

— 総 説 —

## 海洋学の10年展望2021：深層\*

岡 顕<sup>1\*\*</sup>・大林 由美子<sup>2</sup>・勝又 勝郎<sup>3</sup>・高橋 一生<sup>4</sup>・  
山下 洋平<sup>5</sup>・横川 太一<sup>6</sup>

### 要 旨

海洋深層において現在議論されている研究トピックを整理するとともに、今後10年程度の期間で取り組むべき研究の方向性と意義、そしてその遂行に必要な研究基盤について論じた。本稿では物理・化学・生物が分野横断的に関わるトピックとして、とくに深層における物質循環に着目し議論した。具体的には、(1)深層から中層への物質輸送、(2)表層から中深層への有機物の輸送と動態、(3)深層の時間変化の3つの課題を取り上げた。(1)では、これまでの鉛直1次元的な物質輸送の議論から3次元的な物質循環像へと理解を深めるために、とくに太平洋における深層から中層への物質輸送を定量化していく研究の必要性について議論した。(2)では、近年提唱された生物ポンプに関する新しい概念を整理するとともに、素過程についてのプロセス研究と物質循環モデルの高度化に向けた研究の双方からのアプローチの必要性を論じた。(3)では、ゆっくりではあるが確実に進行する将来の深層の変化を把握するには、観測による継続的なモニタリングに加えて、古海洋研究からの知見や数値モデルを用いたプロセス研究を進めていく必要があることを議論した。

キーワード：将来構想，深層，物質循環，海洋深層循環，生物ポンプ

\* 2021年7月15日受領；2021年8月24日受理

著作権：日本海洋学会，2021年

- 1 東京大学 大気海洋研究所  
〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5
  - 2 愛媛大学 沿岸環境科学研究センター  
〒790-8577 愛媛県松山市文京町3
  - 3 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
  - 4 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
  - 5 北海道大学大学院 地球環境科学研究院  
〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西5丁目
  - 6 海洋研究開発機構 超先鋭研究開発部門  
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15
- \*\* 連絡著者：岡 顕  
TEL：04-7136-4384 FAX：04-7136-4375  
e-mail：akira@aoriu.tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

深層の定義としては、物理分野では風の直接の影響がなくなる2,000 m以深、生物分野では太陽光の直接の影響がなくなる200 m以深とすることが多いが、ここでは国際プロジェクト DOOS (Deep Ocean Observing Strategy) での解釈「深層はそれぞれの分野で定義されて一致する必要はない」を踏襲する。本稿では、物理・化学・生物の分野間をまたぐ研究対象として、とくに深層における物質循環という観点から、次の3つの論点を取り挙げる。1つ目の論点は、熱と水に加え、栄養塩や炭素などの海水に含まれるさまざまな物質の深層から中層へ

(下から上へ)の物質循環である。深層における海水循環(深層循環)を説明する物理的プロセスの理解に必要な研究とともに、化学トレーサーを利用した研究の今後の方向性について議論する。2つ目の論点は、とくに有機物に関する表層から中層・深層へ(上から下へ)の輸送と動態についてである。有機物について近年提唱されている新しいポンプの概念と中深層の物質循環を制御する微生物活動に関するプロセス研究の現状を整理するとともに、物質循環モデルの高度化を視野に入れた今後の研究の方向性を議論する。3つ目の論点は、深層における時間変化である。先に挙げた2つの論点は主に深層における物質循環の定常的なバランスについてであったが、その時間変化を理解するために必要な研究を取り挙げる。深層での短周期変動や過去の変化についても触れつつ、将来の気候変化において深層がどのように変化し、その変化が地球表層の環境変化にどのような影響を与えるのか、その理解に必要な視点および今後の研究について議論する。

## 2. 深層から中層への物質輸送

深層における物質循環を理解する上で、深層における海水の流れ、すなわち深層循環に関する研究がその土台となる。データ数が圧倒的に少ない深層の研究はその記述を第一の目的に前世紀から続けられてきた。古くは水温・塩分・溶存酸素の分布から深層海流を推定していたが、船舶断面観測から地衡流計算が可能となり、インバース法や各種シミュレーションの発達とともに定量的な記述が可能となってきた。日本海洋学の重要なフィールドである太平洋に関してはKawabe and Fujio (2010)が一つの集大成といえる。ここ10年の研究を概観すれば、記述が一段落してその物理の定量的理解に向けて観測・シミュレーションの高精度化が進められてきたといえる。深層循環の鍵となる量は鉛直混合である。すなわち、深層循環の上昇流が鉛直混合が強い場所で起こりうることは理論的研究やモデル研究により分かっていたものの、ここ10年で実際の観測データによってその全球分布の詳細が議論されるようになった。2015-2020年に実施された科研費新学術領域「海洋混合学の創設(OMIX)」では、最新の海洋観測とモデリングを両輪と

して、鉛直混合の実態とその影響を明らかにするための研究が展開された(Goto *et al.*, 2021; Yasuda *et al.*, 2021)。中深層における乱流混合の定量化に向けた内部波に関する研究(Ijichi *et al.*, 2020; Onuki *et al.*, 2021; Takahashi *et al.*, 2021)、海底付近での乱流混合の効果を海洋モデルに取り入れる試み(Oka and Niwa, 2013; Tatebe *et al.*, 2018; Kawasaki *et al.*, 2021)なども近年精力的に進められている。日本学術会議のマスタープラン2020に、日本海洋学会が応募した研究計画「深海アルゴフロートの全球展開による気候・生物変動予測の高精度化」が、重点大型計画の1つとして選定されたという事実も、深層循環研究が高精度化・学際化に進んでいることを示す好例である。

一方、これまでの深層循環の全球的な描像は、海水に溶存する各種トレーサー分布に基づいた「Broeckerのコンベアベルト」(Broecker, 2010)で示される、過度に単純化された海洋循環像に強く影響をうけてきた。とくに北太平洋では栄養塩に富んだ深層水が湧昇し、高い生物生産を維持すると漠然と考えられてきた。しかし、海峡部を除き、深層水が表層に直接到達するプロセスは考え難く、深層から中層へ・中層から表層へと栄養塩が輸送される具体的な経路とその支配プロセスを把握する必要がある。西部北太平洋における中層から表層への栄養塩供給過程に関しては、ここ10年で実施された前述のOMIXや文部科学省国家基幹研究開発推進事業「我が国の魚類生産を支える黒潮生態系の変動機構の解明(SKED)」の下での物理・化学パラメータの同時観測等により、大きく理解が進んだ(橋濱ら, 2021, 本特集)。亜寒帯域では、中層循環と縁辺海が関与する栄養塩の輸送機構が示された(Nishioka *et al.*, 2021)。すなわち、北太平洋の広範囲に分布する中層水には、オホーツク海陸棚域から溶存鉄が供給され(Nishioka *et al.*, 2013a; Nishioka and Obata, 2017; Yamashita *et al.*, 2020)、ベーリング海にも跨る亜寒帯循環中層での再無機化に伴い硝酸塩やリン酸塩の栄養塩濃度が高くなることが示された(Nishioka *et al.*, 2020)。また、千島列島やアリューシャン列島の海峡部における強い乱流に伴う鉛直混合により亜表層から有光層に供給される硝酸塩フラックスは、北太平洋亜寒帯全域における有光層への硝酸塩フラックスの半分程度を占めることが示された(Nishioka *et al.*,

2020)。溶存鉄の化学形態に関しても研究が進み、溶存鉄の輸送メカニズムに関する知見が蓄積された (Yamashita *et al.*, 2020; Kondo *et al.*, 2021)。亜熱帯域では、黒潮域における有光層への栄養塩供給プロセスの理解が飛躍的に進んだ (Nagai *et al.*, 2019)。特に、中層から表層への栄養塩輸送に関しては、トカラ海峡での観測や数値実験により、海山周辺で生成される強い乱流混合が重要であることが示された (Nagai *et al.*, 2017; Tsutsumi *et al.*, 2017; Kobari *et al.*, 2020)。一方で、深層から中層への栄養塩供給プロセスについては、前述した Broecker のコンベアベルトの単純化したイメージを刷新するような進展は得られていない。

### 2.1. 海底直上の循環の観測・解明

深層循環に関しては、乱流混合分布を把握するための観測とその分布を決めるプロセスの理解のための研究を引き続き進めていく必要がある。乱流混合は mm 程度の空間スケールの流速を測るの必要があり観測が難しかったが、近年の測器の発達 (乱流微細構造センサーの市場化や周辺の計算機・観測装置の技術革新など) とともにデータが蓄積されてきた。それにより海底に近いほど (とくに平坦ではない「粗い」海底上では) 乱流混合が強いことが分かってきた。観測から明らかになった“海底に近いほど乱流混合が強い”という事実から、海底付近では上昇流ではなく下降流が生じることを主張した理論研究がある (Ferrari *et al.*, 2016)。その理論研究によると、上昇流は“深くなるにつれて乱流混合が弱く”なる場所で起こることになるので、海底のごく近傍にある境界層において生じることになる。つまり全球規模の海洋循環をささえる上昇流は海底境界層付近でのみ生じていて、それは海底地形の形 (深さの関数としての等深線の長さ “hypsometry”) に関係することが示唆されている。また、理想化された推定ではあるが、海底付近の下降流と上昇流がほぼ相殺するものの、全球積分では従来のゆっくりとした湧昇での循環像と同じになるとした研究例もある (Kunze, 2017)。しかしながら、これらの研究の観測による定量的な裏付けはされていない。そもそも海底で生ずる乱流 (いわゆる near-field turbulence) に対しては解像度の低い人工衛星推定の海底地形ではとらえきれない小規模海底地形の寄与が無視できない (Vic *et al.*,

2019) ことも、観測的な裏付けを難しくしている一因である。このような理論先行で観測が追い付いていない現状から、今後の研究において、海底付近における乱流混合の強さや上昇流・下降流についての観測データを蓄積していくことが望まれる。日本に地の利があり有数の強乱流域である伊豆小笠原海嶺などを乱流混合研究のターゲット海域とし、集中的に観測を進めていくことも必要であろう。そのような観測データの蓄積が進めば、前述した仮説の効果が定量的にどれほど重要なのかを評価するためのモデリング研究あるいは理論研究も進展することが期待される。

