

II. 研究開発結果

(1) 赤潮発生メカニズム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・所属・担当者】

水産機構水産資源研究所：黒田 寛，東屋知範

道総研中央水産試験場：西田芳則

道総研さけます・内水面：品田晃良

【目的（全体計画）】

2021 年 9 月中旬～12 月、北海道東部沿岸域～陸棚域でカレニア属を中心とした前例のない大規模な赤潮が発生し、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た。一般に、閉鎖的な内湾域で発生する赤潮はより小規模であり、また、富栄養化等の人為的な海洋汚染が引き金となることがある。一方、道東海域には、通年、亜寒帯の豊かな生態系を支える親潮や沿岸親潮が流れ、沿岸域と外洋域がダイレクトに接続された開放的な陸棚域が広がり、富栄養化等の海洋汚染は報告されていない。さらに、赤潮プランクトンの主要種として同定されている *Karenia selliformis* による大規模赤潮も、国内では道東海域が初めてのケースである。したがって、2021 年に道東海域で発生した大規模赤潮は、人為的な要因ではなく自然発生的な要因により誘発された可能性が高いと考えられる。このため、ある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、ならびに、2021 年夏～秋季の道東海域における特異な海洋環境変動に起因する赤潮発生過程を、同時に検討することで、赤潮の発生原因を究明することが不可欠である。

本課題では、各種海況予測システムの出力、人工衛星による海洋観測データ、水産機構と道総研が長期間継続してきた海洋環境モニタリングデータや気象モデルの再解析値等を解析し、また、粒子追跡サブモデルを利用することで、赤潮プランクトンの起源推定、ならびに、2021 年夏～秋季の赤潮発生の引き金となった物理的要因を明らかにする。

【方法】

本課題では以下の三つの研究開発を実施する。

1) 発生年と非発生年における海洋環境の比較解析

海況予測システムの出力、人工衛星による各種資料、水産機構と道総研が長期的に実施してきた海洋環境モニタリングデータ等を利用・解析して、赤潮が発生した 2021 年夏～秋季の海洋環境ならびに気象環境を、過去ならびに気候学的な状態と比較し、2021 年夏～秋季の赤潮発生の引き金となる物理的要因を明らかにする。

2) カレニア赤潮の起源推定

北西太平洋海況予測システム FRA-ROMS ならびに高解像度 FRA-ROMS の出力を用いて、粒子順追跡および逆追跡実験を実施し、道東沿岸に分布するカレニア属の起源を特定する。より具体的には、粒子追跡サブモデルは過去に開発した既往の研究資源を利用する。ただし、赤潮プランクトンの起源を、道東海域周辺で精度よく、かつ道東から離れた海域を広域に推定するためには、解像度の異なる北西太平洋海況予測システム FRA-ROMS（水平解像度 $1/10^\circ$ ）と高解像度 FRA-ROMS（水平解像度 $1/50^\circ$ ）の出力を同時に利用する必要があるため、異なる解像度のモデル間を粒子が行き来きできる入れ子型粒子追跡手法を開発して利用する。

3) 赤潮発生時における赤潮漂流予測システムの構築

2022 年の事業期間内に赤潮が発生した場合には、粒子追跡に基づき、その起源推定ならびに発生後の赤潮の輸送過程を速やかに予測する。これらを実現するために、北西太平洋海況予測システム FRA-ROMS II（水平解像度 $1/10^\circ$ ）による現況解析値と予測値、ならびに高解像度 FRA-ROMS（水平解像度 $1/50^\circ$ ）による現況解析値と 1 カ月アンサンブル予測値を利用し、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赤潮漂流予測システムを構築する。

