

資源管理・海洋環境シリーズ

2021年北海道太平洋大規模赤潮の発生シナリオ

キーワード：カレニア・セリフォルミス、道東沿岸流、窒素濃度、海洋熱波

はじめに

2021年9月に北海道太平洋海域で発生した大規模有害赤潮では、ウニ、サケを中心に90.7億円を超える我が国で過去最悪の漁業被害を記録しました（北海道水産林務部水産振興課, https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ssk/akashio_info.html) (2023.10.18)。この赤潮の原因種は渦鞭毛藻の一種であるカレニア・セリフォルミス (*Karenia selliformis*) (以下、セリフォルミス) であり¹⁾、我が国での赤潮発生報告は初めてのことでした。この事態に対して、北海道と道総研は9月下旬から本道太平洋沿岸域を中心に赤潮プランクトンの監視を開始した結果、セリフォルミスは日高から根室に至る総距離約300 kmの沿岸に広く出現したことが明らかになりました。また、セリフォルミスの細胞数密度が500 cells/mL (1 mLあたり500細胞) 以上の高密度で出現した期間は9月下旬から11月中旬までの約7週間と長期に及びました。これまで西日本を中心に発生した赤潮は、内湾の狭い海域に2～3週間程度持続するものが一般的でした。これらに比べて、2021年に北海道太平洋海域で発生した赤潮は、開放的な海域に広範囲にかつ長期間持続したことが大きな特徴になります。そこで、道総研では、このような大規模な赤潮が形成された要因を明らかにする研究の一環として、試験調査船を用いた調査を2021年から継続して実施しています。今回はセリフォルミス赤潮の予察に向け、道総研独自調査および水産庁委

託事業によって、これまでに得られた知見をご紹介します。

セリフォルミス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ません。セリフォルミスと同属のカレニア・ミキモトイ (*Karenia mikimotoi*) (以下、ミキモトイ) の場合では、珪藻類の細胞数密度が 10^3 cells/mLを下回った時に増殖しやすいとした報告²⁾ があります。これに倣い、前述の赤潮プランクトンの監視では、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ました。その結果、珪藻類の細胞数密度は、根室地区を除くほとんどの海域において概ね 10^3 cells/mL以下の低密度で推移していました。したがって、2021年の秋季は、競合相手である珪藻類の非増殖・死滅などにより、セリフォルミスが増殖しやすい環境であったことが考えられます。このような珪藻類の非増殖・死滅を誘引する環境条件の1つとして最近話題の海洋熱波^{*1} が考えられています。すなわち、海洋熱波が発生すると成層構造が強くなり、下層からの栄養塩補給が絶たれるため、珪藻は非増殖・死滅するとした仮説です。2021年7月には観測史上最大の海洋熱波が北海道太平洋海域を含む西部北太平洋で発生し、8月まで持続しました³⁾。

我が国での発生が初めてのセリフォルミス赤潮は海流に乗って北海道沿岸へ移送されたと推察さ

れたため、道総研では2021年10月上旬に試験調査船を用いて広範囲にセリフォルミスの分布を調べました。その結果、セリフォルミスは道東太平洋沿岸域を中心に出現しており、また沖合域にも分布が確認されました（図1(a)）。セリフォルミスは道東沿岸流水^{*2}と親潮系水の両水塊に分布していましたが、暖流系の津軽暖流水、黒潮系北上暖水には出現しませんでした（図1）。したがって、セリフォルミスは道東沿岸流、寒流系の親潮により移送されたと考えられます。

