

— 総 説 —

海洋学の10年展望2021：中緯度*

橋濱 史典^{1**}・額額 慎也²・近藤 能子³・佐々木 克徳⁴・杉本 周作⁵・
高橋 一生⁶・長井 健容¹・西岡 純⁷・林田 博士^{8,9}・平井 惇也¹⁰

要 旨

本稿では、亜寒帯循環、亜熱帯循環、縁辺海からなる中緯度海洋の表・中層を対象域とし、最近10年間の海洋学の進展をレビューすると共に、新たに浮かび上がってきたいくつかの重要課題を取り上げ、それらに取り組むための観測技術、解析手法について紹介した。特に西部北太平洋の中緯度海洋に着目し、西岸境界流と大気海洋相互作用のマルチスケール現象の把握と予測、一次生産を支える栄養塩・鉄供給の3次元像の視覚化、海洋生物の多様性維持およびホットスポット形成機構の解明を、今後10年で物理・化学・生物融合で取り組むべき重要課題として取り上げた。観測技術では、生物地球化学センサーや乱流計を装備したプロファイリングフロート、高感度高精度生元素分析、網羅的遺伝子解析などの最先端技術を駆使した、多様な時空間スケールにわたる現象の観測が重要であることを提示した。解析手法では、最新の観測により得られるビッグデータの解析や高解像度モデルにより、現状の中緯度海洋プロセスを把握し、予測することの重要性を示した。

キーワード：将来構想，亜熱帯循環，亜寒帯循環，生物地球化学，生物多様性

* 2021年7月15日受領；2021年9月8日受理

著作権：日本海洋学会，2021年

1 東京海洋大学 学術研究院

〒108-8477 東京都港区港南4-5-7

2 海洋研究開発機構 地球環境部門

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15

3 長崎大学 大学院水産・環境科学総合研究科

〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14

4 北海道大学 大学院理学研究院

〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

5 東北大学 大学院理学研究科

〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

6 東京大学 大学院農学生命科学研究科

〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1

7 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター

〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目

8 Institute for Marine and Antarctic Studies, University of Tasmania, Australia

20 Castray Esplanade, Battery Point, Tasmania 7004, Australia

9 Australian Research Council Centre of Excellence for Climate Extremes

20 Castray Esplanade, Battery Point, Tasmania 7004, Australia

10 東京大学 大気海洋研究所

〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5

** 連絡著者：橋濱史典

e-mail : f.hashi@kaiyodai.ac.jp

1. はじめに

熱帯域と極域の間に位置する中緯度(概ね20～60度帯)の海洋は、亜寒帯循環、亜熱帯循環、縁辺海から構成され、全海洋表面積の60%以上を占める。地球上の中緯度帯は人間活動が盛んであることから、中緯度海洋は人類にとって身近であり、我々はこの海から多くの恵みを受けている。国連の Sustainable Development Goals (持続可能な開発目標; <https://sdgs.un.org/goals>) の「14. 海の豊かさを守ろう」にあるように、今後も中緯度海洋からの恵みを持続的に受けていくためにも、海洋学の視点から中緯度海洋を理解し、監視・保全していくこ

とが重要である。本稿では、日本海洋学会を中心とした海洋学コミュニティが最近の10年間で北太平洋の中緯度海洋の表中層を対象にどのような研究を行ってきたかをレビューすると共に、今後10年で取り組むべき課題を取り上げる。特に日本の海洋学コミュニティが精力的に研究を推進している西部北太平洋を中心に紹介する。なお、北太平洋中緯度域を含む太平洋の深層については岡ら(2021, 本特集)で紹介されているので参照されたい。

日本の東方では、黒潮・親潮(Kuroshio, Oyashio in Fig. 1)という西岸境界流の合流により複数の前線(KOC region in Fig. 1)と亜寒帯循環と亜熱帯循環の水が複雑に入り乱れる黒潮親潮混合水域(MWR in Fig. 1)が形成

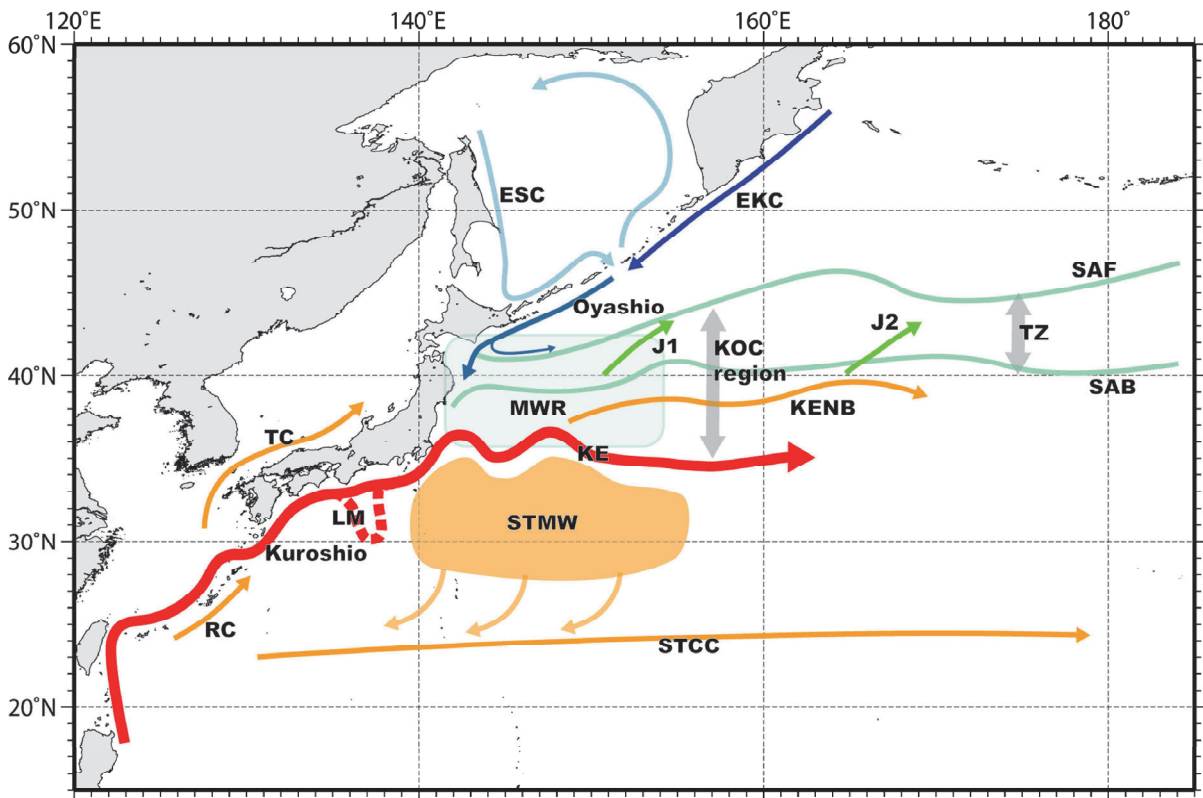


Fig. 1. Geographical locations of oceanic fronts in the western North Pacific described in this article (modified from Kida *et al.*, 2015). KE: Kuroshio Extension; KENB: Kuroshio Extension Northern Branch; TC: Tsushima Current; RC: Ryukyu Current; STCC: Subtropical Counter Current; STMW: Subtropical Mode Water; LM: Large meander path of the Kuroshio; SAB: Subarctic Boundary; J1: Isoguchi Jet 1; J2: Isoguchi Jet 2; EKC: East Kamchatka Current, ESC: East Sakhalin Current; TZ: Transition zone (domain); KOC region: Kuroshio–Oyashio confluence region; and MWR: Mixed water region.

され、活発な渦活動が見られる。また、西部北太平洋の中緯度域にはオホーツク海やベーリング海など縁辺海の影響を強く受けた亜寒帯循環から亜熱帯循環をまたぐ中層循環と、亜熱帯循環から亜寒帯循環および縁辺海に戻る表層循環から成る、北太平洋独自の子午面循環が存在する。近年、こうした海域を主な対象として新学術領域研究や国家基幹研究開発推進事業が実施され (Fig. 2)、前回の将来構想 (花輪・津田, 2013; 岡ら, 2013; 神田ら, 2013; 浜崎ら, 2013) ではあまり意識されていなかった物理、化学、生物分野の垣根を越えた多くの興味深い発見や示唆がなされてきた。本稿では、これらの成果を基盤とし、2節では中緯度海洋の物理機構から迫る生物地球化学的プロセスと気候システム、3節では中緯度海洋全体の生物地球化学的プロセスの統合的理解、4節では現場観測に基づく未知なる海洋生態系プロセスの解明について取り上げ、最新の知見を整理し、今後取り組むべき課題を抽出する。5節ではこれらのトピックスを融合して研究を推進していくための方向性について言及する。

2. 中緯度海洋の物理機構から迫る生物地球化学的プロセスと気候システム

2.1. 北太平洋における海水収支・子午面循環と水塊の混合

北太平洋表層中層における子午面循環の中では、亜熱帯の西岸境界域での黒潮による北向き輸送と外洋域でのモード水 (2.4節) の形成・サブダクションによる南向き輸送のバランスする浅い子午面循環が最も大きな要素である (例えば, Tsujino and Yasuda, 2004)。この浅い子午面循環に加え、縁辺海や亜寒帯を起源とし、亜熱帯との海水交換の現れである塩分極小層の広がりが古くから研究されてきた。特に亜熱帯における塩分極小層の元となる海水輸送は、親潮による輸送に加え、日本東方沖に広がる黒潮親潮混合水域における渦輸送の重要性が認識されている。高解像度の数値実験は、既にこれらの過程を再現しているだけでなく、黒潮親潮混合水域に運ばれた低塩分水が黒潮主流 (KE in Fig. 1) を越え、素早く再循環域に輸送される様子まで鮮明に描き出している (Mitsudera *et al.*, 2004)。さらに、Argo フロート網や衛星海

面高度観測に代表される近年の観測の充実により、表層 (例えば, Itoh and Yasuda, 2010; Kouketsu *et al.*, 2012; Katsura *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2016; Abe *et al.*, 2019) や中層 (例えば, Aoki *et al.*, 2013; Katsumata *et al.*, 2016) での水塊形成や輸送における中規模渦の役割が示されるようになってきた。

こうした水平的な渦輸送・混合に加えて、この海域を対象に海洋の乱流混合に関わるプロジェクト「海洋混合学 (OMIX)」 (Yasuda *et al.*, 2021a; <http://omix.aori.u-tokyo.ac.jp/>; Fig. 2) が近年実施され、観測手法の開発・再検討・高度化も進んだ (例えば, Goto *et al.*, 2018)。それとともに、乱流とそのエネルギー源との間の時空間的関係性をその実態から見出す研究が盛んに行われ (例えば, Waterhouse *et al.*, 2014)、気象擾乱と海洋前線・渦の存在が海洋の混合にも影響することが観測から示されている (Whalen *et al.*, 2012; Inoue *et al.*, 2017)。さらには理論研究の進展を踏まえたより良いパラメタリゼーションも提案され、大循環モデルへの組み込みも企図されている (de Lavergne *et al.*, 2020)。乱流混合は、表層混合層以外でも密度面を横切る水塊交換の担い手として重要であるだけでなく、水塊を最終的に混合する実態である。乱流混合研究の進展により、西岸境界流と外洋域の大まかな水平移流を捉えた従来の単純な収支から、混合を含めたより精緻な循環像を評価できるようになった (Kouketsu, 2021)。有光層以深の乱流混合は、生物地球化学的プロセスの中でも大きな役割を担っている可能性がある。実際に、亜寒帯域に局在する強い混合の役割 (Nishioka *et al.*, 2020; 3.1節) や日本南岸での小スケールでの黒潮への栄養塩供給 (2.3節) とその日本東方沖への輸送などがより大きなスケールの生物地球化学的プロセスへ果たす役割の大きさが評価されつつある。こうしたより細かなプロセスを含めた再評価を行うことで、北太平洋中緯度の循環像を更新することができる。

残された課題も多い。北太平洋の亜寒帯循環は、鉛直的混合、エクマン湧昇、亜寒帯境界 (SAB in Fig. 1) 以北の亜寒帯亜熱帯移行領域 (TZ in Fig. 1) を含めた水平混合との間でバランスされているはずであるが、その定量的な評価がされていない。この海域では、深層からの湧昇・混合による効果が表層混合層でバランスされているため、各過程による輸送量は小さくても、慎重に評価

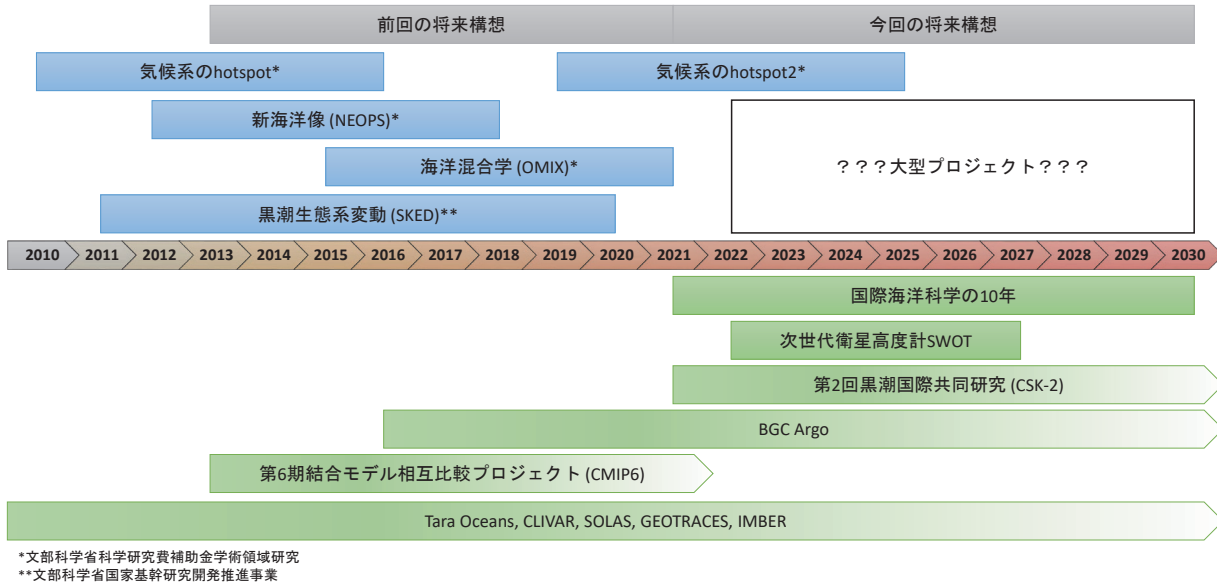


Fig. 2. Timeline of past and ongoing national research programs focused on Northern hemisphere mid-latitude oceanography (top, blue) and ongoing and upcoming international research programs (bottom, green) over the past and next decades. These research programs are described in this article. Abbreviated or short program names are partly stated in the figure. Terminations of some programs are not defined at present, as depicted by right arrows.

すべきである。つまり、近年認識された亜寒帯海域への局所的な北向きの流れである磯口ジェット (J1, J2 in Fig. 1; Isoguchi *et al.*, 2006) や、中規模渦だけでなくサブメソスケールの現象もこのバランスに重要であることが示唆される。加えて、亜熱帯の高塩分水と亜寒帯の低塩分水が複雑に重なり合う海域であるため、未だ十分ではない二重拡散混合の定量的評価も重要である。こうした北太平洋亜寒帯における表中層の海水収支は、その下に存在する世界的にも最も古く貧酸素構造を伴う深層水との混合過程を含む。この貧酸素水の維持機構は、物理的循環だけでなく、粒子による物質の鉛直輸送 (例えば, Honda, 2020) にも関わる課題として興味深い (3.1 節)。

過渡的なふるまいをする人為起源のガス (人為起源 CO₂ など) の浸透評価にも物理的プロセスの再評価は必要である。人為起源 CO₂ の浸透は、北太平洋中層水 (North Pacific Intermediate Water; NPIW) が観測される中層やそれより深い層でも既に検出されている (例えば, Kouketsu *et al.*, 2013)。すなわち、亜寒帯循環の収支、亜熱帯との水塊交換、亜熱帯におけるサブダクシ

ン過程を精緻に評価する必要がある。北太平洋表中層では、比較的長時間スケールの長い自然変動 (モード水の 10 年変動, 中層 20 年変動, 酸素極小層の貧酸素化) も報告されている (例えば, Takatani *et al.*, 2012; Sasano *et al.*, 2015; Ito *et al.*, 2017; Oka *et al.*, 2019)。海洋内部の長期的な変化の一つである人為的变化と自然に内在する変動を定量的に区別して評価するには、近年明らかにされてきたプロセスを活かす必要がある。例えば、長年の観測によってより鮮明に認識されつつある外洋域の表層から中層にかけての小さな乱流混合 (例えば, Goto *et al.*, 2020) と、以前より認識されてきたモード水の大規模なサブダクションとその輸送や北太平洋中層の水塊形成に係る縁辺海での重い水の形成、局在する強い水塊変質、外洋域の渦による輸送といった種々の過程と実際に起きた変化は、現状では数値実験の中で十分に整合的に再現されているとは言えない。そもそも物理的には、風や潮汐といった外力や中規模渦のスケールにある大きなエネルギーと内部波のもつエネルギーが乱流混合に至る過程を十分につなぎ合わせたモデルとなっていない点も考え

併せれば、引き続き乱流の直接観測や、理想モデル実験など局所的なプロセスを解像する研究と大規模循環・変動を明らかにする研究の協働で取り組むべき課題である。

様々な課題を含めて行うべき生物地球化学的プロセスの精緻な記述に耐える中緯度海洋全体像の再評価のうち、黒潮は大きな要素であり、2.2節以降で詳しく議論する。黒潮周辺の現象に対する研究は、日本からのアクセスの良さや近年のモデルの高解像度化もあって大きな進展があり、更なる展開を見せている。北太平洋中緯度海洋全体像の再評価を黒潮域の研究の進展を取り込んで行うことは非常に重要である。

2.2. 日本周辺海流のマルチスケール現象

日本をとりまく黒潮や親潮といった大規模な海流は日本の気候や沿岸環境、生物地球化学的プロセスおよび生態系に影響しており、その理解は重要な課題である。近年の海流の研究の発展には、衛星海面高度計による広域観測や、高解像度モデルによる数値実験（例えば、Qiu, 2000; Nonaka *et al.*, 2006）が大きな貢献を果たしてきた。これらにより、黒潮や黒潮続流、親潮の前線構造の変動や、黒潮続流周辺での活発な中規模渦の活動が明らかとなり、スケール間相互作用の観点からもそれぞれの理解が進んだ（Kida *et al.*, 2015）。例えば、黒潮続流ではその卓越する十年スケール変動（Qiu and Chen, 2005）のメカニズムとして、非線形性の強いジェット構造を扱う理論や強い渦活動の影響を含めた理論が提案された（Sasaki and Schneider, 2011; Qiu *et al.*, 2015）。また、北海道南東沖に出現する暖水渦が親潮の沿岸での南下を妨げること（Itoh and Sugimoto, 2002）、そしてこの暖水渦が近年頻繁に出現していることに伴い、北海道太平洋側でブリの漁獲量が増加していることが指摘された（Miyama *et al.*, 2021）。観測・モデルによる高解像度データの蓄積は、海流に伴う前線構造の長期変動の理解にもつながる。例えば黒潮続流の十年スケール変動と親潮の関係（Qiu *et al.*, 2017）や黒潮続流のトレンドと対馬海流（TC in Fig. 1）の流量との関係（Kida *et al.*, 2021）が報告されており、このような海流間の新たな関係性の発見や、そのメカニズムの理解が一層深まることが期待される。さらに、温暖化に伴い日本周辺の海流系が将来にわたり変化することが地球システムモデルを用いた研究により報

