

南部オホーツク海の春季植物プランクトンブルーム を作る播種機構：アイスアルジーの重要性

鈴木 光 次*

1. はじめに

オホーツク海は、北太平洋の北西縁辺部に位置し、特に沿岸域や陸棚域で高い生物生産力を持つことが知られている (Sorokin and Sorokin, 1999; Mundo et al., 2024). また、オホーツク海の大らかな特徴の1つとして、冬季に海が海水で覆われる。オホーツク海は、北半球の季節海水域の南端であり、北極海の海水と同様、温暖化による海水減少が懸念されている (Toyota et al., 2022). オホーツク海の海水形成機構として、主に北西陸棚域とサハリン東部沿岸域で冬季モンスーンのシベリアからの吹き出しによりポリニア (薄水域) が発達し、その後、サハリン島の東部を西岸境界流として南向きに流れる東サハリン海流により、海水が南部オホーツク海へと運ばれる (Kuga et al., 2023). この際、アムール川からの淡水流入によって、オホーツク海の水柱成層化が高まり、冬季に表層と中深層での鉛直混合が弱められることで海水形成が促進される。また、海水が形成される際に高塩分水であるブラインが海水中へ放出され、オホーツク海北西部の沿岸域では密度の高い陸棚水 (Dense shelf water; DSW) が形成される (Ohshima et al., 2014). DSW は、密度が高いため表層下に沈み込み、ESC により南へと運ばれた後に日本海や亜寒帯太平洋が起源の水と混合することでオホーツク海中層水 (Okhotsk Sea Intermediate Water; OSIW) を形成する (Itoh et al., 2003). SOIW は鉄等の微量金属や栄養塩が豊富に含まれており、ブッソル海峡などの千島列島間の海峡を通過する際に、乱流によって中層

水に含まれる栄養物質が表層へと運ばれ、同海域や親潮域周辺での高い生物生産に寄与することが知られている (Nishioka et al., 2020).

南部オホーツク海の表層は冬季に海水で覆われるが、海水融解後の春季には大規模な植物プランクトンブルームが発生する。高い一次生産力を持つ春季植物プランクトンブルームは南部オホーツク海の生態系や生物地球化学過程に対して重要な役割を果たしていると考えられているが、同ブルームの起源となる微細藻類の種 (たね) に関する知見は著しく限られている。このため、本稿では、現場観測と室内培養実験の結果を通して、南部オホーツク海の春季植物プランクトンブルームに対する海水下の植物プランクトン、海水微細藻類 (アイスアルジー)、表層堆積物中の微細藻類の休眠期細胞の播種効果について検討を行った。

2.1 春季植物プランクトンブルーム

冬季と春季の南部オホーツク海における植物プランクトン群集の現存量と組成の違いを評価するために、2020年12月の学術研究船白鳳丸 (JAMSTEC/東京大学) KH-20-12次研究航海および2021年4月の東北海洋生態系調査研究船新青丸 (JAMSTEC/東京大学) KS-21-6次研究航海において海洋調査を実施した。冬季にオホーツク海が海水で覆われる前の植物プランクトン現存量の指標であるクロロフィル *a* 濃度は表層 (水深5 m) において、 $1.12 \pm 0.38 \text{ mg m}^{-3}$ であった。一方、春季の海水融解後の表層においては、相対的に低塩分水 (塩分約32.5) と高いクロロフィル

*北海道大学大学院地球環境科学研究院教授

a 濃度が存在し、春季植物プランクトンブルームの発生が確認された ($8.61 \pm 5.30 \text{ mg m}^{-3}$, $n=10$). また、走査型電子顕微鏡による観察から、この春季ブルームは主に大型中心目珪藻の *Thalassiosira* 属で構成されていた (図1; 渡邊, 2022). 葛西ら (2017) によると、1996年から2014年におけるオホーツク海紋別湾内の氷海展望塔オホーツクタワーでの海洋表層観測結果から、南部オホーツク海では海水密接度の減少が初春季の植物プランクトンブルーム発生の主要要因であったことを指摘している. また、Mustapha and Saitoh (2007) の衛星リモートセンシングデータを用いた解析においても、海水後退が例年より遅い年の春季において表層のクロロフィル *a* 濃度が有意に高かったことが報告されており、海水と春季植物プランクトンブルームの緊密な関係が明らかとなっている. また、*Thalassiosira* 属を主体とした南部オホーツク海の春季珪藻ブルームは、1989年3月の堀井ら (1992) による海洋観測、Matsumoto et al. (2021) による2017年2月から4月前半のオホーツクタワーでの表層観測におい

ても確認されており、南部オホーツク海の植物プランクトンブルームを特徴付けるものであると考えられる.

