

2026 年 2 月 18 日

国立研究開発法人海洋研究開発機構

国立研究開発法人水産研究・教育機構

国立大学法人九州大学

国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）

四半世紀の観測でわかった冷たい北の海の変化 —カムチャツカ半島沖の海の酸性化や生物生産の推移—

1. 発表のポイント

- ◆ 人間活動によって排出された二酸化炭素（CO₂）は、陸上の温暖化だけでなく、海の温暖化・酸性化など、海洋環境に対しても様々な変化を引き起こしている。本研究では、水産資源が豊富なカムチャツカ半島沖の定点 K2（北緯 47 度、東経 160 度）（図 1）に焦点をあて、25 年（1999～2023 年）に及ぶ海洋観測データから、北太平洋西部亜寒帯域の実態を明らかにした。
- ◆ 北太平洋西部亜寒帯域の定点 K2 において、海洋地球研究船「みらい」（図 1）などを用いて取得したデータの解析から、海洋表層で地球温暖化にともなう「温暖化」「低塩化」が確認され、そのうち温暖化は日本近海よりも 1.87 倍も速く進行していたことがわかった。また、海洋への CO₂ の取り込み増加に伴い「海洋酸性化」が進行していること、その割合（pH: 年 0.0014）は全季節で世界平均とほぼ同程度であることを本観測結果の解析が初めて明らかにした。
- ◆ 生物生産とは、一般に、海洋表面に生息する植物プランクトンが、栄養塩と CO₂ を餌として、太陽光による光合成を介して有機物を生産する過程である。今回、栄養塩の変化を 10 年規模の長期に渡りで観測した結果、「春（5 月）に増加、夏（7 月）に減少」という季節の依存性を新たに見いだした。この現象は、植物プランクトンの一種であるケイ藻類が大規模に増殖して発生（ブルーム）する時期が太陽光の低下の影響で遅延していることが原因と示唆された。

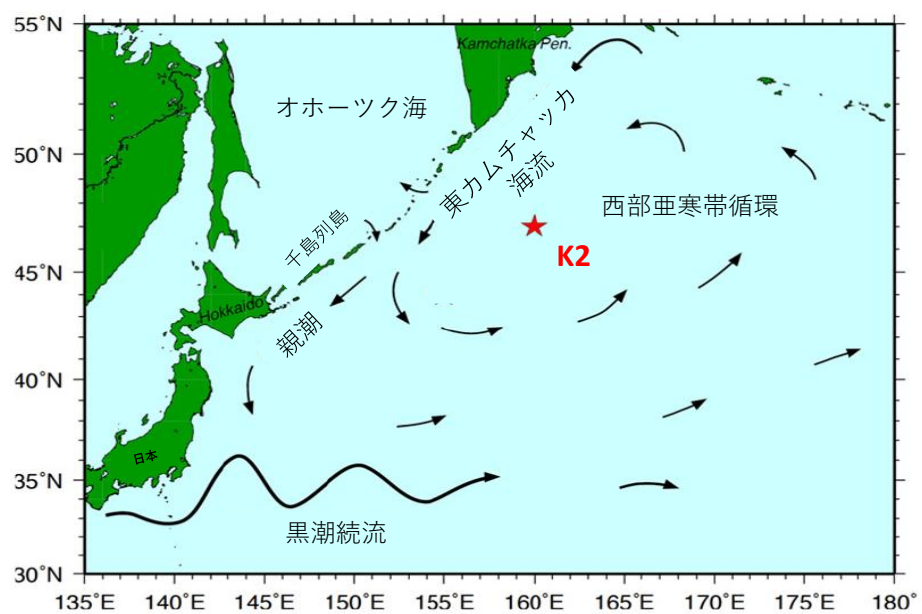


図 1. 北太平洋西部亜寒帯における定点 K2 および海洋地球研究船「みらい」

2. 概要

国立研究開発法人海洋研究開発機構（理事長 大和 裕幸、以下「JAMSTEC」という。）地球環境部門むつ研究所 海峡・沿岸環境変動研究グループの脇田昌英 副主任研究員らの研究グループは、北太平洋西部亜寒帯域のカムチャツカ半島沖に位置する定点 K2（北緯 47 度、東経 160 度）において、1999～2023 年の 25 年間にわたって、海洋地球研究船「みらい」などで得られた生物地球化学観測データを解析しました。その結果、本海域では海洋酸性化が着実に進行していることに加え、生物生産の長期的な変化が明らかにされました。