告されており、黒潮の強化が予測されている（Sakamoto *et al.*, 2005）。ただ、モデル毎に結果がばらつくことが多く、一意の結論を得ることが困難な場合がある。この問題の解決には複数モデルの結果を用いた解析や、不確定性をもたらす要因の解明が必要である。また地球システムモデルの海洋場の空間解像度が海流系を表現するには十分ではないという課題もあり、領域モデルを活用した力学的ダウンスケーリングが必要である（例えば、Nishikawa *et al.*, 2021）。

最近10年間の研究で、中緯度のサブメソスケール現象（1～10 km 程度）の研究が進み、冬季に卓越する季節変動性が海洋モデルと現場観測の双方から報告され始めている（例えば、Sasaki *et al.*, 2014a; Qiu *et al.*, 2017）。2022年春には次世代海面高度計観測衛星SWOT（<https://swot.jpl.nasa.gov/>; Fig. 2）の打ち上げが予定されており、海上では1 km 未満の解像度で観測が行われる計画である。この実現により内部波に伴う海面高度変動も観測できるようになるため、海洋表層での鉛直混合過程等の理解の進展が期待される。SWOTは、陸上では河川や湖沼など小さな水体も捉えられるように100 m 未満の解像度で観測を行う予定である。このような最先端観測とモデルの融合研究は統計解析などで指摘されている外洋域の海流変動の沿岸域への影響（例えば、Sasaki *et al.*, 2014b）の仕組みの解明に大いに役立ち、さらには外洋・沿岸・陸域をつなぐ研究全般にも応用できる（木田ら, 2021, 本特集）。

黒潮大蛇行（LM in Fig. 1）も、高解像度のモデル・観測で挑むべき海洋中規模・沿岸の現象である。2000年代に海盆スケールの渦解像度モデルが開発されたことで、2004年に13年ぶりに発生した大蛇行の発生（Usui *et al.*, 2008a; Miyazawa *et al.*, 2008; Tsujino *et al.*, 2013）、発達（Miyazawa *et al.*, 2004; Usui *et al.*, 2008b; Endoh *et al.*, 2011; Tanaka and Hibiya, 2017）、維持（Tsujino *et al.*, 2006）、解消（Usui *et al.*, 2011）のメカニズムの理解が飛躍的に向上した。この大蛇行は約1年で解消したが、2017年に12年ぶりに大蛇行が発生し（Usui, 2019）、現在も継続している。この間、新たな衛星観測データプロダクトなどが開発され、今回の大蛇行について新たな描像が得られ始めた。例えば、これまで関東・東海沖内側域は大蛇行時に下層からの冷水湧昇により低温になると

考えられていたが、今回の大蛇行では関東沖で北上する黒潮から分岐した西向きの流れ（黒潮分岐流）により遠州灘沖が昇温し（Sugimoto *et al.*, 2020）、その影響で関東・東海地方が高温・多湿化すること（Sugimoto *et al.*, 2021）が指摘された。さらに、今回の大蛇行は、下流の統流流路を安定化し（Qiu and Chen, 2005; Sugimoto *et al.*, 2012）、既存研究が見出した太平洋十年規模変動（Pacific Decadal Oscillation）と黒潮統流流路の安定性の関係（すなわち、2017年以降は不安定になるはずであった；Qiu and Chen, 2005; Qiu *et al.*, 2007, 2014）を終焉させた（Qiu *et al.*, 2020）。これは、黒潮統流の十年規模変動シナリオが2017年に発生した黒潮大蛇行により書き換えられ、黒潮大蛇行が黒潮統流の変動に伴う気候システムの軸になることを示唆している。このように今回の黒潮大蛇行の研究は、黒潮が広範囲な気候場に影響を及ぼす可能性を提示している。2000年代以降の大蛇行研究では、海底観測網など地球科学的な観測と組み合わせた研究も行われている（例えば、Ambe *et al.*, 2009; Nagano *et al.*, 2019）。また、2010年代に海洋データ同化システムが著しく発展し（藤井ら, 2017）、海況予測システムの開発が進んだことで今回の黒潮大蛇行の発生の予測の成功をみている点も興味深い（JCOPE チーム, 2017）。この同化システムを活用するなかで、力学的側面から大蛇行の解明が進むと共に、過去の大蛇行についても理解が進展する可能性がある。

黒潮は、その源流の一部が北赤道海流であり、熱帯域（土井ら, 2021, 本特集）とも密接に関係している。その長い流路上では、琉球列島東方に存在する琉球海流系とよばれる分枝（RC in Fig. 1; 例えば、Ichikawa *et al.*, 2004）や、台風の発生・発達する海域であるフィリピン沖など注目されている海域がいくつもある。これらの全貌を関係各国との連携によって明らかにするために、1965～1979年に行われた「黒潮および隣接水域共同調査」の2度目の実施（2nd Cooperative Study of the Kuroshio and adjacent regions; CSK-2; Fig. 2）が Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC) の枠組みのもと、承認され、動き出した（Ando *et al.*, 2021）。こうした国際的な取り組みと協調する形で、大蛇行も含めた、黒潮統流、黒潮、親潮、亜熱帯反流など

の日本周辺海流とそれらの中規模渦活動の十年規模変動を統合的に理解していくことが重要である。

2.3. 黒潮・黒潮統流と混合層の物理プロセスから解き明かす栄養塩分布

海面付近は貧栄養で知られる黒潮も、有光層底部では栄養塩を下流の黒潮統流や黒潮親潮混合水域へ供給する栄養塩ストリームであることが明らかとなってきた（Fig. 3; Guo *et al.*, 2012, 2013; Komatsu and Hiroe, 2019; Nagai *et al.*, 2019a）。黒潮統流域や黒潮親潮混合水域に運ばれた栄養塩の多くは、傾斜する混合層下部を通じた水平移流（オブダクション）によって混合層内へ供給されていることが推察される（Qiu and Huang, 1995; 長井, 2019）。また、栄養塩濃度は等密度面上で黒潮に沿って高い値を示す（Nagai *et al.*, 2019a）。黒潮は多くの海底の起伏上を流れるため、その起伏で強まる乱流拡散が栄養塩濃度増加に寄与することが示唆される。また、海底起伏上での強い乱流拡散は、その場で有光層内へ栄養塩を供給し、日本南岸縁辺海の一次生産に寄与している可能性がある（Nagai *et al.*, 2019b, 2021a）。黒潮は流路変動により浅瀬に接近することがあるが、このときに黒潮が輸送する有光層底部の栄養塩が上層へ供給される可能性がある。近年、乱流と生物地球化学的パラメーターの水平高解像度同時観測によって、黒潮が流れる海底地形上での混合現象が有光層底部での栄養塩濃度の増加をもたらし、その結果、植物プランクトンが有光層底部で増殖していることが明らかになりつつある（Fig. 3; Nagai *et al.*, 2021b）。混合に起因した有光層底部で起きるブルームの研究は、人工衛星海色観測で捉えられない海面下の情報を補うと同時に、黒潮が引き起こす水柱全体の一次生産を評価するうえで重要な課題である。一方、中規模渦やサブメソスケールの流動に伴う水平移流・拡散は、前述した黒潮流路上の栄養塩濃度を攪拌して薄める作用を持ちうる。中規模渦に伴う輸送は、等密度面上の濃度偏差を均質化する作用を持つため、黒潮前線を挟む両側でそれぞれ異なる渦の作用を受けることが予想できる（Lee and Williams, 2000; Nagai *et al.*, 2019a）。今後、黒潮栄養塩ストリームに中規模渦が及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。

黒潮上での栄養塩分布を解明する上で、依然として観

測が不十分である。プロファイリングフロートや水中グライダーへの乱流微細構造測定センサーや栄養塩センサーの搭載が可能になれば、類をみない頻度でデータの入手が可能になる。しかしながら、従来の流れに受動的な少数のフロートやグライダーを用いた観測では、黒潮などの強い海流の詳細なフロント構造を捉えるのは困難である。そこで予測された海流に合わせてフロートの浮上のタイミングや漂流深度を変え、吹送流が期待できるときは表面を漂流させるなどといった、フロートやグライダーを船舶観測周辺にあらかじめ自動的に集結させる手法をAIなどを用いて開発し、フロント海域における集中的な高頻度高解像度の観測を実施できれば、観測領域と解像度、観測効率と費用対効果全てを向上させることが可能となる。また、これらに高解像度カメラを搭載できれば、大型植物プランクトンと動物プランクトンの種組成や分布特性などを詳細に調べることができ、気候変動・変化に伴う生態系の変化・適応性などの理解が大きく前進する可能性がある。

今後、黒潮の栄養塩輸送がどのように変遷していくかは未解明である。そもそも黒潮流量は10年程度の時間スケールで大きく変動することが知られている(例えば、Sugimoto *et al.*, 2010)。さらに、温暖化に伴う黒潮加速(2.2節)は北方への栄養塩供給の増加に寄与するが、温暖化による表層混合層の浅化(2.4節)は混合層内への栄養塩供給の減少をもたらしている(Fig. 3)。下流域である黒潮親潮混合水域は世界有数の好漁場であるため、黒潮による栄養塩輸送変化が高次栄養段階生物や漁業生産に及ぼす影響を解明することは水産資源の安定的確保の点からも極めて重要である。このような海洋環境の変化は今後数10年で顕在化する可能性があるため、2011～2020年度に実施された国家基幹研究開発推進事業「黒潮生態系変動(SKED)」(<http://snf.fra.affrc.go.jp/html/index.html>; Fig. 2)のような長期プロジェクトを発展的に継続していく必要がある。その中で、水塊や混合層深度、乱流混合・微細構造などの物理的環境だけでなく、人工衛星やプロファイリングフロート、船舶観測、係留観測などを組み合わせて栄養塩、炭素、プランクトン群集構造などといった複合的な環境要素について、気候変動に対する低次栄養段階生物の適応と応答の経年変化を捉えていく必要がある。次の10年では気候変動による海洋環

境変動を継続的にモニタリングするための基盤整備を早急に行うべきである。そして、未だ定量化が不十分である亜寒帯と亜熱帯の海水交換などの大規模スケールでの栄養塩収支(3節)の理解を進める上でも、黒潮による栄養塩輸送研究の進展が重要である。

2.4. 亜熱帯モード水の挙動から見出す海洋循環像

黒潮統流南方では深い冬季混合層が発達し、春以降にその水が南方に沈み込むことで、北太平洋亜熱帯循環の主水温躍層上部には水温17°C程度の亜熱帯モード水(ST-MW in Fig. 1)が広く分布する(Masuzawa, 1969)。この海域での冬季混合層深度の年々変動は、かつては大気冷却のそれに起因するとされていた(例えば、Suga and Hanawa, 1990)。21世紀になり、Argoフロートや衛星海面高度計によるデータが利用可能になり、北方の黒潮親潮混合水域からの高渦位水の流入などによる海洋の成層構造変動が冬季混合層の発達に影響することが明らかになった(Qiu and Chen, 2006; Oka *et al.*, 2015)。海洋観測の充実は亜熱帯モード水の空間分布量の算出を可能とし(Oka *et al.*, 2015)、渦位収支からモード水の変質に寄与する鉛直渦拡散が見積もられるようになった(Qiu and Chen, 2006)。さらに亜熱帯モード水の分布が、海洋付近の成層(Kobashi *et al.*, 2021)や前線(STCC in Fig. 1; Kobashi and Kubokawa, 2012)、主水温躍層上部の低塩化(Oka *et al.*, 2017)や生物地球化学的プロセス(Oka *et al.*, 2015, 2019)に影響を及ぼすことが明らかになってきた。この亜熱帯モード水の沈み込みの仕組みとしては、海洋混合層の季節サイクル(Toyama *et al.*, 2015)に加えて、中規模渦の寄与も大きいことが数値実験から指摘されている(Nishikawa *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2014; Nakano *et al.*, 2021)。今後、酸素センサー付プロファイリングフロート17台を中規模渦に投入した中国のP-MoVEプロジェクト(Xu *et al.*, 2016)のような集中的な観測を通じて沈み込み過程への中規模渦の影響評価を実現することが課題である。

現在までの100年間で黒潮・黒潮統流域の海面水温上昇は全球海洋のなかでも顕著であり(Wu *et al.*, 2012)、亜熱帯モード水の沈み込みを通じてその昇温は海洋内部でも観察されている(Sugimoto *et al.*, 2017)。亜熱帯モード水以深に分布する北太平洋中層水でも温暖化が報

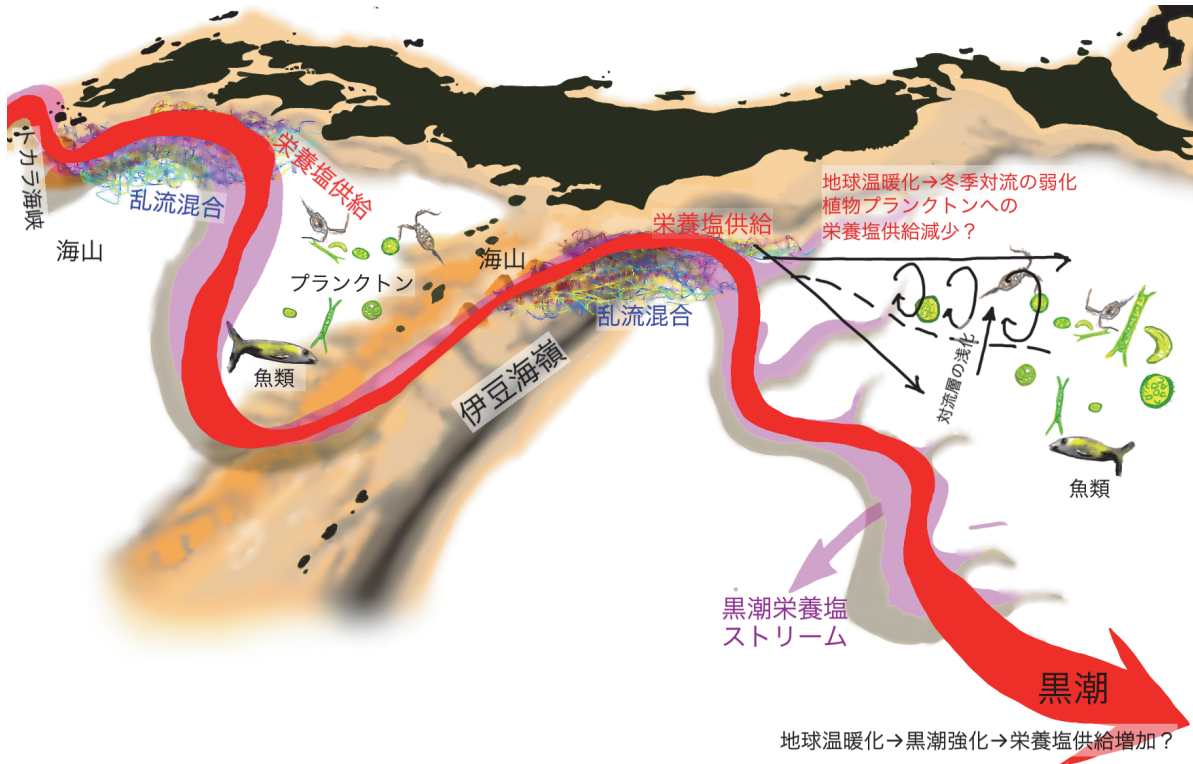


Fig. 3. Schematic summary for Section 2.3. The Kuroshio carries nutrients essential for the phytoplankton growth in downstream while encountering many topographic features, such as the Tokara Strait and Izu Ridge. The mixing processes near these topographic obstacles may provide nutrients on the south coast of Japan before they reach the Kuroshio downstream regions. Climate models predict that global warming could strengthen the Kuroshio and simultaneously weaken the wintertime convective mixing. The former would increase the nutrient transport by the Kuroshio, and latter would decrease the nutrient supply to the surface. More comprehensive long-term observations and climate models with high resolutions are necessary to monitor and predict the consequences of global warming on the nutrient supply, associated CO₂ uptake, and ecosystem responses caused by the Kuroshio accurately. As an example, a large meander path of the Kuroshio is depicted here.