一方、北海道で赤潮が発生する1年前には、ロシアのカムチャッカ半島東岸で海産生物の大量死が生じていました。後にその大量死はセリフォルミスが原因であることが報告されました⁴⁾。また、カムチャッカ半島と北海道で出現したセリフォルミスの遺伝子配列を比較したところ、両者はセリフォルミスの中でもより近縁であることがわかりました¹⁾。これらのことから、北海道のセリフォルミス赤潮は、2020年にカムチャッカ半島東岸で増殖したセリフォルミスが北太平洋で生き残り、その一部が親潮により本道付近まで運ばれ、海洋熱波の影響で競合生物の珪藻が減少・死滅する中、道東沿岸流に取り込まれつつ栄養塩を独占して細胞数を増やしたために発生した、とするシナリオが考えられました。道東沿岸流は5 cm/s程度のゆっくりした速度（図1(c)）で岸に沿って流れる特性を持つため、赤潮が北海道太平洋海域の広範囲に形成されたこととも整合します。もし、セリフォルミスが道東沿岸流に取り込まれなければ、沿岸域で赤潮が発生することはなかったかもしれません。

^{*1} 海洋熱波：水温が過去数十年と比較して顕著に高い状態が数日以上持続する現象をいいます。

^{*2} 道東沿岸流：親潮よりも高温、高塩分で、夏季から秋季にかけて道東太平洋沿岸を岸に沿って西へ流れるオホーツク海起源の沿岸流を道東沿岸流と呼んでいます。

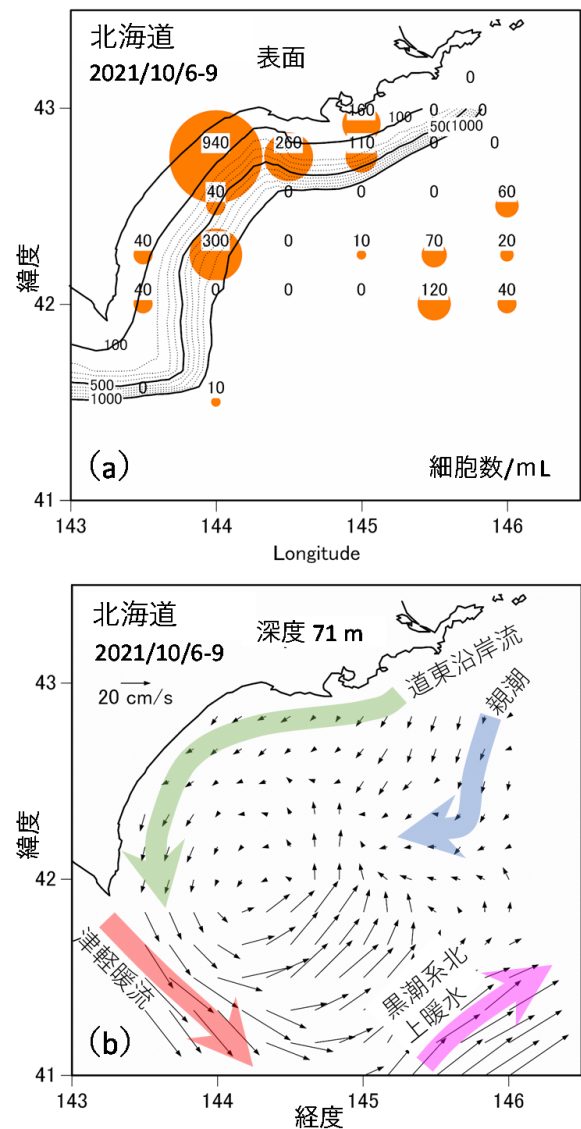


図1 2021年10月上旬における (a) 表層水中のセリフォルミス細胞数密度 (b) 流速ベクトルの水平分布

セリフォルミス赤潮の持続メカニズム

それではなぜ、セリフォルミス赤潮は長期間持続したのでしょうか？セリフォルミスは植物プランクトンなので、栄養塩がなければ増殖できません。そこで、2022年には7月から9月にかけて、

