

(1) 赤潮のモニタリング及び予察の技術開発

A. 効率的・効果的なモニタリング手法の開発

担当機関：道総研中央水試、道総研函館水試、道総研釧路水試、道総研さけます内水試、水産機構資源研、北海道

【背景と目的】

2021年道東太平洋で*Karenia selliformis*（以下、セリフォルミス）による赤潮が発生し、ウニ類を中心に甚大な漁業被害が生じました。この赤潮は、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。そこで、本課題では、2022年から実施している太平洋沿岸10海域と沖合域における赤潮プランクトンのモニタリングおよび海洋環境調査を継続するとともに、セリフォルミスの出現を効率的・効果的に把握可能なモニタリング手法を検討しました。

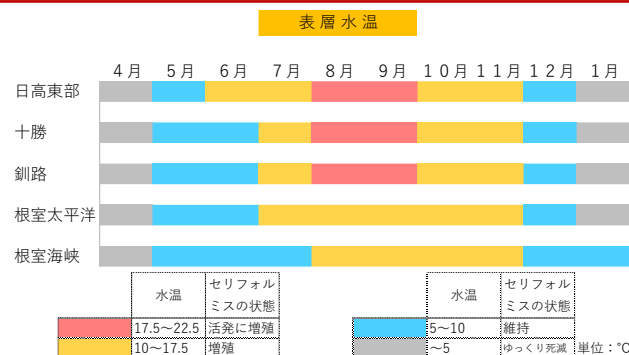


図1 表層水温の経時変化

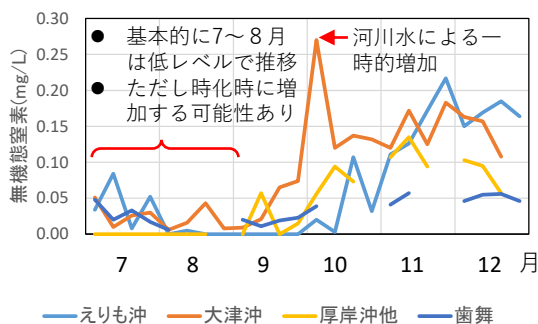


図3 無機態窒素の経時変化

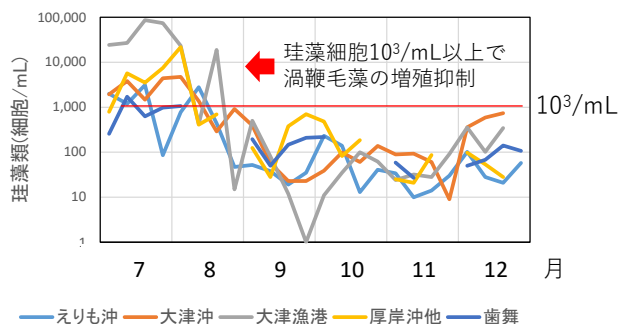


図2 珪藻類細胞数の経時変化

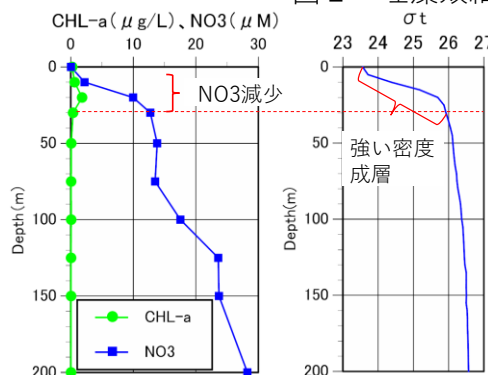


図4 クロロフィルa濃度、硝酸態窒素 (NO₃)、密度 (σ_t) の鉛直分布 (2023年7月、42N・144E地点)

カレンシア赤潮発生シナリオ

- 海洋熱波による強い密度成層内では硝酸態窒素が直線的に減少
- 貧栄養なため珪藻類は増殖できないか死滅
→低クロロフィルa濃度

時化による栄養塩供給により渦鞭毛藻が増殖可能

【得られた成果】

- ・2023年に実施した沿岸域および沖合域のモニタリング調査（顕微鏡による採水サンプル中のプランクトン種同定、計数）では、2022年と同様にセリフォルミスは検出されませんでした。なお、課題（2）ウで実施した環境DNA解析では2022年にセリフォルミスに相同性の高い塩基配列が検出されています。
- ・セリフォルミスの水温に対する増殖特性、太平洋沿岸域における表層水温の季節変化から（図1）、監視が必要な期間（6~11月）を設定することができ、モニタリングの効率化につながる知見が得られました。また、7~8月の夏季は通常、渦鞭毛藻の増殖によって不適な環境にあることがわかりました（図2、3）。さらに、栄養塩の地域差から、河川水が影響する海域を特に注視する必要があると考えられました（図3）。
- ・2021年の大規模赤潮は、海洋熱波による夏季の成層強化とその後の時化による栄養塩供給により誘引されたと推察されています。このシナリオは現場観測で得られたデータセットからも支持されました（図4）。
- ・本事業で得られた研究成果を踏まえ、2023年8月に北海道及び道総研はカレンシア赤潮の注意喚起基準、監視体制などを明示した「北海道太平洋海域における有害赤潮の発生予察および監視に関する行動計画」を策定しました。

