

イ. 海洋環境情報の収集解析

【担当機関・所属・担当者】

道総研中央水試・資源管理部・西田芳則、宮園 章、有馬大地、安永倫明、稲川 亮
道総研釧路水試・調査研究部・美坂 正、石田良太郎、澤村正幸、安東祐太郎
道総研函館水試・調査研究部・藤岡 崇、夏池真史、木村俊介
水研機構・資源研海洋環境部・黒田 寛、谷内由貴子
水研機構・資源研社会生態系システム部・長谷川夏樹、渡辺剛
水研機構・技術研環境保全部・三宅陽一、坂本節子、紫加田知幸、北辻さほ

【目的（全体計画）】

赤潮発生翌年である 2022 年の夏から秋における北海道沖合域で *Karenia selliformis* の出現状況とともに珪藻類の出現状況を把握する。また、道東沖合では情報の少ない栄養塩の分布状況を把握する。

効率的な監視体制を構築するため、2021 年の道東太平洋沿岸域で発生した *K. selliformis* 赤潮をケーススタディとして、赤潮に影響する気象・海洋環境、生物的要因に関する知見を収集・整理し、赤潮発生シナリオを構築する。赤潮発生シナリオを元にモニタリング体制を検討し、現場検証をとおり、効率的な監視体制を構築する。

そのほか、*K. selliformis* 赤潮の発生メカニズム解明に有用なデータを入手し解析する。

【方法】

1) 赤潮発生シナリオ（仮説）の構築

構成員が所持している海洋環境データ、解析成果などをユニットメンバーで共有し、それらの情報をもとに赤潮発生シナリオを構築する。赤潮発生シナリオをもとにモニタリング体制を検討する。

2) 現場観測によるシナリオ検証

1) で構築したモニタリング体制により現場観測を実施し、当初の発生シナリオを検証する。なお、現場観測の調査項目、方法などは以下のとおり。

2022 年における *K. selliformis* の出現状況を把握するため、7 月～9 月にかけて計 3 回、図 1 に示す調査点において、*K. selliformis* サンプリングのための採水を実施した。調査期間は第 1 回目が 7 月 26 日～7 月 31 日、2 回目が 8 月 17 日～18 日、3 回目が 9 月 1 日～2 日である。なお、第 1 回目の調査は太平洋海域では釧路水試所属北辰丸と函館水試所属金星丸、オホーツク海域では稚内水試所属北洋丸、第 2～3 回目の調査では釧路水試北辰丸を用いて実施した。*K. selliformis* の採水層は海面と深度 10m の 2 層とした。採水した海水 500mL を 2 μ m のメッシュで 5mL まで濃縮し、それに片野液 5mL を加えて固定し、検鏡

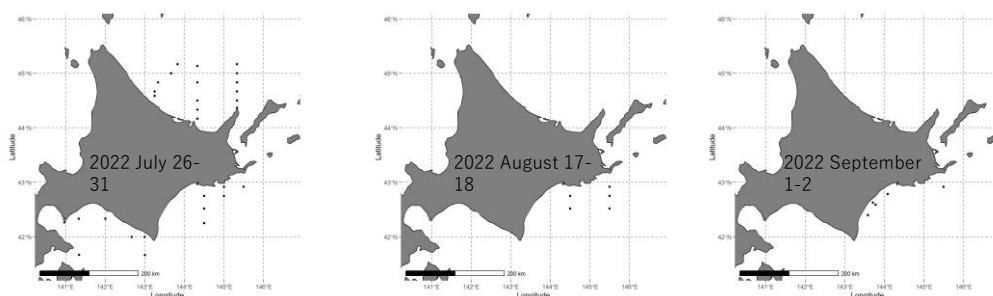


図1 調査船による *Karenia* 属採集地点。(左) 7 月 (中) 8 月 (右) 9 月。

用のサンプルとした。サンプルを冷蔵保存の後、実験室にて倒立顕微鏡を用いて種同定および計数を行った。また同時に珪藻類の出現数をカウントした。

また、上記の道東太平洋における調査航海では、河川水の広がりによる栄養塩添加の状況を把握するため、図2に示す調査全点において海面採水を実施した。加えて図2に示す星印の地点では、栄養塩の鉛直分布を把握するため、深度10mから10mピッチで深度50mまで採水した。ただし、諸般の事情により、7月と8月の調査については、採水が実施できたのはANラインのみであった。栄養塩のサンプルについては冷凍保存後、オートアナライザーにより、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニウム態窒素、リン酸態リン、ケイ酸態ケイ素の含有量を分析した。栄養塩分析用の採水を実施した地点においては、クロロフィルa濃度の分析のための採水も行った。海水の濾過量は230mLとし、Trilogyを用いてクロロフィルa濃度を測定した。

