

ウ. 漁業被害軽減に向けた赤潮注意・警戒基準の検討

【担当機関・所属・担当者】

道総研中央水産試験場：萱場隆昭

道総研釧路水産試験場：美坂 正

道総研栽培水産試験場：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：春日井潔

水産機構水産資源研究所：長谷川夏樹

水産機構水産技術研究所：紫加田知幸

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）】

赤潮による漁業被害の軽減を図るため、有害赤潮プランクトン優占種の培養実験下における増殖や環境応答の特性と、海洋モニタリング調査データ等を相互に分析し、海洋で増殖または消長する条件等を解明する。併せて、主要水産生物への有害性や天然漁場での被害発生情報を総合的に整理して、有害赤潮プランクトンによる被害に対して注意・警戒を要する環境中の細胞密度や環境条件等を検討し、効果的な観測体制や被害軽減対策を構築するうえでの基盤情報を得る。

【方法】

2021年9月に北海道東部太平洋で発生した赤潮に対して、

- 赤潮原因プランクトンの種組成（優占種の把握）及び種判別方法、培養株を用いた増殖特性や環境因子（水温、塩分、光条件）に対する応答、休眠期細胞形成の可否などの生活史に関する情報整理（ 課題（2）ア 北海道太平洋岸に発生した赤潮原因プランクトンの種同定と生理生態特性の解明 ）
- 赤潮海水および培養株を用いた曝露試験等による主要水産生物への有害性の評価、天然漁場や飼育生物の被害発生状況に関する情報整理（ 課題（2）イ 有用水産生物に対する有害性の解明 ）

を行った。

それらをふまえて、効果的なモニタリング体制や被害軽減対策を構築するうえで基礎となる注意・警戒を要する赤潮プランクトンの細胞密度や環境条件等について検討した。

なお、本事業を通して赤潮原因プランクトンに関する多くの情報・知見が得られたものの、その生理生態特性（深淺移動・分布、越冬の可否などの生活史）や生物・環境に対する影響、有害性についてはまだ不明な点が残されている。そのため、これまで集積した知見の範囲から対策検討に資する注意・警戒基準値などを提案し、今後、新たな知

見をふまえて見直し、刷新していくものとする。

【結果および考察】

2021年9月に北海道東部太平洋で発生した有害赤潮に対し、効果的な観測体制や被害軽減対策を構築するうえでの基盤情報として、①注意・警戒を要する赤潮プランクトン種、②増殖や消長に係る環境条件、③生物に対する有害性などについて整理し、漁業被害リスクとなる環境中の細胞密度を検討した。

① 対象とする赤潮有害プランクトン種、種同定・検出方法

- ・ 2021年秋に道東太平洋海域で発生した赤潮海水試料からカレニア科渦鞭毛藻 7 種 (*Karenia selliformis* (以下、*K. selliformis*)、*Karenia longicanalis*、*Karenia mikimotoi* (以下、*K. mikimotoi*)、*Karlodinium* sp.、*Takayama* cf. *acrotrocha*、*Takayama tuberculata*、*Takayama* sp.) の出現を確認した (Iwataki et al., 2022)。その中で、赤潮発生期間を通して優占し、且つ、種々の生物に対して非常に強い有害性をもつ “*K. selliformis*” を主体的に観測することが妥当と考えられた。その他の種については、今後、未記載種、未同定種の解析をしながら、道東海域に出現するカレニア科渦鞭毛藻の特性を把握する必要がある。(課題(2)ア)
- ・ 当事業を通して、*K. selliformis* の形態を生細胞とほぼ同様の状態で保持できる固定方法(片野固定液)や明瞭に観察できる染色方法(DAPI核染色)を確立したとともに、形態特徴に基づいた種同定資料が整理され、顕微鏡観察によって対象種をモニタリングできる基盤が確立した。(課題(2)ア) 衛星画像などによる広域的な監視に加えて、各地先海域での採水と直接検鏡によって *K. selliformis* の動向を詳細に観測することが可能になった。今後、*K. selliformis* の生態をふまえた採水、観測体制の検討と観察技術の普及が必要になる。