告されている (Nakanowatari *et al.*, 2007)。海洋温暖化の検出にあたり過去に遡って海洋内部を3次元的に評価することは難しいが、広範囲に分布する水塊を通じてその検出を試みることは有効な手段であろう。中緯度の多くの海域で温暖化による表層昇温により成層が強化され、冬季混合層の発達が阻害されることが第6期結合モデル相互比較プロジェクトCMIP6 (<https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/>; Fig. 2) に参画している地球システムモデルによって示されている (Kwiatkowski *et al.*, 2020)。これは、有光層底部への栄養塩供給にも影響することが予見される (2.3節)。現状の地球システムモデルの海洋場の

解像度は100 km程度であるため、渦許容(20~50 km程度)から渦分解(10 km程度)への高解像化を推し進めることで変動と変化の両側面から水塊を理解することが可能になる。モデルの妥当性の検証には渦やその内部の精緻なプロセスを明らかにする観測との比較が重要である。渦のような細かな構造がより大規模な変化・変動に影響することも踏まえれば、モデルの大規模変動の妥当性を検証するためにも現行の海洋観測の継続が必須である。そして、モデルと観測の相補的な研究をもとに中緯度全体の海洋環境を評価することが重要であろう。

2.5. 大気海洋相互作用

かつて、中緯度海洋は大気から受動的に影響を受けるだけの存在と考えられていた。しかし、21世紀になり4次元変分法をもとにした大気再解析データの同化システム開発の発展、人工衛星による海上風・降雨・海面水温の広域観測の実現、そして、計算機能力の向上に伴い数値実験が多く実施されるようになったことで、中緯度海洋が、特に海面水温前線が存在する海域や大気への熱放出が大きい海域で、大気に有意な影響を与えることが示されるようになった (Xie *et al.*, 2002; Minobe *et al.*, 2008; Tokinaga *et al.*, 2009)。北太平洋の大規模な海面水温前線の中では亜寒帯前線 (SAF in Fig. 1) が最も強く (Nakamura and Kazmin, 2003), その変動は上空の低気圧活動に影響を与える (例えば, Taguchi *et al.*, 2012)。また黒潮・黒潮統流の北縁には強い海面水温前線が存在し、大気に膨大な熱を放出している。これらの前線は熱放出を通じて、大気境界層の風や気温 (例えば, Masunaga *et al.*, 2020), 降水 (Sasaki and Yamada, 2018), 低気圧の発達 (Kuwano-Yoshida and Minobe, 2017), さらに北太平洋を横切るような大気大循環パターン (Qiu *et al.*, 2020) など様々な時空間スケールの大気場に影響を及ぼしている。大気海洋関係の解明には事例解析も有効である。最近の数値実験では、大雨などで日本各地に甚大な被害を与えた令和元年東日本台風は北海道南東沖の海洋熱波の影響で東北地方への雨量を増したことが報告された (Iizuka *et al.*, 2021)。地球温暖化に伴う黒潮・黒潮統流域での海面水温上昇は他の海域より大きい (Wu *et al.*, 2012), この昇温は日本周辺で発生する海洋熱波の増加に寄与し (Hayashida *et al.*, 2020a), 漁業や養殖だけでなく、栄養塩やプランクトン動態を含む生物地球化学的プロセスにも影響を及ぼす (Hayashida *et al.*, 2020b)。海洋熱波は、2019年に発表された IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書 (Bindoff *et al.*, 2019) でも、温暖化に伴い発生頻度が増加していることから注視すべき海洋現象であると記述されており、今後の重要な研究課題である。海洋温暖化は大気への水蒸気供給を促進するため、梅雨期の降水量増加に寄与する (Manda *et al.*, 2014)。近年、局所的豪雨の要因である線状降水帯に注目が集まっており、その発生に重要な海洋からの水

蒸気供給監視の機運が高まっている。気象庁では、線状降水帯の予測精度向上のための気象観測・監視を強化することで、防災・減災に貢献するべく凌風丸の代替船が2023年度に竣工予定である。

従来、雲・降水系を扱うメソ気象学は純粋な気象学の分野とされてきたが、近年の研究により海洋の寄与の検討が重要視され始めた。海洋に対する大気応答の検出には NOAA 開発データ (Reynolds *et al.*, 2007) などの衛星観測海面水温を境界値に与えた数値実験を行うことが多い。ただ、近年の研究では海面水温データ間には一定程度のばらつきが存在し、特に黒潮のような西岸境界流域でそのばらつきが大きいこと (Yang *et al.*, 2021) や、船舶で測定された現場の海面水温前線は衛星観測に比べ急峻であること (Kawai *et al.*, 2015) が報告されている。海面水温や海面水温前線への大気応答感度を理解するうえで、より現実的な高解像度海面水温データの開発が必要とされている。加えて、船舶による気象観測の充実と高解像度大気海洋結合モデルの開発も中緯度海洋の役割の解明に向けて重要になる。大気海洋系研究を日本が世界を先導する取り組みとして、新学術領域研究「気候系の hotspot」(2010～2014年度; Nakamura *et al.*, 2015; <http://www.atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp/hotspot/>) に引き続き、「気候系の hotspot2」(<http://www.jamstec.go.jp/apl/hotspot2/>) が、海洋・気象研究者の連携のもと2019年度から実施中である (Fig. 2)。前述の CSK-2 (2.2節) や世界気候研究計画 (WCRP) のコアプログラムの一つである CLIVAR (<https://www.clivar.org/>; Fig. 2) でも、中緯度の大気海洋相互作用は重要なトピックである。こうした取り組みを通じて海洋学から、自然災害への防災・減災や気候変動適応計画への策定に貢献していくことが望まれる。

3. 中緯度海洋全体の生物地球化学的プロセスの統合的理解

北太平洋の栄養物質の循環と生物生産を理解するための物理場として、北太平洋中層水の形成に繋がる、オホーツク海やベーリング海と北太平洋をまたぐ中層の循環の理解はとりわけ重要である (本稿では NPIW 循環と呼ぶ; Talley, 2013)。1990～2000年代にかけて精力的

に実施された海洋物理学的観測，化学トレーサー観測，数値実験 (Ohshima and Martin, 2004; Yasuda, 2004) によって，NPIW 循環の理解は飛躍的に進んだ。2000 年代以降，この NPIW 循環を考慮した物理場を背景に，北太平洋の生物地球化学的研究は鉛直 1 次元の解釈から脱却し，3 次元の循環像の理解を目指すようになり，CO₂，溶存有機物や一次生産に直接関わる栄養塩・鉄などの 3 次元像が観測事実として把握されるようになった (例えば，Wakita *et al.*, 2003; Yamamoto-Kawai *et al.*, 2004; Nishioka *et al.*, 2013; Zheng and Sohrin 2019; Yamashita *et al.*, 2021)。NPIW 循環によって広く亜寒帯から亜熱帯まで運ばれた栄養塩は特にケイ酸に富み，主水温躍層を超えて有光層の一次生産者の種組成や現存量を支配していることが示唆されている (Sarmiento *et al.*, 2004)。しかし，その実態は未だ明らかでない。今後は，引き続き NPIW 循環の鍵となる亜寒帯循環 (3.1 節) で，乱流拡散等の混合パラメーターを栄養塩・鉄濃度とともに観測し (例えば，Yasuda *et al.*, 2021b)，データ同化やモデル等に反映させ (例えば，Osafune *et al.*, 2021)，中層と表層をつなぐ物質輸送と水柱一次生産を定量化していく必要がある。また，未だ一次生産を支える栄養源が不明瞭な亜熱帯循環有光層 (3.2 節) への栄養物質供給プロセスとして NPIW 循環で運ばれる栄養塩・鉄が，黒潮親潮混合水域を経由して亜熱帯循環有光層で起こる一次生産とどのような物理過程でつながっているのかを定量的に把握していく必要がある (3.3 節)。

3.1. 亜寒帯循環有光層への栄養塩・鉄供給

これまで西部北太平洋亜寒帯循環は有光層内の栄養塩濃度がとりわけ高い海域 (High Nutrient Low Chlorophyll: HNLC 海域) と認識されてきた。しかし，密度成層の強い海洋において，中深層の栄養塩が亜寒帯循環表層に回帰する過程は簡単に説明できるものではなく，その背景にある物理および生物地球化学のプロセスは未だ十分に理解されていない。高栄養塩濃度の維持機構を理解するためには，1) オホーツク海やベーリング海などの縁辺海が絡む中層の高栄養塩水塊の形成過程，2) 中層と表層の物質をつなぐ鉛直プロセス (乱流混合，粒子の沈降，混合層発達など)，3) 親潮，東カムチャツカ海流 (EKC in Fig. 1)，中規模渦などによる表層・中層の水平

輸送過程，という 3 つのプロセスを定量的に把握しなければならない。1) については栄養塩だけでなく，微量金属元素とその安定同位体 (例えば，Kim *et al.*, 2017; Takano *et al.*, 2017) や放射性同位体 (例えば，Amakawa *et al.*, 2019) など，起源や時間軸の推定につながる化学トレーサーの観測も進めながら中層の生物地球化学のプロセスを理解していく必要がある。これには高精度微量金属元素・同位体測定を進める GEOTRACES プロジェクト (<https://www.geotraces.org/>; Fig. 2) の進展が欠かせないであろう。2) については，近年，外洋域で表層混合層以深の乱流混合が大きくないことが北太平洋の観測からも再認識され (例えば，Goto *et al.*, 2020)，より局所的なプロセスが重要であることが推測されている。実際に千島・アリューシャン列島周辺や亜寒帯亜熱帯移行領域内のモード水形成域 (Saito *et al.*, 2007) などは，中層から表層へ栄養塩が回帰する鍵となる海域であることが示された (Shiozaki *et al.*, 2014a; Nishioka *et al.*, 2020)。今後，シャツキー海台や天皇海山列 (Wagawa *et al.*, 2010) 等の西部北太平洋特有の海底地形との相互作用で起こる混合や，亜熱帯亜寒帯移行領域での二重拡散等による混合により，どれだけ中層から表層へ栄養塩が回帰しているのかを定量的に把握していく必要がある。また，磯口ジェットにより亜熱帯循環から黒潮親潮混合水域を経由して亜寒帯循環へ運ばれる高塩分水が，冬季混合層深度に影響し，栄養塩の鉛直輸送にどのような影響を与えているかなどは興味深い課題であり，海流の形成に与える地形の影響などの解析が進められている (Mitsudera *et al.*, 2018; Miyama *et al.*, 2018)。3) については，黒潮域で見積もられているように (2.3 節) 親潮・東カムチャツカ海流の栄養塩ストリームとしての物質輸送量の評価，物質輸送における中規模渦の役割評価，それらの長期変動に関する知見 (Long *et al.*, 2019; Dobashi *et al.*, 2021) と大規模な循環変動との比較解析 (例えば，Nagano and Wakita, 2019) が引き続き重要となる。また，親潮域に大きな影響を与えるオホーツク海の東サハリン海流 (ESC in Fig. 1) の物質輸送量を把握することも，北太平洋亜寒帯域の生物地球化学のプロセスの理解に欠かせない。

亜寒帯循環の一次生産を定量的に理解するためには，制限要因となりやすい鉄 (Fig. 4) の供給過程の精査が必

要となる。大気由来の鉄に加えて、NPIW 循環を介した縁辺海経由の鉄の長距離輸送の重要性が近年示唆されているが (Yamashita *et al.*, 2020; Misumi *et al.*, 2021), この過程で鍵となるのが溶存有機物のうち鉄と強く錯形成することのできる有機配位子の挙動である (Kondo *et al.*, 2021)。海水中の鉄溶解度は、有機配位子との錯形成により有機錯体鉄となることで上昇するため、鉄の供給および輸送メカニズムの理解において有機配位子の動態把握が重要になる。溶存有機物の大部分は未同定物質で構成されるため、ここ数十年の有機配位子に関する分析手法は鉄と錯形成可能な配位子全体を定量する電気化学的測定が主流であった (例えば, Gledhill and Buck, 2012)。一方で、近年は腐植物質やシデロフォアといった特定の有機配位子のみをターゲットとした分析手法も開発されている (例えば, Boiteau *et al.*, 2013; Sukekava *et al.*, 2018)。特に、これまでの有機配位子と溶存鉄の分布パターンには明瞭な類似性がみられないことから、各海域・

深度で起こる生物活動、有機物分解、スキヤベンジングなどの過程を経て有機配位子は質・量共に変化していることが予想される (Buck *et al.*, 2018; Kondo *et al.*, 2021)。よって、今後は有機配位子全体のデータ蓄積に加え、サイズ分画組成や配位子タイプ組成の調査が重要になる。また、有光層の有機配位子はタイプ別に植物プランクトンによる鉄利用能や光化学反応性が変化することから (Maldonado *et al.*, 2005), 有機配位子の組成は一次生産との関わりを理解する上でも重要だろう。これら鉄および有機配位子の動態を把握した上で、衛星や船舶観測から示されている亜寒帯の高一次生産域 (例えば, Yasunaka *et al.*, 2021) における NPIW 循環からの鉄および栄養塩フラックスを精査することが、亜寒帯循環の一次生産の統合的な理解に繋がると期待される。

3.2. 亜熱帯循環有光層の栄養塩収支

亜熱帯循環では有光層の栄養塩が通年極低濃度で維持

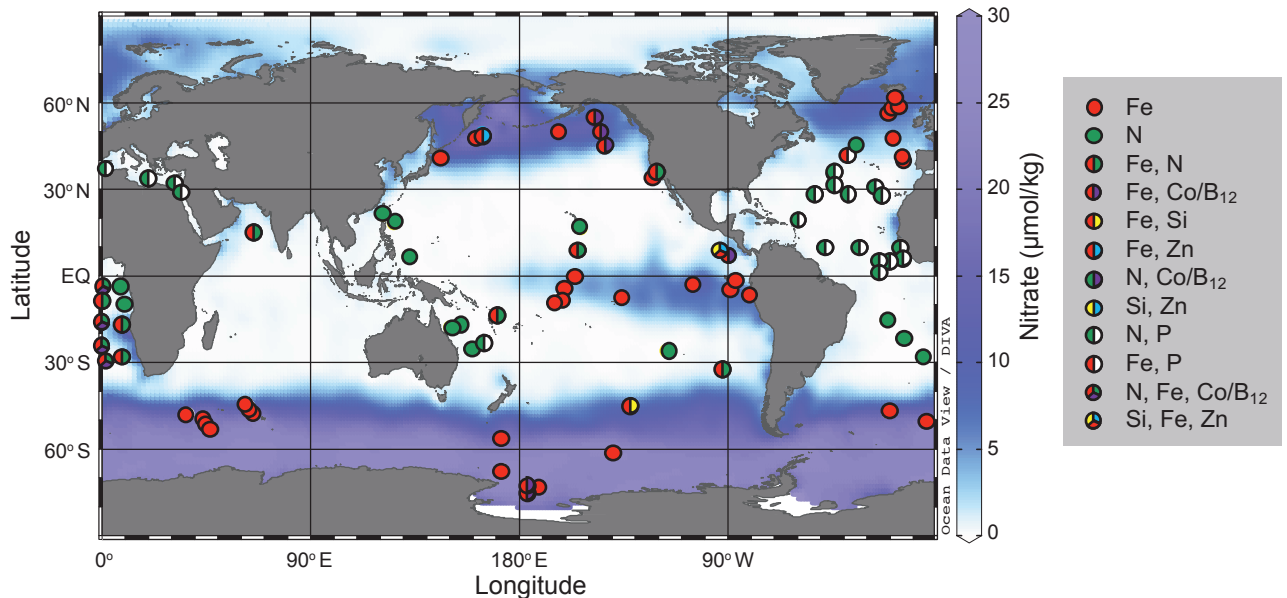


Fig. 4. Patterns of nutrient limitations modified from Moore *et al.* (2013). Background color indicates the annual surface average of nitrate concentration of the World Ocean Atlas 2018. The colors of the circles indicate the limiting nutrients as inferred from chlorophyll and/or primary productivity increases following artificial amendment experiments from the literature (Moore *et al.*, 2013 and references therein; Takeda *et al.*, 1995; Hattori-Saito *et al.*, 2010; Kondo *et al.*, 2013; Mackey *et al.*, 2014; Saito *et al.*, 2015; Chappell *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2015; Browning *et al.*, 2017, 2018). Single colored circles indicate that no secondary limiting nutrient was identified, which in many cases will be because of the lack of testing.

されているにも関わらず、炭素や酸素の季節的収支からは正味の有機物生産（純群集生産：総一次生産のうち群集呼吸を含まない生産）が確認されている（例えば、Ishii *et al.*, 2001; Riser and Johnson, 2008）。純群集生産には栄養塩供給が必須となるが、供給過程や量的収支は未だ不明瞭であり、亜熱帯循環生物地球化学的プロセスの謎となっている（Michaels *et al.*, 1994; Johnson *et al.*, 2010）。下層からの栄養塩供給（中規模渦や台風による供給を含む）、溶存有機態窒素・リン供給、窒素固定、大気からの窒素・リン沈着、プランクトンの鉛直移動などが供給過程として考えられるが、未だに供給量と純群集生産の収支には大きな差がある。新学術領域研究「新海洋像（NEOPS）」（<http://ocean.fs.au-tokyo.ac.jp/>; Fig. 2）等のプロジェクトにより、ここ数十年で高感度分析を駆使した微量栄養塩動態の研究が進んだが（例えば、Hashihama *et al.*, 2009, 2013）、純群集生産に見合う変動は確認されていない。窒素固定については、近年精力的に研究が進んでおり（例えば、Shiozaki *et al.*, 2010, 2018）、その中で窒素固定測定技術が一新され、従来よりも高い値が報告されるようになってきた（Mohr *et al.*, 2010; Böttjer *et al.*, 2017; Hashihama *et al.*, 2020）。今一度、新手法を用いた窒素固定の広域高頻度観測を実施し、純群集生産の窒素源を見直す必要があるだろう。リンについては溶存有機態リンの微生物利用に関する研究が近年展開されているが（Suzumura *et al.*, 2012; Sato *et al.*, 2013; Yamaguchi *et al.*, 2021）、純群集生産に見合ったリン供給・利用については不明瞭である。リンは炭素や窒素に比べて選択的に再生されるため（Clark *et al.*, 1998）、迅速な再生・利用の回転が純群集生産の維持に寄与しているという見方もあるが（Hashihama *et al.*, 2021）、今後定量的な知見の蓄積が必要である。ケイ素や鉄を含めた微量金属元素の供給過程もよくわかっていない。特に、黒潮や東シナ海陸棚斜面を含めた亜熱帯域における微量金属元素動態の知見は亜寒帯域以上に不足している（Liao and Ho, 2018）。近年は、植物プランクトンの増殖は単一元素の律速だけでなく、二種類以上の元素が同時に律速する共制限も確認されているほか（Saito *et al.*, 2008）、大西洋では共制限の組み合わせが海域によって異なることが示されている（Fig. 4）。一方で、太平洋やインド洋では制限元素が不明瞭であり、今後の研

究の進展が期待される。さらに、近年、外洋域では混合栄養生物の動態が注目されるようになってきた（例えば、Sato *et al.*, 2016; Sato and Hashihama, 2019）。混合栄養生物は栄養塩の供給が無くとも粒状有機物の捕食によって窒素やリンを獲得して光合成を行う。このような混合栄養生物の動態が純群集生産に寄与している可能性もある。混合栄養生物のみならず、生物群集の現存量、多様性を網羅的に調べ、各生物・多様性がどのように生物地球化学的プロセスに寄与しているのかを定量的に明らかにすることも課題である（4.1節）。栄養塩代謝過程を古典的な同位体分析に加えて機能遺伝子発現解析を通して明らかにすることで（例えば、Shiozaki *et al.*, 2016）、代謝を駆動する生物群集を把握することができ、これも純群集生産を支える栄養塩動態の理解に大きく貢献すると期待される。

3.3. 亜熱帯循環有光層への栄養塩・鉄供給プロセスの3次元像

亜熱帯循環有光層の栄養物質動態に関する研究（3.2節）の多くは、鉛直1次元の栄養物質供給プロセスに着目しているが、鉛直1次元の解析では純群集生産を充たす栄養物質供給の評価は困難であることが指摘されている（Letscher *et al.*, 2016; Hashihama *et al.*, 2021）。亜熱帯循環に隣接する亜寒帯循環からの富栄養水塊の輸送も含めて栄養物質の3次元供給プロセスを捉えることで亜熱帯循環の純群集生産を充たす栄養物質供給がみえてくる可能性がある。栄養塩・鉄が豊富な北太平洋中層水は亜寒帯から亜熱帯に循環境界を越えて南下するが、亜寒帯亜熱帯移行領域において北太平洋中層水上部に強い乱流混合を伴う上向きの硝酸塩供給が示されている（Kaneiko *et al.*, 2021）。また、この領域を含む黒潮親潮混合水域への親潮と黒潮そのものによる栄養塩輸送の研究も進んでいる（2.3節）。亜熱帯モード水は冬に黒潮続流付近で形成され、南下しながら沈み込むが（2.4節）、この亜熱帯モード水に水平・鉛直混合過程により取り込まれた亜寒帯起源の豊富な栄養塩・鉄が鉛直拡散により亜熱帯循環中央部の有光層内に供給されている可能性も考えられる（Fig. 5）。

こうした各海域での過程を定量的に評価すれば亜熱帯循環有光層における栄養塩供給と純群集生産の比較が可

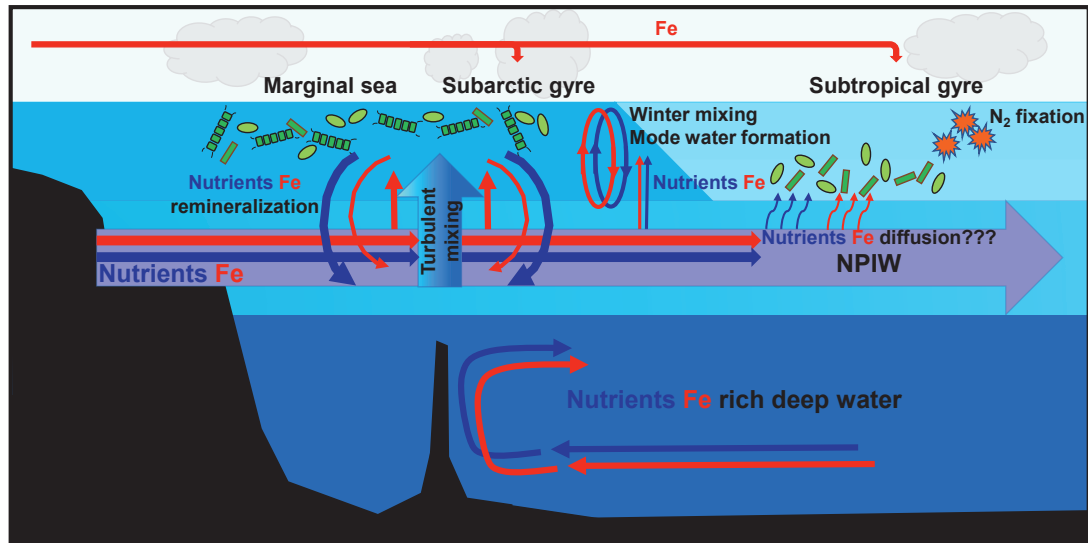


Fig. 5. The schematic of the nutrient and dissolved iron transport through North Pacific Intermediate Water (NPIW) in the western North Pacific, as modified from Nishioka *et al.* (2020). Regenerated nutrients and dissolved iron in the marginal sea (Okhotsk Sea) are vertically supplied to the surface layer by turbulent mixing around the island chains and cycle between the intermediate and surface layers. Then, NPIW transports the nutrients and dissolved iron to the subtropical gyre via the mode water formation area with strong winter mixing, which potentially influences biological production in the oligotrophic surface waters of the subtropical gyre.