K. selliformis 赤潮の初期発生の場合として港湾が機能しているかどうかを確認するため、2022年6月から11月まで月3回の頻度で、十勝管内の天津漁港と十勝港において採水し、*Karenia* 科プランクトンの出現と珪藻類の出現状況を調査した。

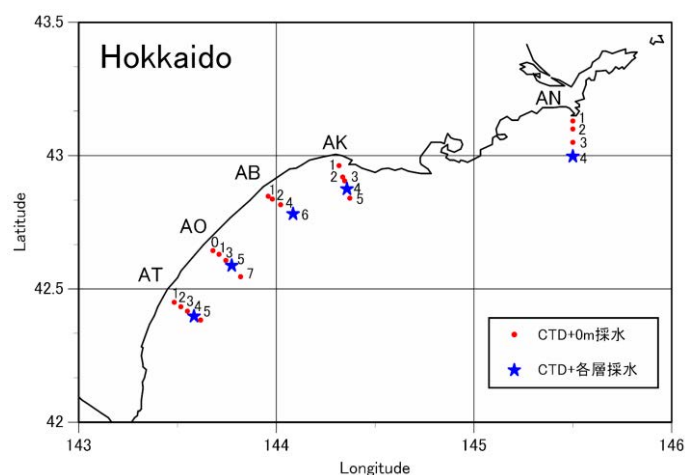


図2 道東沿岸域における栄養塩等の調査地点

3) その他データの解析

Kuroda et al. (2021)で行われたカムチャッカ沿岸に配置した粒子の追跡実験のうち、道東沖に到達した粒子のデータを使って道東に到来した粒子の輸送経路と経験水温を調べた。

また、2021 年白糠町が行った漁場環境調査のうち、設置型 ADCP の濁度の連続データを入手し解析した。

【結果および考察】

1) 赤潮発生シナリオ（仮説）の構築

2021 年道東大規模赤潮の特徴

ここでは、有効なシナリオ構築に向け、2021 年秋季に本道太平洋側で発生した赤潮の特徴についてまとめる。北海道、道総研では、*K. selliformis* を主体とする赤潮が発生したのを機に、同年 9 月下旬から本道太平洋沿岸域において赤潮プランクトンの監視を開始した。その結果から（図 3）、*K. selliformis* は日高から根室に至る総距離約 300km の海域で出現していることが明らかになった。また、同監視結果から *K. selliformis* が他県における *Karenia mikimotoi* の標準的な赤潮警戒基準である 500cells/mL 以上出現した期間は 9 月下旬から 11 月中旬までの約 7 週間と長期に及んだことがわかった。このことから、道東大規模赤潮は、西日本の内湾で発生するそれとは異なり、開放的な海域において広範囲にかつ長期間持続したことが特徴である。加えて、十勝地区では、2021 年 10 月中旬から 11 月上旬にかけて、*K. selliformis* 出現数が 5,000cells/mL を超えるなど、他の地区よりも *K. selliformis* 出現数の多かったことも特徴として上げられる。