衛星および船舶観測データから、定点 K2 での海面水温は、年 0.056℃の割合で上昇し、日本近海（年 0.030℃）よりも速く進行（1.87 倍）していました。海洋の表層混合層^{*1}（0～150 m 未満）の塩分は年 0.004 の割合で低下していました。また、人間活動によって排出された CO₂の吸収により、pH および炭酸カルシウム飽和度^{*2}（カルサイト・アラゴナイト）は統計的に有意に低下しており（pH: 年 0.0014, カルサイト: 年 0.007、アラゴナイト: 年 0.004）、本海域で海洋酸性化が進行していることが確認されました。本海域の亜寒帯・極域は物理過程と生物過程が複雑に絡み合うことが知られており、ハワイなどの亜熱帯域に比べて変動幅が大きく、酸性化の進行も速いと予想されていました。しかしながら、本海域の海洋酸性化は、意外にも世界平均とほぼ同程度であることが分かりました。

一方、生物生産で消費される栄養塩（ケイ酸塩、リン酸塩、硝酸塩）の年平均濃度には明確な長期変化はみられませんでした。しかし、季節別に解析すると、5 月に増加、7 月に減少するという 10 年規模の変化が確認されました。冬季から夏季にかけての栄養塩の季節変動から推定した純群集生産量（NCP）^{*3}も、冬季から 5 月にかけては減少し、冬季から 7 月にかけては増加するという対照的な傾向を示しました。その結果、本海域では、生物生産が「春（5 月）に増加、夏（7 月）に減少」という季節依存性を示すことを、新たに見いだした。

さらに本研究では、5 月の光合成有効放射（PAR）^{*4}のみが 25 年間で年 0.20 の割合で低下していることを明らかにしました。この現象は、光環境の低下が春季の生物生産減少に影響していることを示唆しています。一方、7 月の NCP 増加による各栄養塩の元素の化学量論比（P:N:Si=1:15:55）は過去の報告（1:16:40）に比べて、Si（ケイ素）だけが高く、ケイ藻によるケイ酸塩消費の強化が示されました。8 月の黄砂飛来量が年々増加していることが数値モデルからも示されたことから、黄砂から供給される鉄利用能が、夏季のケイ藻生産増加の現象に関与している可能性が考えられました。

本海域の生物生産は、黄砂や海洋深層から供給される鉄の利用能に加え、海霧の発生に伴う光環境の変化にも影響されると報告されていることから、光環境、大気起源物質、ならびに中・深層からの物質供給の変化が、長期的に北太平洋亜寒帯域の生物

生産の季節的なパターンに直接影響を及ぼしている可能性が明らかになりました。今後も、「みらい」の調査・観測活動を引き継ぐ北極域研究船「みらいⅡ」などによる定点 K2 での継続観測を通じて、海洋酸性化を含む環境変化の影響解明を進めていきます。

本成果は、「Progress in Earth and Planetary Science 誌」に 2026 年 2 月 14 日付けで掲載されました。なお本研究は科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST 「海洋と CO2 の関係性解明から拓く海のポテンシャル」領域（JPMJCR24J1、課題名：気候変動に伴う低次栄養段階生物の応答と炭素吸収能の評価）と科学研究費補助金（科研費）（JP25106709、JP15H02835、JP23K20393）の助成のもと実施されました。

タイトル：Ocean acidification and changes in biological production in the western subarctic region of the North Pacific over the quarter century, 1999-2023

著者：脇田昌英¹、永野憲¹、内田裕¹、中野善之¹、木元克典¹、重光雅仁¹、長島佳奈¹、竹谷文一¹、藤木徹一¹、野口（相田）真希¹、笹岡晃征¹、小埜恒夫²、竹村俊彦³

1. JAMSTEC、2. 国立研究開発法人水産研究・教育機構、3. 九州大学

DOI: <https://doi.org/10.1186/s40645-026-00799-7>

【用語解説】

※1 表層混合層：海面付近には、海水の鉛直的な混合により、水温・塩分が深さ方向にほぼ一様になっている層があり、これを表層混合層と呼びます。冬季には、海面で海水が冷却されるとともに、強い風によって上層と下層の海水がよく混ざるため、表層混合層は厚くなります。一方、夏季には、日射によって海面付近の海水が温められ、海面付近と下層との温度差が大きくなるため、表層混合層は薄くなります。

