貧酸素化する港湾を突き止め、貧酸素化を防止すれば、赤潮の発生件数を減らせる可能性がある。港湾は電気の利用が可能であり、様々な工学的な手法によって貧酸素化を阻止すれば、有害赤潮の発生を防止できると考えられる。

2) 港奥水域での薄層浚渫事例 (鹿児島県長島町)

平成23年度、鹿児島県長島町にて赤潮の原因であるシャットネラのシストを密閉吸引式薄層浚渫 (サブマリנקリーナー工法) の技術を使って除去する赤潮対策実証事業を行った。この事業では、脇崎地区 23,000 m²、伊唐地区 22,000 m² の計 45,000 m² を施工し、底質を厚み 10 cm 除去した (図-6)。



図-6 伊唐地区の地形

伊唐地区は、南側に湾の入り口があり、入口の西側に養殖筏が並んでいる。また、湾奥の南にも養殖いかだが並んでいて湾奥で赤潮が発生すると養殖筏の逃げ場所がない。水深は、湾の漁港の防波堤の前が一番深く、すり鉢状になっているという特殊な地形をしている。

伊唐地区は、養殖筏が多く存在したが、密閉吸引式薄層浚渫 (サブマリנקリーナー工法) は海を濁すことなく施工が出来る為、汚濁防止膜を使用する必要が無かった (図-7)。



図-7 伊唐地区 養殖場近くでの施工状況

シストは、水深が深くなっている海底で多く存在している為、湾奥の筏の前の深くなっている海域を効率よく除去した。密閉吸引式薄層浚渫（サブマリンクリーナー工法）にて底質を除去する事により粒径の細かいシルトが除去され、白い貝殻と砂が表面に残った（図-8）。

本事業では、脇崎地区 23,000 m²、伊唐地区 22,000 m²の計 45,000 m²を施工し、底質を厚み 10 cm 除去した。施工の効果は、全体でシャットネラのシストを 82%除去した（エラー！参照元が見つかりません。2）。



図-8 除去後の海底

表-2 シスト除去の施工実績

地域	除去面積	除去数(推定)	除去率
脇崎地区	23,000m ²	1,089億個体	85%
伊唐地区	22,000m ²	1,256億個体	80%
全体	45,000m ²	2,345億個体	82%

5. 今後の展開

養殖業の推進は、水産政策改革及び水産基盤整

備においても重要課題である。そして養殖業のリスク管理として、発生後の情報取得以上に赤潮貝毒の発生の対策が必要とされる。中でも、基盤整備事業では、藻場干潟等生息環境、流動環境の整備及び浚渫等の事業を実施している。これらを実施する場合、赤潮・貝毒発生対策として、体系的に調査研究を行い、藻場の造成、流動環境改善、薄層浚渫、海底耕耘を事業として組み合わせて取り組むことにより大きな効果が期待できる。

参考文献

- (1) 環境維持保全工法研究会ホームページ.<https://kankyoiji.jp/>、環境維持保全工法研究会
- (2) Imai, I., Inaba, N., Yamamoto, K. (2021). Harmful algal blooms and environmentally friendly control strategies in Japan. Fish. Sci. (in Press).
- (3) 今井一郎・赤穂那海・松野孝平・山口 篤:内湾域の港湾における貧酸素化は有害赤潮のインキュベーターか？. 令和3年度水産環境保全委員会シンポジウム「貧酸素水塊が内湾生態系に及ぼす影響と持続的漁業から見た評価」. 2021年3月
- (4) 秋山 諭・辻村裕紀・田中咲絵・近藤 健・中嶋昌紀・宮原一隆・高倉良太・山下泰司・高木秀蔵・乾 元気・越智洋雅・小川健太・吉田和貴・朝田健斗・加藤慎治 (2021) 有害赤潮プランクトンの出現動態監視及び予察技術開発 ア. 瀬戸内海東部海域。令和2年度漁場環境改善推進事業のうち 栄養塩、赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発 (2) 赤潮被害防止対策技術の開発報告書、pp. 7-58、水産庁。