総合論文

北西太平洋の海洋酸性化と生物ポンプ
―長期観測と将来予測の課題―

野　口　真　希*

1. はじめに

人間活動に起因する二酸化炭素（CO_2）の放出と大気・海洋への蓄積は，地球環境のみならず，社会に対しても深刻な影響を及ぼしつつある．近年では，気候変動の緩和策の一つとして，海洋を利用して大気中の CO_2 を除去・貯留する marine carbon dioxide removal（mCDR）の実装に向けた検討が進められている（NASEM, 2022；本多, 2025）．

温室効果ガスである CO_2 の増加は，地球の平均気温を上昇させ，海洋温暖化や貧酸素化を引き起こすとともに，海水中での溶解・反応を通じて炭酸系の化学平衡を変化させ，pH を低下させる海洋酸性化をもたらす．このような複合的な環境ストレスは，海洋の食物網の基盤を担う動植物プランクトンの生態や代謝機能に深刻な影響を及ぼすことが報告されている．

例えば，動物プランクトンの主要な分類群であるカイアシ類は，日周・季節的な鉛直移動などを通じて生物学的炭素ポンプ（生物ポンプ）において重要な役割を果たしているが，実験では海水温の上昇に伴う個体数の減少や体サイズの小型化が報告されている（Garzke et al., 2016）．また，アラゴナイト殻を有する有殻翼足類では，海洋酸性化に伴う殻の溶解が観測されており，特に高緯度海域における炭酸塩輸送への影響が懸念されている（Bednaršek et al., 2021）．

このような低次栄養段階生態系における変化は，食物連鎖を通じて高次栄養段階生物へ波及する可能性があるとともに，海洋における炭素循環，とりわけ生物ポンプの変化にも深く関与すると考えられる．しかしながら，植物プランクトンによる炭素固定，それを捕食する動物プランクトンの活動，さらにそれらに由来する有機物の沈降を含めた炭素輸送過程が，環境変化のもとでどのように変化するのかについて，その実態は依然として不明な点が多い．

人類が直面する地球環境の変化を正確に把握し，適切な対策を講じるためには，低次栄養段階生物（プランクトン）の応答を理解するとともに，それに伴う炭素輸送過程の変化を定量的に評価することが不可欠である．本稿では，時系列観測点 K2 の長期観測を中心に，全球的な数値モデル研究も参照しながら，海洋における酸性化と生物ポンプに焦点をあて，その基礎過程と環境変化による影響，さらに将来予測に向けた課題について概観する．

2. 炭素循環と海洋酸性化

2.1　海洋炭素循環と生物ポンプ

気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change：IPCC）第 6 次評価報告書によれば，人間活動に伴う化石燃料燃焼や土地利用改変により，2010～2019 年平均では，年間約 11 Pg C の炭素が大気へ放出されている．そのうち，海洋が約 23%（2.5 ± 0.6 Pg C/年），陸域が約 31%（3.4 ± 0.9 Pg C/年）を吸収し，残りの約 46%（5.1 ± 0.02 Pg C/年）が大気中に蓄積している（IPCC, 2021）．年間吸収量のみを比較すると陸域の寄与が大きく見えるが，海洋は数千年規

*国立研究開発法人 海洋研究開発機構
地球環境研究部門 地球表層システム研究センター 海洋生態系変動研究グループ センター長代理

79 周年秋季講演会（令和 7 年 11 月 8 日）講演

模の循環と地球化学的・生物学的過程を通じて，大気・陸域と交換する炭素の主要な貯蔵庫として機能している（DeVries, 2022）．

海洋表層から深層への炭素輸送には，海水へのCO_2の溶解と海洋循環に伴う物理的な輸送過程に加え，生物活動を介した輸送過程がある．後者は「生物学的炭素ポンプ（生物ポンプ）」と呼ばれ，植物プランクトンによる光合成を起点として，有機物の一部が海洋内部へと輸送される仕組みである．植物プランクトンは光合成によってCO_2を同化して有機物を生成し，その炭素は動物プランクトンや魚類へと食物連鎖を通じて受け渡されていく．生成された有機炭素の一部は糞粒や死骸，あるいはこれらが凝集したマリンスノー（沈降粒子）として深層へ沈降するほか，動物プランクトンの日周・季節的な鉛直移動によっても炭素は能動的に深層へと輸送される．このように，数 μm から数 mm ほどの微小な生物群集が地球規模の炭素循環を駆動している．