※2 炭酸カルシウム飽和度：観測で得られた海水中のカルシウム濃度と炭酸イオン濃度の積を理論的に算出できる各イオンの飽和濃度の積で除して得られる指標。この数値が 1 以上であれば過飽和で、1 未満であれば未飽和の状態であることを意味します。そのため、この数値は、海水中のカルシウム濃度と炭酸イオン濃度が高いほど、炭酸カルシウムの殻や骨格を持つ生物は炭酸カルシウムの殻を作りやすく、低いほど作りにくくなります。海洋酸性化による炭酸イオンの減少は、海洋酸性化による生態系への影響評価の指標である炭酸カルシウムの飽和度（ Ω （オメガ））を減少させます。炭酸カルシウムには、カルサイト（方解石）とアラゴナイト（アラレ石）の主に 2 つの結晶形があります。化学的性質も異なり、アラゴナイトの方が溶けやすいため、アラゴナイトの殻や骨格を持つ生物の方が海洋酸性化の影響を強

く受けます。

※3 純群集生産量 (NCP: Net Community Production) : 海洋の植物プランクトンなどの独立栄養生物が光合成により作った有機物の総量から、海洋中の全生物の呼吸により消費された分を差し引いた生物群集全体の正味の生産量のことをいいます。

※4 光合成有効放射 (PAR: Photosynthetically Active Radiation) : 植物の光合成に実際に利用される放射光の波長域 (約 400nm (ナノメートル、ナノは 10 億分の 1) ~700nm) のことで、葉緑素が吸収しやすい青色 (400~500nm) と赤色 (600~700nm) の光が主。

3. 背景

産業革命以降の人間活動によって大気中の CO_2 が増加し、陸上の温暖化とともに海洋環境にも深刻な影響が広がっています。海洋は人間活動によって排出された CO_2 の約 4 分の 1 を吸収しており、その結果として海洋酸性化が進行しています。これにより、海水中の pH が低下し、炭酸イオン濃度が減少するとともに (図 2)、炭酸カルシウムの溶けやすさの指標である炭酸カルシウムの化学的飽和度の低下を引き起こしています。これらの変化は、炭酸カルシウムを骨格や殻に利用しているサンゴや貝類、プランクトンなどの海洋生態系にとって重要な生物に影響を及ぼす可能性があります。

北大西洋および北太平洋を中心とした長期観測から、表層海水の pH は毎年 0.0017 ~0.0027 の速度で低下していることが明らかになっています (IPCC 第 6 次評価報告書)。特に亜寒帯・極域では、物理過程と生物過程が複雑に絡み合うため、亜熱帯域に比べて変動幅が大きく、酸性化の進行も速いことが知られています。また、将来的には冬季に炭酸カルシウムが溶解してしまう「未飽和状態」へ、亜熱帯域よりも早く達する可能性も指摘されています (Orr et al., 2005)。

このような中、北太平洋西部亜寒帯の時系列観測点 K2 は、我々にとって海洋酸性化と生物生産の変化を理解する上で重要な拠点です。定点 K2 は水産資源が豊富で、高栄養塩・低クロロフィル (HNLC) 海域に位置しており、冬季には深層水の混合によって CO_2 の放出源となる一方、春から秋にかけては植物プランクトンの光合成による高い生物生産によって CO_2 の吸収源となるという特徴的な環境を有しています。その生物生産は、黄砂や深層から供給される鉄の利用能や、海霧による低層雲形成に伴う光条件にも影響を受けると報告されています。定点 K2 では、主にケイ藻類による高い生産性が確認されており、これまでの研究から、植物プランクトン群集構造や沈降粒子フラックス、NCP などの長期変動が報告されています。

