

ウ．赤潮発生メカニズムの推定とシナリオ検討による予察手法の検討

【担当機関，所属，担当者名】

道総研中央水産試験場：高嶋孝寛、西田芳則

道総研釧路水産試験場：美坂 正

道総研栽培水産試験場：森 立成、佐野 稔

道総研函館水産試験場：板谷和彦

道総研さけます・内水面水産試験場：品田晃良

水産機構水産資源研究所：黒田 寛、東屋知範

北海道水産林務部水産局水産振興課：佐々木剛、中川 工

【目的（全体計画）】

北海道太平洋において広域的な赤潮が再発した際の漁業被害を未然に防止し、被害の軽減を図るためには、赤潮水塊や原因生物の輸送経路や赤潮発生に関連する環境・生物的条件などを把握し、それらに対応した対策を講じる必要がある。また、それら対策を実施する基盤として、漁業現場のみならず、北海道行政及び研究機関が連携して監視や対策の体制を構築する必要がある。

そこで、赤潮発生あるいはその予兆を早期に察知して備え、漁業被害を最小化することを目的に、赤潮発生機構およびシナリオに基づいて、効果的で実効性が高いモニタリング体制の構築を検討する。

【方法】

1) 赤潮発生機構の推定と発生シナリオの提示

主に「赤潮発生に影響する海洋物理条件の解析」で検討される物理的要因や条件、「海洋環境情報の収集解析」で収集される海洋環境や生物学的要因に基づき、2021年に北海道東部太平洋で発生した大規模有害赤潮の発生機構を推定し、それらを整理して有力なシナリオとして提示する。

具体的には、赤潮の発生起源と輸送過程、増殖および消滅過程、原因プランクトンの生理生態特性、それらの増殖や赤潮発生に関係する環境・生物的条件等の整理、およびそれらの相互関係の模式図化を実施する。

2) 赤潮発生シナリオを考慮した今後のモニタリング体制の検討と提示

今後、北海道東部太平洋で赤潮が発生した際の被害回避や軽減のため、赤潮の発生あるいは発生しうる状況をあらかじめ、あるいは早期に察知し、対策する態勢を検討する。

具体的には、1) で作成したシナリオを活用した警戒・監視対象の海域および監視項目・方法・警戒基準値・対応スケジュール等を検討するとともに、警戒・監視（モニタリング）を実現するための体制の協議と提案を実施する。

【結果および考察】

1) 赤潮発生機構の推定と発生シナリオの提示

主に中課題（1）－アおよびイの成果に基づき、道東大規模有害赤潮の発生と発生後の推移（長期化・消滅）に関する知見や仮説を整理した（表1）。さらに、表1に整理した知見に基づき、2021年道東大規模有害赤潮に関連して起こったと考えられる事象を、「赤潮発生まで」と「長期化・消滅」の2段階に分けた上で時系列順に整理し、それぞれシナリオ（仮説）として模式図化した（図1、2）。

a. 道東大規模有害赤潮発生までのシナリオ（仮説）（図1）

道東大規模有害赤潮は、カレニア科渦鞭毛藻類により引き起こされたものであり、その優占種は *Karenia selliformis* であることが判明している（Iwataki et al., 2022）。この *K. selliformis* が日本周辺で赤潮の原因となったことは記録上初めてのことである。一方、道東大規模有害赤潮発生初期に観察された *K. mikimotoi* は近年、道南地方で赤潮を発生させているが、西日本由来細胞の海流による輸送、あるいは船舶のバラスト水等による人為的な移送が原因種の流入過程として想定されている（嶋田ら, 2016; 嶋田, 2021）。これらのことから、道東有害赤潮発生過程の起点は、発生海域あるいはその近隣海域への原因種の流入であると解釈される（図1）。

原因種流入を起点とすると、赤潮発生までの過程は次のように整理される（[]内は関係知見を得た中課題）。

① 原因種流入

- ・ *K. selliformis* は東カムチャッカから北西太平洋経由で赤潮発生海域近傍に流入した可能性が高い。[（1）－ア、イ、（2）－ア]
- ・ *K. mikimotoi* は宗谷海峡およびオホーツク海を経由して赤潮発生海域近傍に流入した可能性が高い。[（1）－ア、イ]

② 成層強化

- ・ 2021年夏に、かつて無い規模の海洋熱波が発生し、北西太平洋海域に強固な成層を形成した。[（1）－ア]

③ 競合生物（珪藻）の消失

- ・ 強固な成層により表層の栄養塩が中・下層からの供給を受けられずに消費されて枯渇した。これにより表層の珪藻類が極端に減少した可能性がある。[（1）－イ]