【結果および考察】

「1) 発生年と非発生年における海洋環境の比較解析」について、2021 年夏に卓越した海洋熱波の特徴を調べた。道東でカレニア赤潮が発生したのは 2021 年 9 月中旬であり、その約 1 カ月～2 カ月前（7 月中旬～8 月中旬）、北西太平洋では、人工衛星による全球海面水温観測が開始された 1982 年以降、観測史上最強かつ最大規模の海洋熱波が発生した。海洋熱波のピークは 7 月 30 日～8 月 1 日であり、この時、平年差最大 6°C 以上、最大で海洋熱波のカテゴリー 4 が記録された。海洋熱波の範囲は、北緯 $40^\circ \sim 50^\circ$ 、東経 $130^\circ \sim 180^\circ$ であった（図 1）。この海洋熱波の発生は地上から約 12km 上空を吹く偏西風の極端な北偏が引き金となった。具体的には、例年の 7 月には偏西風は北海道上空に位置しているが、2021 年 7 月上旬に東経 70° 付近で発生した偏西風の蛇行が東進して北海道上空を通過し、その後、偏西風は北海道を迂回するように北緯 50° 以北に北偏した。この北偏が引き金となり、その後、太平洋高気圧が北西方向に張り出し、北海道周辺北日本は高気圧に覆われた（図 2）。その結果、雑駁に説明すると、強い日射、高い気温に加えて、低気圧などが発生・通過がなかったことで、海洋表層の成層が極めて安定化し、強い成層が水深 20m 以浅で発達して、海洋表層が加速度的に高水温化した。要するに、気象の極端現象が海洋の極端現象を引き起こしたと解釈できる（詳細は Kuroda and Setou, 2021, <https://doi.org/10.3390/rs13193989>）。

さらに、偏西風の北偏が解消され、偏西風が南下をはじめた8月初旬以降、海洋熱波は急速に減衰した。特に、8月10日前後の低気圧通過時には過去30年間の中でも最も極端なレベルで海洋表層が鉛直的に混合し、急速に海面水温を低下させた。これにより約1週間で海洋熱波は終息した。さらに、海洋熱波終息後、季節的な海面冷却がゆっくりと進み、海洋表層の混合層が徐々に発達し始めた。7~9月において、道東海域において 5 mg/m^3 以上あるいは 10 mg/m^3 以上の衛星クロロフィル濃度が観測された海域（以下、高クロロフィル濃度海域）を特定した。そして、高クロロフィル濃度海域の日別面積と高クロロフィル濃度海域での混合層深度（高解像度 FRA-ROMS による再現値から計算）の日別平均値を比較すると両者の間には正の相関関係があった（図3）。したがって、混合層の発達にともない高クロロフィル濃度海域面積が拡大したことが関連しており、海洋熱波終息過程での混合層の急速な発達と海洋熱波終息後の季節混合層の発達が、水平規模 300km 以上という前例のない大規模赤潮の栄養塩供給に寄与した可能性が高い。ただし、高クロロフィル濃度海域は、混合層の極めて浅い極沿岸域、特に、河川水の影響の強い極低塩分海域（塩分 32 以下）にもみられるため、河川水を起源とする栄養塩供給も局所的には無視できないと解釈される。また、もう一つの注意点として、本事業外で実施した2021年10月の船舶調査においては、カレニア細胞密度と混合層深度の分布の間に明瞭な関係はないことがわかっている（Kuroda et al. 2022, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.841364>）。したがって、混合層深度の発達はあくまでも赤潮発生時の栄養塩供給に重要であるが、赤潮発生後の高密度赤潮の維持過程については混合層以外の要因が重要であった可能性が推察される。

次に、「2）カレニア赤潮の起源推定」について、道東沿岸で発生したカレニア赤潮の起源を推定するために、FRA-ROMS と高解像度 FRA-ROMS を用いた粒子追跡を実施した。これら二つの海況予測システムは異なる水平解像度を有するため、両モデル間で粒子を横断的に追跡するための手法を開発した。次に、赤潮が発生した9月中旬~下旬の道東沿岸表層に計144万個の粒子を配置し、時間逆方向にその軌跡を追跡した。カレニア属を同定した過去の研究結果を考慮した結果、三つの起源が推定された（図4）。一つは道東~国後水道~北海道オホーツク海沿岸~宗谷海峡を経由する日本海起源、一つは道東~親潮~東カムチャッカ海流を経由する東カムチャッカ起源、もう一つは道東~オホーツク海南部を経由する東樺太起源であった。起源海域からの道東までの輸送時間は、それぞれ、1~2カ月、4カ月以上、4カ月以上であり、輸送起源毎に異なる赤潮プランクトンの輸送・生残過程が推察された。2020年秋季の東カムチャッカ起源で大発生した *K. selliformis* の影響を調べるために、2020年9月中旬~下旬の東カムチャッカ沿岸表層に大量の粒子を配置した順追跡を実施した。その結果、粒子のほとんどは冬季の西部亜寒帯循環に取り込まれ、道東沿岸までは輸送されないが、一方で、初期に配置した僅か0.3%の粒子が2021年夏~秋の道東沖に到達した可能性がある。なお、本課題での粒子追跡では、物理的な輸送のみが考慮されており、今後、赤潮プランクトンの生物特性（増殖や死亡）を考慮した粒子追