こうした背景のもと、本研究では定点 K2 における海洋酸性化の進行と生物生産の変化を長期観測データに基づいて明らかにすることを目的として、海洋地球研究船「み

らい」などを用いた海洋観測に加え、衛星解析を併用した長期変化解析を行いました。

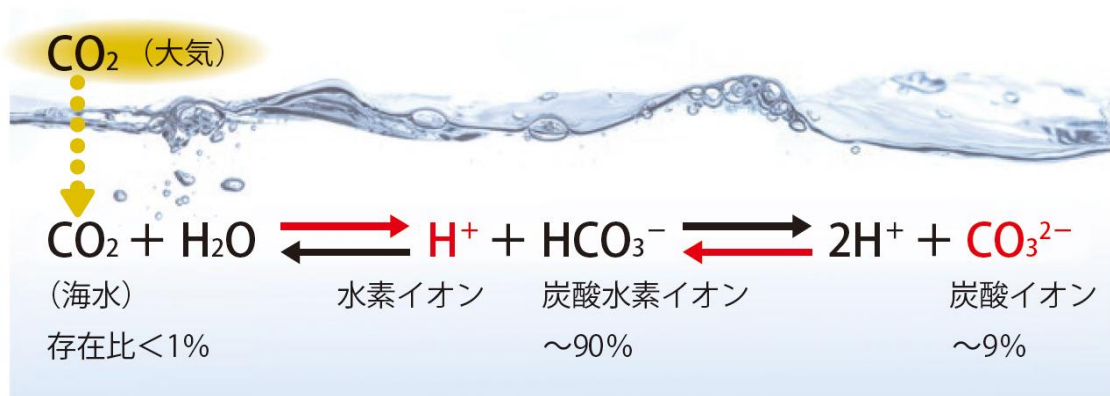


図 2. 海洋酸性化のしくみ

大気中の CO_2 が海水に溶け込むと、水と反応し水素イオンが発生します。この水素イオンが海水の pH を低下させます。さらに、増えた水素イオンと炭酸イオンが反応して炭酸水素イオンを作り、炭酸イオンが減少します。

4. 成果

本研究では、北太平洋西部亜寒帯の定点 K2 において、1999～2023 年の四半世紀にわたる長期データの解析により、海洋酸性化の進行速度と生物生産の季節的变化を定量的に明らかにしました。主な成果は以下の通りです。

1. 表層混合層における海洋酸性化の定量的評価

衛星データ解析の結果、本海域の海面水温は年率 0.056°C で上昇し（図 3-a）、表層混合層（水深 0～最大 150m 未満）の塩分は年率 0.004 低下していました（図 4-a）。さらに、表層混合層における海洋酸性化の割合も全季節で、他の海域と同様に進行しており（図 4-b, 4-c, 4-d）、その主因は人間活動により放出された CO_2 の海洋への吸収であることが示されました。

2. 生物生産の季節構造の変化を発見

表層混合層において、生物生産により消費される栄養塩の年平均濃度には明確な長期的増減は認められませんでした（図 4-f, 4-g, 4-h）。しかし、季節別に解析した結果、季節によって異なる変化が確認されました（図 5）。具体的には、5 月には NCP の減少に伴い栄養塩濃度が増加する一方、7 月には NCP の増加に伴って、栄養塩濃度が減少していました。

本海域の生物生産は、黄砂や深層から供給される鉄の利用能に加え、海霧の発生に伴う光環境の変化にも影響を受けます。5 月の定点 K2 付近では、表層混合層で鉄が枯渇しないことが報告されている一方、PAR が年率 0.20 の割合で低下しており（図 3-b）、この光量低下が春季の生物生産減少に影響した可能性が示唆されました。

一方、7 月の定点 K2 付近では、PAR に経年変化は見られず（図 3-b）、表層混合層の鉄はほぼ枯渇していると報告されています。この時期の NCP 増加に関連して、各栄養塩の NCP 増加速度（図 5-d, 5-e, 5-f）から求めた化学量論比 $\text{P:N:Si} = 1:15:55$ は、過去の報告値（ $\text{P:N:Si} = 1:16:40$; Wakita et al., 2016）に比べて Si（ケイ素）のみが高く、ケイ藻によるケイ酸塩消費の強化が確認されました。さらに、数値モデルの結果から、8 月の黄砂飛来量が年々増加していることが示されており、これがケイ酸塩を利用するケイ藻の夏季生産が増加する一因となっている可能性が示唆されます。

これらの結果から、春季に減少した生物生産は、夏季の生産増加によって補われており、ケイ藻ブルームの発生時期が変化している可能性が示されました。総合的に、光環境と大気および海洋環境の長期的な変化が、生物生産の季節的なパターンに直接影響を与えている可能性が明らかになりました。