(1) 赤潮のモニタリング及び予察の技術開発

I. 海洋環境・衛星画像等からの予察技術開発

担当機関：道総研中央水試、水産機構資源研、名古屋大学（再委託）

【背景と目的】

2021年道東太平洋で*Karenia selliformis*（以下、セリフォルミス）による赤潮が発生し、ウニ類を中心に甚大な漁業被害が生じました。赤潮主要種であったセリフォルミスは、日本国内で初めて赤潮を形成し、かつ前例のないほど広域で発生しました。今後、セリフォルミスによる赤潮を予察するうえでは、沿岸域中心のモニタリングに加えて、沖合域を広く監視することも重要と考えられますが、調査船で高頻度に観測することは困難です。そこで、人工衛星の光学観測データを活用し、赤潮水塊を判別するアルゴリズムの開発に取り組み、現場実装への可能性を検討しました。

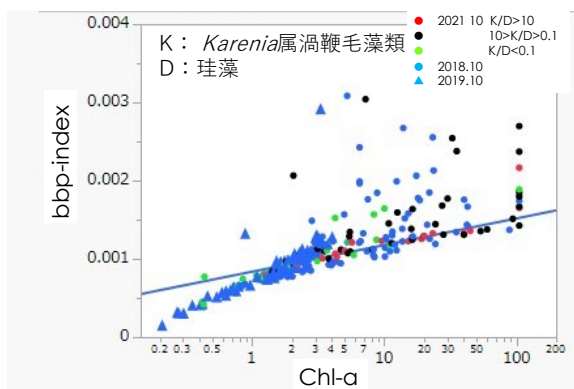


図1 珧藻類と*Karenia*属渦鞭毛藻類の計数結果からマッチアップしたクロロフィルa濃度とbbp-indexの散布図と回帰直線

$$b_{bp-index} = \frac{R_{rs}(565) \times R_{rs}(670)}{R_{rs}(565) - R_{rs}(670)}$$

* R_{rs} はリモートセンシング反射率

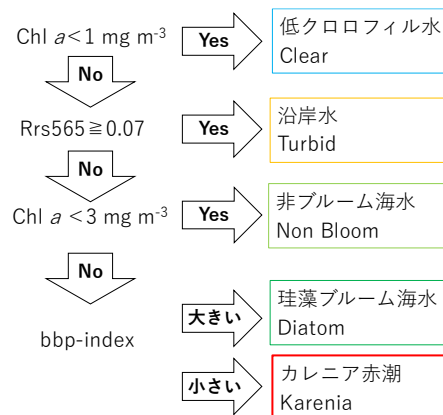


図2 水塊アルゴリズムの概要

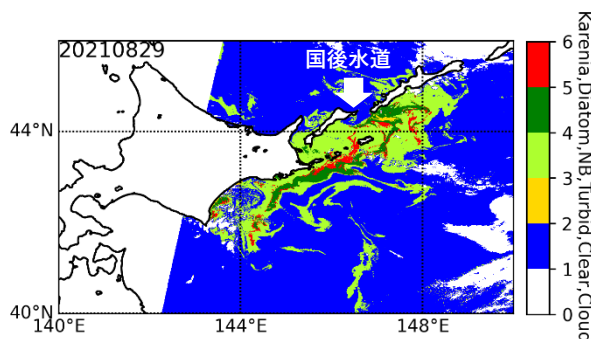
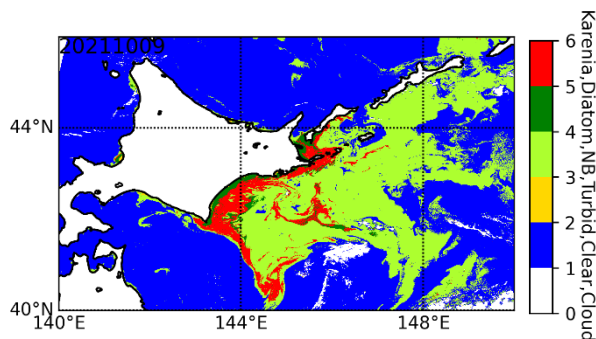