能になる。しかし、亜熱帯循環では供給された栄養塩・鉄は植物プランクトンや従属栄養細菌に直ちに消費されるため、栄養塩・鉄濃度の情報だけでは供給分を把握することは困難である。このため、前述(2.3節)のように、乱流計や栄養塩センサーを備えたフロート(Nagai *et al.*, 2021a)、高感度栄養塩センサー(Steimle *et al.*, 2002)、鉄センサー(Grand *et al.*, 2019)等を用いた観測により、鉛直拡散係数と濃度勾配から計算される栄養塩・鉄フラックスデータをできるだけ時空間的に高解像度で取得し、純群集生産を支える栄養塩・鉄供給過程を明らかにすることが重要である。この観測研究は、生物地球化学的プロセスの長期変動の理解にも繋がるのが大いに期待される。大規模な場を把握するためには、こうした観測の高頻度・高密度化に加えて、観測技術の共用化も大事な要素である。栄養塩分析については認証標準物質を用いて比較可能性を担保できる仕組みが確立しており(Aoyama, 2020)、実際に北太平洋でもGO-SHIP(<https://www.go-ship.org>)やGLODAP(<https://www.glodap.info/>)など国際的取り組みに貢献する形で高精度

観測が実施されている。こうした観測網を駆使し、統計的手法、高解像度モデル、データ同化などを組み合わせて大規模生物地球化学的プロセスの解明に取り組むことが望まれる。栄養塩供給過程は、古くからの課題の一つであるものの、その定量化には、様々な時空間スケールの物理プロセスを含むだけでなく、大気・海洋間の生物地球化学的プロセス(岩本ら, 2021, 本特集)も視野に入れた最新の知見を必要とする。これはGEOTRACESや、SOLAS(<https://www.solas-int.org/>)、IMBER(<http://imber.info/>)などの国際プロジェクト(Fig. 2)でも注視されている中緯度海洋に散在する課題を繋ぎ合わせるものであり、物理・化学・生物を含む海洋学コミュニティが今後10年で取り組むべき統合的課題の一つとなるだろう。

4. 現場観測に基づく未知なる海洋生態系プロセスの解明

亜寒帯循環、亜熱帯循環、縁辺海から構成される北太

平洋中緯度域は、それぞれの境界領域における水塊混合、渦活動、前線形成等により多様な物理環境が形成される(2.2節)。さらに太陽放射や物理場の季節変化は水柱の密度構造、光環境に周期的な影響を与え、大陸に沿って流れる西岸境界流の周辺海域は陸域を含めた周辺地形の影響を強く受ける(2.3節)。このような多様な物理環境からなる北太平洋中緯度域では、様々な時空間スケールで栄養塩・鉄の供給量が変化し(3節)、各海域ではこれに適応した多様な生物群が生態系を駆動する。その結果は例えば、黒潮親潮混合水域における高い漁業生産、世界有数の大規模な植物プランクトン(珪藻)ブルームなど、地球環境や人間活動に大きな影響を与える形となって顕在化する。従って、海洋環境の多様性は中緯度域の生態系の全体像把握の鍵であり、生態系の動態予測には、海洋環境における生物の適応機構を理解し、環境変動に対する生物の応答を明らかにする必要がある。

生物海洋学では古くからプランクトンを中心に種の分布や各生物種の生理生態の研究が精力的に進められてきたが、近年はモデルにより地球規模の種多様性や生物生産が見積もられ、海域間の差が鮮明に映し出されている。各海域内では細かい時空間スケールで水温、栄養塩等の環境変化のモニタリングが進められているが、現状では上述したような多様な海洋環境に対応する生態系情報の不均一性・非定常性の知見は圧倒的に不足している。今後10年の生物海洋学を考えると、新技術の台頭や物理・化学・生物の分野横断型の研究の進行により、経験則やモデル予測、また仮説の域を出ない生態系現象の現場レベルでの理解が欠かせない。そこで本節では中緯度域の海洋生態系理解の鍵となる種多様性および生物生産過程に焦点を当て、現場観測に基づく海洋漂流区における生物多様性の維持機構および生物生産ホットスポットの形成機構の解明に関する議論を行う。

4.1. 海洋漂流区における生物多様性の維持機構

海洋は生物多様性の宝庫であり、正確な見積もりは困難であるが、真核生物では約220万、原核生物では約100億にも及ぶ種が存在すると予想され、その多くは未記載、未発見である(Mora *et al.*, 2011; Locey and Lennon, 2016)。海洋は13億km³を超える莫大な容積を誇

り、海水中の漂流区では多種多様なプランクトンがひしめき合い、真核生物ではこれまで形態情報に基づき1万以上の種が記載されてきた。近年、次世代シーケンサーを利用した網羅的遺伝子解析が台頭し(例えば、Tara Oceansプロジェクト; <https://oceans.taraexpeditions.org/en/>; Fig. 2)、真核生物約15万種に相当する遺伝子配列情報が地球規模の海洋漂流区で報告されている(de Vargas *et al.*, 2015)。また、原核生物も難培養性種の多様性評価が可能となり、多くの種は未発見とされるが、地球規模の海洋漂流区で3万5千を超える種、またそれらの種に由来すると考えられる1,000万を超える遺伝子配列が検出された(Sunagawa *et al.*, 2015)。網羅的遺伝子解析により低緯度から極域に向かい多様性が減少する緯度変化も各生物群で報告され(Ibarbalz *et al.*, 2019)、太平洋広域を対象とした解析では、植物プランクトン・動物プランクトンともに北太平洋の中緯度域で高い種多様性が報告されている(Endo *et al.*, 2018; Hirai *et al.*, 2020)。この中緯度域における高い種多様性は、各生物群の生理生態や進化的要因に加え、中緯度海域の特徴である時空間的に多様な海洋環境の影響を強く受けている。一方、プランクトンのパラドックス(Hutchinson, 1961)として知られる同所的(局所的)な多様性維持機構は十分に解明されておらず、亜熱帯域をはじめとする資源の限られた生態系でなぜ多種共存が可能なのかは未だに謎のままである。

プランクトンは一見すると異なる種が同じ分布を示すように見えるが、実際には水温、栄養塩、光等の細かい環境スケールの違いに応じた空間的な住み分けが存在する可能性がある(Roy and Chattopadhyay, 2007)。原核・真核生物を問わずプランクトンは海洋環境に応じた鉛直分布を示し、水平的にも植物プランクトンのmmスケールの不均一分布(パッチネス)が貧栄養海域における種多様性を高めることがモデルにより示されている(Priyadarshi *et al.*, 2019)。サブメソスケールの海洋環境変化に応答したプランクトン群集や種多様性の変化も報告されており(Mousing *et al.*, 2016)、中緯度海域で頻繁に観測される中規模渦やサブメソスケールの変動(2.2節)、黒潮・黒潮続流域の栄養塩ストリーム(2.3節)などに伴い形成される環境勾配は、プランクトンの種多様性維持において重要な役割を果たすと考えられる。この詳

細を明らかにするためには、物理・化学場の観測に用いられる高感度高精度センサーによる連続的調査に対応した試料採取を行い、環境DNAの技術等を活用して時空間的に高解像度の種の分布を明らかにすることが有効であろう。また、サルパ・ウミタル類など一部の動物プランクトンではビデオプランクトンレコーダーなどの光学的手法によって海洋環境要因に対応した高解像度での鉛直分布が観察されており、その高密度分布域が冷水渦の湧昇や暖水ストリーマー周辺のサブメソスケールの海洋構造に対応していることが示されている (Everett *et al.*, 2011; Takahashi *et al.*, 2015)。

空間的住み分けの仮説に加え、被食-捕食等の生態学的な住み分けにより多様な種が同所的に分布する可能性も指摘されている (Roy and Chattopadhyay, 2007)。例えば、動物プランクトンは特に貧栄養海域である亜熱帯で多様な分類群が分布し、高い肉食性種の割合など食物網構造の複雑化が報告されている (Woodd-Walker *et al.*, 2002)。近年、網羅的遺伝子解析が動物プランクトンの食性研究にも適用され (Zamora-Terol *et al.*, 2020)、今後は定量的評価が難しかった餌料生物の多様性や分類群間の餌料重複 (競合) などについて理解の進展が期待される。生態学的住み分けの理解には非優占種を含む各プランクトン種の生態の調査を進め、複雑な食物網構造を再構築する必要がある。光学的手法を用いた行動観察では、中緯度域に広く分布するオンケア属カイアシ類が尾虫類ハウスを主体とするマリンスノーを摂食する様子や、サフィリナ属カイアシ類が自身よりも大型のウミタルを捕食する様子が捉えられており (Takahashi *et al.*, 2013; Nishibe *et al.*, 2015)、サイズに依存した古典的な食物連鎖に依らない食物網構造の重要性が明らかになりつつある。また、浮遊性有孔虫では捕食以外に共生藻を有する種が報告され、共生藻への依存性の違いが種多様性に関わる可能性が指摘されている (Takagi *et al.*, 2019)。混合栄養生物の多様性は栄養塩が枯渇する亜熱帯域で高くなる傾向があるが (Faure *et al.*, 2019)、鉄制限が顕著な HNLC 海域を含む北太平洋亜寒帯域や沿岸域からも報告があり (Leles *et al.*, 2017)、中緯度海域の漂泳区食物網において普遍的な構成要素である可能性がある。混合栄養生物の存在は高次栄養段階生物への生態転送効率を高め、炭素フラックスの増加に寄与すると予

想されている (Ward and Follows, 2016)。また、漂泳区生態系の種多様性の維持と生物地球化学的プロセスに重要な役割を果たしている可能性が高く、被食-捕食を含めた生態学的研究の進展が期待される (3.2 節)。

従来は検出困難であった寄生者の役割も近年着目されており、寄生者がもたらす生態系の非定常性が海洋漂泳区の多様性に関わる可能性も考えられる。例えば、海洋には 1 mL 中に数億個に至るウイルス粒子が存在し、海洋微生物の 1 日あたり 20% の生物量はウイルスにより死滅しているという試算がある (Suttle, 2005)。また、近年の網羅的遺伝子解析技術により地球規模の海洋漂泳区で約 20 万もの DNA ウイルスが検出されているが (Gregory *et al.*, 2019)、海洋微生物への特異的なウイルス感染は生態系の変動を引き起こすと考えられる。このウイルス感染により単独種の優占が抑制され、非定常的な環境の中でプランクトン種の共存が起こる現象は kill the winner 仮説として知られ、その有効性がモデルにより示されている (Thingstad, 2000)。この仮説は微生物の多様性を対象としているが、近年多くの無脊椎動物から種特異的な新規ウイルスが報告されている (Shi *et al.*, 2016) ほか、生態学的知見の乏しい巨大ウイルスが植物プランクトンの群集構造形成に関わる可能性も指摘されている (Endo *et al.*, 2020)。また、ウイルス以外の寄生生物も近年の研究により高い多様性を誇り、未知なる生態系への影響が存在する可能性が指摘されている (de Vargas *et al.*, 2015; Clarke *et al.*, 2019)。Kill the winner 仮説の現場レベルでの検証は容易ではないが、今後は空間のみならず時間的にも高密度・高精度の物理・化学・生物観測を行い、多様性維持に関わる生態系の非定常性を捉えることが期待される。

ここまでは主として、プランクトンのパラドックス (Hutchinson, 1961) として知られる同所的な種多様性の維持機構について議論したが、生物多様性はスケールに大きく依存するため、中緯度海域の種多様性の全容を把握するにはより広い時空間的スケールを考慮した観測が必要となる。空間的には、海域を横断した海盆スケールでの総合的な漂泳区生態系の高頻度・高精度観測が今後の種多様性維持機構の解明の鍵となる。例えば、Cheung *et al.* (2020, 2021) は、日本と北米間の商船観測を使った高頻度・高精度観測を通して、北太平洋中緯度域の海面

付近における各主要窒素固定生物グループ (*Trichodesmium*, UCYN-A1, Gamma-A, Gamma4) の分布パターンが季節的に大きく変化し、それが本稿 2.2 節で述べられている海洋物理プロセス (中規模渦, 海面高度, 表面水温等) に影響を受けていることを示している。このように、海盆スケールの漂泳区の種多様性の把握には、海洋物理プロセスが漂泳区生態系に与える影響を適切に理解する必要がある。また、栄養塩動態などの海盆スケールの生物地球化学的プロセス (例えば, Yasunaka *et al.*, 2021) と漂泳区生態系との関係を定量的に評価するため、海盆スケールのプランクトンの群集組成や種多様性に関する知見の蓄積が期待される。

中緯度域では太陽放射や物理場の季節変化が水柱の密度構造や光環境に影響を与え、一次生産に季節性が生じるため、生物相の季節変化 (フェノロジー) の把握が多様性決定機構を理解する上で重要である。近年実施された Tara Oceans プロジェクト等の地球規模の生物調査により、プランクトン群集の詳細な空間 (海域間) 分布と多様性の理解が進展したが、中緯度の特性であるフェノロジーに関する理解は進んでいない。日本周辺の中緯度海域については各大学や研究機関が実施するモニタリング観測等を活用し、プランクトンの群集構造の季節変化や、重要種の生活史に関する研究が進められてきた。一方、本稿 2, 3 節で述べられている通り、中緯度域の物理プロセス、栄養塩・鉄動態の特性は海域毎に様々な特徴を持つため、より多様な環境を網羅したフェノロジーの知見蓄積が必要である。特に、現在急速に進む温暖化等の気候変動が、海洋生態系に与える影響の大きさを考えると、季節変化の視点に基づく多様性把握は、今後 10 年の中緯度域の生物海洋学分野の研究者が重点的に取り組むべき研究課題であると言える。このフェノロジーの視点に基づく多様性把握の重要性は、海洋環境の季節変化の小さい亜熱帯循環にも当てはまる。一般に亜熱帯循環では季節変化に比べ、被食-捕食による生物間相互作用が多様性維持機構で果たす役割が大きいと考えられている (Vallina *et al.*, 2014)。一方、温暖化に伴う一次生産者や高次捕食者のフェノロジーの変化は既に報告されており (Kimura *et al.*, 2010; Thomas *et al.*, 2012)、将来的な種間関係の変化がプランクトンを含む漂泳区の群集全体に影響を与える可能性がある。地球環境の変化に伴う中緯

度域の海洋生態系の応答を予測するため、今後は海域毎で群集全体を考慮したアプローチがより重要となるだろう。

以上、本節で述べた海洋漂泳区が多様性維持機構は遺伝子解析や光学的手法など解析手法の高度化に伴い、今後 10 年の間に現場レベルでの理解が今後急速に深まると予想される。一方、得られる生態系のデータは膨大なものとなるため、AI をはじめとしたビックデータの解析技術の導入も望まれる。

4.2. 生物生産ホットスポットの形成機構

海洋生態系を平均像でみた場合、食物連鎖を構成する植物プランクトンから鯨までの栄養段階上昇に伴う生物量の減少はごくわずかである (Sheldon *et al.*, 1972)。そのため、海洋生態系は極めて餌料濃度が希薄な環境であり、消費者の生存には餌料となる生物のパッチネスを効率良く探知する能力が鍵となる。このパッチネス形成はプランクトン生態学の伝統的な研究対象であり、水産分野でも「潮目」や「漁場形成」といった現象として経験的に知られている。近年、観測技術の進展によりプランクトンのパッチネスや高次捕食者の索餌行動に関する知見が蓄積され、局所的に高い生物生産を誇るホットスポットが海洋に存在することが明らかになってきた (Zainuddin *et al.*, 2006; Morato *et al.*, 2010; Kai *et al.*, 2017)。このようなホットスポットの形成には、様々なスケールの物理現象 (2 節) と、これに伴う栄養塩・鉄供給 (3 節) に加えて生物自身の行動が関与していると考えられるが、その詳細は十分に理解されていない。これまでの多くの観測やモデル研究では平均場の決定や再現・予測が重視されてきたが、将来的な気候変動が予想される現在、変動幅の両端にある最大・最小値の背景を理解する重要性は今後より高まるであろう。生物生産ホットスポット形成機構の解明は、生態系の変動予測精度向上に不可欠であり、中緯度域の生物海洋学分野の研究者が今後 10 年間で重点的に取り組むべき研究課題である。

中規模渦やサブメソスケールの海洋構造は生物パッチネス形成に深く関与していると考えられる (Mousing *et al.*, 2016; Hernández-Hernández *et al.*, 2020)。栄養塩供給や光環境条件等の物理現象は日単位、サブメソスケール (1 ~ 10 km 程度) で変化し、植物プランクトンの群集