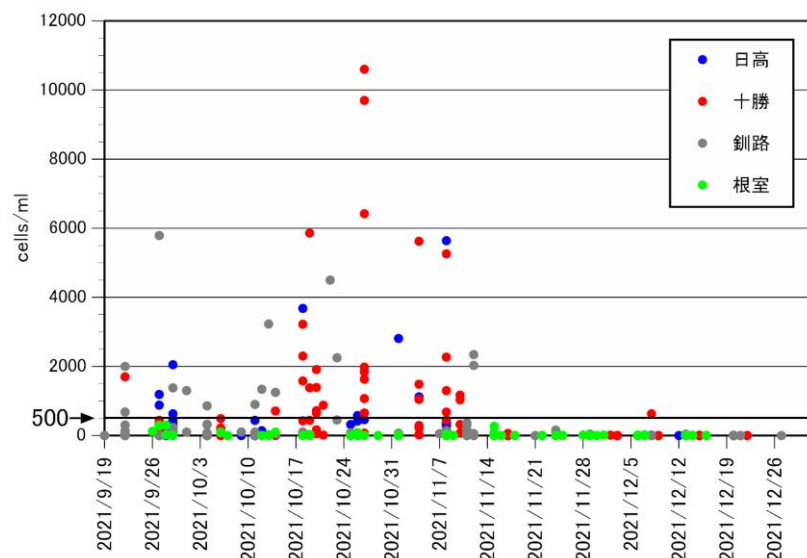


図 3 日高から根室に至る沿岸域における *Karenia* 属の出現細胞数

K. selliformis 赤潮の発生メカニズム

一般に、赤潮はその原因種となるプランクトンの増殖環境が整わないと発生しない。その環境条件として、渦鞭毛藻の場合では、珪藻類の出現密度が 10^3 cells/mL を下回った時に増殖しやすいとした報告がある（今井、2012）。これに習い、前述の赤潮プランクトンの

監視では、カレニア科プランクトンの出現細胞数を計数する一方で、一部のサンプルについては珪藻類の細胞数もカウントした。その結果をまとめて表 1 に示す。珪藻類の出現細胞数は、根室地区では、9 月下旬から 11 月中旬の期間、ほぼ 10^3 cells/mL 以上であったが、他の日高、十勝、釧路地区においては概ね 10^3 cells/mL 以下で推移した。図 3 に示すように、珪藻類の出現細胞数が多かった根室地区においては、*K. selliformis* の出現は認められるものの、その細胞数の最大は 500cells/mL を超えることはなかった。したがって、*K.*

表 1 2021 年赤潮発生時の沿岸モニタリングによる珪藻類の出現状況

	9月中旬	9月下旬	10月上旬	10月中旬	10月下旬	11月上旬	11月中旬	11月下旬	12月上旬	12月中旬	12月下旬
根室海峡	-	+1,+++1	-	0;5,+1,++1, +++5	0;1,+2, +++2	0;1,++1, +++3	+++3	0;4,+5, +++3	0;5,+3, +++1	0;7,+3, +++1	-
根室	-	-	-	+1	+1	0;1,++1, +++1	0;1	0;1	0;1	0;2	-
釧路	-	+1,++1, +++3	+3	0;1,+7, +++2	0;2,+1, +++1	0;7,+4, +++2	+1	+3,++2	0;1,+3, +++2	+6,++2, +++1	+1,+++1
十勝	-	-	-	0;11,+9	+3	0;3,+1, +++1	0;3	+1,++1	+++1	0;13,++1	0;2
日高	-	+1	-	0;3,+5	0;1,+1	+2,++1	0;2	0;6,+4	0;3,+4	0;8,+2, +++2	+++1

0 ; ほとんどいない	+ ; 少ない (10-99cells/ml)	++ ; やや少ない (100-999cells/ml)	+++ ; 多い (10^3 cells/ml以上)
-------------	-------------------------	------------------------------	-------------------------------

観察野帳に珪藻類の計数記録あるいは備考欄に珪藻についての記述のあったものから旬別の最高値を整理した。赤色は珪藻類が多いケースを含む、黄色～青色系は珪藻類が少ないケースをそれぞれ示す。枠内の数字はそれぞれのランクの標本数を示す。

selliformis 赤潮の形成には、*K. mikimotoi* と同様に、珪藻類の非増殖・死滅などが条件になると考えられる。珪藻類を死滅させる海洋条件としては、下層からの栄養塩供給を遮断する密度成層の強化が考えられ、その密度成層を強化する要因としては最近話題の海洋熱波がその候補となる。それを裏付ける事実として、2021 年夏季には道東海域で海洋熱波が発生しており (Kuroda & Setou, 2021)、2020 年には東カムチャッカ半島で *K. selliformis* 赤潮が発生しているが、同年夏季には同海域において海洋熱波が観測されている (Bondur et al., 2021)。