図3 2021年10月9日（左）、2021年8月29日（右）の水塊判別図
赤がカレニア赤潮と推定された領域

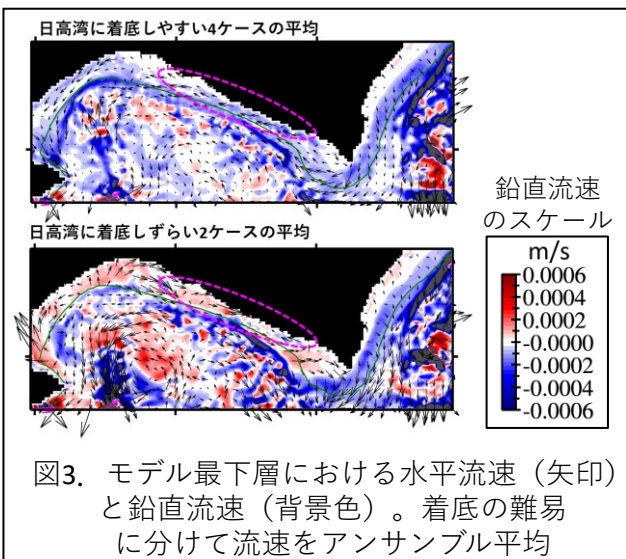
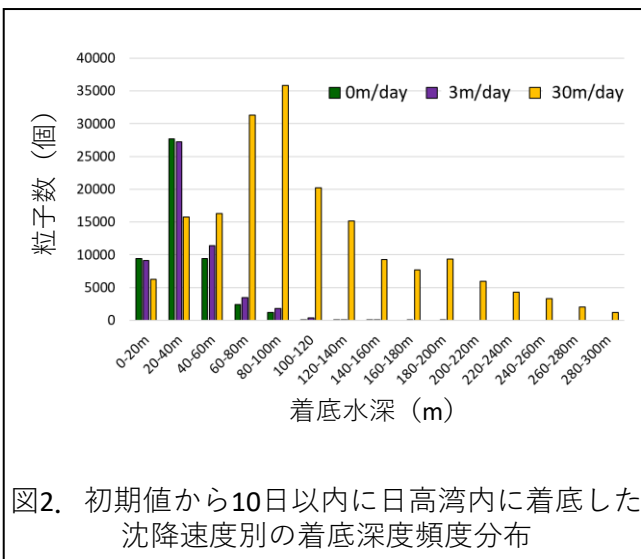
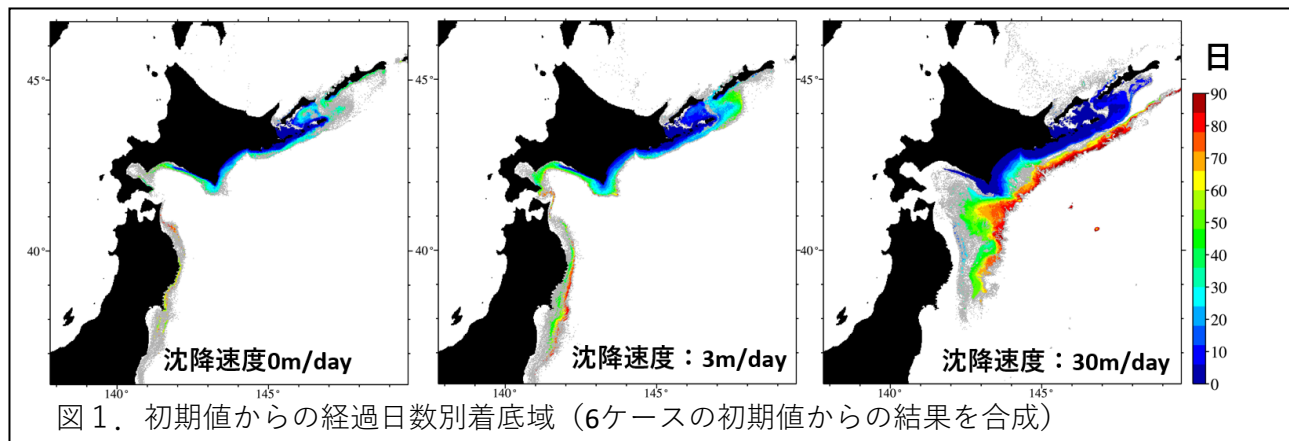
【得られた成果】