構造を決定する重要な要因であることが指摘されている (Lévy *et al.*, 2012)。また、魚類、海鳥、ウミガメ等の高次捕食者の分布や餌料探索行動が、このサブメソスケールの海洋構造に対応することが報告されている (Kai *et al.*, 2009; Cotté *et al.*, 2011; Snyder *et al.*, 2017; Lévy, 2018; Siegelman *et al.*, 2019)。一方、一次生産者と高次捕食者を繋ぐ動物プランクトンのパッチネス形成機構は最も理解が進んでいない。北太平洋亜寒帯域では、1 m³あたり約1,000～10,000個体の動物プランクトンのパッチネスが100～1,000 mスケールで分布していることが連続的な観測により確認されている (例えば、Kawamura, 1974, 1990; Kawamura and Hirano, 1985)。この海域の優占種であるカイアシ類 *Neocalanus cristatus* の分布と環境情報 (水温、塩分、クロロフィル *a*) の比較から、パッチネス形成は物理過程に起因する受動的な集積に加え、環境に応答する個体の能動的行動が関与していることが示唆された (Tsuda, 1993)。また、この海域を索餌場とするヒゲクジラ類の胃内容物が大量かつ単一種のカイアシ類で形成されることは古くから知られているが (例えば、Kawamura, 1974)、この現象は無選択に海水を濾し取ることで説明されず、ヒゲクジラ類は濃密なカイアシ類のパッチネスを効率的に探知・利用していることを示唆している。高次捕食者は、聴覚や嗅覚などによって遠く離れたプランクトンのパッチネスを効率よく発見できる能力を持つと思われるため、これら生物群の索餌海域探索行動とこれに関する生理・生態に関する研究進展は、生物生産ホットスポット形成機構の理解に大きく寄与すると考えられる。

島嶼や海山の地形効果も (2.3, 3.1 節)、生物生産ホットスポットの形成に影響を与えている要因として重要である。島嶼や海山周辺の局地的な湧昇に伴って一次生産が高まる現象はよく知られている (例えば、Furuya *et al.*, 1995; Aristegui *et al.*, 1997)。太平洋には30,000を越える海山が存在し、地形効果による有光層への栄養塩供給や新生産における重要性が特に貧栄養海域で指摘されている (Furuya *et al.*, 1995)。さらに近年では、その高い一次生産性に依存した大型の動物プランクトンの増加 (Hirai *et al.*, 2021) や、周辺海域の魚類マイクロネクトンが島嶼周辺の動物プランクトン摂餌のために鉛直・水平的に日周移動してくる現象 (Benoit-Bird and Au,

2006) などが報告され、島嶼・海山はより高い栄養段階に属する生物にとってもホットスポットとして機能していることが明らかにされている。海山周辺では底生性魚類のみならず、プランクトン食性、これを捕食する大型回遊魚も多く分布することが知られているが、これは一次生産上昇に伴うボトムアップ効果のみならず、海山周辺にプランクトンがトラップされる餌料集積効果の影響も大きいと考えられる (Genin and Dower, 2007)。Shiozaki *et al.* (2014b) は亜熱帯貧栄養の島嶼周辺で湧昇が介在しない窒素固定活性の上昇を見出し、島嶼からの鉄やリンの供給が重要な役割を果たしている可能性を示した。さらに、炭素窒素安定同位体比解析により、貧栄養亜熱帯域では窒素固定生物由来の窒素が食物連鎖を通じて高次栄養段階生物まで転送されていることが示されている (Horii *et al.*, 2018)。その具体的な高次栄養段階生物までの転送過程は明らかにされておらず、今後は島嶼の影響から始まる窒素固定生物由来の食物網構造の全容解明が期待される。

世界有数の好漁場である黒潮親潮混合水域は、小型浮魚類の魚種交替を引き起こす新規加入の成否を左右する場として重要であるが (Yatsu, 2019)、餌生物分布と高次捕食者の関係については極めて知見が限られている。この海域は、黒潮統流・親潮間に形成される前線構造や、水塊の混合、活発な中規模渦の活動や準定常流の存在等に起因して多様な海洋環境が形成され (2.3, 2.4, 3.1 節)、クロロフィル *a* 濃度は時空間的に大きく変動するが、黒潮統流・親潮間前線、磯口ジェット、シャツキー海台や天皇海山列の周辺など、時期によってクロロフィル *a* 濃度が高くなる傾向をもつ海域が存在する。動物プランクトン群集は、水平的に輸送されながら、このような一次生産の時空間的変動に応答して遷移する。このようにして生じる様々なスケールで分布の不均一性は、すなわち餌料環境の変動であり、浮魚類の加入や成長に大きな役割を果たしていると考えられるが (例えば、Okazaki *et al.*, 2019)、その実態は十分に理解されていない。さらに、この海域では、無性生殖によって一次生産の増大に速やかに応答するゼラチナス動物プランクトン (サルパ、ウミタル類) などが時として大発生し、植物プランクトン群集や浮魚類の好むカイアシ類の生産に影響を与えている可能性も指摘されている (Takahashi *et al.*, 2015;

Ishak *et al.*, 2021)。今後は、プランクトン群集全体を対象とした分布実態、高次捕食者の摂餌生態に関する知見を充実させるとともに、理解が大きく進展している物理・化学分野と連携して(2.3節)、プランクトン群集の海洋環境への応答過程理解を深めることが、水産資源変動のメカニズム解明と将来予測に不可欠である。特に、深度10 m以浅の海面付近では、生物生産が活発であり、小型浮魚類仔稚魚の主分布層であるにも関わらず、一般的な物理観測では手法的な問題から解析対象外とされることが多く、その変動実態と生物生産の関係はほとんど理解されていない。複雑な水塊混合過程をもつ本海域の生物生産の実態を明らかにするために、成層構造や栄養物質供給に与える降雨の影響も含め、海面付近の生物生産過程の解明が進むことを期待したい。

また、世界有数の大規模な植物プランクトン(珪藻)の春季ブルームが発生する西部北太平洋中緯度域は、全球的にみて重要な生物生産/海洋炭素ホットスポットであると認識されている(<https://www.us-ocb.org/wp-content/uploads/sites/43/2018/09/OCHS-report.pdf>)。最も顕著なブルームが認められる親潮域では、その規模、経年変動、形成機構、群集遷移過程等について知見が蓄積されてきた(Saito *et al.*, 2002; Okamoto *et al.*, 2010; Suzuki *et al.*, 2011; Kuroda *et al.*, 2019)。一方、中緯度域全体をみると、春季ブルームの開始タイミングや規模、形成機構は各モード水形成海域間や黒潮主流内の位置によって異なることが示されており(Shiozaki *et al.*, 2014a)、海域毎にその詳細を明らかにする必要がある。特に、本稿3節で述べられている栄養塩・鉄供給と循環過程の時空間的変動の理解は、春季珪藻ブルーム動態予測において不可欠であり、物理・化学過程と併せて、その形成機構を明らかにすることが重要である。さらに今後進行すると予想される、温暖化や酸性化の影響(Chiba *et al.*, 2004; Yatsu *et al.*, 2013; Endo *et al.*, 2016)を適切に評価するには、継続的な観測データ取得に加えて、時空間的に高解像度の観測、迅速なデータ解析と共有、網羅的遺伝子解析による種組成や生理機能の包括的な把握等の新技術の導入(例えば、Stec *et al.*, 2017)などが重要である。

生物生産のホットスポット形成は持続時間が短く変動も大きいいため、多様性維持機構の解明(4.1節)と同様に

高頻度・高解像度の観測、新規手法の導入が必須となる。低次栄養段階については、物理・化学環境と生物情報を同時に高解像度で取得できるBGC Argoフロート(<https://biogeochemical-argo.org/>; Fig. 2; 平井ら, 2021, 本特集)や光学的手法(ビデオプランクトンレコーダー、CPICSなど)の導入が現場レベルでの生物生産ホットスポットの理解の鍵となる。また、高次栄養段階生物については、バイオリギングによる索餌行動把握(Siegelman *et al.*, 2019)や、単一あるいは複数元素の同位体比を用いた索餌海域の特定(Santos *et al.*, 2011; Wyatt *et al.*, 2019; Matsubayashi *et al.*, 2020)、環境DNAを用いた分布や現存量把握(Miya, 2022)もホットスポットの特定および形成機構の解明に有効なアプローチとなり得る。これらの研究手法の発展に伴う知見の蓄積は、水産資源を含めた高次捕食者の回遊や資源変動を含む海洋生態系の理解に大きく貢献すると考えられる。

5. まとめ

日本周辺に広がる西部北太平洋の海洋学は、ここ10年で大きな進歩を遂げた。プロファイリングフロートや乱流計の活用により、海盆規模の水塊の季節・経年変動や海底起伏で起こる局地的な拡散などが明らかになり、多くの時空間スケールの物理現象の理解が進んだ。同時に、高性能計算技術の向上により、大規模なデータ同化やモデルを用いた数値実験も可能になり、西岸境界流を含む西部北太平洋の中緯度海洋・大気に関する物理場への理解は着実に進んだ。このような物理場の理解に基づいて、栄養塩や鉄などの輸送過程についても研究が進み、中でも黒潮栄養塩ストリームや縁辺海から亜寒帯循環への物質輸送の理解については大きな進捗が得られた。一次生産を支える栄養塩・鉄供給過程は、亜寒帯循環については海水流動や混合に支配されている傾向がみられるが、亜熱帯循環では海洋の物理場だけでは説明できない供給源があり、窒素固定や大気沈着等の研究が進んだものの、未だ十分な供給量は確認されていない。亜熱帯循環の高い生物多様性は網羅的遺伝子解析により近年理解が進展しているが、その維持機構には不明点が多く、多様な生物群集が駆動する生物地球化学的プロセスが亜熱帯循環の生物生産に深く関与している可能性がう

かがえる。中緯度海洋における一次生産から高次栄養段階への生態系構造については、物理場に関連した生物生産ホットスポットが重要な役割を果たしている可能性があるが、局所的現象の把握の難しさから未だ多くの不明点が残されている。

前回の将来構想(花輪・津田, 2013; 岡ら, 2013; 神田ら, 2013; 浜崎ら, 2013)でも言及されているように、最近10年の海洋学の進歩においても、データ量や取り扱う時空間スケールが物理分野に比べて化学・生物分野では圧倒的に乏しいのは明白である。その差は、衛星海面高度・Argo データの一層の蓄積や SWOT (Fig. 2; 2.2 節) の打ち上げにより、一層大きくなると予想される。近年、BGC Argo フロート (Fig. 2; 平井ら, 2021, 本特集) の投入が本格化し、米国を中心に大西洋や南大洋への投入が進んでいるが、日本周辺の西部北太平洋では展開が遅れている。今後10年で物理分野と化学・生物分野の差を可能な限り解消し、西部北太平洋の物理・化学・生物過程の時空間像を明らかにしていくためにも、BGC Argo フロートによる学際的研究プロジェクトの立脚が重要である。さらに、より詳細な時空間像の追求には、BGC Argo フロートのスペック(水温、塩分、酸素、硝酸塩、pH、クロロフィル *a*、懸濁粒子、下方向放射照度)を上回る乱流計、生元素センサー、ビデオプランクトンレコーダー等も搭載したプロファイリングフロートの展開(例えば乱流計を組み込んだ ArgoMix のような取り組み; Roemmich *et al.*, 2019; 平井ら, 2021, 本特集)、化学・生物パラメーターのデータ同化、生物地球化学的プロセスのアンサンブル予報および高解像度予測モデルへの組み込みが必要となるだろう。また、化学・生物分野では、未知のプロセスの理解のために高感度高精度生元素分析や網羅的遺伝子解析などの観測・実験的技術の新規開発、現場への適用を引き続き実施し、得られた成果を物理場も含めて解釈するよう常に務めることが必要だろう。このように物理・化学・生物を統合した海洋学研究を展開していき、物理場の長期変動や予測とできるだけ近いスケールで生物地球化学的プロセスや生態系の長期変動や予測が可能となることが理想である。このためには、現場観測、理論、数値実験、データ解析に関わる研究者の協働がより一層求められる。これまでも実施されてきたように、異分野の海洋学研究者が一堂に会して科研費等

の予算を獲得し、国連海洋科学の10年 (<https://www.oceandecade.org/>) への貢献を見据えて国内外の大型プロジェクトを継続・推進していくことが必要であろう (Fig. 2)。具体的には、重点的に取り組むべき研究トピックスについて(例えば CSK-2 による黒潮研究)、関係諸国と連携しながら進めていく国際プロジェクトが多数立案され、それらが有機的に融合していくことが理想である。また同時に、高品質の現場海洋データを継続して取得していくことが海洋学の根本にあることを忘れてはならない。これまで官庁、大学、JAMSTEC 等の観測船により、太平洋・インド洋の中緯度域において最先端の観測技術を駆使したマッピング、時系列、プロセス研究が展開されてきた。中でも、西部北太平洋外洋域や日本海では気象庁や水産研究・教育機構の定期航海が継続的に実施されており、これらは海洋の長期変動を解明する上で重要な役割を果たしてきた (Kodama *et al.*, 2014, 2016; Sasano *et al.*, 2015; Oka *et al.*, 2018; Kuroda *et al.*, 2019)。今後はこれらの重要性をより一層社会にアピールし、社会と協働で推進していくと共に、大型プロジェクトの基盤として観測航海を長期継続的に実施していくことが中緯度海洋の統合的理解に不可欠となるだろう。

謝 辞

本稿の作成にあたっては、以下の方々(敬称略)ならびに3名の匿名の査読者から貴重なご助言や参考資料を頂きました: 安藤健太郎, 遠藤寿, 岡英太郎, 木田新一郎, 須賀利雄, 永野憲, 本多牧生。深く感謝申し上げます。

References

- Abe, H., N. Ebuchi, H. Ueno, H. Ishiyama, and Y. Matsumura (2019): Aquarius reveals eddy stirring after a heavy precipitation event in the subtropical North Pacific. *J. Oceanogr.*, **75**, 37-50.
- Amakawa, H., T.-L. Yu, H. Tazoe, H. Obata, T. Gamo, Y. Sano, C.-C. Shen, and K. Suzuki (2019): Neodymium concentration and isotopic composition distributions in the southwestern Indian Ocean and the Indian sector of the Southern Ocean. *Chem. Geol.*, **511**, 190-203.
- Ambe, D., T. Endoh, T. Hibiya, and S. Imawaki (2009): Transition to the large meander path of the Kuroshio as observed by satellite altimetry. *La mer*, **47**, 19-29.
- Ando, K. *et al.* (2021): Half-century of scientific advancements since the

- cooperative study of the Kuroshio and adjacent regions (CSK) programme - Need for a new Kuroshio research. *Prog. Oceanogr.*, **193**, 102513.
- Aoki, K., S. Minobe, Y. Tanimoto, and Y. Sasai (2013): Southward eddy heat transport occurring along southern flanks of the Kuroshio Extension and the Gulf Stream in a 1/10° Global Ocean General Circulation Model. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 1899-1910.
- Aoyama, M. (2020): Global certified-reference-material- or reference-material-scaled nutrient gridded dataset GND13. *Earth Syst. Sci. Data*, **12**, 487-499.
- Aristegui, J., P. Tett, A. Hernández-Guerra, G. Basterretxea, M. F. Montero, K. Wild, P. Sangrá, S. Hernández-Leon, M. Canton, J. A. García-Braun, M. Pacheco, and E. D. Barton (1997): The influence of island-generated eddies on chlorophyll distribution: a study of mesoscale variation around Gran Canaria. *Deep-Sea Res. Part I*, **44**, 71-96.
- Benoit-Bird, K. J., and W. W. Au (2006): Extreme diel horizontal migrations by a tropical nearshore resident micronekton community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **319**, 1-14.
- Bindoff, N. L., W. W. L. Cheung, J. G. Kairo, J. Aristegui, V. A. Guinder, R. Hallberg, N. Hilmi, N. Jiao, M. S. Karim, L. Levin, S. O'Donoghue, S. R. Purca Cuicapusa, B. Rinkevich, T. Suga, A. Tagliabue, and P. Williamson (2019): Chapter 5, Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities, p. 457-597. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, edited by H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, and N. M. Weyer. In press.
- Boiteau, R. M., J. N. Fitzsimmons, D. J. Repeta, and E. A. Boyle (2013): Detection of iron ligands in seawater and marine cyanobacteria cultures by high-performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Anal. Chem.*, **85**, 4357-4362.
- Böttjer, D., J. E. Dore, D. M. Karl, R. M. Letelier, C. Mahaffey, S. T. Wilson, J. Zehr, and M. J. Church (2017): Temporal variability of nitrogen fixation and particulate nitrogen export at Station ALOHA. *Limnol. Oceanogr.*, **62**, 200-216.
- Browning, T. J., E. P. Achterberg, I. Rapp, A. Engel, E. M. Bertrand, A. Tagliabue, and C. M. Moore (2017): Nutrient co-limitation at the boundary of an oceanic gyre. *Nature*, **551**, 242-246.
- Browning, T. J., I. Rapp, C. Schlosser, M. Gledhill, E. P. Achterberg, A. Bracher, and F. A. C. Le Moigne (2018): Influence of iron, cobalt, and vitamin B₁₂ supply on phytoplankton growth in the tropical east Pacific during the 2015 El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 6150-6159.
- Buck, K. N., P. N. Sedwick, B. Sohst, and C. A. Carlson (2018): Organic complexation of iron in the eastern tropical South Pacific: Results from US GEOTRACES Eastern Pacific Zonal Transect (GEOTRACES cruise GP16). *Mar. Chem.*, **201**, 229-241.
- Chappell, P. D., J. Vedamati, K. E. Selph, H. A. Cyr, B. D. Jenkins, M. R. Landry, and J. W. Moffett (2016): Preferential depletion of zinc within Costa Rica upwelling dome creates conditions for zinc co-limitation of primary production. *J. Plankton Res.*, **38**, 244-255.
- Cheung, S., R. Nitani, C. Tsurumoto, H. Endo, S. Nakaoka, W. Cheah, J. F. Lorda, X. Xia, H. Liu, and K. Suzuki (2020): Physical forcing controls the basin-scale occurrence of nitrogen-fixing organisms in the North Pacific Ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **34**, e2019GB006452.
- Cheung, S., R. J. P. Zehr, X. Xia, C. Tsurumoto, H. Endo, S. Nakaoka, W. Mak, K. Suzuki, and H. Liu (2021): Gamma4: a genetically versatile Gammaproteobacterial *nifH* phylotype that is widely distributed in the North Pacific Ocean. *Environ. Microbiol.*, **23**, 4246-4259.
- Chiba, S., T. Ono, K. Tadokoro, T. Midorikawa, and T. Saino (2004): Increased stratification and decreased lower trophic level productivity in the Oyashio Region of the North Pacific: A 30-year retrospective study. *J. Oceanogr.*, **60**, 149-162.
- Clark, L. L., E. D. Ingall, and R. Benner (1998): Marine phosphorus is selectively remineralized. *Nature*, **393**, 426.
- Clarke, L. J., S. Bestley, A. Bissett, and B. E. Deagle (2019): A globally distributed Syndiniales parasite dominates the Southern Ocean micro-eukaryote community near the sea-ice edge. *ISME J.*, **13**, 734-737.
- Cotté, C., F. d'Ovidio, A. Chaigneau, M. Lévy, I. Taupier-Letage, B. Mate, and C. Guinet (2011): Scale-dependent interactions of Mediterranean whales with marine dynamics. *Limnol. Oceanogr.*, **56**, 219-232.
- de Lavergne, C., C. Vic, G. Madec, F. Roquet, A. F. Waterhouse, C. B. Whalen, Y. Cuyppers, P. Bouruet-Aubertot, B. Ferron, and T. Hibiya (2020): A parameterization of local and remote tidal mixing. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **12**, e2020MS002065.
- de Vargas, C. et al. (2015): Eukaryotic plankton diversity in the sunlit ocean. *Science*, **348**, 1261605.
- Dobashi, R., H. Ueno, Y. Okada, T. Tanaka, J. Nishioka, T. Hirawake, A. Ooki, S. Itoh, D. Hasegawa, Y. Sasai, H. Sasaki, and I. Yasuda (2021): Observations of anticyclonic eddies in the western subarctic North Pacific. *J. Oceanogr.*, **77**, 229-242.
- 土井威志・安中さやか・高橋一生・渡辺路生・東塚知己・栗原晴子 (2021): 海洋学の10年展望2021: 熱帯域. 海の研究, **30**, 105-129.
- Endo, H., R. Blanc-Mathieu, Y. Li, G. Salazar, N. Henry, K. Labadie, C. de Vargas, M. B. Sullivan, C. Bowler, P. Wincker, L. Karp-Boss, S. Sunagawa, and H. Ogata (2020): Biogeography of marine giant viruses reveals their interplay with eukaryotes and ecological functions. *Nat. Ecol. Evol.*, **4**, 1639-1649.
- Endo, H., H. Ogata, and K. Suzuki (2018): Contrasting biogeography and diversity patterns between diatoms and haptophytes in the central Pacific Ocean. *Sci. Rep.*, **8**, 10916.
- Endo, H., K. Sugie, T. Yoshimura, and K. Suzuki (2016): Response of spring diatoms to CO₂ availability in the western North Pacific as determined by next-generation sequencing. *PLoS One*, **11**, e0154291.
- Endoh, T., H. Tsujino, and T. Hibiya (2011): The effect of Kosu Seamount on the formation of the Kuroshio large meander south of Japan. *J. Phys. Oceanogr.*, **41**, 1624-1629.
- Everett, J. D., M. E. Baird, and I. M. Suthers (2011): Three-dimensional structure of a swarm of the salp *Thalia democratica* within a cold-core eddy off southeast Australia. *J. Geophys. Res. Oce.*, **116**, C12046.
- Faure, E., F. Not, A.-S. Benoiston, K. Labadie, L. Bittner, and S.-D. Ayata (2019): Mixotrophic protists display contrasted biogeographies in the global ocean. *ISME J.*, **13**, 1072-1083.
- 藤井陽介・浦地政文・広瀬直毅・望月崇・瀬藤聡・美山透・広瀬成章・長船哲史・韓修妍・五十嵐弘道・宮澤泰正・豊田隆寛・干場康博・増田周平・石川洋一・碓氷典久・黒田寛・高山勝巳 (2017): 日本の海洋データ同化研究—20年間の功績と今後の展望—. 海の研究, **26**, 15-43.
- Furuya, K., T. Odate, and K. Taguchi (1995): Effects of a seamount on phytoplankton production in the western Pacific Ocean, p. 255-273. In *Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific*, edited by