2.2 表層堆積物の微細藻類の発芽

南部オホーツク海の表層堆積物を2020年12月の白鳳丸 KH-20-12 次研究航海中にマルチプルコアラーで、また2021年4月の新青丸 KS-21-6 次研究航海中にオケアングラブ採泥器で採取し、1ヶ月以上冷暗所で保存した. その後、Most Probable Number (MPN) 法 (Fukai et al., 2022) を用いて室内発芽培養実験を行った. MPN 法に従い、発芽可能な珪藻類の休眠期細胞の同定を行った後、統計学的に各細胞密度を推定した. その結果、全ての採泥観測点 (15 点) において、珪藻類の発芽と小型中心目珪藻 *Chaetoceros socialis* complex の優占が確認された (深井ら、未発表データ). また、発芽可能な珪藻細胞密度 (MPN cells g^{-1} wet sediment) に対する *Thalassiosira* 属の寄与率は概ね 10% 未満であった (深井ら、未発表データ) ことから、上述の南部オホーツク

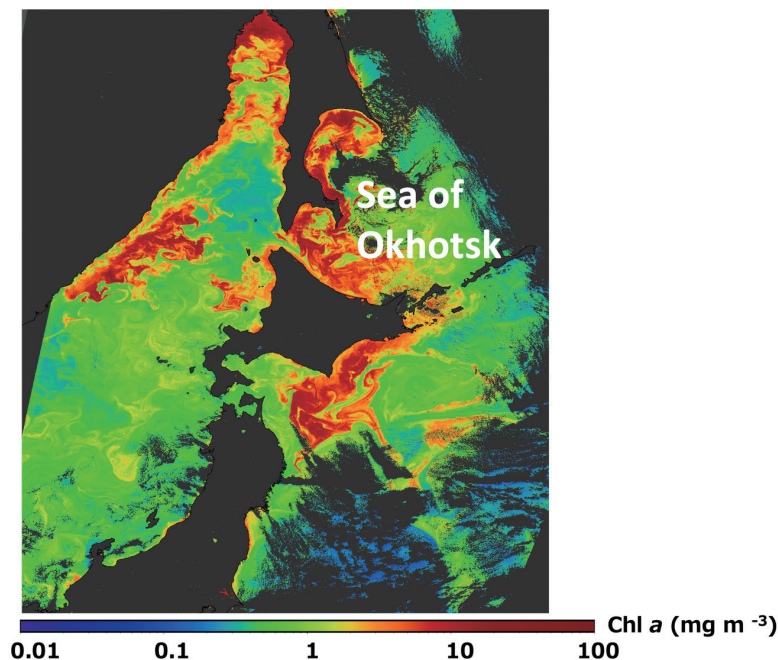


図1. 2021年4月10日に地球観測衛星「しきさい (GCOM-C/SGLI)」による表層のクロロフィル (Chl) *a* 濃度 (植物プランクトン現存量の指標). 北海道沖の南部オホーツク海で植物プランクトンの大増殖 (ブルーム) が発生していた.

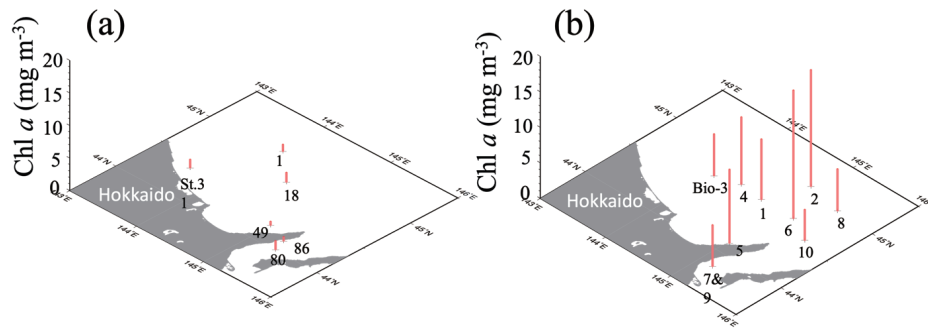


図2. 超高速液体クロマトグラフィー (UHPLC) で測定した (a) 2020 年 12 月および (b) 2021 年 4 月の表層 5 m 深におけるクロロフィル *a* 濃度.