② 増殖生理特性、増殖至適環境、生活史などの基礎生態

- ・ 2021年に発生した赤潮海水から複数の *K. selliformis* 培養株を確立し、本種の増殖生理特性の解明や海産生物への影響について具体的に検証する技術的基盤が構築した。(課題(2)ア)
- ・ 培養株を用いて *K. selliformis* の増殖と環境応答について解析し、水温 15~20°C、塩分 20~33、光強度 150~400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ は増殖至適範囲であることがわかったほか、増殖不可能となる水温範囲も明確になった。(課題(2)ア) この水温等の環境因子に対する応答は、2021年の赤潮発生時における北海道東部太平洋の水温パターンと概ね一致しており、*K. selliformis* の増殖や拡大、消失を予測する一因子とし

て重要と考えられる。

< 注視する海洋環境条件 (課題(2)ア) >

【水温】 増殖至適範囲 15~20°C (増殖可能 10~22.5°C、最大増殖速度 17.5~20°C)

※水温 25°C以上および 5°C以下の環境下では増殖不可能

【塩分】 増殖至適範囲 20~33 (増殖可能 15~33、最大増殖速度 20~30)

【光強度】 増殖至適範囲 150~400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

- ・ また、栄養塩の供給や珪藻類など競合生物種の発生状況など、*K. selliformis* の増殖を制限する他の因子についても今後検討が必要である。
- ・ 北海道太平洋海域における越冬の可否について調べるため、海底泥中の栄養細胞発芽試験や培養株の観察を行ったが、現段階で *K. selliformis* のシストを確認できず、本種の越冬形態や生活史については継続した検討が必要である。(課題(2)ア)

③ 有害性の評価： 曝露試験等による生物への影響、漁業被害等の発生状況

- ・ 赤潮海水や *K. selliformis* 培養株を用いた曝露試験により各種生物への感受性を調べた結果、シロサケを含む複数の魚類種、エゾバフンウニやヒメエゾボラ、マガキなど幅広い分類群の無脊椎動物、コンブを含む海藻類に対する *K. selliformis* 細胞の有害性が確認され、衰弱や障害、へい死が生じることが明らかとなった。ただし、十脚類のホッカイエビやハナサキガニ、鰓脚類のアルテミアでは顕著なへい死が確認されず、魚種によって感受性に違いがみられた。(課題(2)イ)
- ・ 同種でもサイズや年齢によって感受性に差異があり、成長等によって耐性が変化すること、*K. selliformis* の生理活性(対数増殖期と衰退期)によっても生物に与える影響やプロセスが異なる可能性が示唆された。(課題(2)イ)
- ・ *K. selliformis* は、既報の *K. mikimotoi* に比べて総じて有害性が強い傾向がみられた。(課題(2)イ) (Zou et al., 2010)

< *K. selliformis* 曝露後のへい死状況概要 (課題(2)イ) >

【魚類、腹足類】

100cells / mL 以上でへい死観察、1000cells / mL 以上で9割へい死

【二枚貝、ウニ、ナマコ】

1000cells / mL 以上でへい死観察、5000~7000cells / mL で9割へい死

※ウニ類では100cells / mL 以上で付着力の低下等の衰弱が生じた。天然環境下では衰弱による間接的な減耗発生リスクが示唆。

【頭足類】 2000cells / mL 以上でへい死観察

- *K. selliformis* に曝露した魚類の鰓、ウニ類の体表などの呼吸器系の組織観察から、*K. selliformis* の大量被覆による窒息ではなく、*K. selliformis* の細胞表面上に存在する有害因子との繰り返し接触や近接による呼吸器組織の損傷、呼吸機能障害の影響でへい死に至ると考えられた。 (課題 (2) イ)
- 2021 年秋に北海道東部太平洋に発生した *K. selliformis* では、ブレベトキシン群、ギムノジミン群は検出限界以下であり、既知毒以外の未知の細胞毒性物質を産生している可能性がある。 (課題 (2) イ)
- 北海道太平洋岸 (根室・釧路・十勝・日高海域) における赤潮被害報告 (令和 3 年 9 月~12 月:北海道まとめ) や漁況・環境異変の聞き取り情報を収集し、北海道で発生した赤潮被害の特徴を整理した。赤潮が発生した広い海域でウニ類など底生生物の大規模なへい死が生じたほか、定置網等で捕獲したサケなどの魚類、沿岸域の養殖や陸上施設での飼育・畜養中に生物のへい死が認められた。(課題 (2) イ) (Hasegawa *et al.*, 2022)
- 水深数 m の沿岸域から 100m 以上の幅広い水深帯で漁業被害が生じた可能性があるが、深部への影響については *K. selliformis* の到達の可否など今後検討が必要である。(美坂&安東, 2021)
- さけ・ます類やウニ類の浅場沿岸域における漁業被害報告は、環境中の細胞密度が 10~100cells / mL のレベルに達した翌週以降に顕在化する傾向があり、赤潮の増殖と長期化が被害を拡大させたと考えられた。 (課題 (2) イ)