### 2.2. 深層から中層への栄養塩・微量金属元素の輸送

中層から表層への栄養塩供給過程に関する理解が進んだ一方で、深層から中層への栄養塩供給に関しての理解はあまり進んでいない。Kawabe and Fujio (2010) で示された循環像においても、北太平洋に流入した深層水がどのような経路で上昇して南に戻るのかについては不確実性が大きく (岡ら, 2013), その後の理解も大きくは進展していないのが現状である。北太平洋では、中層の方が深層よりも硝酸塩やリン酸塩濃度は高く、ケイ酸濃度は低い。つまり、深層水と中層水の混合は、前者に関しては中層からの除去、後者に関しては中層への供給となる。特に深層から北太平洋中層水上部へのケイ酸の輸送経路は、珪藻が優占する北太平洋の特徴を決める重要な要素であるが、物理過程を含めて十分に理解されていない。2.1 節に示したように海底直上から中層への湧昇が海底近くを通過するか否かによって海底由来の栄養塩の影響が大きく変化することも考えられる。これからの10年で、深層から中層への上昇流の生じる海域を特定し、観測船による物理観測 (鉛直移流や乱流混合等) および化学観測 (硝酸塩、リン酸塩やケイ酸濃度等) を同時に実施することにより、深層から中層への栄養塩のフラックスを定量化することが必要である。そのためには、栄養塩に加えて、微量元素 (鉄、希土類元素や亜鉛など) のフラックスの見積もりについても精緻化し、数値モデリングも活用することで、ベーリング海やオホーツク海の縁辺海を含めた北太平洋全域における栄養塩・微量金属元素の輸送フラックスを3次的に示していくことが望まれる。また、溶存鉄の化学形態に関する研究も継続し

て進める必要がある。鉄は生物に必須な微量元素の一つであるが、酸素の豊富な海水中では速やかな酸化に伴い吸着除去（スキヤベンジング）されるため、外部からの鉄供給（大気、河川、海水、堆積物、熱水活動）が外洋域の一次生産にとって重要である。さらに溶存鉄の長距離輸送は、外部の鉄供給源から遠く離れた外洋域の一次生産を支える上で重要なプロセスとなる。溶存鉄の化学形態に関して、電気化学的手法、分光学的手法、サイズ分画など様々な手法を用いた評価を行い、溶存鉄の長距離輸送を可能とする化学種の同定、さらにはその生物利用性についても評価を進めることが望まれる。鉄の長距離輸送を担うプロセスについての理解を深めることは、中深層の物質循環の3次元的な描像の構築にもつながるであろう。

### 2.3. 化学トレーサーを用いた深層循環の評価

深層循環を評価する化学トレーサーとしては、溶存無機炭素の放射性同位体比 ( $\Delta^{14}\text{C}$ ) や溶存ヘリウムの安定同位体比 ( $\delta^3\text{He}$ ) が古くから使用されている。 $^{14}\text{C}$  は大気中で宇宙線によって窒素原子から生成され、 $^{14}\text{C}$  を含む  $\text{CO}_2$  は大気-海洋間のガス交換により海水に溶け込む。表層海水が沈み込んだ後、 $^{14}\text{C}$  は半減期 5,730 年で崩壊するが、これは深層循環の時間スケールと比較して長いため、 $\Delta^{14}\text{C}$  は深層水の年齢として扱うことができる。また、ヘリウムについては、大気-海洋間のガス交換に加え、熱水活動からマントル由来のヘリウムが海洋へと供給される。マントル由来のヘリウムは大気由来のものよりも  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比が高いため、 $\delta^3\text{He}$  は深層循環の経路を示すトレーサーとして使うことが可能である (Naveira Garabato *et al.*, 2007)。近年、全球的な海水中の鉄の分布を支配する要因として、海底熱水活動による供給の貢献が多であることが明らかになってきた (Tagliabue *et al.*, 2010; Nishioka *et al.*, 2013b; Resing *et al.*, 2015)。海底熱水活動を起源とする鉄が生物生産に及ぼす影響について、海洋物質循環モデルを用いた議論も進んでいるが (Ardyna *et al.*, 2019)、その実態は未だ定量的には良く理解されていない。今後、この海底熱水起源の鉄の化学形態を含めた移送/除去プロセスを理解し、深層から中層への物質輸送を議論するうえでも、熱水を起源とする  $\delta^3\text{He}$  などの化学トレーサーの活用が欠かせない。

$\Delta^{14}\text{C}$  と  $\delta^3\text{He}$  の観測結果は、データセットとして公開されており (Jenkins *et al.*, 2019; Olsen *et al.*, 2019)、 $\Delta^{14}\text{C}$  に関しては自然起源と核実験起源を区別した全球グリッドデータも公開されている (Key *et al.*, 2004)。ただ、 $\Delta^{14}\text{C}$  の全球グリッドデータには系統的なエラーが含まれることも指摘されており (DeVries and Holzer, 2019)、使用するデータセットには十分な注意が必要である。データセットをはじめとした  $\Delta^{14}\text{C}$  や  $\delta^3\text{He}$  の観測結果は、インバースモデルなどを用いた深層循環の速度やパターン、マントル由来  $^3\text{He}$  フラックスを評価する研究に用いられている (Gebbie and Huybers, 2012; Khatiwala *et al.*, 2012; Schlitzer, 2016; Holzer *et al.*, 2017; DeVries and Holzer, 2019; Jenkins, 2020)。これらのトレーサーとモデルを組み合わせたここ 10 年の研究から、マントル由来  $^3\text{He}$  フラックスの見積もりに関しては進展があったが (Schlitzer, 2016)、それを深層循環の逆推定に利用する (DeVries and Holzer, 2019) など、化学トレーサーを深層循環の定量化につなげていく研究の進展の余地はまだ多く残されている。

人為起源物質であるクロロフルオロカーボン類 (CFCs) についても、深層循環の経路や流量を推定する上で有用なトレーサーである (Orsi, 2002)。これまでは、とくに深層水の形成域に近い北大西洋や南大洋において活発に利用されてきたが、深層水の形成域から離れた太平洋にもやがてそのシグナルが検出されると考えられる。今後そのシグナルを継続的にモニタリングすることができれば、太平洋での深層循環の経路や流路を推定する上で重要なデータとなるであろう。

ここ 10 年で、深層循環や中層循環を評価できる新たな化学トレーサーとして、腐植様蛍光性溶存有機物 ( $\text{FDOM}_H$ ) に関する研究も進んだ。 $\text{FDOM}_H$  は外来性 (河川水や堆積物由来) と自生性 (海洋微生物由来) があり、太陽光により分解されるが、生物分解は受け難い。このような特徴から、太陽光の影響を受けない中深層において水塊混合のトレーサーとして有用である (Amon *et al.*, 2003; Nelson *et al.*, 2007)。北太平洋中層に存在する  $\text{FDOM}_H$  中には pre-formed  $\text{FDOM}_H$  が存在する、すなわち、表層に存在していた  $\text{FDOM}_H$  がそのまま海洋内部に輸送されていることも示されており (Yamashita *et al.*, 2021)、保存的な化学トレーサーとして活用できる可能

性が示唆される。また、 $FDOM_H$  はCTDに接続可能な蛍光センサーを用いることにより、水温・塩分と同じ解像度のデータを取得できる点が利点である(神田ら, 2013)。外洋域におけるCTDやグライダー、プロファイリングフロートに搭載されたセンサーを用いた $FDOM_H$ の観測は、ここ10年で増加している(Xing *et al.*, 2012; Yamashita *et al.*, 2015; Nelson and Gauglitz, 2016; Cyr *et al.*, 2017; Shigemitsu *et al.*, 2020)。特に、Shigemitsu *et al.* (2020) は、インド洋中深層における $FDOM_H$ と見かけの酸素消費量の関係は密度帯によって異なることを観測しており、センサーによる $FDOM_H$ の観測により中深層循環の理解が進むことが期待される。DeVries and Holzer (2019) では $\Delta^{14}C$ と $\delta^3He$ の2つのトレーサーを用いて深層循環を評価したが、さらに新たな化学トレーサーとして先に述べた $FDOM_H$ やアルゴン(Holzer *et al.*, 2019)、垂鉛(Vance *et al.*, 2019)、ネオジウム同位体比や希土類元素(Fliedert *et al.*, 2012; Oka *et al.*, 2021)など複数の化学トレーサーを用いることで、深層から中層への上昇流および深層循環場をより正確に評価できる可能性もある。GEOTRACES計画などの国際観測計画の推進や協力を通じて、観測データの蓄積をすすめるとともに、さまざまなトレーサーに関するモデリング研究を日本においても今後活性化させていくことが望まれる。

2.1節で取り上げた強乱流域である伊豆小笠原海嶺において、栄養塩や鉄と同時に、化学トレーサーを重点的に観測することは、深層から中層への物質輸送を定量化する上でも有効である。また、底層由来の高濃度(高密度)なトレーサーとして、堆積物由来の物質が有効かもしれない。上昇流が生じる際に堆積物を巻上げることは十分考えられ、強い上昇流が生じている領域では濁度が高くなり、堆積物間隙水由来の $FDOM_H$ の濃度が高くなる(Chen *et al.*, 2016)ことが予想される。また、後者に関しては、堆積物間隙水中で高濃度な $FDOM_H$ が拡散で水柱に輸送されることも考えられるため、上昇流が堆積物を巻上げるほど強くない場合でも検出できる可能性がある。これらのパラメータは、センサーにより連続観測可能な点を強調しておく。また、近年の研究から、熱水域および底層付近で顕著な微生物量の増加や、特定の代謝機能を持った微生物の存在、特異的な群集構造が確認されているため(Nunoura *et al.*, 2015; Hiraoka *et al.*,

2020)、微生物パラメータ(生物量、群集の系統組成および機能組成)をトレーサーとして利用できる可能性も指摘されている。今後、上昇流が生じていると考えられる海域(伊豆小笠原海嶺が好例)において、物理・化学・生物の多分野にわたる観測を展開するなどして、太平洋における3次元的な物質循環像の構築に資するデータを蓄積していくことが望まれる。