- H. Sakai and Y. Nozaki, Terra Publishing, Tokyo, Japan.
- Genin, A., and F. Dower (2007): Chapter 5, Seamount plankton dynamics, p. 85-100. In *Seamounts: Ecology, Fisheries & Conservation*, edited by T. J. Pitcher, T. Morato, P. J. B. Hart, M. R. Clark, N. Haggan, and R. S. Santos, Brackwell Publishing, Oxford, UK.
- Gledhill, M., and K. N. Buck (2012): The organic complexation of iron in the marine environment: a review. *Front. Microbiol.*, **3**, 69.
- Goto, Y., I. Yasuda, and M. Nagasawa (2018): Comparison of turbulence intensity from CTD-attached and free-fall microstructure profilers. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **35**, 147-162.
- Goto, Y., I. Yasuda, M. Nagasawa, S. Kouketsu, and T. Nakano (2020): Estimation of Basin-scale turbulence distribution in the North Pacific Ocean using CTD-attached thermistor measurements. *Sci. Rep.*, **11**, 969.
- Grand, M. M., A. Laes-Huon, S. Fietz, J. A. Resing, H. Obata, G. W. Luther III, A. Tagliabue, E. P. Achterberg, R. Middag, A. Tovar-Sánchez, and A. R. Bowie (2019): Developing autonomous observing systems for micronutrient trace metals. *Front. Mar. Sci.*, **6**, 35.
- Gregory, A. C. *et al.* (2019): Marine DNA viral macro- and microdiversity from pole to pole. *Cell*, **177**, 1109-1123.
- Guo, X., X. H. Zhu, Y. Long, and D. Huang (2013): Spatial variations in the Kuroshio nutrient transport from the East China Sea to south of Japan. *Biogeosciences*, **10**, 6403-6417.
- Guo, X., X. H. Zhu, Q. S. Wu, and D. Huang (2012): The Kuroshio nutrient stream and its temporal variation in the East China Sea. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **117**, C01026.
- 浜崎恒二・石坂丞二・齊藤宏明・杉崎宏哉・鈴木光次・高橋一生・千葉早苗 (2013): 海洋学の10年展望(Ⅲ) —日本海洋学会将来構想委員会生物サブグループの議論から—。海の研究, **22**, 253-272.
- 花輪公雄・津田敦 (2013): 「海洋学の10年展望」 発刊に寄せて。海の研究, **22**, 187-189.
- Hashihama, F., K. Furuya, S. Kitajima, S. Takeda, T. Takemura, and J. Kanda (2009): Macro-scale exhaustion of surface phosphate by dinitrogen fixation in the western subtropical North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L03610.
- Hashihama, F., S. Kinouchi, S. Suwa, M. Suzumura, and J. Kanda (2013): Sensitive determination of enzymatically labile dissolved organic phosphorus and its vertical profiles in the oligotrophic western North Pacific and East China Sea. *J. Oceanogr.*, **69**, 357-367.
- Hashihama, F., H. Saito, T. Shiozaki, M. Ehama, S. Suwa, T. Sugiyama, H. Kato, J. Kanda, M. Sato, T. Kodama, T. Yamaguchi, S. Horii, I. Tanita, S. Takino, K. Takahashi, H. Ogawa, P. W. Boyd, and K. Furuya (2020): Biogeochemical controls of particulate phosphorus distribution across the oligotrophic subtropical Pacific Ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **34**, e2020GB006669.
- Hashihama, F., I. Yasuda, A. Kumabe, M. Sato, H. Sasaoka, Y. Iida, T. Shiozaki, H. Saito, J. Kanda, K. Furuya, P. W. Boyd, and M. Ishii (2021): Nanomolar phosphate supply and its recycling drive net community production in the subtropical North Pacific. *Nat. Commun.*, **12**, 3462.
- Hattori-Saito, A., J. Nishioka, T. Ono, R. M. L. McKay, and K. Suzuki (2010): Iron deficiency in micro-sized diatoms in the Oyashio region of the Western subarctic Pacific during spring. *J. Oceanogr.*, **66**, 105-115.
- Hayashida, H., R. J. Matear, P. G. Strutton, and X. Zhang (2020a): Insights into projected changes in marine heatwaves from a high-resolution ocean circulation model. *Nat. Commun.*, **11**, 4352.
- Hayashida, H., R. J. Matear, and P. G. Strutton (2020b): Background nutrient concentration determines phytoplankton bloom response to marine heatwaves. *Glob. Chang. Biol.*, **26**, 4800-4811.
- Hernández-Hernández, N., J. Aristegui, M. F. Montero, E. Velasco-Senovilla, F. Baltar, Á. Marrero-Díaz, A. Martínez-Marrero, and Á. Rodríguez-Santana (2020): Drivers of plankton distribution across meso-scale eddies at submesoscale range. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 667.
- Hirai, J., K. Hidaka, S. Nagai, and Y. Shimizu (2021): DNA/RNA metabarcoding and morphological analysis of epipelagic copepod communities in the Izu Ridge off the southern coast of Japan. *ICES J. Mar. Sci.*, fsab064, doi:10.1093/icesjms/fsab064.
- 平井惇也・宮正樹・藤木徹一・吉田聡・乙坂重嘉・埴山秀樹・加古真一郎・片岡智哉・松岡大祐・日高弥子・杉山大祐・小嶋不二夫 (2021): 海洋学の10年展望2021: 新たな手法と問題。海の研究, **30**, 227-253.
- Hirai, J., A. Tachibana, and A. Tsuda (2020): Large-scale metabarcoding analysis of epipelagic and mesopelagic copepods in the Pacific. *PLoS One*, **15**, e0233189.
- Honda, M. C. (2020): Effective vertical transport of particulate organic carbon in the western North Pacific subarctic region. *Front. Earth Sci.*, **8**, 1-17.
- Horii, S., K. Takahashi, T. Shiozaki, F. Hashihama, and K. Furuya (2018): Stable isotopic evidence for the differential contribution of diazotrophs to the epipelagic grazing food chain in the mid-Pacific Ocean. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, **27**, 1467-1480.
- Hutchinson, G. E. (1961): The paradox of the plankton. *Am. Nat.*, **95**, 137-145.
- Ibarbalz, F. M. *et al.* (2019): Global trends in marine plankton diversity across kingdoms of life. *Cell*, **179**, 1084-1097.
- Ichikawa, H., H. Nakamura, A. Nishina, and M. Higashi (2004): Variability of north-eastward current southeast of northern Ryukyu Islands. *J. Oceanogr.*, **60**, 351-363.
- Iizuka, S., R. Kawamura, H. Nakamura, and T. Miyama (2021): Influence of warm SST in the Oyashio region on rainfall distribution of Typhoon Hagibis (2019). *SOLA*, **17A**, 21-28.
- Inoue, R., M. Watanabe, and S. Osafune (2017): Wind-induced mixing in the North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **47**, 1587-1603.
- Ishak, N. H. A., K. Tadokoro, Y. Okazaki, S. Kakehi, S. Suyama, and K. Takahashi (2020): Distribution, biomass, and species composition of salps and doliolids in the Oyashio-Kuroshio transitional region: potential impact of massive bloom on the pelagic food web. *J. Oceanogr.*, **76**, 351-363.
- Ishii, M., H. Y. Inoue, H. Matsueda, S. Saito, K. Fushimi, K. Nemoto, T. Yano, H. Nagai, and T. Midorikawa (2001): Seasonal variation in total inorganic carbon and its controlling processes in surface waters of the western North Pacific subtropical gyre. *Mar. Chem.*, **75**, 17-32.
- Isoguchi, O., H. Kawamura, and E. Oka (2006): Quasi-stationary jets transporting surface warm waters across the transition zone between the subtropical and the subarctic gyres in the North Pacific. *J. Geophys. Res. Océ.*, **111**, C10003.
- Ito, T., S. Minobe, M. C. Long, and C. Deutsch (2017): Upper ocean O₂ trends: 1958-2015. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 4214-4223.
- Itoh, S., and T. Sugimoto (2002): Behavior of warm-core rings in a double-gyre wind-driven ocean circulation model. *J. Oceanogr.*, **58**, 651-660.

- Itoh, S., and I. Yasuda (2010): Water mass structure of warm and cold anticyclonic eddies in the western boundary region of the subarctic North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 2624-2642.
- 岩本洋子・相木秀則・磯口治・大林由美子・近藤文義・近藤能子・西岡純 (2021): 海洋学の10年展望2021: 大気海洋境界, 海の研究, **30**, 199-225.
- JCOPE チーム (2017): 黒潮大蛇行は発生するか? 2017年5月31日, <http://www.jamstec.go.jp/apl/j/column/20170531/>.
- Johnson, K. S., S. C. Riser, and D. M. Karl (2010): Nitrate supply from deep to near-surface waters of the North Pacific subtropical gyre. *Nature*, **465**, 1062-1065.
- Kai, E. T., V. Rossi, J. Sudre, H. Weimerskirch, C. Lopez, E. Hernandez-Garcia, F. Marsaca, and V. Garçon (2009): Top marine predators track Lagrangian coherent structures. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **106**, 8245-8250.
- Kai, M., J. T. Thorson, K. R. Piner, and M. N. Maunder (2017): Predicting the spatio-temporal distributions of pelagic sharks in the western and central North Pacific. *Fish. Oceanogr.*, **26**, 569-582.
- 神田稷太・石井雅男・小川浩史・小埜恒夫・小畑元・川合美千代・鈴木昌弘・本多牧生・山下洋平・渡邊豊 (2013): 海洋学の10年展望(II) ー日本海洋学会将来構想委員会化学サブグループの議論からー, 海の研究, **22**, 219-251.
- Kaneko, H., I. Yasuda, S. Itoh, and S. Ito (2021): Vertical turbulent nitrate flux from direct measurements in the western subarctic and subtropical gyres of the North Pacific. *J. Oceanogr.*, **77**, 29-44.
- Katsura, S., E. Oka, B. Qiu, and N. Schneider (2013): Formation and subduction of North Pacific tropical water and their interannual variability. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 2400-2415.
- Katsumata, K. (2016): Eddies observed by Argo floats. Part I: Eddy transport in the upper 1000 dbar. *J. Phys. Oceanogr.*, **46**, 3471-3486.
- Kawai, Y., T. Miyama, S. Iizuka, A. Manda, M. K. Yoshioka, S. Katagiri, Y. Tachibana, and H. Nakamura (2015): Marine atmospheric boundary layer and low-level cloud responses to the Kuroshio Extension front in the early summer of 2012: three-vessel simultaneous observations and numerical simulations. *J. Oceanogr.*, **71**, 511-526.
- Kawamura, A. (1974): Food and feeding ecology in the southern sei whale. *Sci. Rep. Whales Res. Inst. Tokyo*, **26**, 1974, 25-144.
- Kawamura, A. (1990): Local aggregations of surface zooplankton in the pelagic regions of the northern North Pacific, Bering Sea and Gulf of Alaska. *Bull. Fac. Bioresources, Mie Univ.*, **3**, 41-56.
- Kawamura, A., and K. Hirano (1985): The special scale of surface swarms of *Calanus plumchrus* Marukawa observed from consecutive plankton net catches in the northwestern North Pacific. *Bull. Mar. Sci.*, **37**, 626-633.
- Kida, S. *et al.* (2015): Oceanic Fronts and Jets around Japan - a review. *J. Oceanogr.*, **71**, 469-497.
- Kida, S., K. Takayama, Y. N. Sasaki, H. Matsuura, and N. Hirose (2021): Increasing trend in Japan Sea Throughflow transport. *J. Oceanogr.*, **77**, 145-153.
- 木田新一郎・栗原晴子・大林由美子・川合美千代・近藤能子・西岡純 (2021): 海洋学の10年展望2021: 沿岸域, 海の研究, **30**, 87-104.
- Kim T., H. Obata, J. Nishioka, and T. Gamo (2017): Distribution of dissolved Zinc in the western and central subarctic North Pacific. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **31**, 1454-1468.
- Kimura, S., Y. Kato, T. Kitagawa, and N. Yamaoka (2010): Impacts of environmental variability and global warming scenario on Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) spawning grounds and recruitment habitat. *Prog. Oceanogr.*, **86**, 39-44.
- Kobashi, F., and A. Kubokawa (2012): Review on North Pacific Subtropical Countercurrent and subtropical fronts: role of mode waters in ocean circulation and climate. *J. Oceanogr.*, **68**, 21-43.
- Kobashi, F., T. Nakano, N. Iwasaka, and T. Ogata (2021): Decadal-scale variability of the North Pacific subtropical mode water and its influence on the pycnocline observed along 137°E. *J. Oceanogr.*, **77**, 487-503.
- Kodama, T., Y. Igeta, M. Kuga, and S. Abe (2016): Long-term decrease in phosphate concentrations in the surface layer of the southern Japan Sea. *J. Geophys. Res. Océ.*, **121**, 7845-7856.
- Kodama, T., Y. Shimizu, T. Ichikawa, Y. Hiroe, A. Kusaka, H. Morita, M. Shimizu, and K. Hidaka (2014): Seasonal and spatial contrast in the surface layer nutrient content around the Kuroshio along 138°E, observed between 2002 and 2013. *J. Oceanogr.*, **70**, 489-503.
- Komatsu, K., and Y. Hiroe (2019): Structure and impact of the Kuroshio nutrient stream, p. 85-104. In *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics*, edited by T. Nagai, H. Saito, K. Suzuki, and M. Takahashi, AGU Geophysical Monograph Series 243, AGU-Wiley.
- Kondo, Y., R. Bamba, H. Obata, J. Nishioka, and S. Takeda (2021): Distinct profiles of size-fractionated iron-binding ligands between the eastern and western subarctic Pacific. *Sci. Rep.*, **11**, 2053.
- Kondo, Y., S. Takeda, J. Nishioka, and M. Sato (2013): Growth stimulation and inhibition of natural phytoplankton communities by model organic ligands in the western subarctic Pacific. *J. Oceanogr.*, **69**, 97-115.
- Kouketsu, S. (2021): Inverse estimation of diffusivity coefficients from salinity distributions on isopycnal surfaces using Argo float array data. *J. Oceanogr.*, **77**, 615-630.
- Kouketsu, S., T. Doi, and A. Murata (2013): Decadal changes in dissolved inorganic carbon in the Pacific Ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **27**, 65-76.
- Kouketsu, S., H. Tomita, E. Oka, S. Hosoda, T. Kobayashi, and K. Sato (2012): The role of meso-scale eddies in mixed layer deepening and mode water formation in the western North Pacific. *J. Oceanogr.*, **68**, 63-77.
- Kuroda, H., Y. Toyota, T. Watanabe, J. Nishioka, D. Hasegawa, Y. Taniuchi, and A. Kuwata (2019): Influence of coastal Oyashio water on massive spring diatom blooms in the Oyashio area of the North Pacific Ocean. *Prog. Oceanogr.*, **175**, 328-334.
- Kuwano-Yoshida, A., and S. Minobe (2017): Storm-track response to SST fronts in the northwestern Pacific region in an AGCM. *J. Climate*, **30**, 1081-1102.
- Kwiatkowski, L. *et al.* (2020): Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. *Biogeosciences*, **17**, 3439-3470.
- Lee, M.-M., and R. G. Williams (2000): The role of eddies in the isopycnal transfer of nutrients and their impact on biological production. *J. Mar. Res.*, **58**, 895-917.
- Leles, S. G., A. Mitra, K. J. Flynn, D. K. Stoecker, P. J. Hansen, A. Calbet, G. B. McManus, R. W. Sanders, D. A. Caron, F. Not, G. M. Hallegraeff, P. Pitta, J. A. Raven, M. D. Johnson, P. M. Glibert, and S. Våge (2017): Oceanic protists with different forms of acquired phototrophy display contrasting biogeographies and abundance. *Proc. Roy. Soc. B*, **284**,