2.2　北西太平洋における時系列観測点 K2

この生物ポンプが強く働く海域のひとつが，北西太平洋の亜寒帯域である．当該海域は高い一次生産に支えられ，生物ポンプによる炭素輸送が活発な海域として知られており，海洋炭素循環において重要な役割を担っている（Siegel et al., 2014; Doney et al., 2024）．また，北西太平洋は，2023 年には世界の漁獲量の約 21.5% を占める生産性の高い海域としても知られている（水産庁，令和 6 年度水産白書）．一方，北太平洋亜寒帯域は，低水温および全炭酸濃度の高さに由来する炭酸系特性から，炭酸カルシウム飽和度が比較的低い海域である．近年の人為起源CO_2の海洋吸収に伴い，太平洋全域でアラゴナイトおよびカルサイトの飽和度の低下が進行しており，その飽和界面が浅くなっていることが報告されている（Feely et al., 2012）．さらに，高CO_2排出シナリオのもとでは，21 世紀末までに北太平洋亜寒帯域の一部で表層海水がアラゴナイト未飽和状態に達する可能性が予測されている（Orr et al., 2005）．

国立研究開発法人 海洋研究開発機構（JAMSTEC）では，北太平洋亜寒帯西部のカムチャッカ半島沖に観測点 K2（北緯 47 度，東経 160 度，水深約 5,200 m）を設け，2001 年以降，係留観測と船舶観測を組み合わせた長期時系列観測を実施している．定期的な船舶観測に加え，海底に固定された係留系観測システム（全長約 5,000 m）を用いることで，物理・化学・生物の統合的な観測が可能となっている．さらに，中深層には時系列自動採水装置 RAS（Remote Access Sampler）やセジメントトラップ（図 1）を設置し，物質循環や生物ポンプ効率の変動，海洋酸性化の進行状況などを多角的に観測してきた．

2.3　時系列観測点 K2 における海洋酸性化の進行

K2 における 1999～2023 年の季節変動を除いた表層混合層内の pH は，大気中CO_2濃度の増加に対応して，年間約 0.0013 の速度で低下していることが明らかとなった（Wakita et al., 2026，図 2）．IPCC 第 6 次評価報告書では，長期時系列観測に基づき，1980 年代後半以降の外洋表層における海水の pH が 10 年間に 0.017～0.027 の速度で低下していることが報告されている（IPCC, 2021）．一方，K2 および KNOT（北緯 44 度，東経 155 度）における 1999～2015 年の解析では，冬季混合層内の pH に緩やかな低下が報告されている（Wakita et al., 2017）．また，2015～2019 年の係留観測からは，エルニーニョに関連した鉛直混合の強化により，溶存無機炭素（DIC）に富む下層水の取り込みが増加し，冬季の酸性化が促進された可能性が示唆されている（Nagano et al., 2021）．

海洋酸性化は，大気中CO_2が海水に溶解し，水（H_2O）と反応して炭酸（H_2CO_3）を生成し，さらにその解離により水素イオン（H^+）が増加することで海水の pH が低下する現象である（図 3）．この過程に付随して炭酸イオン（CO_3^{2-}）が減少し，炭酸カルシウム（$CaCO_3$）の飽和度（Ω）が低下する．その結果，石灰質の殻や骨格の形成

が阻害されたり，溶解が生じたりする．K2 におけるアラゴナイト飽和度（Ω_{arag}）は年間約 0.004 の速度で低下しており，近年の冬季には約 1.3 となり，アラゴナイト未飽和状態（$\Omega_{arag}<1$）の境界に近づきつつある（Wakita et al., 2026）．このような環境変化は，石灰質プランクトンの殻形成を困難にし，温暖化と相まって海洋生態系への影響を強める可能性がある．例えば，北太平洋高緯度域の一部海域では，翼足類（pteropods）の殻溶解が観測されており，海洋酸性化の影響がすでに顕在化していることが報告されている（Bednaršek et al., 2021）．