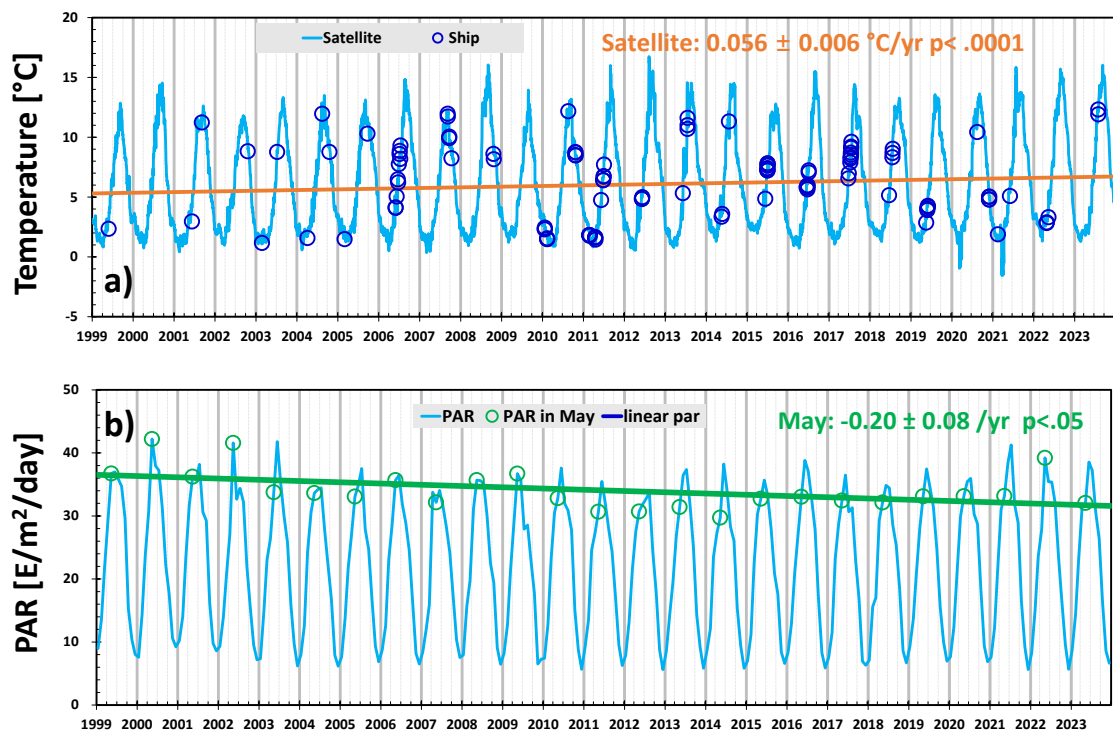


図 3. 定点 K2 における (a) 衛星観測による海面水温と船舶観測による表層混合層水温、
 (b) 衛星観測による光合成有効放射 (PAR) の経年変化
 水色の線は、(a) 衛星観測による海面水温、(b) PAR を表す。丸は、(a) 表層混合層水温
 (青)、(b) 5 月の PAR (緑) の平均値 (緑) を示す。太い実線は、(a) 衛星から得られた
 海面水温 (オレンジ) で年率 0.056°C で上昇、(b) 5 月の PAR (緑) は統計的に有意な線形
 回帰直線を示し、年率 0.20 の割合で低下していることがわかった。