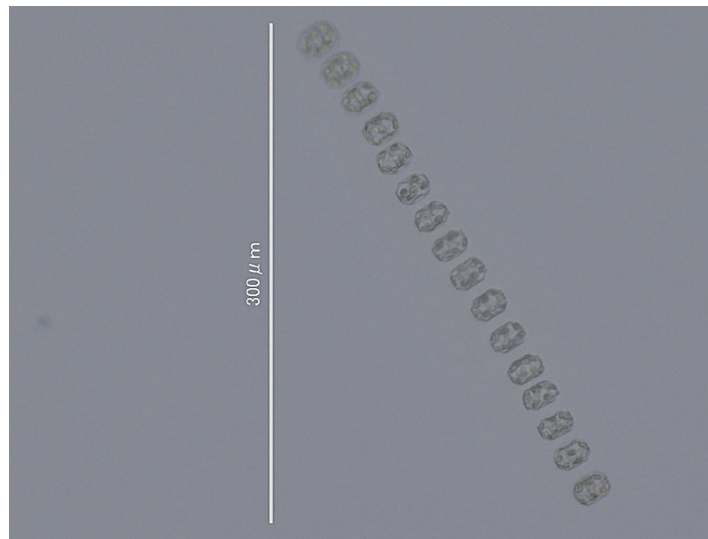


図3. 2021 年 4 月に光学顕微鏡で観察されたオホーツク海の表層水中の鎖状の中心目珪藻 *Thalassiosira nordenskiöldii*.

海で春季珪藻ブルームを主に構成する *Thalassiosira* を中心とした微細藻類組成とは大きく異なっていた。これらの結果から、表層堆積物中の休眠期微細藻類が春季植物プランクトンブルームを形成する種（たね）になる可能性は低いことが示唆された。

2.3 冬季海氷下の植物プランクトン群集組成

2019 年 2 月に砕氷船である海上保安庁そうやに乗船して、海洋表層が海氷で覆われた南部オホーツク海で海水下の 2 m 深より海水を採取し、植物プランクトン群集を走査型電子顕微鏡および 18S rRNA 遺伝子の V4 領域を標的とした DNA メタバーコーディング解析を実施した (Yan et

al., 2022)。その結果、南部オホーツク海の海水下の海水中的植物プランクトン群集は主に小型 (<10 μm) の中心目珪藻 *Chaetoceros* 属が優占し、その細胞は休眠期状態にあった。また多変量解析の一つである冗長性解析により、観察された *Chaetoceros* 属は、低温かつ比較的高い溶存鉄濃度を好み、東サハリン海流の影響を受けていたことが示唆された。海氷下の海水においても南部オホーツク海で春季ブルームを形成する *Thalassiosira* 属はマイナーな植物プランクトングループであったことから、春季植物プランクトンブルームを形成する種（たね）になる可能性は低いことが示唆された。