根室沖に観測ラインを設定し、道東沿岸流水中の全窒素T-N (Total Nitrogen) 濃度を調べました。その結果を7月と8月の観測を例に図2に示します。T-N濃度は、簡単には、海中の溶存無機態窒素DIN (Dissolved Inorganic Nitrogen) 濃度と植物プランクトンにより消費された窒素濃度との和で求められます。植物プランクトンによる消費分はクロロフィル a 濃度をもとに推定が可能で、本研究ではその濃度をクロロフィル a 濃度の10倍と仮定して *3 T-N濃度を求めました。T-N濃度の鉛直分布は、7月、8月ともに、深度が深くなるほど高くなる傾向にあり、特に深度30 m以深では両月ともに $10\text{ }\mu\text{M}$ (1 Lあたり100万分の1 モル) 以上と高濃度でした。道総研が赤潮発生時に臨時的に実施した調査から、セリフォルミスが多く分布していた深度帯は海面から深度20 mまでなので、この深度帯の平均T-N濃度を求めると、7月が $7.4\text{ }\mu\text{M}$ 、8月が $6.3\text{ }\mu\text{M}$ となります。これらのT-N濃度を道総研が日本海のせたな沖で定期的に観測しているそれらと比較すると、日本海の8月における海面から深度20 mまでの平均T-N濃度は $0.2\text{ }\mu\text{M}$ なので、道東沿岸流水中のT-N濃度は日本海のそれに比べ数十倍高いことが分かります。したがって、道東沿岸流水中の窒素は、夏季におい

ても枯渇することなく高い濃度で維持されていると考えられます。

それでは、このT-N濃度を用いてセリフォルミスはどの程度まで細胞数を増やすことができるのかを以下に計算してみます。前述の赤潮プランクトンの監視時には、セリフォルミスの細胞数をカウントするとともに、その試水のクロロフィル a 濃度も調べました。得られたセリフォルミス細胞数とクロロフィル a 濃度との関係を図3に示しますが、両者は高い相関関係にあります。ここで、前述した植物プランクトンにより消費されて減少した窒素濃度はクロロフィル a 濃度の10倍とする関係を用いると、クロロフィル a 濃度からセリフォルミスが1細胞増えるのに必要な窒素量を計算することができます。図3の回帰式をもとにセリフォルミスが1細胞増えるのに必要な窒素量は 17.6 pmol (1兆分の1 モル) と見積もられました。道東沿岸流水中のT-N濃度を $7\text{ }\mu\text{M}$ とすると、存在可能なセリフォルミスは 397 cells/mL と計算されます。したがって、図1 (a) ではセリフォルミスが数百細胞の規模で出現している地点が認められますが、この水準であれば、道東沿岸流の水塊に溶存している豊富な栄養塩で十分細胞数を増やすことができるものと考えられました。また、