④ 赤潮注意・警戒基準の検討 (漁業被害リスクとなる環境中の細胞密度)

- *K. selliformis* の増殖レベルと、生物へ及ぼす障害の大きさや漁業被害の発生頻度との間に関係性が認められており、環境水中の *K. selliformis* 細胞密度 (cells / mL) は赤潮の被害リスクを推し量り、事前の対策を始動する指標となると考えられる。
- 赤潮海水や培養株への曝露試験において、各種生物の感受性からリスクを評価すると、細胞密度 10cells / mL 未満の低いレベルでは生存へ影響するリスクは低いが、100cells / mL 以上の環境下では魚類やアワビ、ヒメエゾボラ等の腹足類でへい死が生じた。同細胞密度下でウニ類はへい死しなかったものの、付着力の低下など天然環境下での生存に影響する衰弱が認められた。細胞密度 1000cells / mL を越えると、より多くの種でへい死が急増した。(課題 (2) イ)
- また、北海道で甚大な漁業被害となった定置網でのサケ類のへい死やウニ類の大規模へい死・打ちあがりは、環境中の *K. selliformis* 細胞密度 (衛星観測から推定) が 10~100cells / mL 以上に達した翌週から顕在化し、このことは曝露試験において明

らかとなったサケやウニの感受性と一致していた。(課題(2)イ)

- *K. selliformis* への感受性や耐性は対象生物種やその成長度合い、曝露された状況(株、曝露時間等)によって変化し、さらには *K. selliformis* の活性などによっても変化するため、リスク評価には慎重な判断が必要だが、幅広い水産資源に対する被害軽減対策の目安として、少なくとも細胞密度 100cells / mL に達する前の段階で注意警戒喚起して情報共有し、各種の対応を進めることが重要といえる。北海道東部太平洋の赤潮発生事例において、*K. selliformis* はごく低位な細胞密度から非常に短期間のうちに 100cells / mL を超えるレベルへ増殖したことをふまえ、安全を見積もり、採水による監視において検知された段階(細胞密度 < 1cells / mL) で注意喚起し、監視頻度の増加などモニタリング体制の強化を検討し、さらに細胞密度 1cells / mL を超えた段階で警戒発信し、各種の漁業活動への対策の準備を進め、監視を行いながら漁業対策を実行することが適切と考える(図)。この発信基準は、既報の *K. mikimotoi* よりも低い細胞密度レベルであり(北海道 *K. mikimotoi* 注意 50cells / mL、警戒 500cells / mL)、*K. selliformis* がより有害性が強いことを示唆する。
- 本報告では、現事業で得られた *K. selliformis* の環境応答や生物に対する有害性などの情報に基づいて *K. selliformis* 発生に対して注意警戒を要する環境水中の細胞密度基準を検討したが、今後、*K. selliformis* の生理生態や生活史などより詳しい知見が明らかになれば、具体の漁業活動の調整や防除技術などについて検討できるようになり、生産現場での対策を考慮したより実効性が高いタイミングで情報発信が可能になると考えられる。これからの研究をふまえて随時見直し、刷新が必要である。
- また、本事業においては、*K. selliformis* を優占種とした道東大規模有害赤潮の発生機構と長期化・消長するシナリオについて検討が進められ、それに基づいた効果的で実効性が高いモニタリング体制(行動スキーム)について考察された。(課題(1)ア、イ、ウ) 注意警戒情報の発信と赤潮の予察、発生時の監視に係る行動を組み合わせることで検討することが不可欠であり、今後、漁業現場とともに、北海道行政、研究機関が連携して警戒・監視体制の構築を進める必要がある。

【成果の概要】

本課題では、2021年9月に北海道東部太平洋で発生した有害赤潮に対し、効果的な観測体制や被害軽減対策を構築するうえでの基盤情報を得るため、①注意・警戒を要する赤潮プランクトン種、②有害赤潮プランクトン優占種の培養実験下における環境応答の特性(増殖や消長に係る環境条件)、③主要水産生物への有害性(赤潮海水または培養細胞への曝露試験による各種生物の感受性等)と天然漁場での漁業被害発生情報などについて整理した。