④ 表層への栄養塩供給

- ・ 2021年8月10日前後に北海道太平洋海域付近を低気圧が通過したことにより、海洋熱波が急速に後退した。その終息過程、並びに季節的な海面冷却により、混合層が急速に発達したことで、北海道太平洋海域の表層に栄養塩が供給された。[（1）－ア]

⑤ 原因種増殖至適環境の醸成

- ・ *K. selliformis* 培養細胞は水温 10～22.5℃、塩分 20～33PSU で増殖可能であった。これらに対し、道東大規模赤潮発生現場の環境は、水温範囲 9.8～17.6℃だったことをはじめ、ほぼこれらの範囲内にあった。〔（２）－ア〕
- ・ *K. selliformis* 群集は道東沿岸流域および親潮系水域に分布したことから、道東沿岸流が緩慢な流れにより *K. selliformis* 群集を取り込み、北海道太平洋沿岸にそれらを運搬した。〔（１）－イ〕

⑥ 原因種増殖

- ・ 以上の過程が順に、あるいは並行して起こったことにより、「タネ」とそれを育てる環境が北海道太平洋に揃って機能し、最終的に原因種が増殖して道東大規模有害赤潮の発生に至った。

以上、①～⑥の過程の連鎖が道東大規模有害赤潮発生のシナリオとして仮説された。①により原因種が流入したとしても、それらが増殖して赤潮形成に至るためには、引き続いて②～⑤の過程を経る必要がある。したがって、発生環境の観点から道東大規模赤潮発生のきっかけとして重要なのは②の成層強化と考えられ、それを引き起こした強い海洋熱波の発生が鍵であると考えられる。また、海流による国外海域からの原因種の流入や群集の移送、沖合域における環境形成や増殖過程がシナリオ中に含まれることから、道東大規模有害赤潮は *K. selliformis* を原因生物の主体とした移流型赤潮とみなすことが適当と考えられる〔（１）－イ〕。

b. 道東大規模有害赤潮の長期化・消滅のシナリオ（仮説）（図 2）

西日本を中心に発生する赤潮は、年間数百件が発生するものの 1 件あたりの面積規模が 100km²を超えることは少ない（例えば、三重県水産研究所, 2010）。また、継続期間は 2 週間前後のものが多く、1 カ月を超えることは少ない（例えば、「せとうちネット」https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/setouchiNet/seto/g2/g2cat01/akashio/hyo5-2.html）。しかし、道東大規模有害赤潮は、少なめに見積もっても 5,000km²を超える範囲で発生し、2021 年 9 月下旬から 11 月中旬まで約 7 週間にわたって継続した〔（１）－イ〕。また、道東大規模有害赤潮は移流型と考えられる一方で、沿岸域では 5,000 細胞/ml を超える細胞密度も継続して観測された〔（１）－イ〕。すなわち、道東大規模有害赤潮の規模を拡大し、さらに長期化に寄与した要因が存在すると考えられる。そこで、本事業で得られた知見からそれら要因を推察し、大規模化・長期化の過程を含むシナリオとして整理した（図 2）。

① 原因種増殖至適環境の醸成

- ・ 前項 a.⑤と同じ

② 海洋ポテンシャルを超えた密度に増殖（沿岸域）

- ・ 赤潮が高密度で維持された過程については、混合層の発達以外の要因も重要〔（１）－ア〕。

- ・ 大型河川の河口に近い沿岸表層部では、陸域からも栄養塩が供給され、*K. selliformis* の増殖を促した可能性がある〔（１）－イ〕。

③ *K. selliformis* が一定水準の密度を維持（沖合域）

- ・ 道東沿岸流が長期間にわたり *K. selliformis* 群集を取り込み続けたことで、*K. selliformis* の生存および増殖に好適な環境が維持された〔（１）－イ〕。
- ・ *K. selliformis* が日周鉛直移動により、表層域だけでなく、中層域（50～60m 深）の栄養塩も利用することで一定水準以上の細胞密度を維持した可能性がある。この点については、実際の鉛直移動を確認するなどの検証が必要である〔（１）－イ〕。

①～③の過程が揃って、あるいは連鎖して起こったことにより、道東大規模有害赤潮は大規模化し、かつ 7 週間の長期にわたって北海道太平洋海域に滞留したものと仮説された。2021 年 11 月中旬以降、発生海域の *K. selliformis* 細胞密度は減少傾向となり、赤潮は次第に消滅したが、その要因は次のように推察された。

④ 赤潮水塊が沖合へ輸送・拡散

- ・ 道東地域では 2011 年 11 月中旬から風速 10m/s 以上の西風が連吹したことで表層海水が沖に向かって輸送されるエクマン輸送が発生し、取り込まれた赤潮水塊も沖合へ輸送・拡散された〔（１）－イ〕。