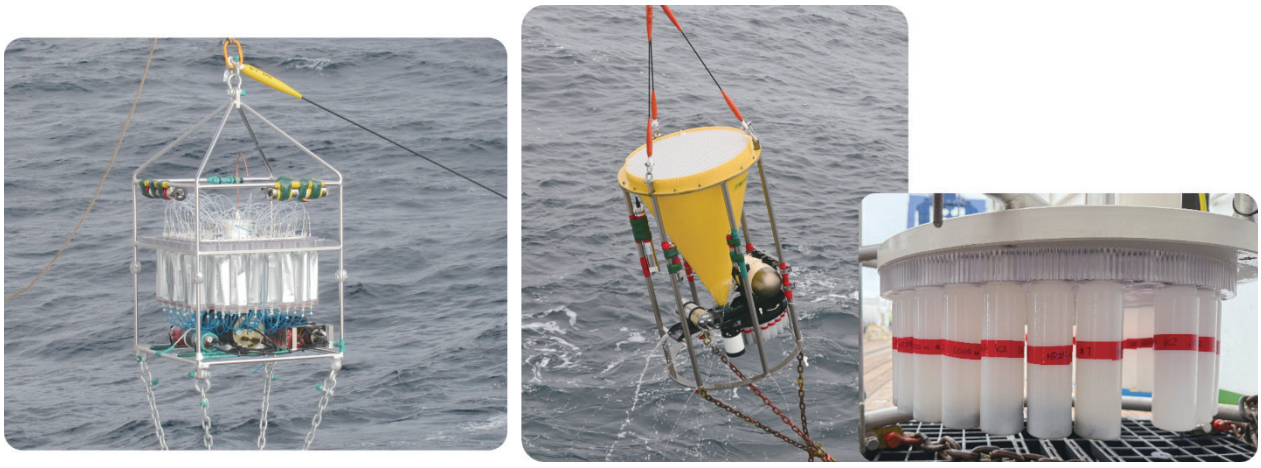


図 1　北西太平洋亜寒帯域の時系列観測定点 K2 における係留系観測装置の例．
水深 200 m および 300 m に設置された時系列自動採水装置 RAS（Remote Access Sampler，左）．あらかじめ設定したスケジュールに従い，500 mL の海水試料を最大 48 本自動採取することができる．また，水深 500 m，1,000 m および 4,800 m にはセジメントトラップ（中央）が設置されており，沈降粒子（マリンスノーなど）を捕集する．沈降粒子は上部の漏斗状の捕集部から入り，下部の保存液を入れた試料カップに回収される．一定の間隔（約 2〜3 週間）で試料カップが自動的に切り替わることにより，沈降粒子を長期間にわたり時系列的に捕集することができる（右）．