### 3. 表層から中深層への有機物の輸送と動態

前節では深層から中層への物質輸送に注目したが、本節では表層から中深層への物質輸送、いわゆる生物ポンプに関するプロセスを取りあげる。海洋の炭素循環を考える際には、有機物ポンプ(有機物の沈降・分解に伴う輸送)、アルカリポンプ(炭酸カルシウム殻の沈降・溶解に伴う輸送)、溶解ポンプ(大気海洋間 $CO_2$ フラックスに伴う輸送)など、さまざまなポンプの概念が用いられる(Sarmiento and Gruber, 2006; 岡, 2018; Oka, 2020)。生物ポンプとは、生物が関わるポンプ全般(有機物ポンプとアルカリポンプの両者)を指すことも多いが、本稿ではとくに有機物ポンプに着目する。この10年で提唱された有機物ポンプに関するいくつかの新しい概念など、現状の研究について整理するとともに、今後10年で進めるべき研究の方向性について議論する。なお、有機物ポンプとして一般にイメージされる粒子の自重での沈降に伴う鉛直輸送プロセスはBoyd *et al.* (2019)に従い、重力生物ポンプ(biological gravitational pump)と呼ぶ。また、有機物ポンプに関連したトピックとして、中深層の微生物活動による有機物生成(炭素固定)および微生物炭素ポンプについても取り上げる。表層から沈降してくる有機物は深度とともに減少するため、有光層以深では基本的には有機物の分解が起こる場所となるが、炭素固定は中深層に新たに生じる有機物供給源としての役割がある。微生物炭素ポンプは、微生物が難分解性溶存有機物を生成するなどして炭素を隔離する過程であり、とくに中深層においては有機物ポンプを変質する役割がある。この節では表層から中深層への有機物輸送、中層および深層の微生物活動による物質の変化について取りあげたうえで、全球規模の炭素循環モデルを念頭にモデルの高度化と生物学的プロセスの関係について言及する。

### 3.1. 表層から中深層への有機物輸送

重力生物ポンプによる沈降粒子の輸送フラックスは有機物分解により深さとともに減衰する。観測データから得られた経験式である Martin カーブでは、その減衰率をべき乗関数によって数式化し、その輸送効率をべき指数である“b”で評価した (Martin *et al.*, 1987)。その後、その研究では、減衰率を指数関数を用いて評価すること (Armstrong *et al.*, 2001; Pavia *et al.*, 2019) や、水深 A から水深 B の間を分解されずに鉛直輸送される沈降粒子の割合である Transfer efficiency を用いて評価することも提案されている。近年の研究成果により、b や Transfer efficiency には海域依存性があり、特に亜表層の水温や溶存酸素濃度に関連した従属栄養微生物の活性により決定されていることが指摘された (Marsay *et al.*, 2015; Honda, 2020)。また、沈降粒子中の従属栄養微生物の生産速度が測定され、水温および溶存酸素濃度の低い亜寒帯海域の方が、亜熱帯海域よりも低いことも示された (Yamada *et al.*, 2012)。しかし、Transfer efficiency を制御する微生物学的要因に関する評価は十分であるとは言えず、今後も微生物生物量および生産速度の観測を継続し、さらに微生物 DNA/RNA 解析を基にした有機物分解・生成を担う群集・遺伝子構造解析研究の展開が望まれる。また、Martin カーブや Transfer efficiency を求める際の基準水深 A や B を変えると、Transfer efficiency が大きく異なることも指摘されている (Marsay *et al.*, 2015; Buesseler *et al.*, 2020)。近年、国際 GEO-TRACES 計画や米国の大規模プロジェクト (EXPORTS) では、広域スケールにおける重力生物ポンプの定量化を目指し、集中的観測・数値モデリングが実施されている (Siegel *et al.*, 2016; Hayes *et al.*, 2018; Pavia *et al.*, 2019)。日本においても、炭素循環モデルなどに必要な定式化も視野に入れ、生物地球化学のプロセスを考慮した適切な基準水深 (有光層や混合層下部など) を決定し、分野横断型の集中的な観測・モデリング研究を行うことが望まれる。

生物起源オパール、炭酸カルシウム、陸起源鉱物粒子が沈降粒子の密度を大きくし沈降速度を高めるというバラスト効果に関しては、重力生物ポンプの効率を決定する上で重要な因子であるとの報告が多くなされている

(Weber *et al.*, 2016; DeVries and Weber, 2017; Sukigara *et al.*, 2019)。バラスト効果を基に有機物分解性や沈降速度から沈降粒子を 2 成分に区別して考えることもある (Armstrong *et al.*, 2001; Riley *et al.*, 2012; DeVries and Weber, 2017; Pavia *et al.*, 2019)。しかしながら、バラストの種類や海域依存性に関しては十分な理解が得られているとは言い難い (Cram *et al.*, 2018)。バラスト効果に関しても観測、実験、数値モデルなど様々な手法を用いた研究を継続し (Oka *et al.*, 2008; Wilson *et al.*, 2012)、その季節性や海域依存性を含めた統合的な理解が望まれる。長期間の炭素隔離が可能な海底への沈降粒子の堆積という点から考えると、沈降粒子中および堆積物中の難分解な有機物に関して、その生成機構を明らかにすることは重要である。そのような知見を積み上げていくことで、将来あるいは過去のような異なった気候状態における重力生物ポンプの変化についての議論も進めていくことができるかと期待される。

有機物ポンプに関しては、新しい観測やデータの再解析、栄養塩濃度を用いた診断解析、数値モデルなど様々な研究が実施され、前述した重力生物ポンプに加えて、新たな有機物ポンプに関しても理解が進み、整理されてきた (Boyd *et al.*, 2019)。特に、冬季鉛直混合や渦、中層水や深層水形成に伴う従来は重力沈降しない有機物の物理的輸送や動物プランクトンの鉛直移動に伴う能動的輸送の定量評価が進み、重力生物ポンプに対してこれらの過程は Particle-Injection Pumps (PIPs) と称された (Boyd *et al.*, 2019)。この PIPs の寄与によって、従来からの問題となっていた中層に生息する動物プランクトン・微生物の炭素要求量と、重力生物炭素ポンプによる中層への炭素供給量とのミスマッチがある程度解消されるとの指摘もある (Boyd *et al.*, 2019)。季節や対象水深、海域によって異なるが、平均で PIPs と重力生物ポンプを足した全有機物粒子輸送フラックスの 40% を PIPs が担うと見積もられた (Boyd *et al.*, 2019)。PIPs には、沈まない粒子による輸送、動物プランクトンによる輸送、さらに魚類による輸送のプロセスが含まれる。以下でそれぞれについて取り上げる。

海水中には、自重で沈降するにはサイズや密度が小さすぎる“沈まない”懸濁粒子や溶存有機物も存在する。サブメソスケールの渦など海洋物理過程に伴う懸濁粒子

の輸送に関する理解は、光学的粒子測定センサー観測により飛躍的に進展した (Omand *et al.*, 2015)。冬季鉛直混合や渦、中層水や深層水形成に伴う溶存有機物の鉛直輸送に関する理解も進み (Hansell *et al.*, 2009; Emerson, 2014; Fernandez-Castro *et al.*, 2019; Resplandy *et al.*, 2019)、全海洋平均では、有光層下部における有機物フラックスの20%を溶存有機物が占めると見積もられている (Hansell *et al.*, 2009; Roshan and DeVries, 2017)。一方で、有光層内では分解され難い溶存有機物は亜表層へ輸送されたのち、微生物群集による従属栄養的な過程により速やかに分解されると考えられている (Letscher *et al.*, 2013, 2015; Calleja *et al.*, 2019) が、その分解性を制御する要因 (栄養塩濃度、微生物群集と溶存有機物組成との関係) は良く分かってない。栄養塩濃度や微生物群集組成を制御した分解実験 (Letscher *et al.*, 2015)、懸濁粒子および溶存有機物と微生物群集組成の時系列観測 (Uchimiya *et al.*, 2018) などにより、その制御要因が明らかになることが望まれる。また、亜表層の比較的長い時間スケールの海洋循環 (~数10年) における溶存有機物の分解速度を評価するには、時間的・空間的に高解像度な溶存有機物の観測 (Pachiadaki *et al.*, 2017; Lopez *et al.*, 2020) や観測結果のデータベースの構築も重要である。米国の研究者を中心に溶存有機炭素濃度のデータベース化の動きが進んでおり (Hansell *et al.*, 2021)、その充実が望まれる。また、溶存有機炭素濃度の僅少な変化を精確に求めるには、現在の分析法よりも高精度かつ高確度で溶存有機炭素濃度の分析が可能となる湿式酸化法の改良や新手法の開発を行うことも必要である。

生物の鉛直移動に伴う能動的な物質輸送については、近年、亜寒帯性大型カイアシ類が表層で脂質を蓄積し深層で越冬中に呼吸や死亡で炭素を輸送する季節的な鉛直移動を通した Seasonal Lipid Pump (SLP; Jónasdóttir *et al.*, 2015) の重要性が指摘され始めている。太平洋、大西洋亜寒帯域においては、SLPに関する観測が実施され、鉛直物質輸送に関わる SLP の寄与が量的に見積もられている (Bradford-Grieve *et al.*, 2001; Kobari *et al.*, 2003)。この炭素輸送過程は表層から個体が能動的に 500 m ~ 1,000 m 以深に移動するため、沈降に伴う減衰が小さく、また隔離効果 (期間) が高いと考えられている。さらに、成体雌が越冬後翌春表層に再浮上し産卵す

る大西洋種 (*Calanus* 属) と異なり、北太平洋種 (*Neocalanus* 属) は深層 (1,000 m 以深) で産卵後に死亡するため、輸送量・効率は北太平洋で高くなることが予想される。*Neocalanus* 属の表層での動態に加えて、越冬中の死亡率や加入過程 (深層で孵化し表層に出現するまでの初期ステージは卵黄栄養で成長) に与える深層環境の影響解明は、表層の食物網構造だけでなく深層への物質 (炭素) 輸送動態の将来予測にも重要である。

