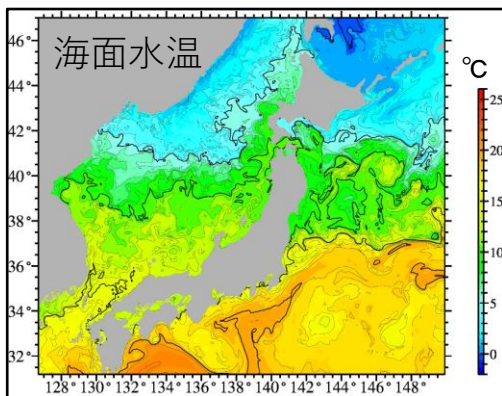


(1) 赤潮発生メカニズムの解明等による発生予察手法の開発 ア 赤潮発生に影響する海洋物理条件の解析

担当機関：水産機構資源研、道総研中央水試、さけます内水試

2021年9月中旬～12月、北海道東部沿岸～陸棚域でカレニア属を中心とした前例のない大規模赤潮が発生し、道東海域の海洋生態系ならびに沿岸漁業に甚大な被害を及ぼしました。本課題では、2021年に道東海域で発生した大規模赤潮が自然発生的な要因により誘発された可能性が高いという仮説を立て、①各種海洋・気象データを解析して海洋環境変動に起因する赤潮発生過程を調べ、②海況予測システムの出力と粒子追跡モデルを用いて、起源海域から道東海域への赤潮プランクトンの輸送過程を究明し、③将来の赤潮発生時に、即時、起源推定や赤潮輸送予測を行うシステム（以下、赤潮漂流予測システム）を構築しました。

高解像度FRA-ROMSの計算領域



赤潮漂流予測システムの概要

①赤潮発生時に備えて非発生時においても常時準備計算を実施（毎週自動で実施）

赤潮発生あるいは予兆の検出

①高解像度FRA-ROMSによる現況再現計算と35日後のアンサンブル予測

②海況の現況再現値と将来予測値に基づく粒子追跡実験

関係者に情報提供

半自動化

赤潮漂流予測システムによる試験計算

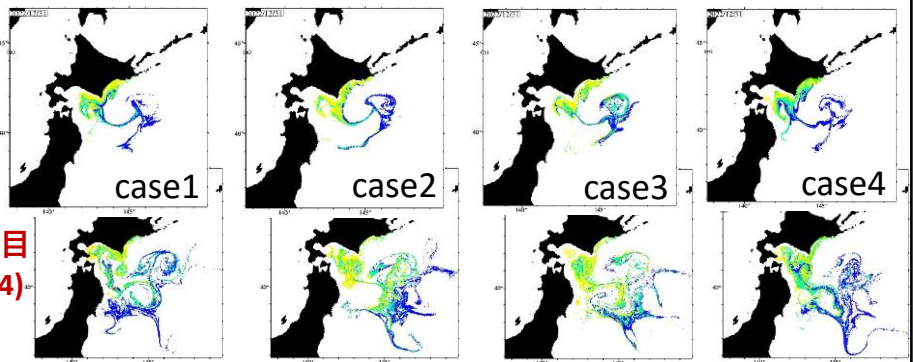
（2022年12月12日に道東沿岸で赤潮が発生したと仮定した場合のアンサンブル予測4ケース）

粒子の初期分布

(2022/12/12) 20日目 (12/31)



⇒



粒子の分布深度

1m 5m 10m

34日目 (1/14)

⇒

赤潮漂流予測システムは、 $1/50^\circ$ （約2km）格子の高解像度海況予測システム（高解像度FRA-ROMS）による現況再現値と将来予測値を用いて粒子追跡を行うシステムであり、農林水産研究情報総合センターの科学技術計算システム内に構築されました。予測の不確実性を考慮するために、気候予測システム（NOAA CFS）による4ケースの気象アンサンブル予測値を用いて、高解像度FRA-ROMSにより35日先までの海況予測を行い、さらに海況予測値を用いた粒子順追跡により約1か月後の赤潮プランクトン分布を予測します。本システムは半自動的に実行され、赤潮発生の緊急時に実運用することで、赤潮被害の軽減に資する情報を提供します。