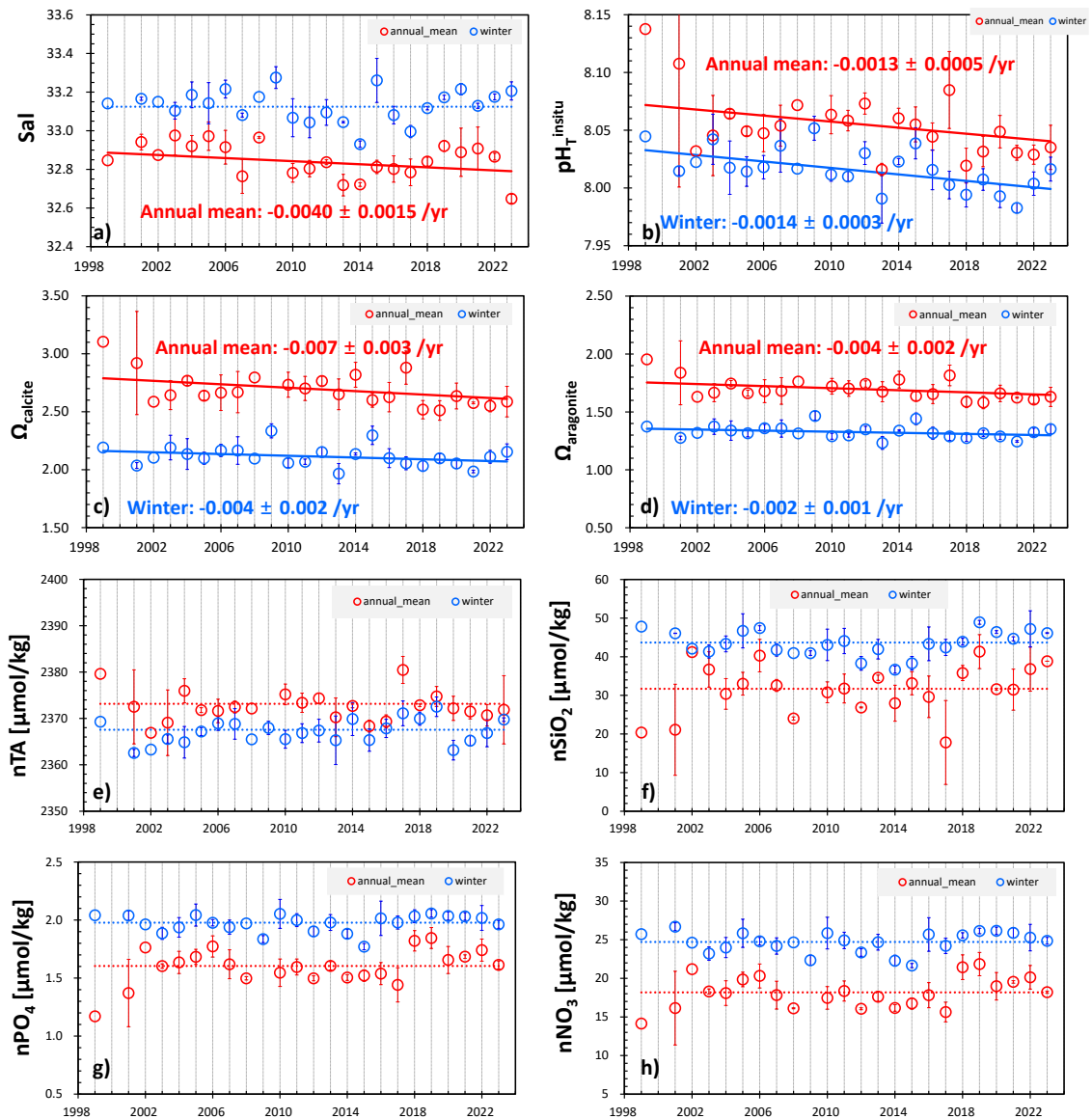


図4. 定点 K2 における表層混合層の (a) 塩分 (Sal)、(b) 現場水温 pH ($\text{pH}_T^{\text{insitu}}$)、(c-d) カルサイト (Ω_{calcite}) およびアラゴナイト ($\Omega_{\text{aragonite}}$) の CaCO_3 飽和度、(e) 塩分 35 に規格化した全アルカリ度 (nTA)、(f) 同ケイ酸塩 (SiO_2)、(g) 同リン酸塩 (nPO_4)、(h) 同硝酸塩 (nNO_3) の経年変化

赤丸と青丸は、それぞれ年平均値および推定した冬季混合層の値で、縦線は標準偏差を示す。実線は統計的に有意な傾向 ($p < 0.05$) の線形回帰を示し、点線は有意でない場合の期間内の平均を示す。傾きの誤差は、線形回帰における標準誤差。

塩分は年率 0.004 で低下し (a)、海洋酸性化を示す指標 (b-d) はいずれも酸性化の進行を示している。一方で、表層混合層における栄養塩に有意な変化は見られなかった。(f-h) また、全アルカリ度にも変化は認められず (e)、海洋酸性化に伴う石灰化低下の可能性は確認できなかった。