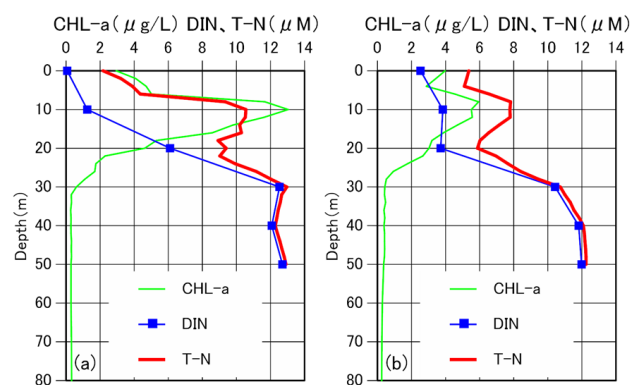


図2 根室沖10マイル地点におけるクロロフィル a 濃度、DIN濃度、T-N濃度の鉛直分布。(a) 2022年7月26日 (b) 2022年8月17日観測

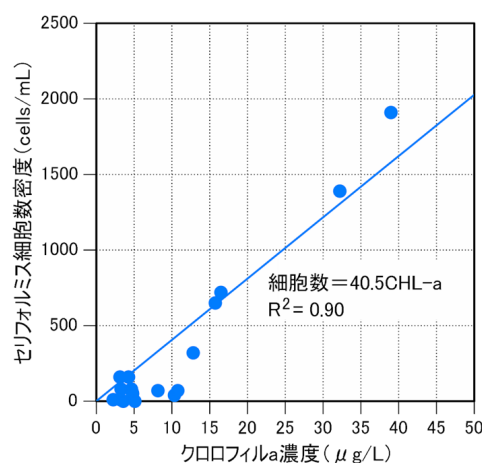


図3 クロロフィル a 濃度とセリフォルミス細胞数密度との関係

ミキモトイは数十mの日周鉛直移動をすることが知られています⁵⁾。夜間には深度20 m以深の中層へ移動して栄養塩を吸収し、昼間は表層へ浮上して光エネルギーを利用して増殖します。セリフォルミスの日周鉛直移動については、現在、調査中ですが、前述したように高密度の状態が7週間持続したことを踏まえると、ミキモトイと同様に中層の豊富な栄養塩を利用した可能性が考えられます。

以上のことから、北海道太平洋海域は、夏～秋季においても大規模有害赤潮を発生・維持するだけの高い栄養塩ポテンシャルを潜在的にもっていることがわかりました。

*³ 植物プランクトンの平均的C/Chla は、30～60とされているので⁶⁾、レッドフィールド比 (C:N = 106 : 16) を考慮して、N/Chlaを10とした。

おわりに

前述したように、海洋熱波は赤潮を発生させたトリガーの1つと考えられました。海洋熱波は地球温暖化に起因して発生しているとした報告があり⁷⁾、その発生回数は年々増加傾向にあります⁸⁾。北海道太平洋の道東沿岸流、親潮が流れる海域は栄養塩が豊かで、多くの水産資源を育んできましたが、その反面、栄養塩が豊かであるが故に、気候変動を受けて新たな漁業被害の発生するリスクが高まっているのかもしれません。

本研究により、セリフォルミス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と考えられました。道総研では赤潮の早期予察に向けて、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。また、セリフォルミス赤潮が沖合域で発生した際に早期発見するため、大学や他研究機関と共同で人工衛

星データから赤潮海域を判別するアルゴリズムを開発中です。

参考文献

- 1) 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 (2022) Morphological variation and phylogeny of *Karenia selliformis* (Gymnodiniales, Dinophyceae) in an intensive cold-water algal bloom in eastern Hokkaido, Japan. *Harmful Algae.*, 114, 102204.
- 2) 今井一郎 (2012) シャットネラ赤潮の生物学, 生物研究社, 東京, 184pp.
- 3) Kuroda H, Setou T (2021) Extensive marine heatwaves at the sea surface in the northwestern Pacific Ocean in summer 2021, *Remote Sens.*, 13, 3989. <https://doi.org/10.3390/rs13193989>.
- 4) A.V. Zhirmunsky National Scientific Center for Marine Biology. Internet web. Download from: (<http://www.imb.dvo.ru/index.php/ru/konferentsii-seminary/463-novye-shagi-rossijskikh-i-inostrannykh-uchenykh-v-izuche-nii-krasnykh-prilivov-na-poberezhe-tikhogo-okeana> (2020)) (2023.11.27)
- 5) Koizumi Y, Uchida T, Honjo T (1996) Diurnal vertical migration of *Gymnodinium mikimotoi* during a red tide in Hoketsu Bay. *J. Plankton Res.*, 18, 289-294.
- 6) Parsons TR, Stephens K, Strickland JDH (1961) On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankton, *J. Fish. Res. Bd, Canada*, 18, 1001-1016.
- 7) Laufkötter C, Zscheischler J, Frölicher TL (2020) High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming, *Science*, 369, 1621-1625.
- 8) Frölicher TL, Gruber N, Fischer EM (2018) Marine heatwaves under global warming, *Nature*, 560, 360-364.

(西田芳則 中央水試資源管理部

報文番号B2483)