(1) 赤潮発生メカニズムの解明等による発生予察手法の開発 イ 海洋環境情報の収集解析

担当機関：道総研中央水試、釧路水試、函館水試
水産機構資源研、技術研

背景と目的

2021年道東太平洋で発生した*Karenia selliformis*（以下、セリフォルミス）による赤潮は、西日本の内湾で生じる赤潮とは異なり、日高から根室に至る総距離300kmの広範な沿岸域で約7週間と長期にわたり持続しました。これにより、ウニ類を中心に甚大な漁業被害が生じました。そこで、本研究では、このセリフォルミス赤潮を早期に発見することを目的に、本種赤潮の発生シナリオを赤潮発生当時の観測データ、発生海域の環境特性などを解析・整理して構築し、そのシナリオの妥当性を現場観測により検証しました。

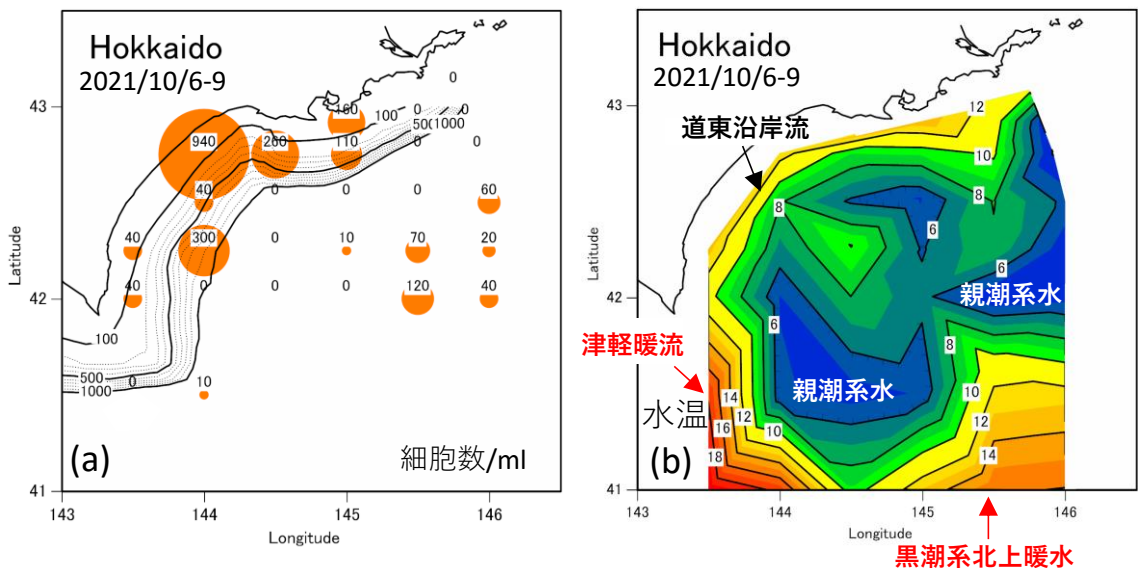


図1 2021年10月上旬における (a) 表面水中のカレニア属出現細胞数、
(b) 50m深水温の水平分布。

得られた成果

○ セリフォルミス赤潮の発生メカニズム

- ・ 道総研が赤潮発生時に行った調査から、セリフォルミスは道東沿岸流、親潮系水に多く分布していたことが明らかになりました（図1）。
- ・ 2022年に行った沿岸域、沖合域の調査では、セリフォルミスは1細胞も検出されませんでした。したがって、同種の出現タイプは地場発生型ではなく移流型と考えられました。
- ・ 2021年の道東大規模赤潮は、セリフォルミスを含む水塊が亜寒帯域に存在し、大規模な海洋熱波の影響により同種が増殖するとともに、その水塊が何らかの物理機構により岸に沿って流れる宗谷暖流変質水（宗谷暖流が起源と考えられる高温高塩分の水塊）に取り込まれ、道東沿岸での赤潮を形成したと考えられました。