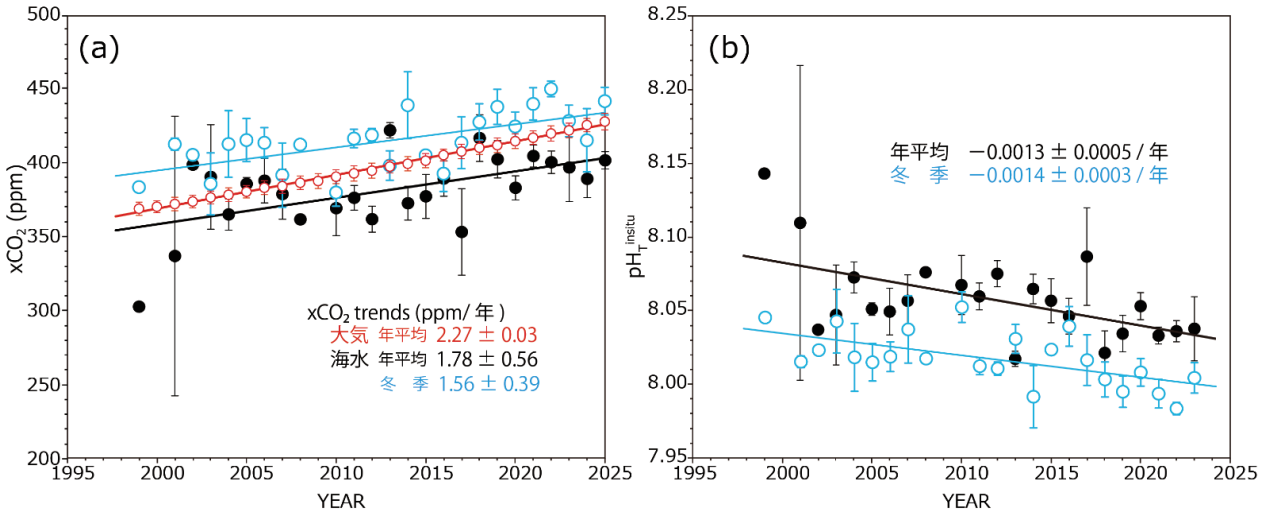


図 2　北西太平洋亜寒帯域の時系列観測定点 K2 における CO_2 モル分率（xCO_2）と pH の経年変化．
（a）大気中の CO_2 モル分率（赤）および表層混合層内（年平均：黒）と冬季混合層内（冬季平均：青）の海水と平衡にある気相の CO_2 モル分率の経年変化．大気中の CO_2 モル分率には NOAA Greenhouse Gas Marine Boundary Layer Reference データ（Lan et al., 2023）を使用した．Wakita et al.（2026）を基に，観測期間を 2025 年まで延長し，1999〜2025 年のデータを用いて線形回帰分析を行い，再作図した．（b）表層混合層内および冬季混合層内の pH の 1999〜2023 年までの経年変化（Wakita et al., 2026 の図 3-b を引用・改変）．丸印は平均値（年平均：黒，冬季：青），エラーバーは標準偏差を示す．実線は線形回帰直線を示し，図中の数値は変化速度とその標準誤差を示す．

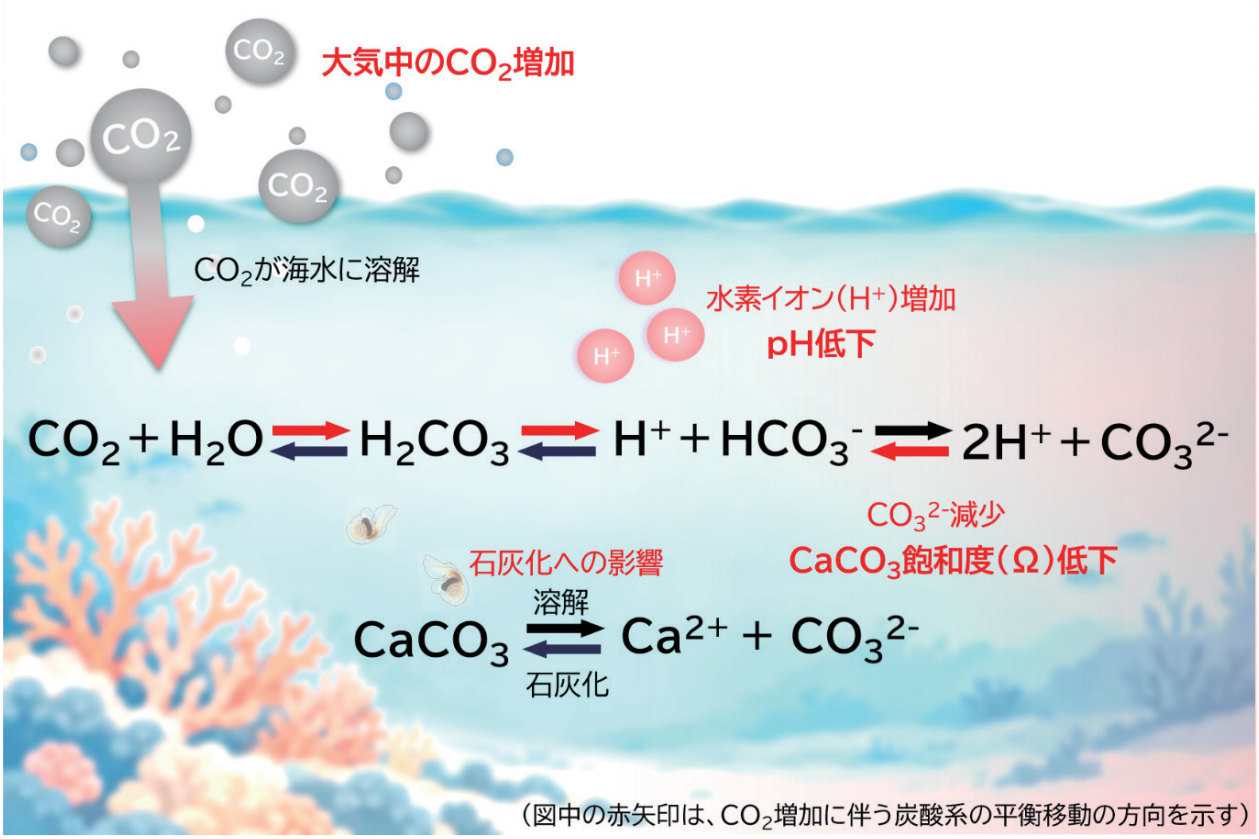


図 3　海洋酸性化に伴う海水の炭酸系の変化と石灰化への影響．赤矢印は，大気中 CO_2 の増加に伴う炭酸系の平衡移動の方向を示す．Ω は炭酸カルシウム（$CaCO_3$）の飽和度を示す．