⑤ *K. selliformis* の増殖停滞・死滅

- ・ *K. selliformis* 培養細胞は水温 10～22.5℃で増殖可能であったが〔（２）－ア〕、11 月下旬時点で道東太平洋沿岸の表面水温が 10℃を下回っていたため（海況速報 No.203、<http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/central/section/kankyau/sokuhou/att/a2112sokuho.pdf>）、以降の赤潮発生海域での *K. selliformis* 増殖が停滞した。
- ・ *K. selliformis* 培養細胞は 5℃の環境では緩やかに死滅し、5℃以下では増殖しなかった〔（２）－ア〕。一方、北海道太平洋では 11 月以降、2 月に表面水温 2℃以下に達するまで季節的な水温下降が続いたと考えられるため（海況速報 No.204、<http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/central/section/kankyau/sokuhou/att/a2202sokuho.pdf>）、北海道太平洋海域では *K. selliformis* は死滅していった可能性が高い。ただし、実際の死滅過程については検証が必要である。

以上、④⑤の過程により、道東大規模有害赤潮は消滅に向かったと推測される。

ここまでに仮定した二つのシナリオ（図 1、2）は、海洋の表層、あるいは沿岸の浅海域で観察された事象を説明することを主眼に仮説した。一方で、道東大規模赤潮の発生期間中に、100m を超える水深帯でツブ類の斃死個体が多数採集された（美坂・安東, 2021）など、通常赤潮の被害が及ばない大深度水深帯にも何らかの影響が及んだ可能性がある。しかし、これらについては暴露試験による実験的な有害性評価を除き、具体的な現象の発

生機序については未解明である〔（２）－イ〕。また、本事業の取組の中では、*K. selliformis* についてはシストやその他の休眠態が発見されていないものの、本道周辺での越冬および定着の可能性については否定に至っていない〔（２）－ア〕。これらの問題については、本事業終了後も解明に向けて引き続き取り組む必要がある。

2) 赤潮発生シナリオを考慮した今後のモニタリング体制の検討と提示

表 1 あるいは図 1、2 に整理したシナリオとそれらの解釈に基づき、北海道太平洋における赤潮発生予察、および発生後の対応に必要な行動を、それぞれ「道東大規模有害赤潮の発生予察に関する行動計画案」および「道東大規模有害赤潮発生に対応する行動計画案」として整理した（図 3、4）。

a. 道東大規模有害赤潮の発生予察に関する行動計画案（図 3）

道東大規模有害赤潮（と同様の赤潮）を警戒してその発生に備える態勢を組み立てるためには、道東大規模有害赤潮の特徴を踏まえる必要がある。本事業における取組結果から、*K. selliformis* を優占種とした道東大規模有害赤潮は、①移流型であること、②海洋熱波に代表される気象・海象の極端現象をきっかけに発生すること、の 2 点が、特に踏まえるべき重要な特徴であると考えられた。これら 2 点を踏まえると、道東大規模有害赤潮を警戒するためには、沖合を含めた広域監視が重要と考えられる。

特段の極端現象が発生していない平常時（通常態勢）においては、沖合海域（我が国の排他的経済水域外を含む北西太平洋海域）については、その監視範囲の広さから、人工衛星画像を活用した海表面監視を主体に実施すべきと考える。海表面の水温について、気象変動観測衛星（GCOM-C）や水循環変動観測衛星（GCOM-W）、気象衛星などによる観測結果が利用できる。また、観測衛星により取得したデータを処理して偏差を計算し、それを視覚的に確認できるサイト「Marine Heatwave」（<http://www.marineheatwaves.org/>）も有用である。北海道太平洋沿岸においては、疎（例えば振興局ごとに 1 点など）に配置した沿岸観測点において定期的に水温・塩分やクロロフィル a を観測し、それらの鉛直分布を含めて把握すると同時に異常が無いか確認しておくことが有効と考えられる（広域モニタリング）。

夏季を中心に強い海洋熱波が観測された場合は、1～2 カ月後に赤潮が発生するリスクが生じたとみなし、警戒態勢に移行する。警戒態勢では、沖合海域については人工衛星による監視を継続するとともに、調査船による観測を開始する。調査船観測では、水温・塩分観測により発生した海洋熱波の推移を把握するとともに、栄養塩や珪藻類の分布状況も把握する。北海道太平洋沿岸においては、プランクトンモニタリングを加えて広域モニタリングを強化し、必要に応じて観測点を追加する（港湾を含む沿岸臨時観測）。陸域からの栄養塩供給状況を把握するために、降水量や海域に流入する主要な河川の流量についても情報収集を実施する。これらのモニタリングで得られた情報については、ホームページや刊行物（準定期あるいは臨時）により定期的に情報配信する。