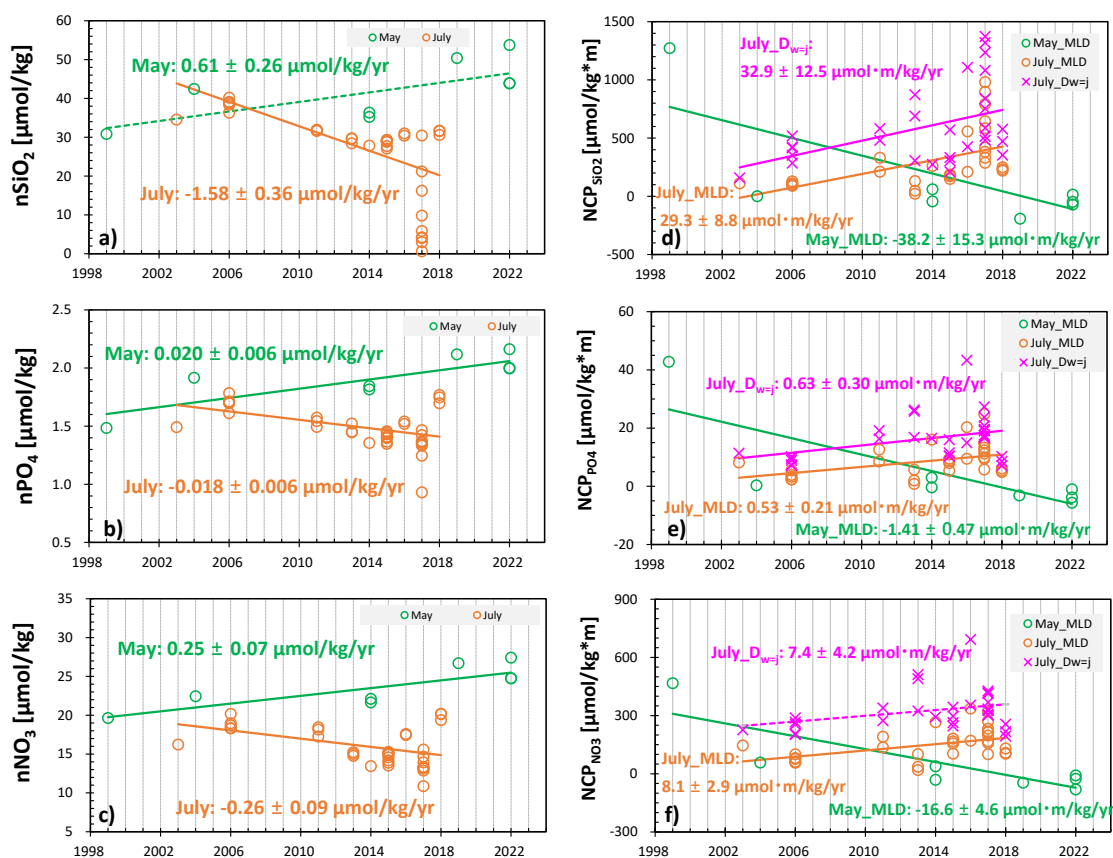


図5. 定点 K2 における 5 月（緑丸）と 7 月（橙丸）の栄養塩と生物生産の指標である純群集生産 NCP の経年変化

(a) 塩分 35 で規格化したケイ酸塩 ($n\text{SiO}_2$)、(b) 同リン酸塩 ($n\text{PO}_4$)、(c) 同硝酸塩 ($n\text{NO}_3$) の経年変化。また、冬から 5 月（緑丸）および 7 月（橙丸）までの表層混合層 MLD における純群集生産 NCP（橙丸）[(d) $\text{NCP}_{\text{SiO}_2}^{\text{MLD}}$ 、(e) $\text{NCP}_{\text{PO}_4}^{\text{MLD}}$ 、(f) $\text{NCP}_{\text{NO}_3}^{\text{MLD}}$]、さらに海面から水深約 80m ($D_{w=j}$) までの純群集生産 NCP（ピンクの×）[(d) $\text{NCP}_{\text{SiO}_2}^{D_{w=j}}$ 、(e) $\text{NCP}_{\text{NO}_3}^{D_{w=j}}$ 、(f) $\text{NCP}_{\text{NO}_3}^{D_{w=j}}$] の経年変化も併せて示しています。実線は統計的に有意な傾向 ($p < 0.05$) を示し、点線は $p < 0.10$ の有意傾向を示す。傾きに付した誤差は、線形回帰における標準誤差。

5 月は、NCP の減少 (d-f 緑丸) に伴い栄養塩が増加している (a-c 緑丸) が、7 月は NCP の増加 (d-f 橙丸、ピンクの×) に伴い栄養塩が減少している (a-c 橙丸)。