さらに，将来の海洋酸性化が生物に及ぼす影響についても実験的な研究が進められている．Shimizu et al.（2025）は，日本沿岸に分布する巻貝クサイロアオガイの幼生を対象に，現在の pH が最も低下する冬季の海洋条件（pH 7.87, Ω_{arag} = 1.91）と，将来の環境を模した異なる pH・Ω_{arag} を有する海水（pH 7.6, Ω_{arag} = 1.26；pH 7.3, Ω_{arag} = 0.70）を用いて飼育実験を行った．その結果，pH・Ω_{arag} の低下に伴い殻は薄くなり，小型化するとともに，殻密度も低下した．また，遺伝子発現解析から，殻形成関連遺伝子の発現領域の縮小も確認されており，将来的には殻形成が困難になる可能性が示唆されている．

このように，海洋酸性化に伴う炭酸系の変化は，すでに長期観測によって捉えられており，石灰化生物への影響も観測や飼育実験から明らかになりつつある．一方，こうした環境変化が，海洋生態系全体や生物ポンプによる炭素輸送にどのような影響を及ぼすのかについては依然として不明な点が多い．

3　観測による変化の検出と数値モデルによる将来予測

3.1　長期観測における人為起源変化の検出と課題

海洋の生物ポンプが地球温暖化や環境変化に伴いどのように変化しているかを捉えることは，将来予測モデルの検証において極めて重要である．しかし，温暖化や酸性化といった人間活動の影響は，すべての海域やプロセスにおいて同じ時期に検出されるわけではない．Schlunegger et al.（2019）は，米国海洋大気庁（NOAA）地球物理流体動力学研究所（GFDL）の地球システムモデル GFDL-ESM2M の大規模アンサンブル実験を用いて，海洋炭素循環における人為起源の変化がモデル上で自然変動から識別可能となる時期（Time of Emergence：ToE）を解析した．その結果，表層海水の pH 低下などの化学的な変化は比較的短期間で検出可能となる一方，水深 100 m にお

ける粒子状有機炭素（POC）フラックスでは人為起源のシグナルを検出するまでに数十年以上を要し，その期間は海域によって異なることが示された．これは，POC フラックスでは自然変動の大きさに対して人為起源の変化が相対的に小さく，長期トレンドの識別が難しいためである．

では実際の長期観測ではどうであろうか．図 4 は，時系列観測点 K2 の水深 4,800 m に設置されたセジメントトラップによって観測された POC フラックスの時系列データである．POC フラックスには明瞭な季節変動や年々変動が認められる一方，Dobashi et al.（2022）は，2005～2018 年の観測データを解析し，深層の沈降 POC フラックスに統計的に有意な長期トレンドが認められないことを報告した．また，POC フラックスの年々変動には，表層の植物プランクトンの増殖や中規模渦に伴う水平移流などの物理・生物過程が大きく関与していることを示した．このような自然変動の存在が，人為起源の長期変化を検出する上での課題となり得る．

ただし，長期トレンドが検出されないことは，生物ポンプに変化が生じていないことを意味しない．表層の環境や生態系が変化していても，その影響が深海への炭素輸送量にどの程度反映されるかは，沈降粒子の生成や分解，輸送過程によって異なる．さらに，深海 POC フラックスは大きな季節・年々変動を伴うことから，長期変化を識別し，その要因を評価するためには，より長期間の継続的な観測が必要となる．

3.2　数値モデルによる将来予測と不確実性

地球温暖化に伴う海洋環境の変化と生物ポンプの将来応答を評価するため，地球システムモデルを用いた将来予測が進められている．第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6：CMIP6）の複数モデルによるアンサンブル平均では，高排出シナリオ（SSP5-8.5）について，1870～1899 年平均に対し，21 世紀末（2080～2099 年平均）の全球平均の海面水温が 3.47℃ 上昇し，表層海水の pH が 0.44 低下するとともに，表層（0～100 m）の硝酸塩濃度の減少や中層（100～600 m）の溶存酸素濃度の低下が予測されている．一方，生物ポンプの起点となる純一次生産量（NPP）の将来