跡実験を検討・実施すべきである。

最後に、「3）赤潮発生時における赤潮漂流予測システムの構築」を実施した。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において、高解像度 FRA-ROMS による海況の約 1 カ月予測を実施し、その出力を用いた粒子順追跡が、緊急時において即時実施可能になるように半自動化されたシステムを構築した。なお、海況予測を実施するための海洋モデルの側面境界条件や海面水温には FRA-ROMS の予測値を、気象外力には CFS（Climate Forecast System）による 4 種類のアンサンブル予測値（風向風速、気温、海面気圧、比湿、短波放射、長波放射）を採用した。結果として、4 種類のアンサンブル予測に基づく赤潮プランクトンの漂流予測が可能になった。図 5 に、2022 年 12 月 12 日を初期値（道東沿岸全域で赤潮が発生したと仮定）とした場合の、2023 年 1 月 14 日におけるアンサンブル予測に基づく赤潮プランクトンの分布を示す。

さらに、これら 1）～3）の成果に加えて、将来の赤潮発生時を想定して、水産機構だけではなく道総研においても粒子追跡関連の様々なケーススタディーが実施できるようにするために、道総研中央水産試験場内に新規演算サーバーを設置し、順追跡と逆追跡が可能な粒子追跡サブシステムならびに高解像度 FRA-ROMS の出力が利用できるように基盤整備を実施した。