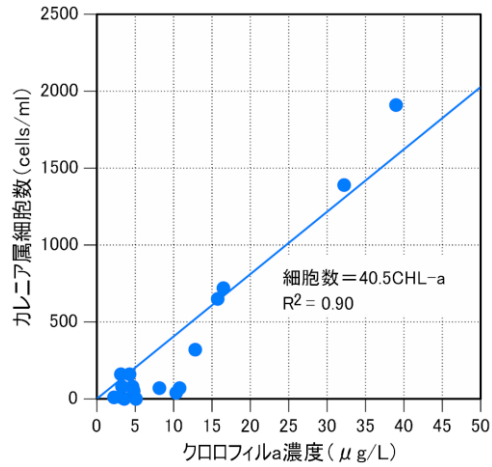


図2 クロロフィルa濃度とセリフォルミス細胞数との関係。
2021年に道東太平洋で実施した沿岸モニタリングの試料を基に分析。

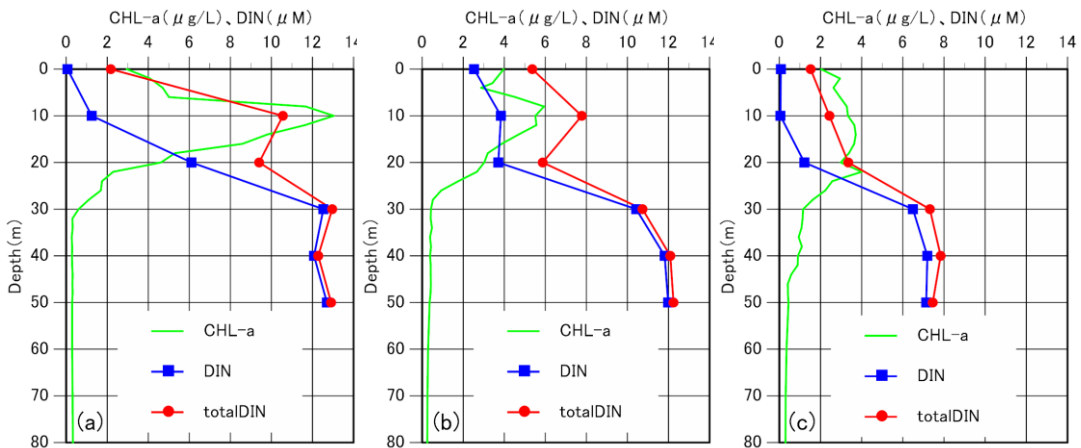


図3 根室沖約10マイル地点におけるクロロフィルa濃度、DIN（溶存態無機窒素）、クロロフィルa濃度から換算した窒素濃度とDINとの和（totalDIN）の鉛直分布。(a) 2022年7月26日 (b) 2022年8月17日 (c) 2022年9月2日観測。プランクトンにより消費された窒素量はクロロフィルa濃度の10倍 (Parsons et al.,1961) と仮定した。

得られた成果

○ セリフォルミス赤潮の持続メカニズム

- ・赤潮モニタリングから得られたセリフォルミス細胞数とクロロフィルa濃度との関係から（図2）、同種の1細胞が増殖するために使用した窒素量（ミニマムセルクオータ）は17.6pmol/cellと見積もられました。
- ・宗谷暖流変質水がもともと持つ硝酸態窒素濃度は、夏季においても枯渇することはなく、約7μMと高いことが判明しました（図3）。この栄養塩を利用してセリフォルミスは500cells/mL程度までは増殖可能なことが推察されました。
- ・道東太平洋において河川水は岸から4～5マイル沖まで広がり、中でも十勝沖の河川プルーム内では表面の硝酸態窒素濃度が100μM程度に達することがわかりました。

○ セリフォルミス赤潮の消滅メカニズム

- ・2021年の道東大規模赤潮は、11月中旬から2週間持続した西風によるエクマン輸送により、セリフォルミスが沖合へ輸送されたために消滅したと考えられました。

○ 衛星画像情報の構築

- ・本種赤潮の発生予察には海洋の循環系を網羅した監視体制が有効です。道総研では赤潮の早期予察に資するため、人工衛星GCOM-Cが観測したクロロフィルa濃度の画像を掲載するサイト (<https://hro-fish.net/satellite/index.html>) を構築しました。

(1) 赤潮発生メカニズムの解明等による発生予察手法の開発 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：道総研中央水試、釧路水試、栽培水試、函館水試、さけます内水試
水産機構資源研、北海道水産林務部

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最小化するためには、効果的で実効性が高いモニタリング体制を構築した上で、赤潮発生あるいはその予兆を早期に察知して備える必要があります。
そこで、赤潮水塊や原因生物の輸送経路、赤潮発生に関連する環境・生物的条件などを把握することで赤潮の発生機構を解明してシナリオとして整理し、さらにそれらに基づいてモニタリングの考え方や実施内容を検討しました。