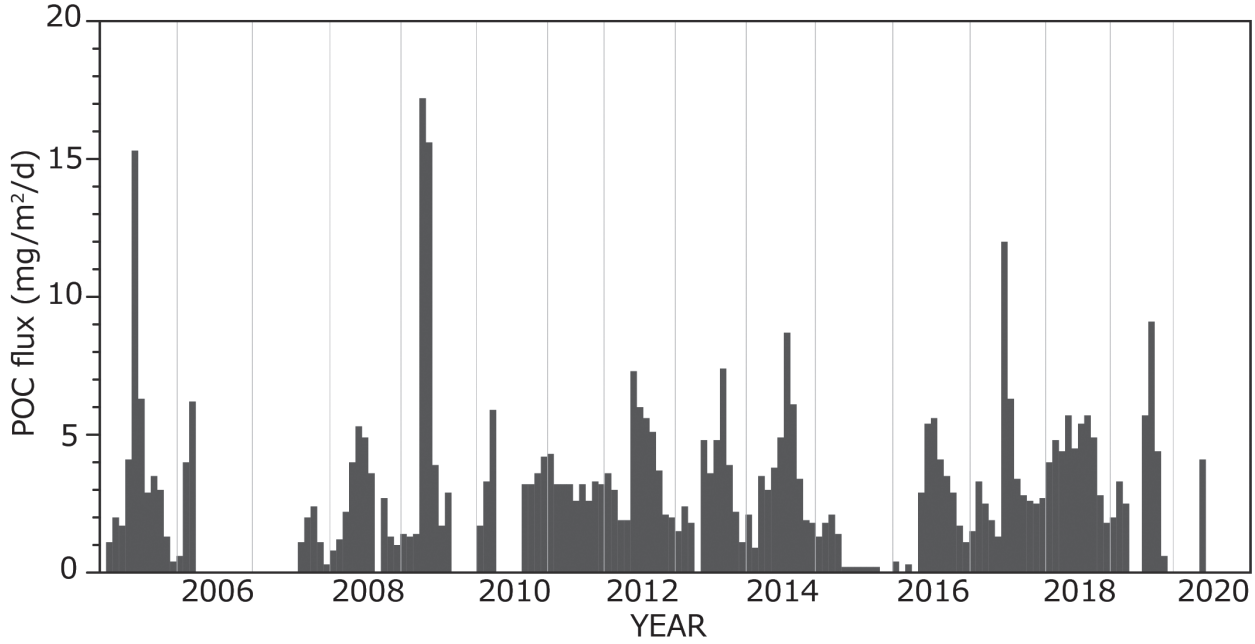


図 4　北西太平洋亜寒帯域の時系列観測定点 K2 の水深約 4,800 m に設置されたセジメントトラップによって観測された粒子状有機炭素（POC）フラックスの 2005～2020 年の時系列変化．
JAMSTEC OceanSITES Sediment Trap data の公開データ（https://www.jamstec.go.jp/k2oceansites/）を基に月平均値を算出し，作図した．

変化については，モデル間の予測に大きなばらつきがある．CMIP5 では全球的な NPP の減少傾向が比較的一貫して予測されていたのに対し，CMIP6 では増加を予測するモデルもみられ，モデル間の不確実性は大幅に拡大している（Kwiatkowski et al., 2020）．

将来予測の基盤となる現在気候の再現においても，表層から深層への炭素輸送量にはモデル間のばらつきがある．全球海洋炭素収支の国際評価プロジェクト（RECCAP2）における海洋生物地球化学モデルと観測データの比較解析では，水深 100 m における全球の POC 輸出量はモデルアンサンブル平均で 6.08 ± 1.17 Pg C/年であり，観測に基づく推定値の平均である約 8 Pg C/ 年（範囲 4〜13 Pg C/年）を下回った．さらに，水深 1,000 m における POC 沈降フラックスは 0.65 ± 0.24 Pg C/年であり，観測推定値の下限に近かった．一方，水深 100 m に対する 1,000 m の POC フラックスの比から求めた転送効率は 0.122 ± 0.041 であり，観測に基づく推定値と概ね整合していた（平均 ± モデル間標準偏差，Doney et al., 2024）．