- クロロフィルa濃度、bbp-indexを用いて、カレニア赤潮を判別するアルゴリズムを作成しました（図1、図2）。
- 上記アルゴリズムを活用し、2021年に発生した有害赤潮の時間的推移を調べました。その結果、国後水道では、本道太平洋側で赤潮が発生する前に、既に赤潮が形成されていることを確認でき（図3）、本アルゴリズムによるモニタリングはカレニア赤潮の早期発見に有効であると考えられました。

(2) 赤潮による深い水深への影響等に関する調査 ア. 赤潮原因プランクトンの鉛直方向への動態

担当機関：水産機構資源研、水産機構技術研

【背景と目的】2021年秋の道東赤潮発生以降、ウニなど比較的浅海域に生息する水産生物への被害が報告されています。加えて、赤潮発生海域では水深数十m以深に生息する貝類等の漁獲が激減したことや、100 m以深のトロール調査ではホシムシや貝類のへい死個体が確認されました。しかし深い水深に赤潮プランクトンが到達したかについては検証されていません。そこで、本課題では、鉛直方向の移動を考慮した赤潮プランクトンやその周辺水の三次元的な輸送についてシミュレーションを行い、深い水深への赤潮プランクトンの輸送可能性について検討しました。



【得られた成果】Sentinel-3による衛星海色画像からカレンシア属細胞密度を推定し、その分布図に基づいて粒子の初期配置を6ケース決定し、鉛直運動を考慮した粒子追跡実験を実施しました。他の赤潮プランクトンの既往知見を参考に、カレンシア属の沈降速度は0、3、30 m day⁻¹に設定し、海底に着底した粒子分布からカレンシア着底マップを作成しました。その結果、沈降速度に関わらず、追跡初期からわずか10日以内に道東や日高湾周辺の沿岸域に粒子が着底しました（図1）。沈降速度0と3 m day⁻¹のケースでは、10日以内に日高湾内に着底した粒子の水深は20～40 mが最多でした（図2）。着底メカニズムを調べた結果、日高湾沿岸を北西方向に流れる沿岸流によるカレンシア属の湾奥方向への輸送と、沿岸流直下の海底近傍での下降流、並びにカレンシア属の沈降速度が日高湾内での着底に寄与していたことが分かりました（図3）。