①赤潮発生機構の推定と発生シナリオの提示

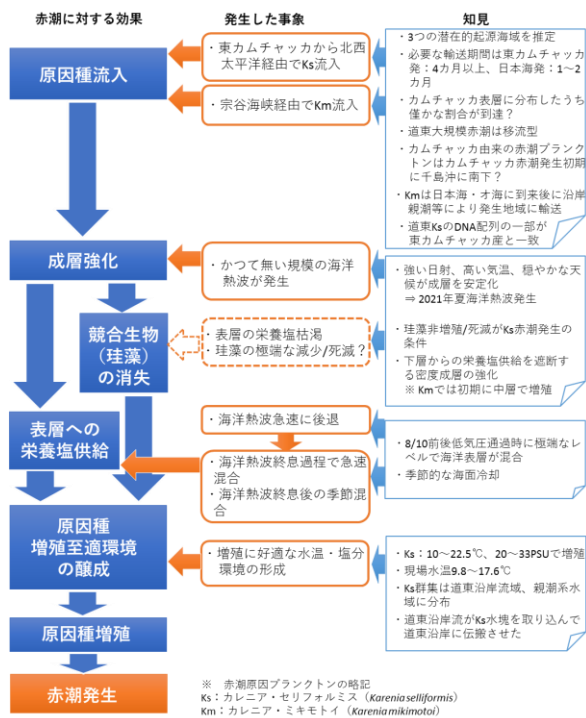


図1 道東大規模有害赤潮発生までのシナリオ (仮説)

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

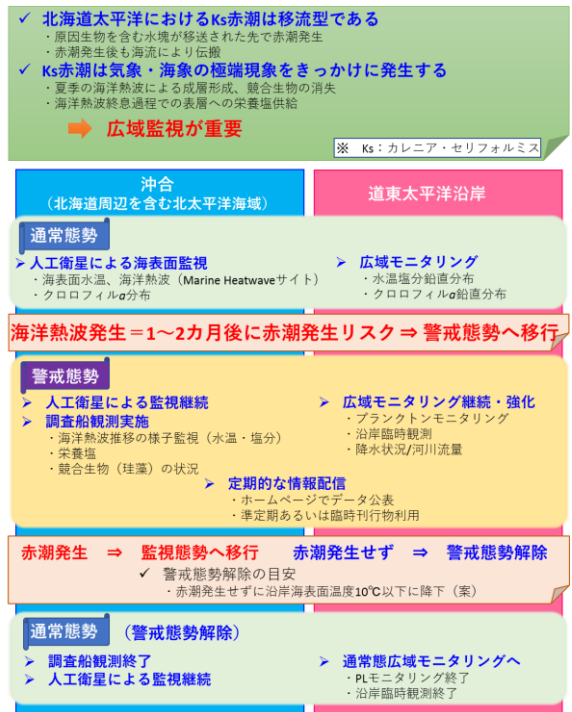


図2 道東大規模有害赤潮の発生予察に関する行動計画案

得られた成果

- 2021年秋に北海道太平洋海域で発生した大規模有害赤潮は、原因種の流入以降、海洋熱波による成層強化、その後の原因種増殖至適環境の醸成などが連鎖して赤潮発生に至ったと推察されました。これらの事象について、それらが起こった流れをシナリオ (仮説) として整理しました (図1)。
- 北海道太平洋海域で発生した大規模有害赤潮は移流型であり、かつ気象・海象の極端現象をきっかけに発生したと解釈されたことから、発生予察のためには広域監視が重要であると判断されました。これらの解釈・判断に基づき、北海道太平洋海域における赤潮発生予察などのために必要になる行動を、行動計画案として整理しました (図2)。

※ 本資料は令和3年度北海道赤潮対策緊急支援事業の成果資料として、得られた知見等をまとめたものです。

(2)新たな赤潮原因プランクトンの水産生物に対する毒性の影響等の調査 ア 北海道太平洋沿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

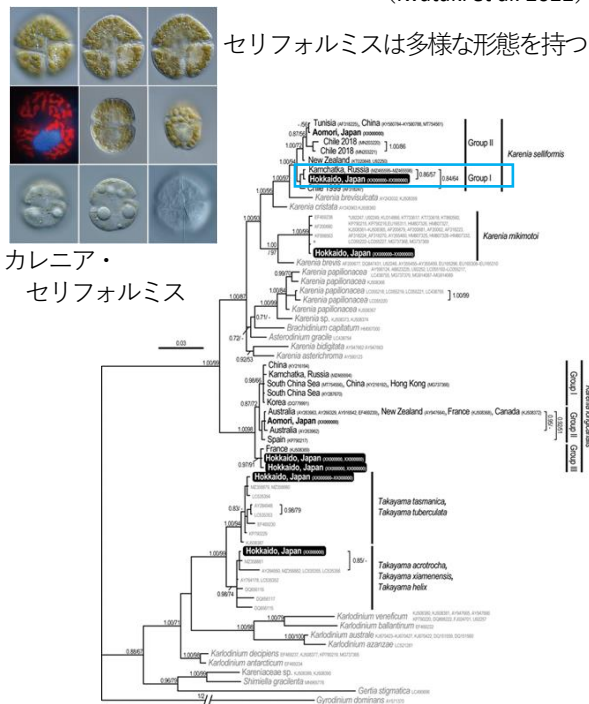
担当機関：水産機構技術研、資源研、道総研中央水試、釧路水試（再委託：東京大学）

【背景と目的】

北海道東部太平洋で発生した赤潮の主体は、*Karenia selliformis*（以下、セリフォルミス）であったことが確認されています。我が国において本種による赤潮の発生は初報告であり、我が国の沿岸環境下における生物学的特徴や生態、増殖生理特性については知見がありません。