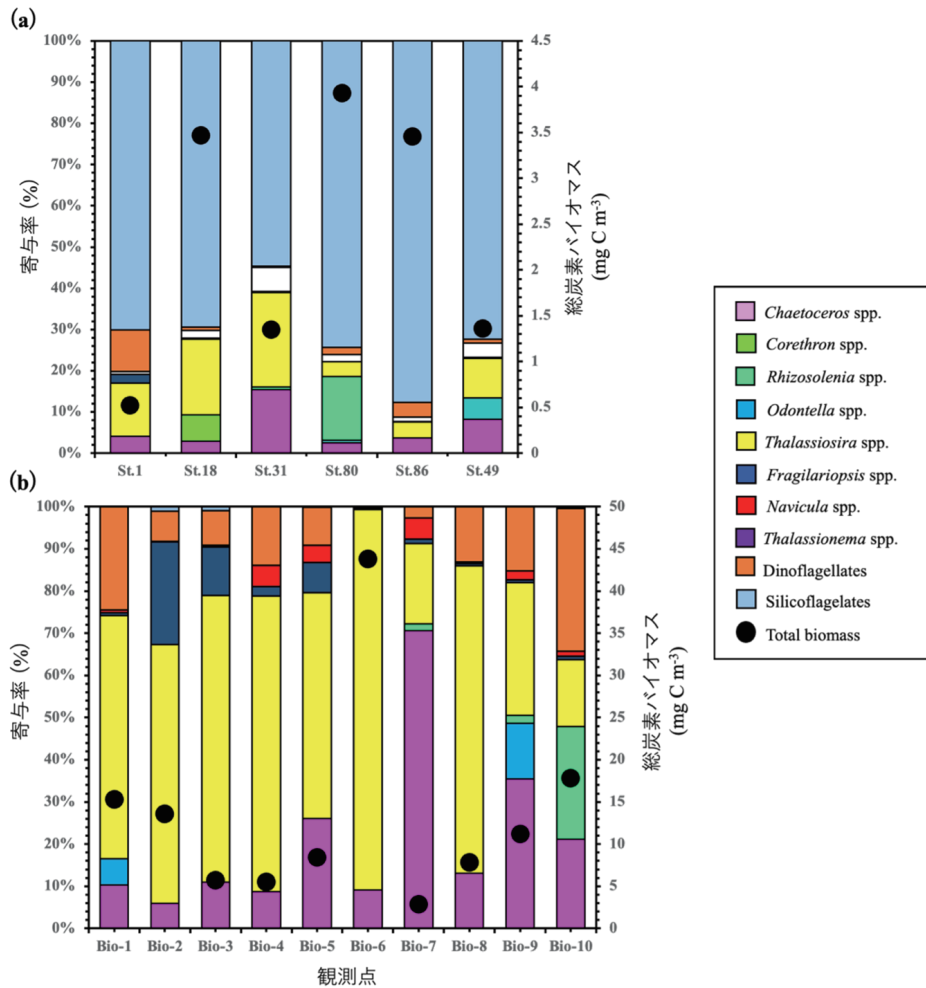


図4. (a) 2020年12月と (b) 2021年4月の有殻植物プランクトンの総炭素バイオマスに対する各有殻植物プランクトングループの相対的な寄与率 (渡邊, 2021).



図5. (左) アイスコアラーで採取したオホーツク海の海水 (長さ約40 cm). (右) 海水微細藻類 (アイスアルジー) が濃縮していた海水下層の断面.

2.4 海水融解室内培養実験

2019年2月に砕氷船である海上保安庁そうや航海において、アイスコアラーを用いて、南部オホーツク海より海水を採取し、陸上の実験室において、現場環境を模擬した海水融解培養実験を実施した (Yan et al., 2020). この海水融解実験では、

採取した海水試料を0°Cの現場海水 (滅菌済) で徐々に融解し、50 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で光照射を行い、微細藻類の存在量、細胞形態、細胞生存率 (ThermoFisher LIVE/DEAD *BacLight* assay) などの時間変化を評価した. 採取した海水には多量の大型中心目珪藻 *Thalassiosira* 属が

含まれており（同属の相対存在量は約75%）、海水融解実験を通して *Thalassiosira* 属の増殖が確認された (Yan et al., 2020). また、同実験の海水融解期（海水融解開始から約1日間）において、*Thalassiosira* 属を含む中心目珪藻類の全細胞に対する死細胞の割合は0.5%程度であったのに対し、羽状目珪藻類のそれは約6%と高かったことから、塩分変化（浸透圧ストレス）に対する羽状目珪藻類の脆弱性が示された。葛西ら(2014)によると、オホーツク海南西部の北海道沿岸域で採取した海水においても、*Thalassiosira* 属珪藻が海水微細藻類（アイスアルジー）群集中で優占していたことを報告しており、同報告は Yan et al. (2020) の結果と整合的であった。従って、海水中に生息する *Thalassiosira* 属が主に南部オホーツク海の春季植物プランクトングループを形成に大きく寄与する可能性が高いことが明らかとなった。

3. おわりに

海水微細藻類（アイスアルジー）が、種（タネ）となって、春季オホーツク海で増殖し、その一部は動物プランクトンの餌として捕食される一方、残りの細胞の多くは水柱を沈降し、ホタテ貝類等の底生生物（ベントス）の餌になり、オホーツク海の豊かな生態系を支えていると考えられる。これら生物が作り出した有機物は、オホーツク海の中深層において、バクテリアや古細菌により分解され、豊富な栄養物質（栄養塩）が再生される。今後の温暖化を鑑み、南部オホーツク海における海水量や栄養塩濃度の年々変化を把握するとともに、アイスアルジーの動態や生態生理変化を明らかにすることが喫緊の課題であるが、アイスアルジーは主に海水下部に生息していることから、現場観測や衛星リモートセンシングによる評価が大変困難である。このため、近年、アイスアルジーを対象とした数値モデリングの発達が期待されている (Hayashida et al., 2021). また、南部オホーツク海の北海道沿岸域の海水域面積や海水密接度の

年々傾向は、北部および中部オホーツク海で観測されるそれら傾向とは異なり、海水の力学的変形過程が海水体積に大きな影響を与えている可能性が高く、海水動態の予測を困難としている (Toyota et al., 2022). 今後の南部オホーツク海の環境変化を把握するために、物理・化学・生物を含む学際的研究が益々重要となっている。