こうしたモデル間のばらつきを生む要因の一つとして，中層における有機物の分解過程の表現の違いが注目されている．Rodgers et al.（2024）は，低緯度域（南緯 30 度〜北緯 30 度）における栄養塩循環について，一次生産の 72%，炭素輸出の 55% が中層における局所的な栄養塩の再循環によって支えられていることを観測解析を踏まえたモデル感度実験から推定した．さらに，5 つの CMIP6 モデルによる 2300 年までの将来予測を比較し，SSP5-8.5 のもとでは，有機物の分解速度の水温依存性を考慮した一部のモデルでは，温暖化によって中層での栄養塩の保持・再循環が強化され，低緯度の一次生産が維持または増加する可能性を示した．一方，分解速度の水温依存性を考慮していないモデルでは，一次生産や炭素輸出量の減少が予測された．北西太平洋亜寒帯域への適用には検証が必要であるものの，この結果は，生物ポンプを構成する個々のプロセスの表現が，将来予測の方向性そのものを左右する可能性を示している．

4　おわりに

人間活動に伴う大気中 CO_2 の増加は，海洋の温暖化や酸性化を進行させ，海洋生態系や炭素循環に様々な影響を及ぼしつつある．北西太平洋亜寒帯域の時系列観測点 K2 では，20 年以上にわたる長期観測によって海洋酸性化の進行が明瞭に捉えられている．一方，K2 の深層における POC フラックスには大きな季節・年々変動が認められるものの，2005〜2018 年の解析対象範囲では有意な長期トレンドは検出されていない．また，数値モデルによる将来予測においても，一次生産や炭素輸送の変化には大きな不確実性が残されている．

今後，気候変動が海洋生態系や生物ポンプに及ぼす影響をより正確に予測するためには，長期時系列観測の継続が不可欠である．一方，環境変化に対するプランクトンの生物応答や，植物プランクトンの増殖や栄養塩制限，動物プランクトンによる摂食，沈降粒子の形成・分解・無機化など，複数の生物地球化学過程に由来する不確実性が残されている．したがって，将来予測の確度を高めるためには，これらの過程を支配するメカニズムの理解を深め，現場観測や実験研究から得られる知見をもとに，モデルにおける各過程の表現を改善していくことが重要となる．こうした取り込みによって不確実性を低減し，変わりゆく北西太平洋の海洋環境と炭素循環の将来像をより確かなものにしていくことが期待される．

謝辞

本稿のもととなる講演の機会をいただいた京都大学化学研究所の宗林由樹教授ならびに公益財団法人海洋化学研究所の皆さまに深く感謝申し上げます．また，本稿で使用した海洋酸性化およびセジメントトラップの観測データについて，海洋研究開発機構の脇田昌英副主任研究員および本多牧生特任上席研究員にご協力いただきました．観測

データの取得にあたっては，海洋地球研究船「みらい」と乗組員の皆さま，航海を支えてくださった関係者の皆さまに深く感謝申し上げます．本研究は，JST CREST「海洋カーボン」（JPMJCR24J1）およびJSPS科研費「デジタルバイオスフェア」（JP21H05319）の支援を受けたものです．

引用文献

Bednaršek N., Naish K.-A., Feely R.A., Hauri C., Kimoto K., Hermann A.J., Michel C., Niemi A., Pilcher D. (2021) Integrated Assessment of Ocean Acidification Risks to Pteropods in the Northern High Latitudes: Regional Comparison of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity. Front. Mar. Sci. 8:671497. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.671497

DeVries T. (2022) The Ocean Carbon Cycle. Annu. Rev. Environ. Resour., 47, 317-341. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120920-111307

Dobashi R., Ueno H., Matsudera N., Fujita I., Fujiki T., Honda M.C., Harada N. (2022) Impact of mesoscale eddies on particulate organic carbon flux in the western subarctic North Pacific. J. Oceanogr. 78, 1–14. https://doi.org/10.1007/s10872-021-00620-7

Doney, S.C., Mitchell, K.A., Henson, S.A., Cavan, E., DeVries, T., Gruber, N., Hauck J., Mouw C.B., Müller J.D., Primeau F.W. (2024) Observational and numerical modeling constraints on the global ocean biological carbon pump. Glob. Biogeochem. Cyc., 38, e2024GB008156. https://doi.org/10.1029/2024GB008156

Feely R.A., Sabine C.L., Byrne R.H., Millero F.J., Dickson A.G., Wanninkhof R., Murata A., Miller L.A., Greeley D. (2012) Decadal changes in the aragonite and calcite saturation state of the Pacific Ocean, Global Biogeochem. Cycles, 26, GB3001, doi:10.1029/2011GB004157.