そこで、本課題では、沖合での赤潮モニタリング手法や原因プランクトンに応じた被害軽減対策技術確立の基盤となる知見を得るため、北海道太平洋沿岸で発生した赤潮原因プランクトンの分類、増殖生理特性、生活史などの生物学的特性を明らかにすることを目的としました。

セリフォルミスの生物学的特徴： 形態・分子系統分類 (Iwataki et al. 2022)

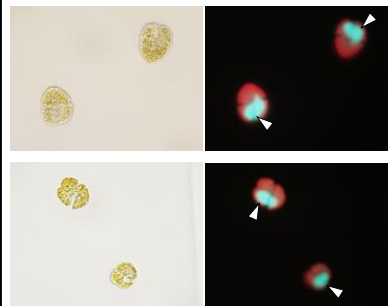


セリフォルミスおよび近縁種の分子系統樹：北海道とロシアのセリフォルミスは遺伝的に同じ系統 (□)

セリフォルミスと近縁種との種判別手法の確立

化学固定法と核染色を併用した種判別手法を確立

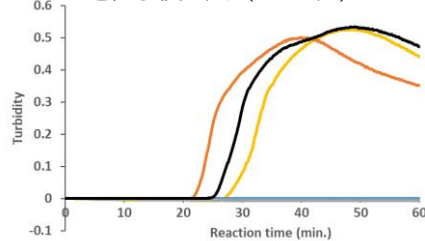
明視野 BV励起



上：*K. selliformis*,
下：*K. mikimotoi*
(以下、ミキモトイ)

核(▷)の形態や位置で種判別可能

遺伝子検査法 (LAMP法) による種判別手法を確立



セリフォルミスのみを検出。
ミキモトイは検出されない。

— *K. selliformis* MoKr600 (Aomori) — *K. selliformis* 21Ks11-1 (Akkeshi)
— *K. mikimotoi* (KM02) — Negative (DW)
— Positive (2.E+02 copies/μL)

【主な成果-1】

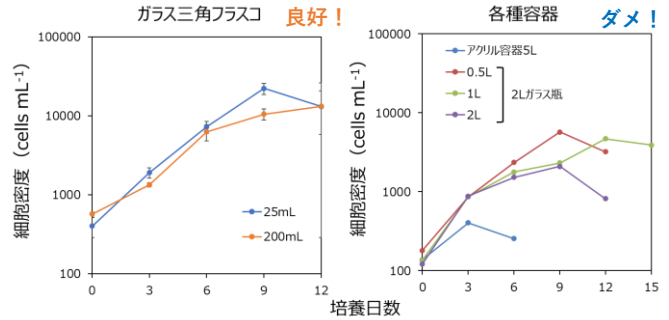
- 北海道沿岸で発生したセリフォルミスの生物学的特徴を解明しました。セリフォルミスは多様な形態を持つこと、北海道とロシア沿岸で発生したセリフォルミスは分子系統解析から同じ系統であることが分かりました。
- セリフォルミスと近縁種を細胞形態や遺伝子検査 (LAMP法) により客観的に種判別する手法を確立し、これにより沖合でのモニタリングを効率的に実施することが可能となりました。
- 赤潮発生中および発生後に採集した海底泥を培養してシストを探索しましたが、底泥からのセリフォルミスの発芽は確認されませんでした。セリフォルミスの培養では一時シスト様の細胞が観察されましたが、そのシードポピュレーション (赤潮のタネ) としての機能についてはまだ不明であり、さらなる調査研究が必要です。

培養株の維持培養方法 と大量培養系の確立



- ・複数のセリフォルミス培養株を分離
- ・f/2, 改変SWM-III, IMKなどの培地で継代培養可能

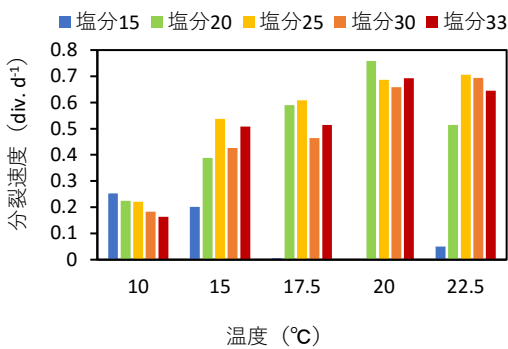
大量培養法の最適化：各種容器及び液量における収量比較
培養条件：20°C、12hL:12hD、150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$