また、日周鉛直移動によって表層で摂餌を行い、中層へ移動する生物群 (動物プランクトン、マイクロネクトン) はほぼ全ての海洋に分布しており、これらの生物群により輸送される炭素量はセジメントトラップによる炭素輸送量見積もりの30%程度にも達する可能性が示され、その重要性が指摘されている (Boyd *et al.*, 2019)。とくに魚類マイクロネクトンの日周鉛直移動に伴う輸送は有光層から移出する炭素の平均16%に相当すると見積もられているが (Saba *et al.*, 2021)、実態を評価するための定量的知見が不足している。とくにプランクトンに比べて遊泳能力の高いマイクロネクトンでは、ネット逃避が大きな問題となり、正確な輸送量計算の妨げとなっている。この点を克服するためには、採集効率の高いネットによる定量採集 (Hidaka *et al.*, 2001) に音響、画像、環境DNA解析などを組み合わせた調査 (Benoit-Bird and Au, 2006; Easson *et al.*, 2020; Klevjer *et al.*, 2020) による基礎的な知見を充実させると同時に、これらのデータに基づいた、より簡便で精度の高い推定手法の開発が必要である (Proud *et al.*, 2019; Behrenfeld *et al.*, 2019)。また、種多様性を考慮した鉛直移動や食性、代謝 (呼吸・排泄) に関する知見の集積に加えて、回遊や生活史など時空間的なスケールを拡大した調査に基づく生態理解の進展が将来予測において重要である。

有機物ポンプを考えるうえでは、中深層において沈降粒子は、分解されるだけでなく、変質することについても留意が必要である。モデル有機物粒子を用いた実験で、粒子に付着した従属栄養微生物が粒子中の有機物を分解することで有機物粒子の空隙率が大きくなることや、ある種の付着細菌の産生する粘着性物質により粒子の結合が促進されて粒子が大型化する場合があることが報告されている (Yamada *et al.*, 2013, 2016)。前者では粒子の密度が低下するため沈降速度が小さくなり、後者では

粒子の大型化により沈降速度が大きくなる。有光層下に分布する中層性動物プランクトンにはマリンスノー食者も多い。分解されながら沈降してきたマリンスノーが動物プランクトンに摂餌され、沈降速度の大きな糞粒として排泄されれば、下層への物質輸送が促進されることになる (Fender *et al.*, 2019)。一方ここで同化された有機物の多くは、呼吸や死亡によって中層で無機化され、炭素隔離に寄与する。動物プランクトンの種により異なったタイプの沈降粒子を食べる可能性もあり、沈降粒子の組成と動物プランクトン群集組成の組み合わせは中層以深への炭素輸送の収支に影響を与えると考えられる (Hannides *et al.*, 2020)。さらに、凝集体のような粒子は、物理的な力によって、バラバラになったり (小型化)、衝突により大型化する可能性がある。海洋内部での乱流混合等の水の動きに伴う粒子の状態の変化と生物活動による粒子そのものの変質は、いずれも物質輸送の定量化に重要な要素であり、研究の進展が望まれる。

以上のように、従来の重力生物ポンプに加えて、新しい有機物ポンプ (PIPs) に関する証拠や情報の蓄積は進んできたが、海域や季節の違いによる各ポンプの貢献度の違いについては、整理されていない点が多い。今後は、それぞれの海域について各ポンプによる有機物の鉛直輸送フラックスを定量化していくと同時に、それらの海域や季節毎の特徴や異同が明らかにされることが望まれる。

### 3.2. 中層および深層の微生物活動による物質の変化

ここ 10 年ほどの間の表層から深層までの精力的な観測の実施と、分子生物学的な解析法の発達普及や質量分析計などの分析機器・手法の高度化により、中層・深層の微生物群集やその機能に関する情報が蓄積されてきた (Nunoura *et al.*, 2015)。その結果、中深層における微生物活動は、必ずしも表層から輸送される有機物に頼ったものに限られないこと、時空間的にダイナミックに変化している可能性があることなども示されている (Herndl and Reinthaler, 2013; Yokokawa *et al.*, 2013)。

太陽光が届かず分解が卓越する中深層において、アンモニア酸化菌や亜硝酸酸化菌が炭素固定により有機物を生成することが明らかとなってきた (Herndl *et al.*, 2005; Pachiadaki *et al.*, 2017)。海洋における炭素固定微生物に関しては、中層に生息する古細菌膜脂質の炭素安定同

位体解析によっても明らかにされている (Hansman *et al.*, 2009)。また、炭素固定を担う古細菌の単離 (Könneke *et al.*, 2014)、化学独立栄養古細菌集積培養でのアンモニアの消費・亜硝酸塩の増加 (Wuchter *et al.*, 2006)、中深層生態系における化学独立栄養古細菌の時空間分布観測 (Agogué *et al.*, 2008; De Corte *et al.*, 2009; Nunoura *et al.*, 2015) などの結果からも、古細菌が中深層での炭素固定を担い、その規模が炭素・窒素循環過程を考える上で無視できないほど大きいことが明らかになってきている。現在では炭素固定は中深層生態系で起きる普遍的な現象として理解されている。分子生物学的な手法の適用により、微生物 DNA 情報から無機炭素固定機能を持つ細胞の定性的な時空間分布が明らかになりつつある (Nunoura *et al.*, 2015)。一方で、炭素固定速度等の定量的なデータの取得には、放射性同位元素を使用したトレーサー法の使用が必要なため、船上での実施に制限がかかることも多い。炭素固定は中深層生態系における新たな有機物生産であり、中深層物質循環の主要過程である可能性が高い。その定量的解析に耐えうる観測およびデータの蓄積が期待される。

微生物炭素ポンプを介した易分解性有機物から難分解性溶存有機物の生成 (Jiao *et al.*, 2010) のプロセスに関しても理解が進んだ。中深層に棲む微生物や沈降粒子に付着している微生物は微生物炭素ポンプを駆動する。沈降粒子の分解過程においても難分解性溶存有機物は生成されるため、中深層における微生物炭素ポンプの定量化は、重力生物ポンプを介した海洋炭素循環の理解とその変動予測にとっても重要である。ここ 10 年の高分解能な質量分析計を用いた溶存有機物の解析により、従属栄養微生物による難分解性溶存有機物の生成機構が評価された (Koch *et al.*, 2014; Lechtenfeld *et al.*, 2015; Zark and Dittmar, 2018)。また、微生物群集の中で、ある特定の細菌種が微生物炭素ポンプに大きく寄与していることを示唆する実験結果も得られている (Noriega-Ortega *et al.*, 2019; Goto *et al.*, 2020; Ortega-Retuerta *et al.*, 2021)。しかし、微生物炭素ポンプの定量的な評価には至っていない (Robinson *et al.*, 2018)。難分解性溶存有機物の生成プロセスには、海洋微生物からの直接的排出やその死滅に伴う多様な間接的排出が考えられる (Carlson and Hansell, 2015) が、まずは難分解性成分の生成に関して



量的に主要なプロセスを明らかにする必要がある。次に、生成される難分解性成分の全量と関係がある鍵分子(鍵成分)を同定し、培養実験などから両者の定量的関係を構築することが重要であろう。また、微生物に関しても、難分解性成分の生成フラックスを制御し得る鍵種や鍵遺伝子の同定が必須である。

こうした難分解化の結果として、深層においては従属栄養微生物にとって利用しやすい有機物は少ないであろう。また、中深層における炭素固定により生産される有機物は、表層の一次生産に由来する有機物と質的に同じとは限らない。したがって、中深層の従属栄養微生物群集は、表層の群集に比べて様々な有機物を効率よく利用している可能性がある。近年、深層の微生物群集では、表層の群集に比べて代謝系遺伝子の多様性が高いことや(Coutinho *et al.*, 2021; Sebastián *et al.*, 2021)、細胞外に分泌される酵素の重要性が高いことなども示されている(Zhao *et al.*, 2020)。今後、表層・中層・深層の微生物群集構造や物質代謝能をより定量的に見積もり、水塊構造と合わせて解析することで、水柱全体での物質動態の三次元的な理解に繋げていくことが望まれる。さらに、温暖化・酸性化・貧酸素化などの環境変動に中深層の微生物群集がどのように応答し、物質輸送をどのように変化させるのかについての観測・実験による評価やそれを基盤とした予測モデル構築へと繋げていくことが期待される。

### 3.3. 素過程の追求と物質循環モデル

上述した生物の関わる物質輸送を全球の物質循環モデルへ適用する際には、それらプロセスの定量化・定式化あるいは関連パラメータの定量的観測が必要である。ただ、生物学的なプロセスの解明やそれぞれの素過程に関する課題の追求という方向性と、物質循環モデルへの適用という方向性は、相容れない側面がある。この隔たりは、モデル研究とプロセス研究との隔たり、あるいは異なる分野間における隔たりであるともいえる。海洋物質循環の包括的な理解と予測のためには、そのようなギャップを認識しつつ双方の研究を進めていくことが重要であろう。そのためのひとつの視点として、生物を介した物質循環過程解析の項目とその理解段階にいくつかの階層を設定して生物ポンプを以下に整理してみる。

- 1) 海洋観測によって得られた観測値とそのパターンの記述(Martin カーブ, レッドフィールド比, 栄養塩・有機物濃度など; Sarmiento and Gruber, 2006; 実測可)
- 2) パターンの制御機構(水温・溶存酸素濃度・深度等, バラスト輸送, 物理・化学的パラメータとの相関など; Hasumi and Nagata, 2014; 実測可)
- 3) 物質循環過程における生物群集の機能(一次生産, 有機物分解, 無機栄養塩再生等; 実測可)
- 4) パターンの制御機構を構成する生物群集の記述(生物量・増殖速度等の生物群集パラメータ; 実測可)
- 5) 生物群集の環境応答(生物群集パラメータの変動と物理・化学パラメータとの相関および変動要因の抽出; 解析可)
- 6) 個体群の環境応答(個体群の生物量・活性量等の定量とその変動要因の抽出; 個体群の観察およびその定量そのものが難しく, 観察技術の進展が必要)
- 7) 個体の環境応答(個体の生物量・活性量等の定量とその変動要因の抽出; 個体の観察およびその定量法が皆無であり, 観察技術の革新的進展が必要)

階層が1)に近いほど単純な記述でモデルへの組み込みが容易であり、階層が高くなるほど生物学的な記述が増え(機能群→群集→個体群→個体)、現象をより詳細に理解できる反面、モデルへの適用が困難になる。具体的には、現状の全球物質循環モデルでは観測値から導き出された経験的な式であるMartinカーブに基づき深層への炭素の輸送過程を表現しているが、生物ポンプを駆動する素過程の理解を進めるには、より高い階層に踏み込むことが必要となる。