西日本では、赤潮の発生型を地場発生型、移流型などに区分し、タイプ別に発生予察を行っている。それでは、2021 年の道東大規模赤潮はどちらのタイプに分類されるのであろうか？道総研が赤潮発生時に臨時的に行った調査では、*K. selliformis* は道東沿岸流、親潮系水中に多く分布していることが明らかになった (図 4)。ここで道東沿岸流とは沿岸境界流として道東沿岸部を右手にみながら岸に沿って流れる海流で、この海流を構成する水塊の起源はオホーツク海とされている。ちなみに、海流といっても、2016 年 9 月～10 月に行った流況調査では、道東沿岸流の平均流速は約 5 cm と非常に弱い。したがって、*K. selliformis* は沖合を流れる海流に分布していたことから、発生型は移流型と考えられる。

それでは、*K. selliformis* はどこから移流してきたのであろうか？Kuroda et al. (2021) は粒子追跡実験を行い、2021 年秋季に道東沖で出現したカレニア属の起源は、日本海、東

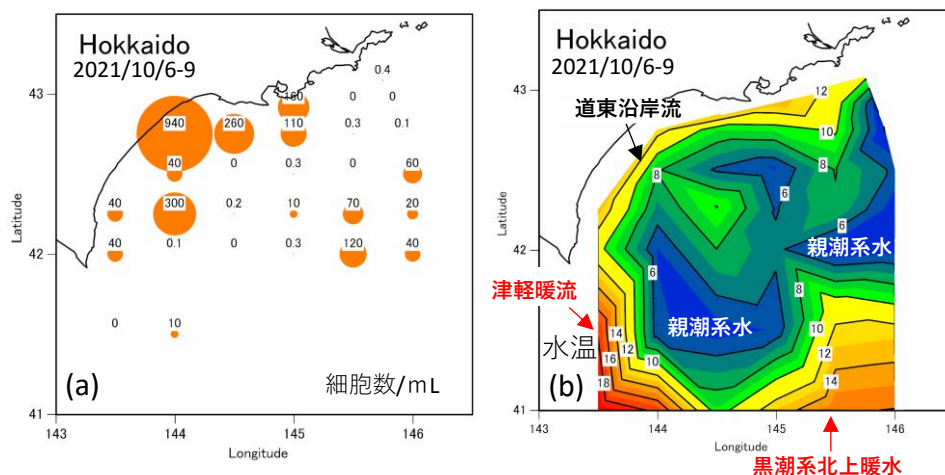


図4 2021年10月上旬における (a) 表面水中の *Karenia* 属出現細胞数、(b) 50m 深水温の水平分布。

カムチャッカ、東樺太と推定している。さらに、2020年にカムチャッカ半島、2021年に道東沖で赤潮を形成した *K. selliformis* の遺伝子配列は一致したとの報告がある (Iwataki et.al, 2022)。したがって、道東大規模赤潮は *K. selliformis* を含む水塊が亜寒帯域を循環し、先の海洋熱波により *K. selliformis* が増殖し、その水塊が何らかの物理機構により道東沿岸流に取り込まれ、前述したように道東沿岸流は岸に沿って流れるため、道東沿岸で赤潮が発生した、というシナリオが考えられる。一方、*K. selliformis* による赤潮が初めて観察された場所は、静穏域である釧路市桂恋漁港であった。その後、各前浜から赤潮報告が相次いだ。したがって、*K. selliformis* が沿岸域に輸送され、港や河川水との混合水域などを利用して増殖やがて赤潮を形成し、その水塊が少しずつ道東沿岸流に取り込まれ道東沿岸域に広まったとするシナリオも考えられる。以上のことを踏まえると、2021年の道東大規模赤潮の特徴である広域化については、道東沿岸流が赤潮水塊を運んだとすれば説明できる。また、赤潮が約7週間持続したことについては、*K. selliformis* が分布する水塊の道東沿岸流への取り込み期間が長かったためと推察する。

K. selliformis 赤潮の持続メカニズム

ここでは、今後の有効な赤潮予察に資するため、今回の赤潮に関する物理量を整理する。まず、2021年道東大規模赤潮の形成で消費された窒素量を求める。次に *K. selliformis* のミニマムセルクオータ、道東大規模赤潮への河川の影響などを評価する。

赤潮形成により消費された窒素量 (t) の算定には、クロロフィル a 濃度の5~10倍が植物プランクトンに含まれている窒素の量 (門谷、私信) ※という関係を利用する。窒素量は (1) 式から求められる。

※ 植物プランクトンの平均的 C/Chla は、30~60 (Parsons et al., 1961) とされているので、レッドフィールド比を考慮して、N/Chla を5~10とした。