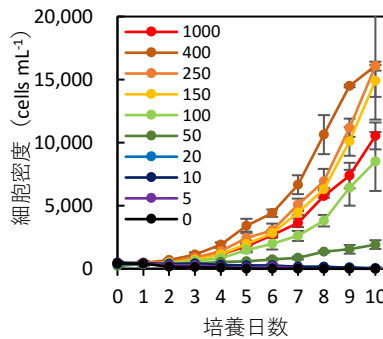
セリフォルミス細胞を大量培養する方法を最適化

セリフォルミス(Ks-6株)の増殖に及ぼす水温・塩分・光強度の影響

水温・塩分



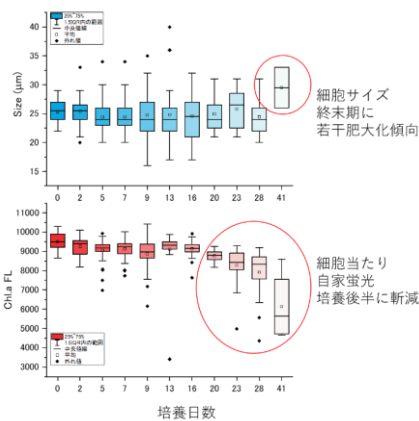
光強度



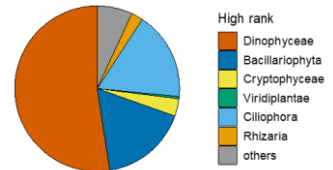
至適増殖環境は、水温
15~20°C、塩分20~33、
光強度150~400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

5°Cでは緩やかに、
25°Cでは速やかに
死滅。

培養環境が細胞サイズ等に与える影響



環境DNA解析による 赤潮発生前から発生中 のプランクトン組成 (18S rDNA)



	Sum of reads [%]		
	グループ 1	グループ 2	グループ 3
採水点	釧路市桂漁漁港 (釧路庁舎取水)	釧路～根室	標津町～襟裳岬
採水日	2021/3/11~9/28	2021/11/1	2021/10/12, 11/2
高次分類群	渦鞭毛藻, 珪藻, 放射虫, 繊毛虫	繊毛虫, 珪藻, クリプト藻	渦鞭毛藻類, 繊毛虫
渦鞭毛藻類	<i>Karenia</i> spp., <i>Amoebophrya</i> spp., <i>Alexandrium</i> spp.	<i>Karenia</i> spp., <i>Amoebophrya</i> spp.	<i>Karenia</i> spp. 優占
珪藻類	<i>Thalassiosira</i> spp., <i>Actinocyclus</i> spp., <i>Bacillaria</i> spp., <i>Chaetoceros</i> spp.	<i>Rhizosolenia</i> spp., <i>Eucampia</i> spp.	<i>Thalassiosira</i> spp., <i>Skeletonema</i> spp., <i>Leptocylindrus</i> spp.
繊毛虫	<i>Strombidium</i> spp., <i>Pelagostrombidium</i> spp.	<i>Strombidium</i> spp.	<i>Tiarina</i> spp., <i>Tintinnopsis</i> spp.

【主な成果-2】

- ・セリフォルミスの培養株を複数株分離し、安定した維持培養手法を確立しました。また、魚介類への影響試験のための培養株の大量培養方法を最適化しました。
- ・セリフォルミスの増殖可能な水温・塩分範囲、および増殖に与える光強度の影響を明らかにしました。結果から、2021年秋の道東赤潮は、セリフォルミスの増殖至適な水温、塩分環境で発生していたことが分かりました。
- ・培養環境がセリフォルミスの形態等の変化に与える影響を検討し、増殖定常期から末期に細胞サイズが肥大すること、定常期後期に葉緑体自家蛍光が減少する傾向があることを確認しました。
- ・環境DNA解析により、道東における赤潮発生前から発生中のプランクトン組成を調査し、属レベルで地理的・経時的に試料を3つのグループに類型化できることが推察されました。