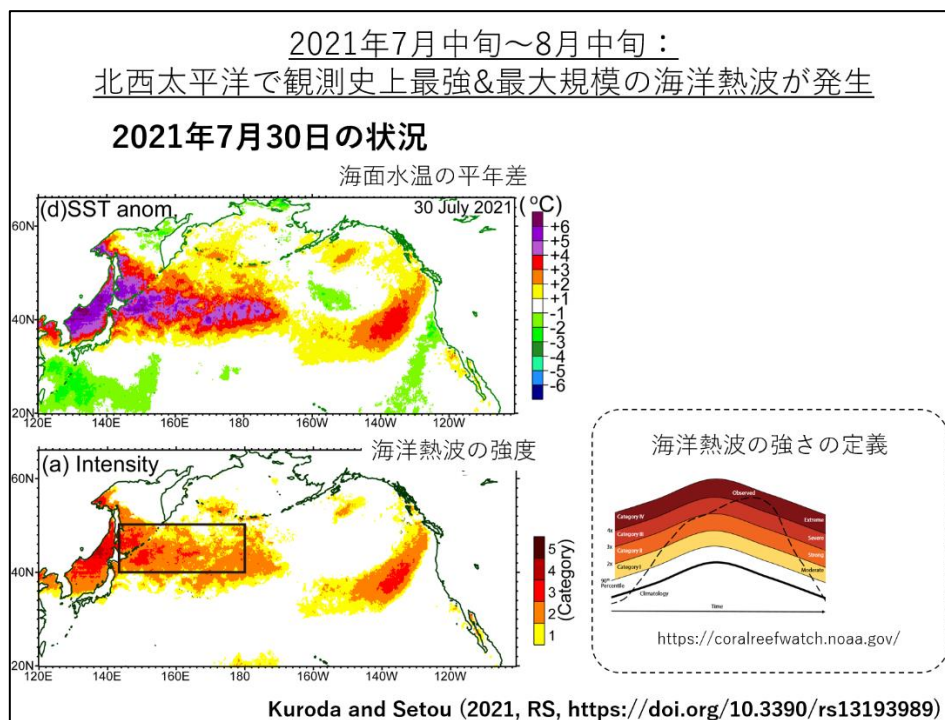


図 1 2021 年夏の海洋熱波について

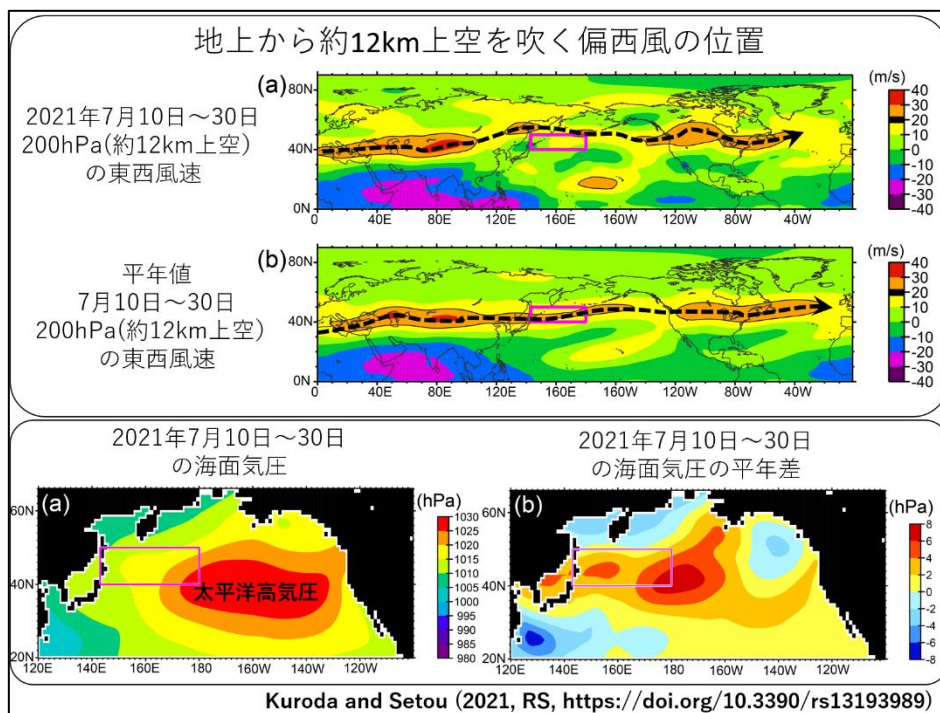


図2 2021年夏の海洋熱波に関わる大気条件について

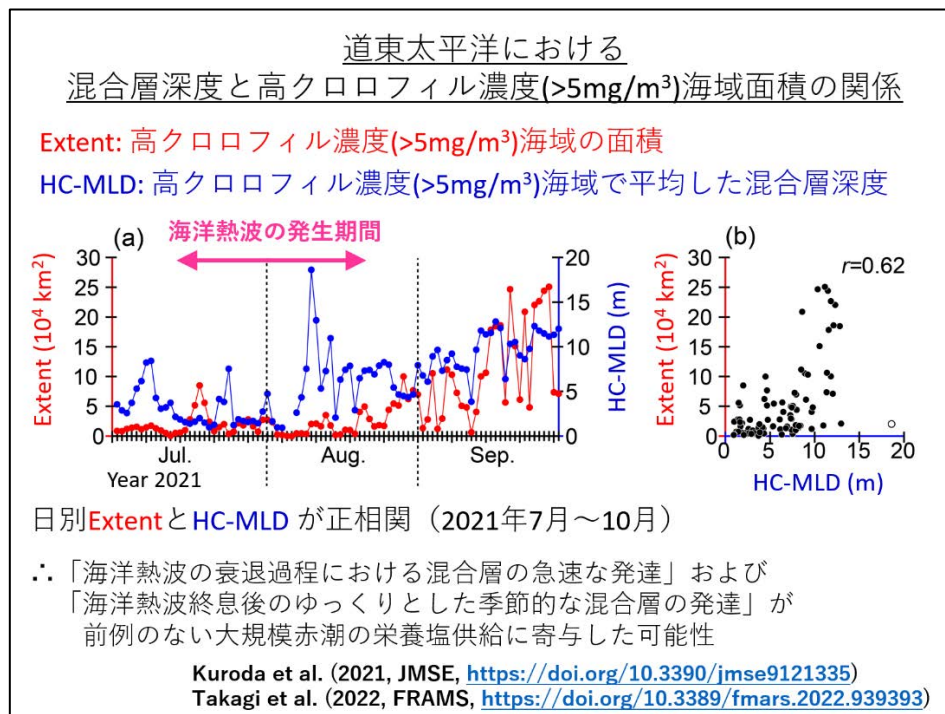