Garzke J., Hansen T., Ismar S.M.H., Sommer U. (2016) Combined Effects of Ocean Warming and Acidification on Copepod Abundance, Body Size and Fatty Acid Content. PLoS ONE, 11 (5): e0155952. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155952

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Climate Change 2021–The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2023. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Kwiatkowski L., Torres O., Bopp L., Aumont O., Chamberlain M., Christian J.R., Dunne J.P., Gehlen M., Ilyina T., John J.G., Lenton A., Li H., Lovenduski N.S., Orr J.C., Palmieri J., Santana-Falcón Y., Schwinger J., Séférian R., Stock C.A., Tagliabue A., Takano Y., Tjiputra J., Toyama K., Tsujino H., Watanabe M., Yamamoto A., Yool A., Ziehn T. (2020) Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections, Biogeosci., 17, 3439–3470, https://doi.org/10.5194/bg-17-3439-2020

Lan, X., Tans, P., Thoning, K., NOAA Global Monitoring Laboratory. (2023) NOAA Greenhouse Gas Marine Boundary Layer Reference–CO2. [Data set]. NOAA GML. https://doi.org/10.15138/DVNP-F961

Nagano A., Wakita M., Fujiki T., Uchida H. (2021) El Niño-related vertical mixing enhancement under the winter mixed layer at western subarctic North Pacific station K2, J. Geophys. Res. Oceans, 126:e2020JC016913.

https://doi.org/10.1029/2020JC016913

NASEM (2022) A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/26278.

Orr J., Fabry V., Aumont O., Bopp L., Doney S.C., Feely R.A., Gnanadesikan A., Gruber N., Ishida A., Joos F., Key R.M., Lindsay K., Maier-Reimer E., Matear R., Monfray P., Mouchet A., Najjar R.G., Plattner G.-K., Rodgers K.B., Sabine C.L., Sarmiento J.L., Schlitzer R., Slater R.D., Totterdell I.J., Weirig M.-F., Yamanaka Y., Yool A. (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature, 437, 681–686. https://doi.org/10.1038/nature04095

Rodgers K.B., Aumont O., Toyama K., Resplandy L., Ishii M., Nakano T., Sasano D., Bianchi D., Yamaguchi R. (2024) Low-latitude mesopelagic nutrient recycling controls productivity and export. Nature, 632, 802–807. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07779-1

Schlunegger S., Rodgers K.B., Sarmiento J.L., Frölicher T.L., Dunne J.P., Ishii M., Slater R. (2019) Emergence of anthropogenic signals in the ocean carbon cycle. *Nat. Clim. Chang.* 9, 719–725. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0553-2

Shimizu K., Kimoto K., Wakita M., Sasaki T. (2025) A window into the effect of ocean acidification on molluscan larval shell development using a quantitative approach, J. Molluscan Stud., 91 (3), eyaf015, https://doi.org/10.1093/mollus/eyaf015

Siegel D.A., Buesseler K.O., Doney S.C., Sailley S.F., Behrenfeld M.J., Boyd P.W. (2014) Global assessment of ocean carbon export by combining satellite observations and food-web models, Glob. Biogeochem. Cycles, 28, 181–196, doi:10.1002/2013GB004743.

Wakita M., Nagano A., Fujiki T., Watanabe S. (2017) Slow acidification of the winter mixed layer in the subarctic western North Pacific. J. Geophys. Res. Oceans 122:6923–6935. https://doi.org/10.1002/2017JC013002

Wakita, M., Nagano, A., Uchida, H., Nakano Y., Kimoto K., Shigemitsu M., Nagashima K., Taketani F., Fujiki T., Aita M.N., Sasaoka K., Ono T., Takemura T. (2026) Ocean acidification and changes in biological production in the western subarctic region of the North Pacific over the quarter century, 1999–2023. Prog. Earth Planet. Sci., 13, 11. https://doi.org/10.1186/s40645-026-00799-7

本多牧生(2025)海洋への二酸化炭素除去(mCDR)に関する実現可能性調査―全米科学・工学・医学アカデミー報告書の要点―, 海の研究, 34 (1), 1–36. https://doi.org/10.5928/kaiyou.34.1_1

水産庁「令和6年度水産白書」第3章 水産資源及び漁場環境をめぐる動き https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/R6/250606_1.html (2026年3月25日参照)