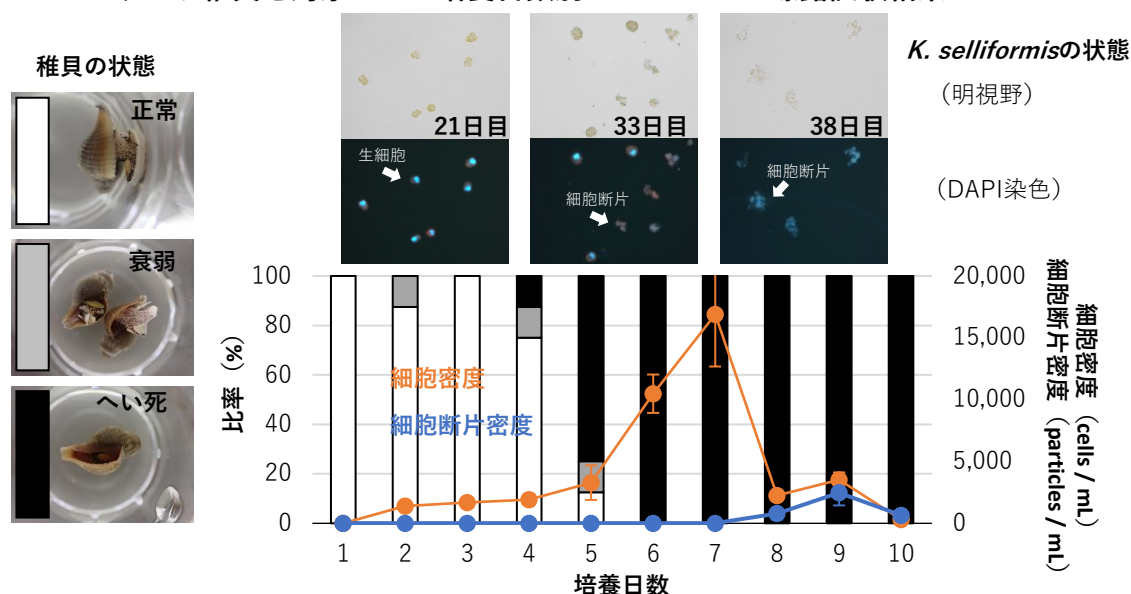
(2) 赤潮による深い水深への影響等に関する調査

Ⅰ. 原因プランクトンの深場に生息する生物への影響評価

担当機関：水産機構資源研、水産機構技術研、北里大学（再委託）

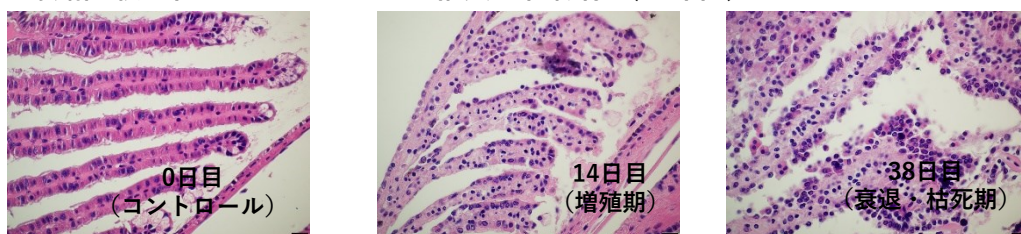
【背景と目的】道東太平洋沿岸域において、2021年秋季の赤潮以降、深場生物の大量へい死やエゾボラ等のつぶ類（巻貝）の資源量が大幅に減少しました。また、先行研究における室内曝露試験により、つぶ類の一種の *Neptunea arthritica*（ヒメエゾボラ）が増殖期の赤潮原因プランクトン *Karenia selliformis*（以下、セリフォルミス）に曝露されることでへい死することが確認されました。表層で赤潮を形成したセリフォルミスがつぶ類が生息する深場に到達するまでの長い期間、有害性を維持できるかは不明です。そこで、セリフォルミスを経期間培養し、ヒメエゾボラ稚貝に対する有害性の経時変化を追跡しました。

ヒメエゾボラ稚貝を対象とした培養日数別 *K. selliformis* 曝露試験結果



細胞密度が大きく減少しその遺骸に由来する細胞断片密度が増加した培養28日目以降（衰退・枯死期）の曝露試験においても、へい死率は100%で推移し有害性を維持

曝露試験に供したヒメエゾボラ稚貝の組織像（鰓部位）



増殖期と衰退・枯死期で共通して二次鰓弁の浮腫や上皮細胞の剥離などの損傷を確認

【得られた成果】曝露試験の結果、長期間の培養により衰退・枯死期に達したセリフォルミスの培養液も、増殖期にある生細胞の培養液と同様に、ヒメエゾボラ稚貝に対して高い有害性を有することが明らかとなりました。本研究の成果と深場に到達するまでの海洋物理学的プロセスなどを統合して、深場生物の被害発生機序を考察することが今後の課題です。

(2) 赤潮による深い水深への影響等に関する調査
ウ、原因プランクトンの海底到達の可能性の検証

担当機関：水産機構技術研、水産機構資源研、道総研中央水試、道総研釧路水試、道総研栽培水試

【背景と目的】2021年9月に北海道東部太平洋で発生した赤潮は、この海域のサケ類やウニ類など有用水産生物の大規模なへい死を引き起こしました。本赤潮の原因種である *Karenia selliformis*（以下、セリフォルミス）の発生は我が国で例がなく、早急に実態を把握し、漁業被害を軽減する対策を構築する必要が生じました。本赤潮では、浅海域だけでなく、水深数十m以深に生息する貝類等の漁獲も激減したことや、100 m以深のトロール調査では、ホシムシや貝類のへい死個体が確認されました。本研究課題では、環境DNA技術やドローンを利用して、深場へ生息する生物へのセリフォルミスの影響について検討することを目的としています。

結果 1：環境 DNA 解析による海底泥および深場の海水中における原因プランクトンの分布調査

*K. selliformis*の海底深場への到達の検証

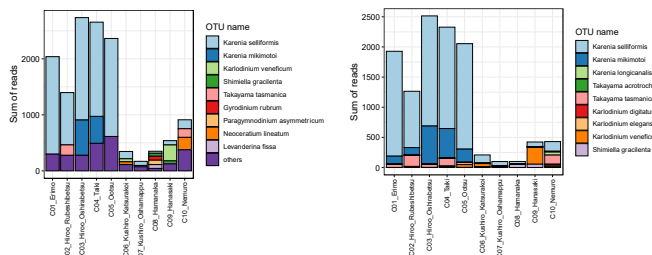
検鏡結果（2021年12月海水試料）

調査点	深度 m	細胞密度 (細胞数 / mL) <i>Karenia selliformis</i>
ヤナギダゴ漁場 東側定点	0.0	7
ヤナギダゴ漁場 東側定点	94.3	6
ヤナギダゴ漁場 中央定点	0.0	2
ヤナギダゴ漁場 中央定点	94.8	6
ヤナギダゴ漁場 西側定点	0.0	0
ヤナギダゴ漁場 西側定点	93.0	1
湯沸岬沖	0.0	16
湯沸岬沖	35.9	8