5. 今後の展望

本研究により、北太平洋亜寒帯域の海洋酸性化と生物生産の長期変動に関する理解は大きく前進した一方で、今後の研究で解明すべき重要な課題も明らかになりました。

まず、表層混合層の全アルカリ度^{※5}に有意な長期変化が認められなかったことから（図 4-e）、海洋酸性化に伴う石灰化低下（例：石灰質プランクトンの殻の薄化）の可能性は今回の解析では確認されませんでした。今後は、この海域で採取された石灰質プランクトンを対象に、マイクロフォーカス X 線 CT^{※6}（Kimoto et al., 2023）などの先端的分析技術を用いた殻密度の高精度測定を行い、その実態の理解を進めていきたいと思います。

さらに、北極域研究船「みらいⅡ」などによる定点 K2 での継続観測を通じて、今後は、光環境や大気・海洋からの物質供給が生物生産に与える影響を総合的に評価するとともに、エルニーニョなどの気候変動イベントとの関係を加えて解析し、本海域の将来の海洋環境変化の予測精度向上を目指します。

【用語解説】

※5 全アルカリ度：海水中の強電解質の陽イオンと陰イオンの全電荷量の差として定義されます。弱アルカリ性（pH 約 8.1）を示す現代の海水では、強電解質の陰イオンの全電荷量が陽イオンに比べてわずかに少ないため、電気的中性を保つように弱電解質の陰イオンがその差を補っています。この全アルカリ度に寄与する主な成分は、炭酸水素イオン、炭酸イオン、ホウ酸塩の 3 種類です。サンゴや貝、プランクトンなどの生物が、海中の炭酸イオンとカルシウムイオンを利用して石灰質（炭酸カルシウム）の骨格や殻を形成すると全アルカリ度は減少し、逆にそれらが溶解すると増加します。そのため、全アルカリ度は海洋における炭酸カルシウムの生成・溶解プロセスを知るための重要な指標となります。

※6 マイクロフォーカス X 線 CT：マイクロサイズの微小な物体に対して全方向から X 線を照射することで物体の透過画像を取得し、それらをコンピュータ上で再構成することにより物体の表面から内部の形態情報を 3 次元で詳細に明らかにすることができる顕微鏡。

参考文献

1. IPCC 第6次評価報告書 : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021) Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 673-816. doi:10.1017/9781009157896.007
2. Orr et al. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437, doi:10.1038/nature04095
3. Wakita et al., (2017) Slow acidification of the winter mixed layer in the subarctic western North Pacific, *J Geophys Res Oceans* 122: 6923-6935. doi:10.1002/2017JC013002
4. Wakita et al. (2016) Biological organic carbon export estimated from the annual carbon budget observed in the surface waters of the western subarctic and subtropical North Pacific Ocean from 2004 to 2013, *J Oceanogr*, 72(5): 665-685. doi:10.1007/s10872-016-0379-8
5. Kimoto et al. (2023) Precise bulk density measurement of planktic foraminiferal test by X-ray microcomputed tomography. *Frontiers in Earth Science*, doi:10.3389/feart.2023.1184671

お問い合わせ先：

(本研究について)

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球環境部門 むつ研究所 海峡・沿岸環境変動研究グループ

副主任研究員 脇田 昌英

電話：0175-45-1012 E-mail：mwakita@jamstec.go.jp

国立研究開発法人水産研究・教育機構

水産資源研究所(横浜)

主幹研究員 小埜 恒夫

電話：045-788-7615 (代表) E-mail：ono_tsuneo65@fra.go.jp

国立大学法人九州大学

応用力学研究所

主幹教授 竹村 俊彦

電話：092-583-7932 E-mail：takemura.toshihiko.570@m.kyushu-u.ac.jp

(報道担当)

国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部報道室

電話：045-778-5690 E-mail：press@jamstec.go.jp

国立研究開発法人水産研究・教育機構 経営企画部広報課

E-mail：fra-pr@fra.go.jp

国立大学法人九州大学 広報課

電話：092-802-2130 E-mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

国立研究開発法人科学技術振興機構 広報課

電話：03-5214-8404 E-mail：jstkoho@jst.go.jp

(JST 事業に関すること)

国立研究開発法人科学技術振興機構

戦略研究推進部 ライフイノベーショングループ

沖代 美保

電話：03-3512-3524 E-mail：crest@jst.go.jp