例えばMiki(2020)では、水域生態系での生物を介した主要物質循環過程(Classical grazing food chain, Biological pump, Microbial loop, Microbial carbon pump, Viral shunt, Mycoloop)とその繋がりを1つの図で示している。水域生態系を理解する上ではこの俯瞰的な理解が非常に重要である。また微生物量、多様性や機能を一元的に理解する手法として数理モデル(Miki *et al.*, 2008; Miki, 2020)の積極的な活用も必須である。生物学的な理解(素過程の解析)が深まると物質循環過程はさらに複雑になるが、モデル化においてそれらすべてを考慮することは現実的には不可能である。モデル化の際には、

これらの複雑な過程を把握した上で、シミュレーションのターゲットとなる現象に必要な最低限となるプロセスを見極め、モデルの改良・高度化を進めていくことが必要である。モデル化のためにはそれぞれのプロセス(素過程)への深い理解が必要となる一方、素過程の解析においては全球炭素循環に果たす役割を意識しながら進めていくことも大切であろう。

## 4. 時間変化する深層

### 4.1. 深層における数十年程度あるいはそれより短周期の変動

2.1節で紹介した「ゆっくりと湧昇する上昇流」から「海底近くの下流流と海底地形をすりぬける上昇流」というイメージの変化は、のっぺりとした矢印でしばしば描かれる外洋の深層流にも及んでいる。フロートや係留系を用いた観測では従来西岸に集中していると信じられていた境界流が実は岸から離れた内部にも及び、それも渦運動に満ちあふれていることが示されている(Bower *et al.*, 2009; Miyamoto *et al.*, 2020)。この性質はすなわち(1)一回きりのCTD断面に無流面を仮定して推定した輸送量には相当な誤差があること(2)西岸付近だけの係留系で推定された「深層西岸流」の輸送には相当な誤差があることを示している。実際数値モデルによる見積もり(Wunsch and Heimbach, 2013)によると、断面の流量を正確に推定するには10年以上の観測時間が必要となる。従来はこれをインバース法などなんらかのスムージングで代替してきたが(Kawabe and Fujio, 2010)、これからの10年は乱流を直接観測してその効果を定量化する必要がある。ここ数年でそのための重要な観測機器である深層フロートが実用化の域に達してきた(Roemich *et al.*, 2019)。これらのフロートを用いた水温・塩分および漂流速度のデータを用いて海洋大循環の「後半部分」を担う太平洋子午面循環の定量化につながる研究を進めていく必要がある。またその水温、塩分、流量の時空間変動を理解・予測するための観測およびモデリング研究を進展させていく必要がある。

深層における物質循環についての全球的な描像を正しく描くには、各観測データに内在する短周期変動にも留

意する必要がある。それぞれの「点」観測のデータにはそのような短周期の変動が含まれることになるからである。また、3節で取り扱った各種生物ポンプの評価は鉛直1次元モデルを(暗に)仮定して行われることが多いが、実際の海水循環は3次元であり時間変化も考慮すれば4次元である。たとえば、溶存酸素を生物活動量の指標として用いるにはその水塊にそった変化を積分した効果となるので、水塊の4次元的な挙動の履歴が分かっていると有用な情報とならない。それには物理観測・化学トレーサーの利用が必要となる。水塊の4次元の挙動は現在では数値シミュレーション、同化モデル、観測データから推定されるが、信頼できる空間スケールは100 km以上、現実的には1,000 km程度であろう。生物・化学観測は係留観測に代表されるように「点」観測で、空間的にはどれほどの代表性を持つのか検討する必要がある。たまたま高濃度の「パッチ」内で観測した値を1,000 kmの代表とするとオーダー以上の誤差となるであろう。この問題は10年と言わず今後長い時間をかけて克服していくべきであるが、まず有力なのはセンサー観測によってデータ数を増やすことである。具体的にはBGC Argoフロート(平井ら, 2021, 本特集)に代表されるクロロフィル $a$ 、後方散乱光、溶存酸素、窒素化合物などのデータが考えられる。また、近年用いられてきているCTDに取り付け可能なFDOMセンサーもデータ増加に大いに貢献するポテンシャルを持つ(2.3節参照)。

深層環境の短周期変動が生物過程に与える影響については、底生生物において比較的知見が蓄積されている。表層から移出する植物プランクトンのフラックスは水深4,000 mの海底に40日程度で及ぶことから(Billett *et al.*, 1983)、近年の気候変動の影響(例えば表層のフラックス変動)が速やかに深層の生態系に及んでいることは疑いようがない(Danovaro *et al.*, 2014)。深海底への有機物供給は一様ではなく、表層の生産性に加えて、近年は地形に起因した水平方向からの餌料供給の影響が大きくなったことがわかってきた(Smith *et al.*, 2001)。とくに大陸棚縁辺部の深層や海底谷では陸域における嵐や洪水に伴う有機物供給が多く、これに依存した生物群集が分布していることが報告されている(De Leo *et al.*, 2010)。このような群集にはセルロース分解能を持つものも多く、陸域から海洋生態系への有機物輸送経路として注目されてい

る (Selvaraj *et al.*, 2015)。定点観測が比較的容易な底生生物の短周期変動は、変化を捉えることが難しい水柱内の諸過程変動の累積的な影響を反映しているともみることが可能。今後それぞれの専門分野の研究者が協同することで、深層環境の短周期変動の理解はより深まると考えられる。

#### 4.2. 深層の過去の長期変動

将来の気候変化における深層の役割を理解する上で、過去に深層がどのような変化をしたのかを知るための古気候・古海洋研究からのアプローチも、重要かつ魅力的な研究テーマである。例えば、大西洋深層循環についての過去1,000年間の変動を記録した古気候データによると、最近100年は大西洋深層循環の強さが最も弱い時期にあるとの指摘がされている (Caesar *et al.*, 2021)。また過去150年間では、1960年以降にその弱体化が顕著になっていることを指摘する研究が近年報告されている (Thornalley *et al.*, 2018)。さらに、RAPID-MOCHA 観測アレイの展開により2004年以降の大西洋深層循環の強さに関する定量的な観測データが蓄積され (Cunningham *et al.*, 2007)、長期トレンドに比べて年々の短期変動が非常に大きいことなどがわかってきている (Frajka-Williams *et al.*, 2019)。一方で太平洋においては、深層循環の変動について大西洋ほどには研究が進んでいないのが現状である。太平洋は大西洋に比べて貯熱量・物質貯蔵量が多い。そのため過去の地球システムの熱・物質バランスにおいて重要な役割を果たしていたはずであり、それを定量的に理解するための研究を進めていくことが重要である。気象庁の東経137度線における長期観測が、太平洋における長期の気候変動を捉えるうえでの重要なデータとなっているように (Oka *et al.*, 2018)、長期的に継続したデータが深層の変化を検出するうえで重要となることは明らかである。長期継続を見据えた係留観測が理想であり、現在観測が行われている北太平洋のK2・KEO 係留点の継続は必須である。加えて、サモア海峡などのいわゆる choke point と言われる深層水の経路上での長期係留観測ができれば、日本の気候にも影響する可能性のある深層循環の将来変動をとらえるための体制が整えられるであろう。大西洋のRAPID計画のような大型研究を太平洋で同様に展開するのは簡単では

ないとはいえ、太平洋においても深層における長期変化を捉えるために必要な観測を継続的に続けていることが強く望まれる。さらに、RAPID計画でも改めて認識されたことであるが、観測された変化には先に議論した短期変動成分も含まれるため、深層における長期変化を分離して検出するためには高解像度数値モデルや同化モデルを用いた研究についても並行して進めていくことが必要となるであろう。

海洋の深層は炭素をはじめとするさまざまな物質の貯蔵庫としても重要である。その容量の大ききゆえにその変化は非常にゆっくりとしたものとなるが、過去には深層の物質循環が大きく変化し気候にも重要な影響を与えた事例もある。ひとつ挙げると、最終氷期最大期(2万年前)における大気中CO<sub>2</sub>濃度は、現在に比べて100ppm程度低かったことがアイスコアデータから示されている (Petit *et al.*, 1999)。その低下には、海洋の炭素循環の変化が本質的な役割を果たしていたと考えられており、Martinの鉄仮説 (Martin, 1990)、シリカリケージ仮説 (Matsumoto *et al.*, 2002) などさまざまな説が提案されている。しかしながら、現在の全球海洋炭素循環モデルではその100ppmの低下を定量的に説明できていないように、その変化についての理解は不十分である (Kobayashi and Oka, 2018; Yamamoto *et al.*, 2019)。本稿で取り上げた生物ポンプに関する新しい知見が、氷期のような現在とは大きく異なる気候状態での物質循環を理解する上での重要な役割を秘めている可能性もある。生物ポンプを支配するさまざまな素過程に関するプロセス研究を進めることは、全球の物質循環に果たす役割のより本質的な理解にもつながるであろう。

#### 4.3. 深層の将来変化

IPCC第五次報告書 (IPCC, 2013) では深層における昇温が有意なシグナルとして観測されたことが大きく取り上げられた。今後の地球温暖化の進行とともに、深層ではその影響が今以上に顕著となり、より大きなシグナルとなって検出されるであろう。太平洋での昇温シグナルは、南極での南極底層水形成を起源とするものをはじめ (川合ら, 2021, 本特集)、大西洋深層水形成を起源とするものや、太平洋表層から伝わるものなど、複数の経路で生じると考えられる。今後10年から20年の時間スケール

ルで考えると、南極での底層水を起源とするシグナルが太平洋深層にどのように伝わっていくのかに注視する必要がある。太平洋深層にすでに昇温のシグナルが到達しているという報告もあり (Masuda *et al.*, 2010; Kouketsu *et al.*, 2011), 今後太平洋全域に渡ってシグナルが検出されるような状況になった場合、その変化を正確にモニタリングしていくことは、日本の海洋学コミュニティにおいて重要な課題である。また、塩分についても、南極陸棚でここ 20 年ほど進行してきた低塩分化が 2010 年代後半から高塩分化にリバウンドしたことが報告された (Castagno *et al.*, 2019; Aoki *et al.*, 2020)。この変化が太平洋にどのような変化として伝わるのか、観測によりモニタリングしていく必要がある。深層の変化についての長期的なモニタリングを続けるためには、深層フロートの活用をはじめ、船舶観測・係留観測についても長期的な視点で展開していくことが望まれる。それに加えて、高解像度モデルあるいは同化モデルによるモデリング研究も併用して昇温・低塩のシグナルの経路と大きさについて定量的な理解を進める研究も重要である。深層の変化を捉えるための研究を進めることは、深層循環自体の経路や流路の理解へもつながると期待される。