- 20170664.
- Letscher, R. T., F. Primeau, and J. K. Moore (2016): Nutrient budgets in the subtropical ocean gyres dominated by lateral transport. *Nat. Geosci.*, **9**, 815–819.
- Lévy, M. (2018): The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems. *Nat. Commun.*, **9**, 4758.
- Lévy, M., R. Ferrari, P. J. S. Franks, A. P. Martin, and P. Rivière (2012): Bringing physics to life at the submesoscale. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L14602.
- Li, Q., L. Legendre, and N. Jiao (2015): Phytoplankton responses to nitrogen and iron limitation in the tropical and subtropical Pacific Ocean. *J. Plankton Res.*, **37**, 306–319.
- Liao, W. H., and T. Y. Ho (2018): Particulate trace metal composition and sources in the Kuroshio adjacent to the East China Sea: the importance of aerosol deposition. *J. Geophys. Res. Océ.*, **123**, 6207–6223.
- Locey, K. J., and J. T. Lennon (2016): Scaling laws predict global microbial diversity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **113**, 5970–5975.
- Long, Y., X.-H. Zhou, and X. Guo (2019): The Oyashio nutrient stream and its nutrient transport to the mixed water region. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 1513–1520.
- Mackey, K. R., C. T. Chien, and A. Paytan (2014): Microbial and biogeochemical responses to projected future nitrate enrichment in the California upwelling system. *Front. Microbiol.*, **5**, 632.
- Maldonado, M. T., R. F. Strzepek, S. Sander, and P. W. Boyd (2005): Acquisition of iron bound to strong organic complexes, with different Fe binding groups and photochemical reactivities, by plankton communities in Fe-limited subantarctic waters. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **19**, GB4S23.
- Manda, A., H. Nakamura, N. Asano, S. Iizuka, T. Miyama, Q. Moteki, M. K. Yoshioka, K. Nishii, and T. Miyasaka (2014): Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon. *Sci. Rep.*, **4**, 5741.
- Masunaga, R., H. Nakamura, B. Taguchi, and T. Miyasaka (2020): Processes shaping the time-mean surface wind convergence patterns in winter around the Kuroshio Extension and Gulf Stream. *J. Climate*, **33**, 3–25.
- Masuzawa, J. (1969): Subtropical mode water. *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.*, **16**, 463–472.
- Matsubayashi, J., Y. Osada, K. Tadokoro, Y. Abe, A. Yamaguchi, K. Shirai, K. Honda, C. Yoshikawa, N. O. Ogawa, N. Ohkouchi, N. F. Ishikawa, T. Nagata, H. Miyamoto, S. Nishino, and I. Tayasu (2020): Tracking long-distance migration of marine fishes using compound-specific stable isotope analysis of amino acids. *Ecol. Lett.*, **23**, 881–890.
- Michaels, A. F., N. R. Bates, K. O. Buesseler, C. A. Carlson, and A. H. Knap (1994): Carbon-cycle imbalances in the Sargasso Sea. *Nature*, **372**, 537–540.
- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S.-P. Xie, and R. J. Small (2008): Influence of the Gulf Stream on the troposphere. *Nature*, **452**, 206–209.
- Misumi, K., J. Nishioka, H. Obata, D. Tsumune, T. Tsubono, M. C. Long, K. Lindsay, and J. K. Moore (2021): Slowly sinking particles underlie dissolved iron transport across the Pacific Ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **35**, e2020GB006823.
- Mitsudera, H., B. Taguchi, Y. Yoshikawa, H. Nakamura, T. Waseda, and T. D. Qu (2004): Numerical study on the Oyashio water pathways in the Kuroshio-Oyashio confluence. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 1174–1196.
- Mitsudera, H., T. Miyama, H. Nishigaki, T. Nakanowatari, H. Nishikawa, T. Nakamura, T. Wagawa, R. Furue, Y. Fujii, and S. Ito (2018): Low ocean-floor rises regulate subpolar sea surface temperature by forming baroclinic jets. *Nat. Commun.*, **9**, 1190.
- Miya, M. (2022): Environmental DNA metabarcoding: a novel method for biodiversity monitoring of marine fish communities. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **14**, doi:10.1146/annurev-marine-041421-082251.
- Miyama, T., H. Mitsudera, H. Nishigaki, and R. Furue (2018): Dynamics of a quasi-stationary jet along the subarctic front in the North Pacific Ocean (the western Isoguchi Jet): an ideal two-layer model. *J. Phys. Oceanogr.*, **48**, 807–830.
- Miyama, T., S. Minobe, and H. Goto (2021): Marine heatwave of sea surface temperature of the Oyashio region in summer in 2010–2016. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 576240.
- Miyazawa, Y., X. Guo, and T. Yamagata (2004): Roles of meso-scale eddies in the Kuroshio paths. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 2203–2222.
- Miyazawa, Y., T. Kagimoto, X. Guo, and H. Sakuma (2008): The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system. *J. Geophys. Res. Océ.*, **113**, C10015.
- Mohr, W., T. Großkopf, D. W. R. Wallace, and J. LaRoche (2010): Methodological underestimation of oceanic nitrogen fixation rates. *PLoS One*, **5**, e12583.
- Moore, C. M. *et al.* (2013): Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. *Nat. Geosci.*, **6**, 701–710.
- Mora, C., D. P. Tittensor, S. Adl, A. G. B. Simpson, and B. Worm (2011): How many species are there on earth and in the ocean? *PLoS Biol.*, **9**, e1001127.
- Morato, T., S. D. Hoyle, V. Allain, and S. J. Nicol (2010): Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **107**, 9707–9711.
- Mousing, E. A., K. Richardson, J. Bendtsen, I. Cetinić, and M. J. Perry (2016): Evidence of small-scale spatial structuring of phytoplankton alpha and beta-diversity in the open ocean. *J. Ecol.*, **104**, 1682–1695.
- 長井健容 (2019): 黒潮上流から統流の鉛直混合過程とその影響に関する考察. 沿岸海洋研究, **57**, 43–58.
- Nagai, T., S. Clayton, and Y. Uchiyama (2019a): Multiscale routes to supply nutrients through the Kuroshio nutrient stream, p. 105–125. In *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics*, edited by T. Nagai, H. Saito, K. Suzuki, and M. Takahashi, AGU Geophysical Monograph Series 243, AGU-Wiley.
- Nagai, T., G. S. Durán Gómez, D. A. Otero, Y. Mori, N. Yoshie, K. Ohgi, and T. Kobari (2019b): How the Kuroshio Current delivers nutrients to sunlit layers on the continental shelves with aid of near-inertial waves and turbulence. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 6726–6735.
- Nagai, T., G. M. Rosales Quintana, G. S. Durán Gómez, F. Hashihama, and K. Komatsu (2021a): Elevated turbulent and double-diffusive nutrient flux in the Kuroshio over the Izu Ridge and in the Kuroshio Extension. *J. Oceanogr.*, **77**, 55–74.
- Nagai, T., D. Hasegawa, E. Tsutsumi, H. Nakamura, A. Nishina, T. Senjyu, T. Endoh, T. Matsuno, R. Inoue, and A. Tandon (2021b): The Kuroshio flowing over seamounts and associated submesoscale flows drive 100-km-wide 100–1000-fold enhancement of turbulence. *Commun. Earth Environ.*, **2**, 170.
- Nagano, A., and M. Wakita (2019): Wind-driven decadal sea surface

- height and main pycnocline depth changes in the western subarctic North Pacific. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **6**, 39.
- Nagano, A., Y. Yamashita, T. Hasegawa, K. Ariyoshi, H. Matsumoto, and M. Shinohara (2019): Characteristics of an atypical large-meander path of the Kuroshio current south of Japan formed in September 2017. *Mar. Geophys. Res.*, **40**, 525-539.
- Nakamura, H., A. Isobe, S. Minobe, H. Mitsudera, M. Nonaka, and T. Suga (2015): "Hot Spots" in the Climate System—New Developments in the Extratropical Ocean—Atmosphere Interaction Research: A short review and an introduction. *J. Oceanogr.*, **71**, 463-467.
- Nakamura, H., and A. S. Kazmin (2003): Decadal change in the North Pacific oceanic frontal zones as revealed in ship and satellite observation. *J. Geophys. Res. Oce.*, **108**, 3078.
- Nakano, H., H. Tsujino, K. Sakamoto, S. Urakawa, T. Toyoda, and G. Yamanaka (2021): Effects of eddies on the subduction and movement of water masses reaching the 137°E section using Lagrangian particles in an eddy-resolving OGCM. *J. Oceanogr.*, **77**, 283-305.
- Nakanowatari, T., K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi (2007): Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955-2004. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04602.
- Nishibe, Y., K. Takahashi, T. Ichikawa, K. Hidaka, H. Kurogi, K. Segawa, and H. Saito (2015): Degradation of discarded appendicularian houses by oncaeid copepods. *Limnol. Oceanogr.*, **60**, 967-976.
- Nishikawa, S., H. Tsujino, K. Sakamoto, and H. Nakano (2010): Effects of mesoscale eddies on subduction and distribution of Subtropical Mode Water in an eddy-resolving OGCM of the western North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1748-1765.
- Nishikawa, S., T. Wakamatsu, H. Ishizaki, K. Sakamoto, Y. Tanaka, H. Tsujino, G. Yamanaka, M. Kamachi, and Y. Ishikawa (2021): Development of high-resolution future ocean regional projection datasets for coastal applications in Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **8**, 7.
- Nishioka, J., T. Nakatsuka, Y. W. Watanabe, I. Yasuda, K. Kuma, H. Ogawa, N. Ebuchi, A. Scherbinin, Y. N. Volkov, T. Shiraiwa, and M. Wakatsuchi (2013): Intensive mixing along an island chain controls oceanic biogeochemical cycles. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **27**, 920-929.
- Nishioka, J., H. Obata, H. Ogawa, K. Ono, Y. Yamashita, K. Lee, S. Takeda, and 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. USA*, **117**, 12665-12673.
- Nonaka, M., H. Nakamura, Y. Tanimoto, T. Kagimoto, and H. Sasaki (2006): Decadal variability in the Kuroshio-Oyashio Extension simulated in an eddy-resolving OGCM. *J. Climate*, **19**, 1970-1989.
- Ohshima, K. I., and S. Martin (2004): Introduction to special section: oceanography of the Okhotsk Sea. *J. Geophys. Res. Oce.*, **109**, C09S01.
- 岡頭・大林由美子・勝又勝郎・高橋一生・山下洋平・横川太一 (2021): 海洋学の10年展望2021: 深層, 海の研究, **30**, 179-198.
- Oka, E., M. Ishii, T. Nakano, T. Suga, S. Kouketsu, M. Miyamoto, H. Nakano, B. Qiu, S. Sugimoto, and Y. Takatani (2018): Fifty years of the 137°E repeat hydrographic section in the western North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **74**, 115-145.
- 岡英太郎・磯辺篤彦・市川香・升本順夫・須賀利雄・川合義美・大島慶一郎・島田浩二・羽角博康・見延庄士郎・早稲田卓爾・岩坂直人・河宮未知生・伊藤幸彦・久保田雅久・中野俊也・日比谷紀之・寄高博行 (2013): 海洋学の10年展望(1) —日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から—, 海の研究, **22**, 191-218.
- Oka, E., B. Qiu, Y. Takatani, K. Enyo, D. Sasano, N. Kosugi, M. Ishii, T. Nakano, and T. Suga (2015): Decadal variability of Subtropical Mode Water subduction and its impact on biogeochemistry. *J. Oceanogr.*, **71**, 389-400.
- Oka, E., S. Katsura, H. Inoue, A. Kojima, M. Kitamoto, T. Nakano, and T. Suga (2017): Long-term change and variation of salinity in the western North Pacific subtropical gyre revealed by 50-year long observations along 137°E. *J. Oceanogr.*, **73**, 479-490.
- Oka, E., K. Yamada, D. Sasano, K. Enyo, T. Nakano, and M. Ishii (2019): Remotely forced decadal physical and biogeochemical variability of North Pacific Subtropical Mode Water over the last 40 years. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 1555-1561.
- Okamoto, S., T. Hirawake, and S. Saitoh (2010): Interannual variability in the magnitude and timing of the spring bloom in the Oyashio region. *Deep-Sea Res. Part II*, **57**, 1608-1617.
- Okazaki, Y., K. Tadokoro, H. Kuroda, Y. Kamimura, and K. Hidaka (2019): Dietary overlap and optimum prey environments of larval and juvenile sardine and anchovy in the mixed water region of the western North Pacific. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **630**, 149-160.
- Osafune, S., N. Sugiura, T. Doi, T. Hemmi, and S. Masuda (2021): The use of tidally induced vertical-mixing schemes in simulating the Pacific deep-ocean state. *J. Oceanogr.*, **77**, 367-382.
- Priyadarshi, A., S. L. Smith, S. Mandal, M. Tanaka, and H. Yamazaki (2019): Micro-scale patchiness enhances trophic transfer efficiency and potential plankton biodiversity. *Sci. Rep.*, **9**, 17243.
- Qiu, B. (2000): Interannual variability of the Kuroshio Extension system and its impact on the wintertime SST field. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 1486-1502.
- Qiu, B., and S. Chen (2005): Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal timescales. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 2090-2103.
- Qiu, B., and S. Chen (2006): Decadal variability in the formation of the North Pacific Subtropical Mode Water: Oceanic versus atmospheric control. *J. Phys. Oceanogr.*, **36**, 1365-1380.
- Qiu, B., S. Chen, and P. Hacker (2007): Effect of mesoscale eddies on subtropical mode water variability from the Kuroshio Extension System Study (KESS). *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 982-1000.
- Qiu, B., S. Chen, N. Schneider, and B. Taguchi (2014): A coupled decadal prediction of the dynamic state of the Kuroshio Extension system. *J. Climate*, **27**, 1751-1764.
- Qiu, B., S. Chen, and N. Schneider (2017): Dynamical links between the decadal variability of the Oyashio and Kuroshio Extensions. *J. Climate*, **30**, 9591-9605.
- Qiu, B., S. Chen, N. Schneider, E. Oka, and S. Sugimoto (2020): On the reset of the wind-forced decadal Kuroshio Extension variability in late 2017. *J. Climate*, **33**, 10813-10828.
- Qiu, B., S. Chen, L. Wu, and S. Kida (2015): Wind-versus eddy-forced regional sea level trends and variability in the North Pacific Ocean. *J. Climate*, **28**, 1561-1577.
- Qiu, B., and R. X. Huang (1995): Ventilation of the North Atlantic and North Pacific: Subduction versus obduction. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 2374-2390.
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax (2007): Daily high-resolution-blended analyses for sea surface

- temperature. *J. Climate*, **20**, 5473–5496.
- Riser, S. C., and K. S. Johnson (2008): Net production of oxygen in the subtropical ocean. *Nature*, **451**, 323–325.
- Roemmich, D. *et al.* (2019): On the future of Argo: a global, full-depth, multi-disciplinary array. *Front. Mar. Sci.*, **6**, 439.
- Roy, S., and J. Chattopadhyay (2007): Towards a resolution of 'the paradox of the plankton': A brief overview of the proposed mechanisms. *Ecol. Complex.*, **4**, 26–33.
- Saito, H., T. Suga, K. Hanawa, and T. Watanabe (2007): New type of pycnostad in the western subtropical-subarctic transition region of the North Pacific: Transition Region Mode Water. *J. Oceanogr.*, **63**, 589–600.
- Saito, H., A. Tsuda, and H. Kasai (2002): Nutrient and plankton dynamics in the Oyashio region of the western subarctic Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. Part II*, **49**, 5463–5486.
- Saito, M. A., T. J. Goepfert, and J. T. Ritt (2008): Some thoughts on the concept of colimitation: Three definitions and the importance of bio-availability. *Limnol. Oceanogr.*, **53**, 276–290.
- Saito, M. A., M. R. Mellvin, D. Moran, T. J. Goepfert, G. R. DiTulio, A. F. Post, and C. H. Lamborg (2015): Multiple nutrient stresses at intersecting Pacific Ocean biomes detected by protein biomarkers. *Science*, **345**, 1173–1177.
- Sakamoto, T. T., H. Hasumi, M. Ishii, S. Emori, T. Suzuki, T. Nishimura, and A. Sumi (2005): Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high-resolution climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14617.
- Santos, G. M., J. Ferguson, K. Acayler, K. R. Johnson, S. Griffin, and E. Druffel (2011): $\Delta^{14}\text{C}$ and $\Delta^{13}\text{C}$ of seawater DIC as tracers of coastal upwelling: A 5-year time series from Southern California. *Radiocarbon*, **53**, 669–677.
- Sarmiento, J. L., N. Gruber, M. A. Brzezinski, and J. P. Dunne (2004): High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature*, **427**, 56–60.
- Sasaki, H., P. Klein, B. Qiu, and Y. Sasai (2014a): Impact of oceanic-scale interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere. *Nat. Commun.*, **5**, 5636.
- Sasaki, Y. N., S. Minobe, and Y. Miura (2014b): Decadal sea level variability along the coast of Japan in response to ocean circulation changes. *J. Geophys. Res. Oce.*, **119**, 266–275.
- Sasaki, Y. N., and N. Schneider (2011): Decadal shifts of the Kuroshio Extension jet: Application of thin-jet theory. *J. Phys. Oceanogr.*, **41**, 979–993.
- Sasaki, Y. N., and Y. Yamada (2018): Atmospheric response to interannual variability of sea surface temperature front in the East China Sea in early summer. *Clim. Dyn.*, **51**, 2509–2522.
- Sasano, D., Y. Takatani, N. Kosugi, T. Nakano, T. Midorikawa, and M. Ishii (2015): Multidecadal trends of oxygen and their controlling factors in the western North Pacific. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **29**, 935–956.
- Sato, M., and F. Hashihama (2019): Assessment of potential phagotrophy by pico- and nanophytoplankton in the North Pacific Ocean using flow cytometry. *Aquat. Microb. Ecol.*, **82**, 275–288.
- Sato, M., R. Sakuraba, and F. Hashihama (2013): Phosphate monoesterase and diesterase activities in the North and South Pacific Ocean. *Biogeosciences*, **10**, 7677–7688.
- Sato, M., T. Shiozaki, and F. Hashihama (2016): Distribution of mixotrophic nanoflagellates along the latitudinal transect of the central North Pacific. *J. Oceanogr.*, **73**, 159–168.
- Sheldon, R. W., A. Prakash, and W. H. Sutcliffe Jr. (1972): The size distribution of particles in the Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **17**, 327–340.
- Shi, M., X. D. Lin, J. H. Tian, L. J. Chen, X. Chen, C. X. Li, X. C. Qin, J. Li, J. P. Cao, J. S. Eden, J. Buchmann, W. Wang, J. Xu, E. C. Holmes, and Y. Z. Zhang (2016): Redefining the invertebrate RNA virosphere. *Nature*, **540**, 539–543.
- Shiozaki, T., D. Bombar, L. Riemann, M. Sato, F. Hashihama, T. Kodama, I. Tanita, S. Takeda, H. Saito, K. Hamasaki, and K. Furuya (2018): Linkage between dinitrogen fixation and primary production in the oligotrophic South Pacific Ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **32**, 1028–1044.
- Shiozaki, T., K. Furuya, T. Kodama, S. Kitajima, S. Takeda, T. Takemura, and J. Kanda (2010): New estimation of N_2 fixation in the western and central Pacific Ocean and its marginal seas. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **24**, GB1015.
- Shiozaki, T., M. Ijichi, K. Isobe, F. Hashihama, K. Nakamura, M. Ehama, K. Hayashizaki, K. Takahashi, K. Hamasaki, and K. Furuya (2016): Nitrification and its influence on biogeochemical cycles from the equatorial Pacific to the Arctic Ocean. *ISME J.*, **10**, 2184–2197.
- Shiozaki, T., S. Ito, K. Takahashi, H. Saito, T. Nagata, and K. Furuya (2014a): Regional variability of factors controlling the onset timing and magnitude of spring algal blooms in the northwestern North Pacific. *J. Geophys. Res. Oce.*, **119**, 1–13.
- Shiozaki, T., T. Kodama, and K. Furuya (2014b): Large-scale impact of the island mass effect through nitrogen fixation in the western South Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 2907–2913.
- Siegelman, L., M. O'Toole, M. Flexas, P. Rivière, and P. Klein (2019): Submesoscale ocean fronts act as biological hotspot for southern elephant seal. *Sci. Rep.*, **9**, 5588.
- Snyder, S., P. J. S. Franks, L. D. Talley, Y. Xu, and S. Kohin (2017): Crossing the line: Tunas actively exploit submesoscale fronts to enhance foraging success. *Limnol. Oceanogr. Lett.*, **2**, 187–194.
- Stec, K. F., L. Caputi, P. L. Buttigieg, D. D'Alelio, F. M. Ibarbalz, M. B. Sullivan, S. Chaffron, C. Bowler, M. R. d'Alcalá, and D. Iudicone (2017): Modelling plankton ecosystems in the meta-omics era. Are we ready? *Mar. Genomics*, **32**, 1–17.
- Steimle, E. T., E. A. Kaltenbacher, and R. H. Byrne (2002): In situ nitrite measurements using a compact spectrophotometric analysis system. *Mar. Chem.*, **77**, 255–262.
- Suga, T., and K. Hanawa (1990): The mixed-layer climatology in the northwestern part of the North Pacific subtropical gyre and the formation area of subtropical mode water. *J. Mar. Res.*, **48**, 543–566.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2012): Relationship between the path of the Kuroshio in the south of Japan and the path of the Kuroshio Extension in the east. *J. Oceanogr.*, **68**, 219–225.
- Sugimoto, S., K. Hanawa, K. Narikiyo, M. Fujimori, and T. Suga (2010): Temporal variations of the net Kuroshio transport and its relation to atmospheric variations. *J. Oceanogr.*, **66**, 611–619.
- Sugimoto, S., K. Hanawa, T. Watanabe, T. Suga, and S.-P. Xie (2017): Enhanced warming of the subtropical mode water in the North Pacific and North Atlantic. *Nat. Clim. Chang.*, **7**, 656–659.
- Sugimoto, S., B. Qiu, and A. Kojima (2020): Marked coastal warming off Tokai attributable to Kuroshio large meander. *J. Oceanogr.*, **76**, 141–154.