環境DNA結果（2021年12月底泥試料）

ホシムシヘイ死個体が採集された周辺の底泥から、*K. selliformis*と相同性が100%一致する配列が8リード得られた。

28S rDNAに基づく渦鞭毛藻とカレニア科

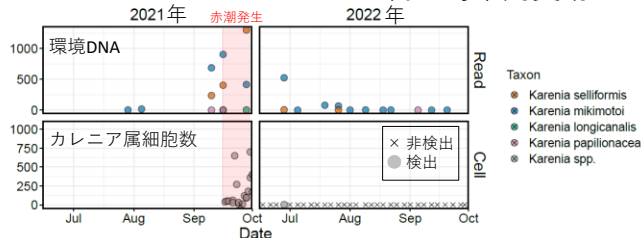


カレニア属
細胞数



- 細胞数の傾向と一致
- 環境DNAは感度が良い

28S rDNAに基づくカレニア属の時系列変動

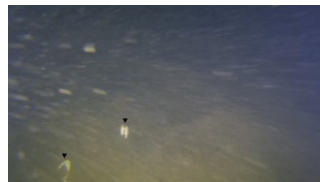


2021年 赤潮発生前からカレニア属の塩基配列を検出
初期 *K. mikimotoi* → 大発生 *K. selliformis*
リード数と細胞数が対応

2022年 環境DNAはカレニア属の塩基配列を検出
→ 検鏡では 0-2 細胞/mL

結果 2：水中ドローン撮影調査結果

- ・撮影時間は42分49秒
- ・撮影時の海底付近は透視度が低い
- ・撮影画像からはエゾボラ生貝は未確認
- ・表在性マクロベントスとして多数の優占していたクモヒトデ類はドレッジ調査においても未確認



エゾボラ生貝は未確認であり、エゾボラ資源は低水準と推測された。

【得られた成果】

- ・2021年12月、浜中沖のヤナギダコ漁場の水深約95 mにおいて、生きたセリフォルミスが低密度で検出され、海底深場に達していたことが確認されました。同時期に採集した底泥試料について、28S rDNA領域の環境DNA解析を実施した結果、セリフォルミスと100%相同の配列が得られました。ただし、得られたリード数はごく微量であるため再検討が必要です。
- ・道東の環境DNA解析の結果は、細胞数の結果とほぼ一致していました。
- ・2022年に、検鏡では生きたセリフォルミスは検出されませんでしたが、環境DNA解析ではセリフォルミスに相同性の高い塩基配列が検出されました。
- ・環境DNA解析は感度が高く、モニタリングへの利用の可能性も出てきました。
- ・水深100 m付近のえりも岬沖海底撮影調査を2023年10月に実施した結果、エゾボラは確認できず、資源状況は低水準と考えられました。

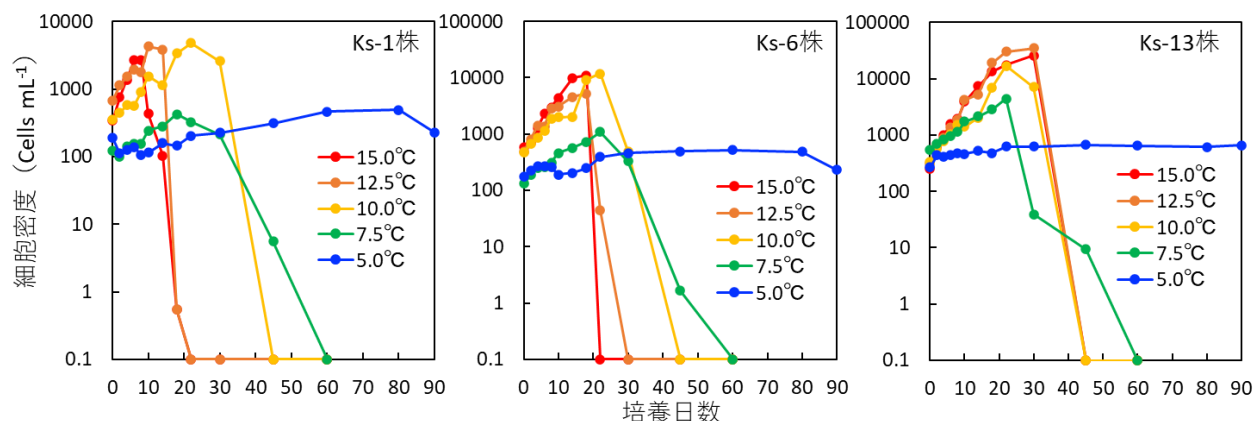
(2) 赤潮による深い水深への影響等に関する調査 エ. 原因プランクトンの越冬細胞生残条件の検討