北海道太平洋沿岸の海表面水温が 10℃以下に降下するまで赤潮が発生しなかった場合は、警戒態勢を解除し、通常態勢に移行する。もし、警戒態勢中に赤潮が発生した場合は、状況を確認の上、監視態勢に移行する。

b. 道東大規模有害赤潮発生に対応する行動計画案（図 4）

警戒態勢中に赤潮発生疑いが指摘された場合、赤潮発生と断定できるのか判断する必要がある。そのために、事態の発生状況を把握する（初動）。具体的には現象の発生現場において採水を行い、原因プランクトンを特定および密度推定を実施する。同時に、現場観測や通報情報の整理、人工衛星観測などを利用して、現象の発生範囲を把握する。原因プランクトンの特定及び密度推定の結果、別に定められた基準に達した場合、赤潮が発生したものとして、監視態勢に移行する。

監視態勢では、発生した赤潮に対し、①推移の観測、②推移の予察、③定期的な情報配信の3点を基本に対処する。①では、現場採水・検鏡を定期的実施することで原因プランクトンを監視するとともに、現場観測、通報情報の整理、人工衛星観測等による発生範囲の監視を実施して、赤潮の推移を常に把握する。

②では、水温・塩分・流況の把握、陸域からの栄養塩供給状況把握、西風の状況把握と予測を駆使し、赤潮の拡大や消滅を含めた推移を予察（予測）する。利用する情報によっては、河川管理や環境・気象の専門組織との連携も必要になるだろう。

①で得られた現況、②で実施した予察については、ホームページや刊行物（準定期あるいは臨時）により定期的に情報配信する（③）。

①による監視において、原因プランクトン密度が一定水準以下に低下し、一定期間継続した場合は、赤潮が消滅したものとして監視態勢を解き、通常態勢に復帰する。基準とするプランクトン密度や期間については、別に定める。

以上、赤潮発生シナリオを考慮した行動計画案について整理した。これらは道東大規模有害赤潮と同様の型の赤潮監視と発生に備える態勢として利用できると考えられるが、各々の行動についての役割分担や作業頻度（実施体制）については検討が不十分な状態である。これら実施体制について、北海道行政、漁業現場、および研究機関で協議をすすめ、本事業の成果を活用した警戒・監視（モニタリング）を実現する必要がある。

一方で、道総研では先行して人工衛星 GCOM-C が観測した海表面クロロフィル a 濃度の分布画像を参照できるサイトを構築した〔（１）－イ〕（<https://hro-fish.net/satellite/index.html>）。今後の赤潮モニタリング体制での活用が期待される。

【成果の概要】

本課題では、本事業の中課題における取組み、主に「赤潮発生に影響する海洋物理条件の解析」で検討される物理的要因や条件、「海洋環境情報の収集解析」で収集される海洋環境や生物学的要因に基づき、赤潮発生機構の推定と発生シナリオの提示、および赤潮発

生シナリオを考慮した今後のモニタリング体制の検討と提示を行った。

- 1) 2021 年道東大規模有害赤潮に関連して起こったと考えられる事象を、「赤潮発生まで」と「長期化・消滅」の 2 段階に分けた上で時系列順に整理し、それぞれシナリオ（仮説）として模式図化した。
- 2) 整理したシナリオとそれらの解釈に基づき、北海道太平洋における赤潮発生予察、および発生後の対応に必要な行動を、それぞれ「道東大規模有害赤潮の発生予察に関する行動計画案」および「道東大規模有害赤潮発生に対応する行動計画案」として整理した

【引用文献】

- Iwataki M, Lum WM, Kuwata K, Takahashi K, Arima D, Kuribayashi T, Kosaka Y, Hasegawa N, Watanabe T, Shikata T, Isada T, Orlova TY, Sakamoto S. Morphological variation and phylogeny of *Karenia selliformis* (Gymnodiniales, Dinophyceae) in an intensive cold-water algal bloom in eastern Hokkaido, Japan. *Harmful Algae*. 2022;114, 102204.
- 嶋田 宏, 金森 誠, 吉田秀嗣, 今井一郎. 2015 年秋季北海道函館湾における渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* による有害赤潮の初記録. 日本水産学会誌 2016;82:934-938.
- 嶋田 宏. 北海道沿岸における赤潮と貝毒の長期変動（総説）. 北海道水産試験場研究報告 2021;100:1-12.
- 三重県水産試験場. 平成 21 年三重県沿岸海域に発生した赤潮. 2010;13pp.
- 美坂正, 安東祐太郎. 北海道太平洋沿岸で発生した大規模有害赤潮について. 試験研究は今 943, 北海道立総合研究機構 2021.