- Sugimoto, S., B. Qiu, and N. Schneider (2021): Local atmospheric response to the Kuroshio large meander path in summer and its remote influence on the climate of Japan. *J. Climate*, **34**, 3571–3589.
- Sukekava, C., J. Downes, H. A. Slagter, L. J. A. Gerringa, and L. M. Laglera (2018): Determination of the contribution of humic substances to iron complexation in seawater by catalytic cathodic stripping voltammetry. *Talanta*, **189**, 359–364.
- Sunagawa, S. *et al.* (2015): Structure and function of the global ocean microbiome. *Science*, **348**, 1261359.
- Suttle, C. A. (2005): Viruses in the sea. *Nature*, **437**, 356–361.
- Suzuki, K., A. Kuwata, N. Yoshie, A. Shibata, K. Kawanobe, and H. Saito (2011): Population dynamics of phytoplankton, heterotrophic bacteria, and viruses during the spring bloom in the western subarctic Pacific. *Deep-Sea Res. Part 1*, **58**, 575–589.
- Suzumura, M., F. Hashihama, N. Yamada, and S. Kinouchi (2012): Dissolved phosphorus pools and alkaline phosphatase activity in the euphotic zone of the western North Pacific Ocean. *Front. Microbiol.*, **3**, 99.
- Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya, and A. Goto (2012): Seasonal evolutions of atmospheric response to decadal SST anomalies in the North Pacific subarctic frontal zone: Observations and a coupled model simulation. *J. Climate*, **25**, 111–139.
- Takagi, H., K. Kimoto, T. Fujiki, H. Saito, C. Schmidt, M. Kucera, and K. Moriya (2019): Characterizing photosymbiosis in modern planktonic foraminifera. *Biogeosciences*, **16**, 3377–3396.
- Takahashi, K., T. Ichikawa, C. Fukugama, M. Yamane, S. Takehi, Y. Okazaki, H. Kubota, and K. Furuya (2015): In situ observations of a doliolid bloom in a warm water filament using a video plankton recorder: bloom development, fate, and effect on biogeochemical cycles and planktonic food webs. *Limnol. Oceanogr.*, **60**, 1763–1780.
- Takahashi, K., T. Ichikawa, H. Saito, S. Takehi, Y. Sugimoto, K. Hidaka, and K. Hamasaki (2013): Sapphirinid copepods as predators of doliolids: their role in doliolid mortality and sinking flux. *Limnol. Oceanogr.*, **58**, 1972–1984.
- Takano, S., M. Tanimizu, T. Hirata, K.-C. Shin, Y. Fukami, K. Suzuki, and Y. Sohrin (2017): A simple and rapid method for isotopic analysis of nickel, copper, and zinc in seawater using chelating extraction and anion exchange. *Anal. Chim. Acta*, **967**, 1–11.
- Takatani, Y., D. Sasano, T. Nakano, T. Midorikawa, and M. Ishii (2012): Decrease of dissolved oxygen after the mid-1980s in the western North Pacific subtropical gyre along the 137°E repeat section. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **26**, GB2013.
- Takeda, S., A. Kamatani, and K. Kawanobe (1995): Effects of nitrogen and iron enrichments on phytoplankton communities in the northwestern Indian Ocean. *Mar. Chem.*, **50**, 229–241.
- Talley, L. D. (2013): Closure of the global overturning circulation through the Indian, Pacific, and Southern Oceans. *Oceanogr.*, **26**, 80–97.
- Tanaka, Y., and T. Hibiya (2017): Effects of Koshu Seamount on the development of baroclinic instability leading to the Kuroshio large meander. *J. Phys. Oceanogr.*, **47**, 2563–2576.
- Thingstad, T. F. (2000): Elements of a theory for the mechanisms controlling abundance, diversity, and biogeochemical role of lytic bacterial viruses in aquatic systems. *Limnol. Oceanogr.*, **45**, 1320–1328.
- Thomas, M. K., C. T. Kremer, C. A. Klausmeier, and E. Litchman (2012): A global pattern of thermal adaptation in marine phytoplankton. *Science*, **338**, 1085–1088.
- Tokinaga, H., Y. Tanimoto, S.-P. Xie, T. Sampe, H. Tomita, and H. Ichikawa (2009): Ocean frontal effects on the vertical development of clouds over the western North Pacific: in situ and satellite observations. *J. Climate*, **22**, 4241–4260.
- Toyama, K., A. Iwasaki, and T. Suga (2015): Interannual variation of annual subduction rate in the North Pacific estimated from a gridded Argo product. *J. Phys. Oceanogr.*, **45**, 2276–2293.
- Tsuda, A., H. Sugisaki, T. Ishimaru, T. Saino, and T. Sato (1993): White-noise-like distribution of the oceanic copepod *Neocalanus cristatus* in the subarctic North Pacific. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **97**, 39–46.
- Tsujino, H., S. Nishikawa, K. Sakamoto, N. Usui, H. Nakano, and G. Yamanaka (2013): Effects of large-scale wind on the Kuroshio path south of Japan in a 60-year historical OGCM simulation. *Clim. Dyn.*, **41**, 2287–2318.
- Tsujino, H., N. Usui, and H. Nakano (2006): Dynamics of Kuroshio path variations in a high-resolution GCM. *J. Geophys. Res. Oce.*, **111**, C11001.
- Tsujino, H., and T. Yasuda (2004): Formation and circulation of mode waters of the North Pacific in a high-resolution GCM. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 399–415.
- Usui, N. (2019): Chapter 9, Progress of studies on Kuroshio path variations south of Japan in the past decade, p. 147–161. In *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics*, edited by T. Nagai, H. Saito, K. Suzuki, and M. Takahashi, AGU Geophysical Monograph Series 243, AGU-Wiley.
- Usui, N., H. Tsujino, Y. Fujii, and M. Kamachi (2008a): Generation of a trigger meander for the 2004 Kuroshio large meander. *J. Geophys. Res. Oce.*, **113**, C01012.
- Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, and Y. Fujii (2008b): Formation process of the Kuroshio large meander in 2004. *J. Geophys. Res. Oce.*, **113**, C08047.
- Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, Y. Fujii, and M. Kamachi (2011): Decay mechanism of the 2004/05 Kuroshio large meander. *J. Geophys. Res. Oce.*, **116**, C10010.
- Vallina, S. M., M. J. Follows, S. Dutkiewicz, J. M. Montoya, P. Cermeno, and M. Loreau (2014): Global relationship between phytoplankton diversity and productivity in the ocean. *Nat. Commun.*, **5**, 4299.
- Wagawa, T., Y. Yoshikawa, and A. Masuda (2010): Bathymetric influences of the Emperor Seamounts upon the subarctic gyre of the North Pacific: examining boundary current dynamics along the eastern side of the mountain ridge with an idealized numerical model. *J. Oceanogr.*, **66**, 259–271.
- Wakita, M., Y. W. Watanabe, S. Watanabe, S. Noriki, and M. Wakatsuchi (2003): Oceanic uptake rate of anthropogenic CO₂ in a subpolar marginal sea: the Sea of Okhotsk. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2252.
- Ward, B. A., and M. J. Follows (2016): Marine mixotrophy increases trophic transfer efficiency, mean organism size, and vertical carbon flux. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **113**, 2958–2963.
- Waterhouse, A. F., J. A. MacKinnon, J. D. Nash, M. H. Alford, E. Kunze, H. L. Simmons, K. L. Polzin, L. C. St. Laurent, O. M. Sun, R. Pinkel, L. D. Talley, C. B. Whalen, T. N. Huussen, G. S. Carter, I. Fer, S. Waterman, A. C. Naveira Garabato, T. B. Sanford, and C. M. Lee (2014): Global patterns of diapycnal mixing from measurements of the turbulent dissipation rate. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 1854–1872.
- Whalen, C. B., L. D. Talley, and J. A. MacKinnon (2012): Spatial and tem-

- poral variability of global ocean mixing inferred from Argo profiles. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L18612.
- Woodd-Walker, R. S., P. Ward, and A. Clarke (2002): Large-scale patterns in diversity and community structure of surface water copepods from the Atlantic Ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **236**, 189–203.
- Wu, L. X., W. Cai, L. Zhang, H. Nakamura, A. Timmermann, T. Joyce, M. J. McPhaden, M. A. Alexander, B. Qiu, M. Visbeck, P. Chang, and B. Giese (2012): Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nat. Clim. Chang.*, **2**, 161–166.
- Wyatt, A. S. J., R. Matsumoto, Y. Chikaraishi, Y. Miyairi, Y. Yokoyama, K. Sato, N. Ohkouchi, and T. Nagata (2019): Enhancing insight into foraging specialization in the world's largest fish using a multi-tissue, multi-isotope approach. *Ecol. Monogr.*, **89**, e01399.
- Xie, S.-P., J. Hafner, Y. Tanimoto, W. T. Liu, H. Tokinaga, and H. Xu (2002): Bathymetric effect on the winter sea surface temperature and climate of the Yellow and East China Seas. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2228.
- Xu, L. X., S.-P. Xie, J. J. McClean, Q. Y. Liu, and H. Sasaki (2014): Mesoscale eddy effects on the subduction of North Pacific mode waters. *J. Geophys. Res. Oce.*, **119**, 4867–4886.
- Xu, L., P. Li, S.-P. Xie, Q. Liu, C. Liu, and W. Gao (2016): Observing mesoscale eddy effects on mode-water subduction and transport in the North Pacific. *Nat. Commun.*, **7**, 1–9.
- Yamaguchi, T., M. Sato, F. Hashihama, H. Kato, T. Sugiyama, H. Ogawa, K. Takahashi, and K. Furuya (2021): Longitudinal and vertical variations of dissolved labile phosphoric monoesters and diesters in the subtropical North Pacific. *Front. Microbiol.*, **11**, 570081.
- Yamamoto-Kawai, M., S. Watanabe, S. Tsunogai, and M. Wakatsuchi (2004): Chlorofluorocarbons in the Sea of Okhotsk: ventilation of the intermediate water. *J. Geophys. Res. Oce.*, **109**, C09S11.
- Yamashita, Y., J. Nishioka, H. Obata, and H. Ogawa (2020): Shelf humic substances as carriers for basin-scale iron transport in the North Pacific. *Sci. Rep.*, **10**, 4505.
- Yamashita, Y., T. Tosak, R. Bamba, R. Kamezaki, S. Goto, J. Nishioka, I. Yasuda, T. Hirawake, J. Oida, H. Obata, and H. Ogawa (2021): Widespread distribution of allochthonous fluorescent dissolved organic matter in the intermediate water of the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **191**, 102510.
- Yang, C., F. E. Leonelli, S. Marullo, V. Artale, H. Beggs, B. B. Nardelli, T. M. Chin, V. D. Toma, S. Good, B. Huang, C. J. Merchant, T. Sakurai, R. Santoleri, J. Vazquez-Cuervo, H.-M. Zhang, and A. Pisano (2021): Sea surface temperature intercomparison in the framework of the Copernicus Climate Change Service (C3S). *J. Climate*, **34**, 5257–5283.
- Yasuda, I. (2004): North Pacific Intermediate Water: progress in SAGE (SubArctic Gyre Experiment) and related projects. *J. Oceanogr.*, **60**, 385–395.
- Yasuda, I., S. Masuda, J. Nishioka, X. Guo, N. Harada, S. I. Ito, and H. Hasumi (2021a): Ocean mixing processes (OMIX): Impact on biogeochemistry, climate and ecosystem. *J. Oceanogr.*, **77**, 1.
- Yasuda, I., S. Fujio, D. Yanagimoto, K. J. Lee, Y. Sasaki, S. Zhai, M. Tanaka, S. Itoh, T. Tanaka, D. Hasegawa, Y. Goto, and D. Sasano (2021b): Estimate of turbulent energy dissipation rate using free-fall and CTD-attached fast-response thermistors in weak ocean turbulence. *J. Oceanogr.*, **77**, 17–28.
- Yasunaka, S., H. Mitsudera, F. Whitney, and S. Nakaoka (2021): Nutrient and dissolved inorganic carbon variability in the North Pacific. *J. Oceanogr.*, **77**, 3–16.
- Yatsu, A. (2019): Review of population dynamics and management of small pelagic fishes around the Japanese Archipelago. *Fish. Sci.*, **85**, 611–639.
- Yatsu, A., S. Chiba, Y. Yamanaka, S. Ito, Y. Shimizu, M. Kaeriyama, and Y. Watanabe (2013): Climate forcing and the Kuroshio/Oyashio ecosystem. *ICES J. Mar. Sci.*, **70**, 922–933.
- Zainuddin, M., H. Kiyofuji, K. Saitoh, and S.-I. Saitoh (2006): Using multi-sensor satellite remote sensing and catch data to detect ocean hot spots for albacore (*Thunnus alalunga*) in the northwestern North Pacific. *Deep-Sea Res. Part II*, **53**, 419–431.
- Zamora-Terol, S., A. Novotny, and M. Winder (2020): Reconstructing marine plankton food web interactions using DNA metabarcoding. *Mol. Ecol.*, **29**, 3380–3395.
- Zheng, L., and Y. Sohrin (2019): Major lithogenic contributions to the distribution and budget of iron in the North Pacific Ocean. *Sci. Rep.*, **9**, 11652.

Decadal vision in oceanography 2021: Mid-latitude ocean

Fuminori Hashihama^{1*}, Shinya Kouketsu², Yoshiko Kondo³, Yoshi N. Sasaki⁴, Shusaku Sugimoto⁵, Kazutaka Takahashi⁶, Takeyoshi Nagai¹, Jun Nishioka⁷, Hakase Hayashida^{8, 9}, and Junya Hirai¹⁰

Abstract

We reviewed the progress of mid-latitude oceanographic research over the past decade, and identified three new research topics for the western North Pacific and proposed observational and analytical techniques to address them. These topics are as follows: (1) multiscale phenomena in western boundary currents and air-sea interaction, (2) transportation of nutrients and iron between the subarctic and subtropical gyres, and (3) biodiversity and biological hotspots of marine organisms. In the case of observational techniques, we discussed the importance of cutting-edge oceanographic measurements, such as floats equipped with microstructure, biogeochemical, and plankton sensors, sensitive chemical measurements, and metagenomic analysis, for data collection across multispatiotemporal scales. The analyses of large datasets from these observations and high-resolution modeling would increase our ability to reveal the oceanic processes at higher spatial and temporal scales than that in the past decade. These comprehensive and interdisciplinary approaches are necessary to progress the mid-latitude oceanography in the next decade.

Key words: future planning, subtropical gyre, subarctic gyre, biogeochemistry, biodiversity

(Corresponding author's e-mail address: f-hash@kaiyodai.ac.jp)

(Received 15 July 2021; accepted 8 September 2021)

(doi: 10.5928/kaiyou.30.5_131)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2021)

-
- 1 Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan
 - 2 Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan
 - 3 Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki, Nagasaki 852-8521, Japan
 - 4 Faculty of Science, Hokkaido University, 10N8W, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan
 - 5 Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aramaki-aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan
 - 6 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan
 - 7 Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 19N8W, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0819, Japan
 - 8 Institute for Marine and Antarctic Studies, University of Tasmania, Australia, 20 Castray Esplanade, Battery Point, Tasmania 7004, Australia
 - 9 Australian Research Council Centre of Excellence for Climate Extremes, 20 Castray Esplanade, Battery Point, Tasmania 7004, Australia
 - 10 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8564, Japan
- * Corresponding author: Fuminori Hashihama
e-mail: f-hash@kaiyodai.ac.jp