担当機関：水産機構技術研

【背景と目的】

2021年9月に北海道東部太平洋で発生した*Karenia selliformis*（以下、セリフォルミス）による赤潮は、2020年秋季にロシアカムチャッカ半島で発生した赤潮との関連が示唆されています。しかしながら、セリフォルミスのシスト形成の可能性や越冬生態については不明な点が多く残されています。本研究では、セリフォルミスが栄養細胞のまま越冬する可能性について、培養実験により検証するとともに、培養環境条件と栄養細胞の生残等との関係について検討しました。

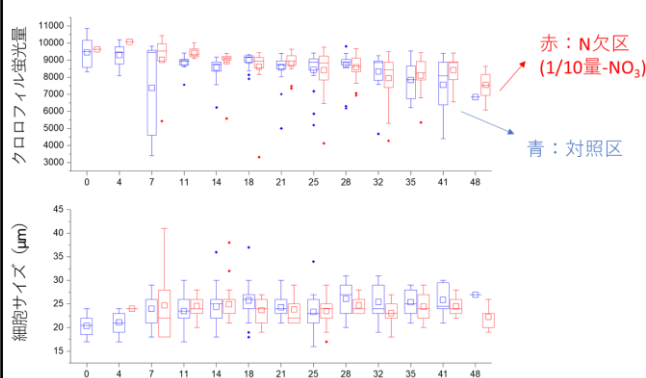
越冬細胞生残条件の検討



・各株を各温度の下、弱光（20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）、12 h明/12 h暗で培養

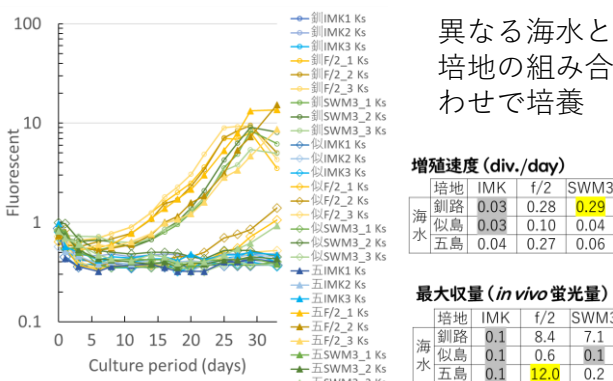
・5°Cでは少なくとも90日以上生残
・弱光下では低水温で生残期間が長くなる

細胞形態変化と培養環境との関係（無機窒素の影響）



環境中の窒素濃度の低下は*K. selliformis*の細胞サイズやクロロフィル量には影響なし

細胞生残における培養海水・培地組成の影響



異なる海水と培地の組み合わせで培養

増殖速度 (div./day)

培地	IMK	f/2	SWM3
海水	0.03	0.28	0.29
似島	0.03	0.10	0.04
五島	0.04	0.27	0.06

最大収量 (in vivo 蛍光量)