海洋の有機物に関する各ポンプによる炭素吸収フラックスが、温暖化や酸性化に対してどのように応答しているかは分かっていない。仮に重力生物ポンプによる堆積フラックスや微生物炭素ポンプの炭素固定フラックスが増加傾向にあるのであれば、海洋は CO<sub>2</sub> を有機物の形でも吸収していることになる。中層の水温上昇は分解者である従属栄養微生物の活性を高めるので、粒子態有機物から溶存有機物への変換速度、溶存有機物の無機化速度が加速される可能性が高い。結果として、中層生態系内の有機物のリサイクルが加速し、深層への有機物輸送量は低下することが予測される。一方で、有機物のリサイクルにより中層が貧酸素状態になれば、深層への有機物輸送量が増加へと変化することも予想される。深層の水温上昇は、中層と同様に、分解者である従属栄養微生物の活性を高める。中層と異なり深層では、系外からの主たる有機物供給源として沈降有機物だけでなく海底面からの有機物の溶出・拡散も寄与していることが考えられる。深層での従属栄養微生物活性の上昇は、海底面有機物の消費量上昇とそれに伴った栄養塩などの無機物量

の増加につながることを予想される。また、水温上昇や溶存酸素濃度減少に対する炭素固定微生物の活性変化も考慮する必要がある。大洋全体の昇温は表層と中深層の物理的な分断を強め、それぞれ生態系間をつなぐ物質循環フラックス (生物ポンプ・表層への栄養塩供給) の縮小をまねき、結果として生態系が維持できる生物量の減少に繋がることも予想される。現時点では中深層での従属栄養微生物活性の測定値・海底面からの有機物などのフラックスの観測値が十分でなく、将来予測が困難な状況である。海水温上昇等、環境変動に対する従属栄養微生物の応答の将来予測には、中深層での微生物生態系観測の体系化、重点化が必須である。

生物分野においても、将来の環境変化に対する応答を議論することは、今後の重要な研究課題である。温暖化・富栄養化 (化石燃料・窒素肥料使用増加) の影響から深層を中心として全球的な貧酸素化の進行が懸念されており、水温上昇や酸性化と連動した Multiple stressors としてその影響が危惧されている (Breitburg *et al.*, 2018)。海洋全体で過去 50 年に 2% の酸素が減少したと見積もられており (Schmidtke *et al.*, 2017), とくに中層の酸素極小層の拡大が東部太平洋熱帯域、太平洋亜寒帯域、北部インド洋において顕著である。沿岸域ではこの水塊が湧昇することにより底生生物の大量死・魚類分布・回遊経路に影響し、深層では有機物の分解速度や脱窒、硝化、鉄・リン溶出など栄養塩循環に影響を与えることから、様々な深度帯における物質循環や生物分布を大きく改変する可能性がある (Bianchi *et al.*, 2013; Chan *et al.*, 2019)。とくに日周鉛直移動性動物プランクトンやマイクロネクトンの分布層や移動距離は、酸素極小層の分布に影響をうけることが報告されており (Koslow *et al.*, 2011; Netburn and Anthony Koslow, 2015; Wishner *et al.*, 2020), その結果これら生物を餌料とする捕食者の分布にまで影響を与えている可能性がある (Stewart *et al.*, 2013)。一方、中深層性の生物群には低酸素濃度環境に適応力をもつ種が比較的多くいることも同時に明らかになりつつあり (Danovaro *et al.*, 2014), その応答や影響については未知な部分が多く、将来予測のために生物学的知見 (環境 DNA 情報, 生物量・活性量動態等) の蓄積が望まれる。

深海底ではこの他、海底資源開発に伴う深海掘削や海

洋投棄 (Ramirez-Llodra *et al.*, 2011), 漁獲に起因する大型魚類死骸の落下量の減少 (Mariani *et al.*, 2020), 海洋プラスチックゴミの集積 (Kane and Clare, 2019), 海山周辺での漁業活動など, この数十年で急速に人為的影響が拡大している。深海底の生物群集は, 海洋表層および陸域から流入する沈降有機物の終着点であり, これらの有機物を無機化し循環させる巨大なバイオリアクターとして機能しており, その劣化が懸念される。さらに熱水噴出孔群集など化学合成系生物群集を含む極限環境において維持されている多様な生物群集の維持機構や共生システム・遺伝子資源などの多くは未解明のまま残されており (Danovaro *et al.*, 2014; 矢萩ら, 2019), その保全と全容の理解は人類共通の課題である。

今後100年以上先の未来の気候においては, 現在の深層循環の経路に応じて深層水形成域からシグナルが深層へ受動的に伝わるだけでなく, 深層水形成そのものが大きく変化することも起こりうる。生物ポンプに関しても, 気候が大きく変わった場合, 現在のモデルで仮定している Martin カーブのような経験式が通用しない状況に変わりうることも考えられる。また, 長期の気候変化を理解する上では, 海洋深層における変化の大きさを把握するとともに, その変化が表層にどのように戻っていくか, その両者の理解が必要となる。温暖化の進行により, 大西洋深層循環の弱体化が引き起こされることは多くの研究で議論されているが (岡, 2020), その影響は太平洋にどのような形で及んでくるであろうか? 今後進行していく太平洋深層での熱吸収は, 未来の地球表層環境にどのような影響を及ぼしうるであろうか? 海洋酸性化のシグナルが深層で検出されるようになった場合, 生物にどのような影響が生じるか? 温暖化により将来の生物生産は減少することが指摘されているが (Bopp *et al.*, 2013; Nakamura and Oka, 2019), それに伴い生物ポンプはどのように変化し, 太平洋深層での物質循環がどのような影響を受けるか? これらの課題についての回答を得るためにも, 観測による継続的なモニタリング, 数値モデルによる研究, 化学トレーサー研究, 古気候・古海洋研究など, これまでに述べてきた研究を積み重ねていくことが必要であろう。

## 5. おわりに

以上, 海洋深層研究において, 現在議論されているトピックを整理するとともに, 今後10年で取り組むべき研究の方向性について論じた。本稿では物理・化学・生物が分野横断的に関わるトピックとして, とくに深層における物質循環に着目し議論した。これから取り組むべき研究の方向性としても, 物理・化学・生物(・地学)の分野にこだわることなく, 学際的な研究を推進していくことが, 今後10年の海洋学の将来の鍵となるであろう。船舶観測ではとくにそのコストの高さから多分野の科学者が同じ釜の飯を食らいながらそれぞれの観測を行ってきた伝統がある。上記の議論には収まらなかったが, 近年では深層係留観測でも同じロープを物理・化学・生物のセンサーで共有し効率的な運用を行う試みもある。数値モデリングに関しても, 本稿で取り上げた物理・化学・生物が分野横断的に関わる物質循環についての研究は今後ますます重要となるであろう。近年の大型研究プロジェクトのように, 学際的な研究を遂行していくための枠組みとなる新しい大型研究プロジェクトを, 複数の分野の研究者が協力して立案する機会を今後積極的に増やしていくことも大事である。深層フロートの展開やモデリング研究の推進などを通じて, 物理・化学・生物に関する様々な素過程への理解を深めながら, 深層を3次元(緯度, 経度, 深さ)的に把握し, その変化の予測(+時間で4次元)につながる研究が進むことを期待したい。ただどんなにフロートやグライダーといった自律観測が発展しても, 投入プラットフォームあるいは校正データ取得のための船舶観測は必須である。本稿で取り上げた深層における生物・化学分野の研究の多くは船舶以外のプラットフォームではなしえないが, 外洋における深海の観測に利用できる船は限られているのが現状である。海洋学コミュニティの研究基盤である船舶観測の機会を確保することは, 今後10年の海洋学の将来において非常に重要である。

## 謝 辞

本稿の作成にあたり、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助言をいただきました：大貫陽平、岡英太郎、乙坂重嘉、西岡純、本多牧生。深く感謝申し上げます。