(2) 新たな赤潮原因プランクトンの水産生物に対する毒性の影響等の調査 Ⅰ 有用水産生物に対する有害性の解明

担当機関：水産機構資源研、技術研、水大校（再委託：北里大学）

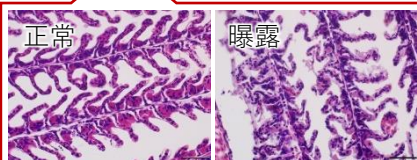
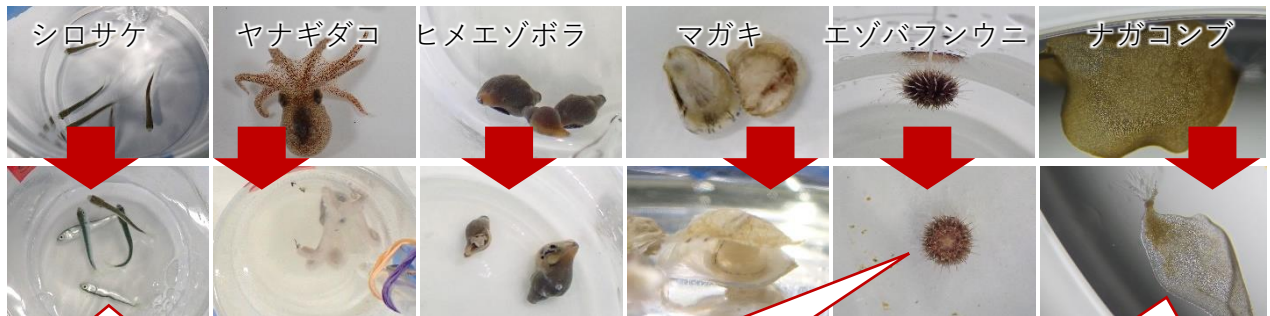
道総研釧路水試、栽培水試、函館水試、中央水試、さけます内水試

【目的】

北海道東部太平洋海域で発生した *Karenia selliformis*（以降、セリフォルミス）を中心とした赤潮の有用水産生物に対する有害性を解明するため、赤潮海水や培養株を活用した曝露試験を行い有害性やへい死機構を解明したほか、漁場等で生じた生物被害の情報を収集、整理を実施しました。

① 赤潮海水および培養株を用いた曝露試験による有害性評価

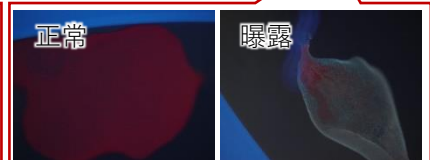
セリフォルミス曝露試験で衰弱（横臥や付着力の喪失）やへい死が確認された生物の一例



曝露によってエラが損傷



曝露によって体表が損傷



曝露によって部分的に枯死

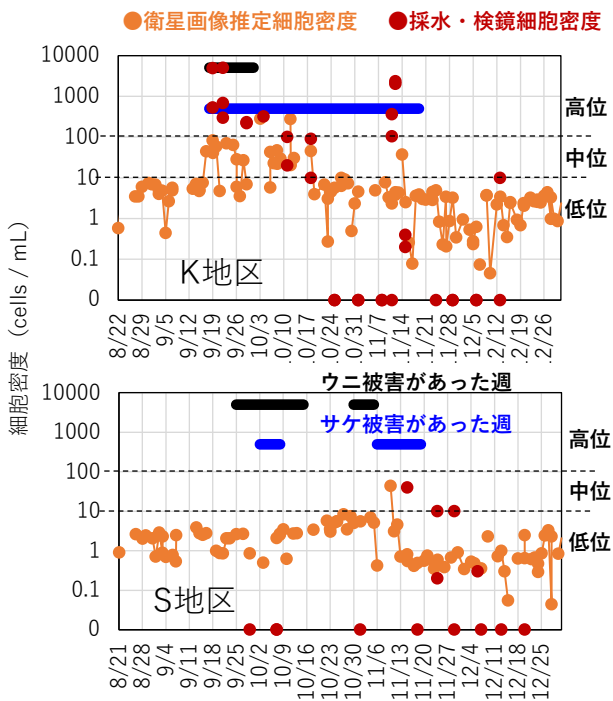
【主な成果-1】

- ・曝露試験によって、セリフォルミスは魚類や棘皮動物類などの衰弱やへい死を引き起こすことが確認されましたが、エビ・カニ類では顕著な異常は確認されませんでした。
- ・セリフォルミスへの感受性は、魚類や腹足類（巻貝類）で高く二枚貝類やウニ・ナマコ類では低いものの、セリフォルミスは総じて同属の *Karenia mikimotoi*（カレニア・ミキモトイ）よりもこれらの生物に対する有害性が高いことが明らかとなりました。
- ・対象生物のサイズや年齢による感受性の違いや、セリフォルミスの増殖活性の変化に伴う有害性の変化も確認されました。
- ・ウニ類や腹足類では付着力を失うことで、打ち上げや流失、体の損傷が生じ、間接的にへい死に至った可能性も推察されました。
- ・セリフォルミスには特性の異なる複数の有害因子が存在する可能性が示唆されましたが、機器分析において既知毒は検出されませんでした。