培地	IMK	f/2	SWM3
海水	0.1	8.4	7.1
似島	0.1	0.6	0.1
五島	0.1	12.0	0.2

・赤潮発生時の釧路沿岸海水で良好に増殖
・瀬戸内海（似島沖）の海水で増殖不良

【得られた成果】

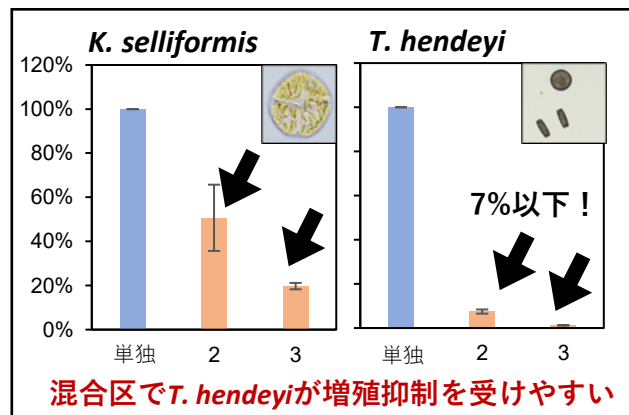
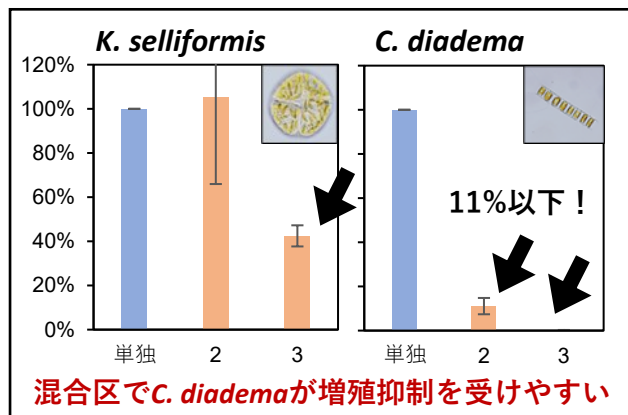
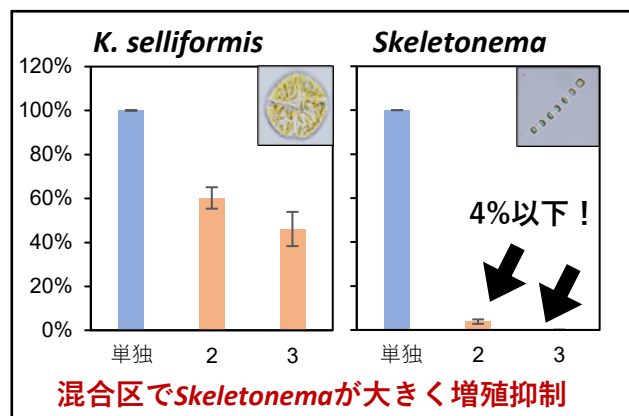
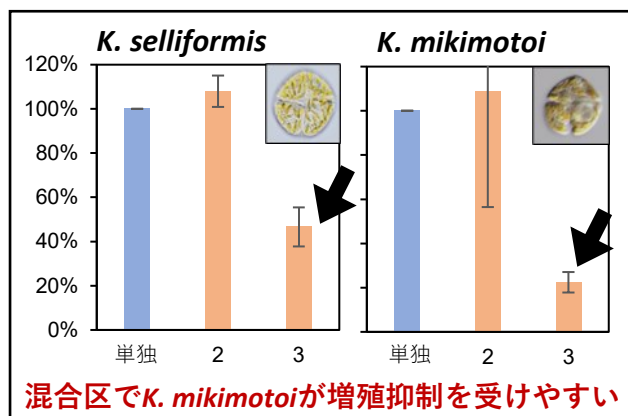
- ・セリフォルミスは、弱光下・低水温で生残期間が長くなり、5°C弱光下では少なくとも90日以上、栄養細胞のまま生残することが確認されたことから、少なくとも5°C以上では栄養細胞での越冬が可能と推察されました。
- ・環境中の窒素濃度の低下はセリフォルミスの細胞サイズや形態変化、クロロフィル蛍光強度には影響を与えず、深い水深で確認されたクロロフィルを持たない透明な細胞は観察されませんでした。
- ・セリフォルミスは釧路沿岸で採水した海水で良好に増殖したことから、赤潮発生時の水環境が本種の増殖に適した環境であったことが推察されました。

(2) 赤潮による深い水深への影響等に関する調査 オ. 他種プランクトンとの競合関係の解明

担当機関：水産機構技術研、水産機構水大校、九州大学（再委託）

【背景と目的】2021年秋に北海道東部太平洋沿岸域で発生した*Karenia selliformis*（以下、セリフォルミス）を中心とした大規模な赤潮により、甚大な漁業被害が発生しました。赤潮発生初期に複数の*Karenia*属が混在していたこと、珪藻類が例年より低密度だったことから、他種との増殖競合がセリフォルミスの単種優占化に関与した可能性があります。本課題では、この可能性を検証するために、セリフォルミスと他種（*Karenia mikimotoi*および珪藻3種〔*Skeletonema* sp., *Chaetoceros diadema*, *Thalassiosira hendeyi*〕）の二者混合培養実験を行い、種間の競合関係を調べました。

単独区 (初期細胞密度200 cells/mL) に対する混合区 (+他種200, 2000 cells/mL) の最大到達密度（相対値）



【得られた成果】赤潮発生初期の水温15℃で混合培養すると、セリフォルミスと他種は互いに増殖を抑制し合いましたが、増殖抑制効果は他種よりセリフォルミスの方が強いことが明らかとなりました。また、セリフォルミスの増殖抑制効果に対する感受性は種ごとに大きく異なることが分かりました。本研究により、2021年の赤潮発生メカニズムに、セリフォルミスと他種間の増殖競合が関与した可能性が支持されました。