## References

- Agogu , H., M. Brink, J. Dinasquet, and G. J. Herndl (2008): Major gradients in putatively nitrifying and non-nitrifying Archaea in the deep North Atlantic. *Nature*, **456**, 788–791.
- Amon, R. M. W., G. Bud us, and B. Meon (2003): Dissolved organic carbon distribution and origin in the Nordic Seas: Exchanges with the Arctic Ocean and the North Atlantic. *J. Geophys. Res. Oce.*, **108**, doi:10.1029/2002jc001594.
- Aoki, S., K. Yamazaki, D. Hirano, K. Katsumata, K. Shimada, Y. Kitade, H. Sasaki, and H. Murase (2020): Reversal of freshening trend of Antarctic Bottom Water in the Australian–Antarctic Basin during 2010s. *Sci. Rep.*, **10**, 14415.
- Ardyna, M., L. Lacour, S. Sergi, F. d’Ovidio, J.-B. Sall e, M. Rembauville, S. Blain, A. Tagliabue, R. Schlitzer, C. Jeandel, K. R. Arrigo, and H. Claustre (2019): Hydrothermal vents trigger massive phytoplankton blooms in the Southern Ocean. *Nat. Commun.*, **10**, 2451.
- Armstrong, R. A., C. Lee, J. I. Hedges, S. Honjo, and S. G. Wakeham (2001): A new, mechanistic model for organic carbon fluxes in the ocean based on the quantitative association of POC with ballast minerals. *Deep Sea Res. Part II*, **49**, 219–236.
- Behrenfeld, M. J., P. Gaube, A. D. Penna, R. T. O’Malley, W. J. Burt, Y. Hu, P. S. Bontempi, D. K. Steinberg, E. S. Boss, D. A. Siegel, C. A. Hostetler, P. D. Tortell, and S. C. Doney (2019): Global satellite-observed daily vertical migrations of ocean animals. *Nature*, **576**, 257–261.
- Benoit-Bird, K. J., and W. W. L. Au (2006): Extreme diel horizontal migrations by a tropical nearshore resident micronekton community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **319**, 1–14.
- Bianchi, D., E. D. Galbraith, D. A. Caroza, K. A. S. Mislan, and C. A. Stock (2013): Intensification of open-ocean oxygen depletion by vertically migrating animals. *Nat. Geosci.*, **6**, 545–548.
- Billett, D. S. M., R. S. Lampitt, A. L. Rice, and R. F. C. Mantoura (1983): Seasonal sedimentation of phytoplankton to the deep-sea benthos. *Nature*, **302**, 520–522.
- Bopp, L., L. Resplandy, J. C. Orr, S. C. Doney, J. P. Dunne, M. Gehlen, P. Halloran, C. Heinze, T. Ilyina, R. S erian, J. Tjiputra, and M. Vichi (2013): Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences*, **10**, 6225–6245.
- Bower, A. S., M. S. Lozier, S. F. Gary, and C. W. B oning (2009): Interior pathways of the North Atlantic meridional overturning circulation. *Nature*, **459**, 243–247.
- Boyd, P. W., H. Claustre, M. Levy, D. A. Siegel, and T. Weber (2019): Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature*, **568**, 327–335.
- Bradford-Grieve, J. M., S. D. Nodder, J. B. Jillett, K. Currie, and K. R. Lassey (2001): Potential contribution that the copepod *Neocalanus tonsus* makes to downward carbon flux in the Southern Ocean. *J. Plankton Res.*, **23**, 963–975.
- Breitburg, D. *et al.* (2018): Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, **359**, doi:10.1126/science.aam7240.
- Broecker, W. (2010): *The Great Ocean Conveyor*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 154 pp.
- Buesseler, K. O., P. W. Boyd, E. E. Black, and D. A. Siegel (2020): Metrics that matter for assessing the ocean biological carbon pump. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **117**, 9679–9687.
- Caesar, L., G. D. McCarthy, D. J. R. Thornalley, N. Cahill, and S. Rahmstorf (2021): Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nat. Geosci.*, **14**, 118–120.
- Calleja, M. L., N. Al-Otaibi, and X. A. G. Mor an (2019): Dissolved organic carbon contribution to oxygen respiration in the central Red Sea. *Sci. Rep.*, **9**, 4690.
- Carlson, C. A., and D. A. Hansell (2015): Chapter 3 – DOM Sources, Sinks, Reactivity, and Budgets, p. 65–126. In *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter* (Second Edition), edited by D. A. Hansell and C. A. Carlson, Academic Press, San Diego, CA, USA.
- Castagno, P., V. Capozzi, G. R. DiTullio, P. Falco, G. Fusco, S. R. Rintoul, G. Spezie, and G. Budillon (2019): Rebound of shelf water salinity in the Ross Sea. *Nat. Commun.*, **10**, 5441.
- Chan, F., J. Barth, K. Kroeker, J. Lubchenco, and B. Menge (2019): The dynamics and impact of ocean acidification and hypoxia: Insights from sustained investigations in the northern California current large marine ecosystem. *Oceanography*, **32**, 62–71.
- Chen, M., J.-H. Kim, S.-I. Nam, F. Niessen, W.-L. Hong, M.-H. Kang, and J. Hur (2016): Production of fluorescent dissolved organic matter in Arctic Ocean sediments. *Sci. Rep.*, **6**, 39213.
- Coutinho, F. H., F. A. B. von Meijenfheldt, J. M. Walter, J. M. Haro-Moreno, M. Lop ez-P erez, M. C. van Verk, C. C. Thompson, C. A. N. Cosenza, L. Appolinario, R. Paranhos, A. Cabral, B. E. Dutilh, and F. L. Thompson (2021): Ecogenomics and metabolic potential of the South Atlantic Ocean microbiome. *Sci. Total Environ.*, **765**, 142758.
- Cram, J. A., T. Weber, S. W. Leung, A. M. P. McDonnell, J.-H. Liang, and C. Deutsch (2018): The role of particle size, ballast, temperature, and oxygen in the sinking flux to the deep sea. *Global Biogeochem. Cycles*, **32**, 858–876.
- Cunningham, S. A., T. Kanzow, D. Rayner, M. O. Baringer, W. E. Johns, J. Marotzke, H. R. Longworth, E. M. Grant, J. J.-M. Hirschi, L. M. Beal, C. S. Meinen, and H. L. Bryden (2007): Temporal Variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5°N. *Science*, **317**, 935–938.
- Cyr, F., M. Tedetti, F. Besson, L. Beguery, A. M. Doglioli, A. A. Petrenko, and M. Goutx (2017): A new glider-compatible optical sensor for dissolved organic matter measurements: Test case from the NW Mediterranean sea. *Front. Mar. Sci.*, **4**, doi:10.3389/fmars.2017.00089.
- Danovaro, R., P. V. R. Snelgrove, and P. Tyler (2014): Challenging the paradigms of deep-sea ecology. *Trends Ecol. Evol.*, **29**, 465–475.
- De Corte, D., T. Yokokawa, M. M. Varela, H. Agogu , and G. J. Herndl (2009): Spatial distribution of Bacteria and Archaea and amoA gene copy numbers throughout the water column of the Eastern Mediterranean Sea. *ISME J.*, **3**, 147–158.

- De Leo, F. C., C. R. Smith, A. A. Rowden, D. A. Bowden, and M. R. Clark (2010): Submarine canyons: hotspots of benthic biomass and productivity in the deep sea. *Proc. R. Soc. B.*, **277**, 2783–2792.
- DeVries, T., and M. Holzer (2019): Radiocarbon and helium isotope constraints on deep ocean ventilation and mantle- $^3\text{He}$  sources. *J. Geophys. Res. Oce.*, **124**, 3036–3057.
- DeVries, T., and T. Weber (2017): The export and fate of organic matter in the ocean: New constraints from combining satellite and oceanographic tracer observations. *Global Biogeochem. Cycles*, **31**, 535–555.
- Easson, C. G., K. M. Boswell, N. Tucker, J. D. Warren, and J. V. Lopez (2020): Combined eDNA and Acoustic Analysis Reflects Diel Vertical Migration of Mixed Consortia in the Gulf of Mexico. *Front. Mar. Sci.*, **7**, doi:10.3389/fmars.2020.00552.
- Emerson, S. (2014): Annual net community production and the biological carbon flux in the ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, **28**, 14–28.
- Fender, C. K., T. B. Kelly, L. Guidi, M. D. Ohman, M. C. Smith, and M. R. Stukel (2019): Investigating Particle Size–Flux Relationships and the Biological Pump Across a Range of Plankton Ecosystem States From Coastal to Oligotrophic. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00603.
- Fernández-Castro, B., M. Álvarez, M. Nieto-Cid, P. Zunino, H. Mercier, and X. A. Álvarez-Salgado (2019): Dissolved organic nitrogen production and export by meridional overturning in the Eastern subpolar north Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 3832–3842.
- Ferrari, R., A. Mashayek, T. J. McDougall, M. Nikurashin, and J.-M. Campin (2016): Turning ocean mixing upside down. *J. Phys. Oceanogr.*, **46**, 2239–2261.
- Fliedert, T. *et al.* (2012): GEOTRACES intercalibration of neodymium isotopes and rare earth element concentrations in seawater and suspended particles. Part 1: reproducibility of results for the international intercomparison. *Limnol. Oceanogr. Methods*, **10**, 234–251.
- Frajka-Williams, E. *et al.* (2019): Atlantic meridional overturning circulation: Observed transport and variability. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00260.
- Gebbie, G., and P. Huybers (2012): The mean age of ocean waters inferred from radiocarbon observations: sensitivity to surface sources and accounting for mixing histories. *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 291–305.
- Goto, S., Y. Tada, K. Suzuki, and Y. Yamashita (2020): Evaluation of the production of dissolved organic matter by three marine bacterial strains. *Front. Microbiol.*, **11**, 584419.
- Goto, Y., I. Yasuda, M. Nagasawa, S. Kouketsu, and T. Nakano (2021): Estimation of basin-scale turbulence distribution in the North Pacific Ocean using CTD-attached thermistor measurements. *Sci. Rep.*, **11**, doi:10.1038/s41598-020-80029-2.
- Hannides, C. C. S., B. N. Popp, H. G. Close, C. R. Benitez-Nelson, C. A. Ka'apu-Lyons, K. Gloeckler, N. Wallsgrove, B. Umhau, E. Palmer, and J. C. Drazen (2020): Seasonal dynamics of midwater zooplankton and relation to particle cycling in the North Pacific subtropical gyre. *Prog. Oceanogr.*, **182**, 102266.
- Hansell, D., C. Carlson, D. Repeta, and R. Schlitzer (2009): Dissolved organic matter in the ocean: A controversy stimulates new insights. *Oceanography*, **22**, 202–211.
- Hansell, D. A., C. A. Carlson, R. M. W. Amon, X. A. Álvarez-Salgado, Y. Yamashita, C. Romera-Castillo, and M. B. Bif (2021): Compilation of dissolved organic matter (DOM) data obtained from the global ocean surveys from 1994 to 2020 (NCEI Accession 0227166). NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. <https://doi.org/10.25921/s4f4-ye35>.
- Hansman, R. L., S. Griffin, J. T. Watson, E. R. M. Druffel, A. E. Ingalls, A. Pearson, and L. I. Aluwihare (2009): The radiocarbon signature of microorganisms in the mesopelagic ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **106**, 6513–6518.
- 橋濱史典・額額慎也・佐々木克徳・杉本周作・高橋一生・長井健容・西岡純・林田博士・平井惇也 (2021): 海洋学の10年展望2021: 中緯度、海の研究, **30**, 131–158.
- Hasumi, H., and T. Nagata (2014): Modeling the global cycle of marine dissolved organic matter and its influence on marine productivity. *Ecol. Modell.*, **288**, 9–24.
- Hayes, C. T., E. E. Black, R. F. Anderson, M. Baskaran, K. O. Buesseler, M. A. Charette, H. Cheng, J. K. Cochran, R. L. Edwards, P. Fitzgerald, P. J. Lam, Y. Lu, S. O. Morris, D. C. Ohnemus, F. J. Pavia, G. Stewart, and Y. Tang (2018): Flux of particulate elements in the north Atlantic ocean constrained by multiple radionuclides. *Global Biogeochem. Cycles*, **32**, 1738–1758.
- Herndl, G. J., and T. Reinthaler (2013): Microbial control of the dark end of the biological pump. *Nat. Geosci.*, **6**, 718–724.
- Herndl, G. J., T. Reinthaler, E. Teira, H. van Aken, C. Veth, A. Pernthaler, and J. Pernthaler (2005): Contribution of *Archaea* to total prokaryotic production in the deep Atlantic Ocean. *Appl. Environ. Microbiol.*, **71**, 2303–2309.
- Hidaka, K., K. Kawaguchi, M. Murakami, and M. Takahashi (2001): Downward transport of organic carbon by diel migratory micronekton in the western equatorial Pacific: its quantitative and qualitative importance. *Deep Sea Res. Part I*, **48**, 1923–1939.
- 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・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.
- Hiraoka, S., M. Hirai, Y. Matsui, A. Makabe, H. Minegishi, M. Tsuda, Juliarni, E. Rastelli, R. Danovaro, C. Corinaldesi, T. Kitahashi, E. Tasumi, M. Nishizawa, K. Takai, H. Nomaki, and T. Nunoura (2020): Microbial community and geochemical analyses of trans-trench sediments for understanding the roles of hadal environments. *ISME J.*, **14**, 740–756.
- Holzer, M., T. DeVries, D. Bianchi, R. Newton, P. Schlosser, and G. Winckler (2017): Objective estimates of mantle  $^3\text{He}$  in the ocean and implications for constraining the deep ocean circulation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **458**, 305–314.
- Holzer, M., T. DeVries, and W. Smethie Jr (2019): The ocean's global  $^{30}\text{Ar}$  distribution estimated with an ocean circulation inverse model. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 7491–7499.
- Honda, M. C. (2020): Effective vertical transport of particulate organic carbon in the western North Pacific subarctic region. *Front. Earth Sci.*, **8**, 366.
- Ijichi, T., L. St. Laurent, K. L. Polzin, and J. M. Toole (2020): How variable is mixing efficiency in the abyss? *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi:10.1029/2019gl086813.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: *The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1535 pp.
- Jenkins, W. J. (2020): Using excess  $^3\text{He}$  to estimate Southern Ocean upwelling time scales. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi:10.1029/2020gl087266.