※実際の野外環境における影響の確認には、対象生物の生息域等も考慮した検証が必要です。

②漁場および飼育生物被害情報の収集整理および解析

【沿岸域の浅場におけるカレニア属プランクトン細胞密度と漁業被害の推移】



地区によっては、細胞密度と漁業被害の推移・関係性が異なる

潜水回収されたウニ類
(へい死・衰弱個体が含まれる)



定置網でへい死し回収されたサケ類



【深場における影響調査】

海底撮影調査で確認されたツブ類
(生貝の確認は極めて限定的)



トロール調査で採集されたへい死直後のツブ類
(試験研究は今 No. 943より)



【主な成果-2】

- 沿岸域の浅場でのサケ類やウニ類の漁業被害は、カレニア属プランクトンの細胞密度が10~100 cells / mLの中位以上に達した翌週に顕在化する傾向にありましたが、密度の推移と被害が一致しない地区も確認されました。
- 海底撮影調査などによって、一部の海域の深場でのツブ類の資源減少や分布域の縮小の可能性が明らかとなりましたが、セリフォルミスの深場への到達過程や有害性の変化が不明であり、被害実態の全容解明にはいたっておらず、さらなる調査や研究が必要です。

(2) 新たな赤潮原因プランクトンの水産生物に対する毒性の影響等の調査

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：道総研中央水試、釧路水試、栽培水試、函館水試、さけます内水試
水産機構資源研、水産機構資源研
北海道水産林務部

北海道東部太平洋海域で発生する大規模赤潮による漁業被害の軽減を図るため、赤潮原因プランクトンの種組成や種判別方法、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して情報整理するとともに、赤潮海水および培養株を用いた曝露試験等により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ついて整理しました。

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ました。

● 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 セルフォルミス)

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

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
・生け賣、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
漁業被害の報告	無	無 (少)	有	有 ・ウニ類等のへい死、沿岸への打ちあがり ・定置網等の漁獲物へい死 等
生物への影響 (曝露試験)	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 へい死亡率 > 90% シロサケ稚魚 (魚類) へい死亡率 > 50% ヒメエソボラ (鰓足類) 衰弱・附着弱体化 エソアワビ (鰓足類) エソバフワンニ (棘皮)	有害性(曝露試験): 高 へい死亡率 > 90% シロサケ稚魚 (魚類) へい死亡率 > 90% エソアワビ (鰓足類)、ヤナギダコ (鰓足類) へい死亡率 > 50% ヒメエソボラ (鰓足類) エソバフワンニ (棘皮) マナマコ (棘皮)、マガキ (二枚貝) ホタテガイ (二枚貝)
	※ <i>K. selliformis</i> 培養細胞に曝露 ※魚類、鰓足類や二枚貝、棘皮動物等の無脊椎動物について検証 ※ホッカイエビやハナサキガニは顕著なへい死なし			

得られた成果

- 2021年秋に道東太平洋海域で発生した赤潮原因プランクトンにおいて、赤潮発生期間を通して優占し、かつ、種々の生物に対して非常に強い有害性をもつ *Karenia selliformis* (以下、*K. selliformis*) を主体的に観測することが妥当と考えられました。形態観察、遺伝子検査による種同定手法を構築し、効果的にモニタリングすることが可能になりました。
- K. selliformis* 培養株を用いて増殖特性や環境応答について解析し、増殖至適環境条件（水温15~20℃、塩分20~33、光強度150~400μmol m⁻² s⁻¹）がわかったほか、増殖不可能となる水温範囲等も明確になり、監視するうえで留意すべき環境情報が得られました。
- 赤潮海水や*K. selliformis* 培養株を用いた曝露試験によって、魚類や棘皮動物などの衰弱やへい死を引き起こすことが確認されました。また北海道で甚大な漁業被害となったウニ類の大規模へい死・打ちあがりの発生報告や定置網でのサケ類のへい死と、環境中の細胞密度との関係について検討しました。
- K. selliformis* への感受性は生物種やその成長度合い、曝露された状況等によって変化するため、リスク評価には慎重な判断が必要ですが、幅広い水産資源に対する被害軽減対策の目安として、注意警戒を要する環境水中の細胞密度基準を検討しました (図)。