引用文献

- 堀井貴司, 田村真樹, 大槻知寛 (1992) 1989年3月におけるオホーツク海北海道沿岸の海況と珪藻類分布. 北水試研報, 39, 11-19
- Itoh, M., K. I. Ohshima, M. Wakatsuchi (2003) Distribution and formation of Okhotsk Sea Intermediate Water: An analysis of isopycnal climatological data. J. Geophys. Res.: Oceans, 108, 3258, doi: 10.1029/2002JC001590
- 葛西広海, 新村陽子, 永田隆一, 片倉靖次, 濱岡莊司 (2014) オホーツク海紋別沖において採取した流水中の微細藻類（アイスアルジー）の生物量と分類群組成 (短報). 日本プランクトン学会報, 61, 121-125.
- 葛西広海, 永田隆一, 村井克詞, 片倉靖次, 館山一孝, 濱岡莊司 (2017) 北海道オホーツク海沿岸域の海洋環境の季節変化と海水後退時期の経年変動がクロロフィル a 量に及ぼす影響. 沿岸海洋研究, 54, 181-192
- Fukai, Y., K. Matsuno, A. Fujiwara, and K. Suzuki (2022) Photophysiological response of diatoms in surface sediments to light exposure: A laboratory experiment on a diatom community in sediments from the Chukchi Sea. Front. Mar. Sci., 9, doi: 10.3389/fmars.2022.998711
- Hayashida, H., M. Jin, N. S. Steiner, N. C. Swart, E. Watanabe, R. Fiedler, A. McC. Hogg, A. E. Kiss, R. J. Matear, P. G. Stratton (2021) Ice algae model intercomparison project phase 2.

- Geosci. Model Dev., 14, 6487–6861, doi: 10.5194/gmd-14-6847-2021
- Kuga, M., K. I. Ohshima, N. Kimura, K. Nakata, Y. Fukamachi (2023) Particle-tracking experiments of coastal-origin sea ice that could induce high biological productivity in the Sea of Okhotsk. *J. Oceanogr.*, 79, 145–159, doi: 10.1007/s10872-022-00670-5
- Matsumoto, T., K. Matsuno, S. Katakura, H. Kasai, A. Yamaguchi (2021) Seasonal variability of the protist community and production in the southern Okhotsk Sea revealed by weekly monitoring. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, 43, 101683, doi: 10.1016/j.rsma.2021.101683
- Mundo, R. T. Matsunaka, T. Nakanowatari, Y. Taniuchi, M. Inoue, H. Kasai, K. Mashita, H. Mitsuunushi, S. Nagao (2024) A review of the oceanographic structure and biological productivity in the southern Okhotsk Sea. *Prog. Oceanogr.*, 221, 103194, doi: 10.1016/j.pocean.2023.103194
- Mustapha, M. A., S.-I. Saitoh (2008) Observations of sea ice interannual variations and spring bloom occurrences at the Japanese scallop farming area in the Okhotsk Sea using satellite images. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 77, 577–508, doi: 10.1016/j.ecss.2007.10.021
- Nishioka, J., H. Obata, H. Ogawa, K. Ono, Y. Yamashita, K. Lee, S. Takeda, I. Yasuda (2020) Subpolar marginal seas fuel the North Pacific through the intermediate water at the termination of the global ocean circulation. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 117, 12665–12673, doi: 10.1073/pnas.2000658117
- Ohshima, K. I., T. Nakanowatari, S. Riser, Y. Volkov, M. Wakatsuchi (2014) Freshening and dense shelf water reduction in the Okhotsk Sea linked with sea ice decline. *Prog. Oceanogr.*, 126, 71–79, doi: 10.1016/j.pocean.2014.04.020
- Sorokin, Y. I., P. Y. Sorokin (1999) Production in the Sea of Okhotsk. *J. Plankton Res.*, 21, 201–230, doi: 10.1093/plankt/21.2.201
- Toyota, T., N. Kimura, J. Nishoka, M. Ito, D. Nomura, H. Mitsudera (2022) The interannual variability of sea ice area, thickness, and volume in the Southern Sea of Okhotsk and its likely factors. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 127, e2022JC019069. doi: 10.1029/2022JC019069
- Yan, D., K. Yoshida, J. Nishioka, M. Ito, T. Toyota, K. Suzuki (2020) Response to sea ice melt indicates high seeding potential of the ice diatom *Thalassiosira* to spring phytoplankton blooms: a laboratory study on an ice algal community from the Sea of Okhotsk. *Front. Mar. Sci.*, Article 613, doi: 10.3389/fmars.2020.00613
- Yan, D., J. Nishioka, T. Toyota, K. Suzuki (2022) Winter microalgal communities of the southern Sea of Okhotsk: a comparison of sea ice, coastal, and basinal seawater. *Prog. Oceanogr.*, 204, 102806, doi: 10.1016/j.pocean.2022.102806