図3 2021年赤潮発生に関わる混合層と高クロロフィル濃度海域面積について

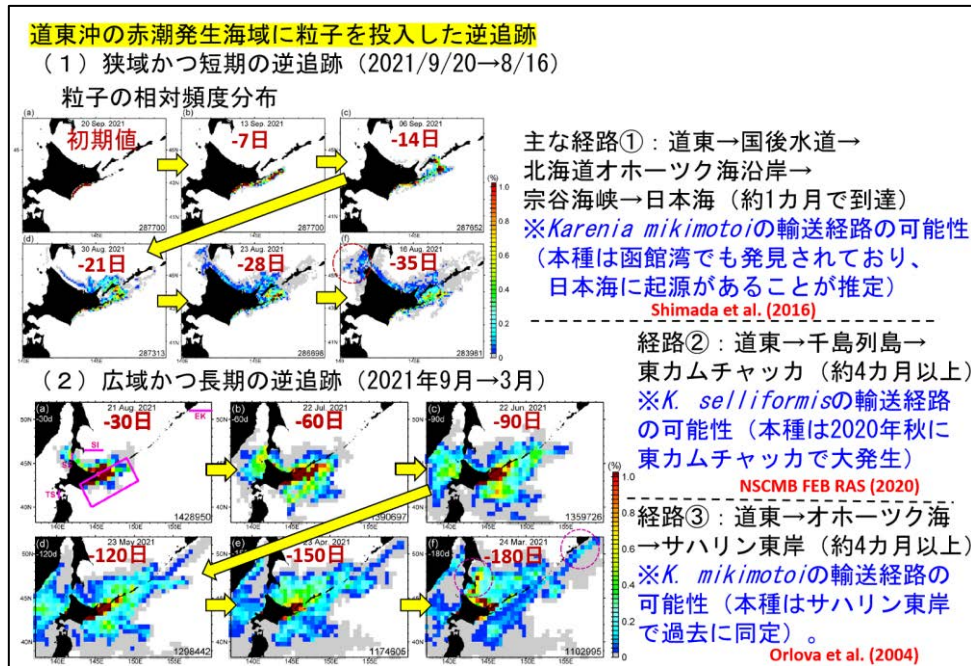


図4 粒子逆追跡に基づく赤潮起源および輸送経路の推定

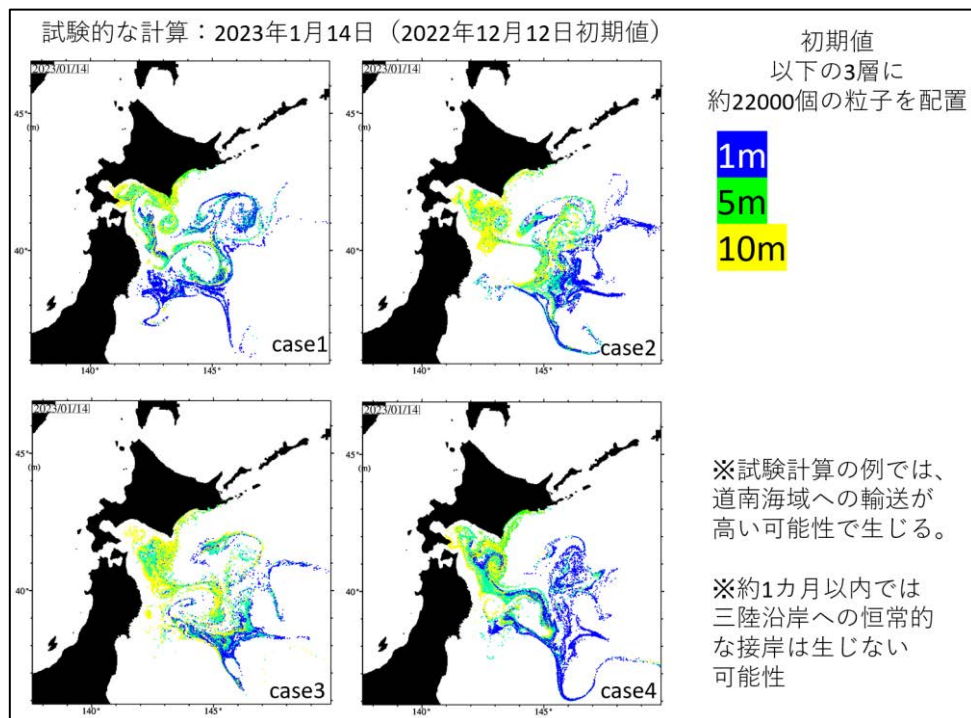


図5 赤潮漂流予測システムの試運転結果