それらをふまえ、水産資源に対する被害軽減対策の目安として、有害赤潮プランクトンの発生、増殖に対して注意警戒を要する環境水中の細胞密度基準について検討した。

【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.
- Hasegawa N, Watanabe T, Unuma T, Yokota T, Izumida D, Nakagawa T, Kurokawa T, Takagi S, Azumaya T, Taniuchi T, Kuroda H, Kitatsuji S, Abe K (2022) Repeated reaching of the harmful algal bloom of *Karenia* spp. around the Pacific shoreline of Kushiro, eastern Hokkaido, Japan, during autumn 2021. *Fisheries Science* 88:787–803.
- Zou Y, Yamasaki Y, Matsuyama Y, Yamaguchi K, Honjo T, Oda T (2010) Possible involvement of hemolytic activity in the contact-dependent lethal effects of the dinoflagellate *Karenia mikimotoi* on the rotifer *Brachionus plicatilis*. *Harmful Algae* 9(4): 367-373.
- 美坂正, 安東祐太朗 (2021) 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, No.943.

● **有害赤潮プランクトン発生に対する注意・警戒情報の発信基準（暫定案）**

< 赤潮プランクトン > *Karenia selliformis* (カレニア セルフホルミス)

< 増殖環境 > 水温: 増殖至適範囲 15~20℃ (増殖可能10~22.5℃, 最大増殖速度 17.5~20℃) で検証, 改変SWM-3塩地、光条件 (12hL:12hD, 150μmol m⁻²s⁻¹)
 ※ *K. selliformis*培養株 (KS-1, 6, 13) で検証, 最大増殖速度 20~30, 塩分: 増殖至適範囲 20~33 (増殖可能15~33, 最大増殖速度 20~30)

Stage 1. (注意喚起)

出現初期 -
 細胞密度基準 < 1 cells/ml
 ※濃縮海水試料により検知
 (想定される対応案)
 ・注意速報発信
 ・衛星等による広域監視
 ・監視体制の強化の検討
 ・海洋観測の強化等

Stage 2. (警戒喚起)

低密度期 -
 細胞密度基準 1~100 cells/ml
 (想定される対応案)
 ・警戒速報発信
 ・監視体制の強化 (頻度、海域拡大)
 ・各種対策の準備・始動
 (畜養出荷、給餌養殖の餌調整、飼育施設の取水、種苗生産用の親個体、養殖用の母藻等の確保)

高密度期 -
 細胞密度基準 > 100 cells/ml
各種対策の実践
 (想定される対応・対策案)
 ・定置網等の網揚げ頻度
 ・生け簀、養殖施設等の移動
 ・飼育施設の取水停止
 ・種苗放流、沖だし (養殖コンブ等) の停止・延期等

細胞密度 < 1 cells/ml	細胞密度 1~100 cells/ml	細胞密度 100~1000 cells/ml	細胞密度 > 1000 cells/ml
無	無 (少)	有	有害性 (曝露試験): 高
有害性 (曝露試験): 低 ※顕著なへい死なし	有害性 (曝露試験): 低 ※顕著なへい死なし	有害性 (曝露試験): 中 へい死率 > 90% シロサケ稚魚 (魚類) ヒメエソボラ (腹足類) へい死率 > 50% エソアワビ (腹足類) 衰弱・付着弱化 エソハフゾウニ (棘皮)	有害性 (曝露試験): 高 へい死率 > 90% シロサケ稚魚 (魚類) エソアワビ (腹足類), ヤナギタコ (頭足類) ヒメエソボラ (腹足類) エソハフゾウニ (棘皮) へい死率 > 50% マナマコ (棘皮), マガキ (二枚貝) ホタテガイ (二枚貝)
漁業被害の報告 ※北海道根室~日高 (R3.9~12月)			
生物への影響 (曝露試験) ※ <i>K. selliformis</i> 培養細胞に曝露 ※魚類、腹足類や二枚貝、棘皮動物等の無脊椎動物について検証			

※ホッコカイエビやハナサキカニは顕著なへい死なし

図 *K. selliformis* の細胞密度と生物に対する有害性の関係と、それをふまえた注意・警戒情報の発信基準 (暫定案)