- Jenkins, W. J., S. C. Doney, M. Fendrock, R. Fine, T. Gamo, P. Jean-Baptiste, R. Key, B. Klein, J. E. Lupton, R. Newton, M. Rhein, W. Roether, Y. Sano, R. Schlitzer, P. Schlosser, and J. Swift (2019): A comprehensive global oceanic dataset of helium isotope and tritium measurements. *Earth Syst. Sci. Data*, **11**, 441–454.
- Jiao, N., G. J. Herndl, D. A. Hansell, R. Benner, G. Kattner, S. W. Wilhelm, D. L. Kirchman, M. G. Weinbauer, T. Luo, F. Chen, and F. Azam (2010): Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean. *Nat. Rev. Microbiol.*, **8**, 593–599.
- Jónasdóttir, S. H., A. W. Visser, K. Richardson, and M. R. Heath (2015): Seasonal copepod lipid pump promotes carbon sequestration in the deep North Atlantic. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **112**, 12122–12126.
- Kane, I. A., and M. A. Clare (2019): Dispersion, accumulation, and the ultimate fate of microplastics in deep-marine environments: A review and future directions. *Front. Earth Sci.*, **7**, doi:10.3389/feart.2019.00080.
- 神田 稷太・石井雅男・小川浩史・小笠恒夫・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) 海の研究, **22**, 219–251.
- Kawabe, M., and S. Fujio (2010): Pacific Ocean circulation based on observation. *J. Oceanogr.*, **66**, 389–403.
- 川合美千代・田村岳史・渡邊英嗣・西岡純・野村大樹・真壁竜介・溝端浩平・安中さやか (2021): 海洋学の10年展望2021: 極域, 海の研究, **30**, 159–178.
- Kawasaki, T., H. Hasumi, and Y. Tanaka (2021): Role of tide-induced vertical mixing in the deep Pacific Ocean circulation. *J. Oceanogr.*, **77**, 173–184.
- Key, R. M., A. Kozyr, C. L. Sabine, K. Lee, R. Wanninkhof, J. L. Bullister, R. A. Feely, F. J. Millero, C. Mordy, and T.-H. Peng (2004): A global ocean carbon climatology: Results from Global Data Analysis Project (GLODAP). *Global Biogeochem. Cycles*, **18**, doi:10.1029/2004gb002247.
- Khatiwal, S., F. Primeau, and M. Holzer (2012): Ventilation of the deep ocean constrained with tracer observations and implications for radiocarbon estimates of ideal mean age. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **325–326**, 116–125.
- Klevjer, T., W. Melle, T. Knutsen, E. Strand, R. Korneliusen, N. Dupont, A.G.V. Salvanes, and P.H. Wiebe (2020): Micronekton biomass distribution, improved estimates across four north Atlantic basins. *Deep Sea Res. Part II*, **180**, 104691.
- Kobari, T., T. Honma, D. Hasegawa, N. Yoshie, E. Tsutsumi, T. Matsuno, T. Nagai, T. Kanayama, F. Karu, K. Suzuki, T. Tanaka, X. Guo, G. Kume, A. Nishina, and H. Nakamura (2020): Phytoplankton growth and consumption by microzooplankton stimulated by turbulent nitrate flux suggest rapid trophic transfer in the oligotrophic Kuroshio. *Biogeosciences*, **17**, 2441–2452.
- Kobari, T., A. Shinada, and A. Tsuda (2003): Functional roles of interzonal migrating mesozooplankton in the western subarctic Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **57**, 279–298.
- Kobayashi, H., and A. Oka (2018): Response of Atmospheric pCO<sub>2</sub> to glacial changes in the Southern Ocean amplified by carbonate compensation. *Paleoceanogr. Paleoclimatology*, **33**, 1206–1229.
- Koch, B. P., G. Kattner, M. Witt, and U. Passow (2014): Molecular insights into the microbial formation of marine dissolved organic matter: recalcitrant or labile? *Biogeosciences*, **11**, 4173–4190.
- 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.
- Könneke, M., D. M. Schubert, P. C. Brown, M. Hügler, S. Standfest, T. Schwander, L. S. von Borzyskowski, T. J. Erb, D. A. Stahl, and I. A. Berg (2014): Ammonia-oxidizing archaea use the most energy-efficient aerobic pathway for CO<sub>2</sub> fixation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **111**, 8239–8244.
- Koslow, J. A., R. Goericke, A. Lara-Lopez, and W. Watson (2011): Impact of declining intermediate-water oxygen on deepwater fishes in the California Current. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **436**, 207–218.
- Kouketsu, S., T. Doi, T. Kawano, S. Masuda, N. Sugiura, Y. Sasaki, T. Toyoda, H. Igarashi, Y. Kawai, K. Katsumata, H. Uchida, M. Fukasawa, and T. Awaji (2011): Deep ocean heat content changes estimated from observation and reanalysis product and their influence on sea level change. *J. Geophys. Res., Oce.*, **116**, doi:10.1029/2010jc006464.
- Kunze, E (2017): The internal-wave-driven meridional overturning circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, **47**, 2673–2689.
- Lechtenfeld, O. J., N. Hertkorn, Y. Shen, M. Witt, and R. Benner (2015): Marine sequestration of carbon in bacterial metabolites. *Nat. Commun.*, **6**, 6711.
- Letscher, R. T., D. A. Hansell, C. A. Carlson, R. Lumpkin, and A. N. Knapp (2013): Dissolved organic nitrogen in the global surface ocean: Distribution and fate. *Global Biogeochem. Cycles*, **27**, 141–153.
- Letscher, R. T., A. N. Knapp, A. K. James, C. A. Carlson, A. E. Santoro, and D. A. Hansell (2015): Microbial community composition and nitrogen availability influence DOC remineralization in the South Pacific gyre. *Mar. Chem.*, **177**, 325–334.
- Lopez, C. N., M. Robert, M. Galbraith, S. K. Bercovici, M. V. Orellana, and D. A. Hansell (2020): High temporal variability of total organic carbon in the deep northeastern Pacific. *Front. Earth Sci.*, **8**, doi:10.3389/feart.2020.00080.
- Mariani, G., W. W. L. Cheung, A. Lyet, E. Sala, J. Mayorga, L. Velez, S. D. Gaines, T. Dejean, M. Troussellier, and D. Mouillot (2020): Let more big fish sink: Fisheries prevent blue carbon sequestration-half in unprofitable areas. *Sci. Adv.*, **6**, doi:10.1126/sciadv.abb4848.
- Marsay, C. M., R. J. Sanders, S. A. Henson, K. Pabortsava, E. P. Achterberg, and R. S. Lampitt (2015): Attenuation of sinking particulate organic carbon flux through the mesopelagic ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **112**, 1089–1094.
- Martin, J. H. (1990): Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, **5**, 1–13.
- Martin, J. H., G. A. Knauer, D. M. Karl, and W. W. Broenkow (1987): VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific. *Deep Sea Res. A*, **34**, 267–285.
- Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, J. P. Matthews, T. Toyoda, Y. Kawai, T. Doi, S. Kouketsu, H. Igarashi, K. Katsumata, H. Uchida, T. Kawano, and M. Fukasawa (2010): Simulated rapid warming of abyssal North Pacific waters. *Science*, **329**, 319–322.
- Matsumoto, K., J. L. Sarmiento, and M. A. Brzezinski (2002): Silicic acid leakage from the Southern Ocean: A possible explanation for glacial atmospheric pCO<sub>2</sub>. *Global Biogeochem. Cycles*, **16**, 5–1–5–23.
- Miki, T. (2020): Mathematical Modeling on Microbes and Their Roles in Community and Ecosystem: How to Handle Microbial Diversity in Modeling? p. 109–157. In *Diversity of Functional Traits and Interactions*, edited by A. Nougé, Theoretical Biology Ser., Springer, Singapore.



- Miki, T., T. Yokokawa, and T. Nagata (2008): Immigration of prokaryotes to local environments enhances remineralization efficiency of sinking particles: a metacommunity model. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **366**, 1-14.
- Miyamoto, M., E. Oka, D. Yanagimoto, S. Fujio, M. Nagasawa, G. Mizuta, S. Imawaki, M. Kurogi, and H. Hasumi (2020): Topographic Rossby waves at two different periods in the northwest Pacific Basin. *J. Phys. Oceanogr.*, **50**, 3123-3139.
- Nagai, T., D. Hasegawa, T. Tanaka, H. Nakamura, E. Tsutsumi, R. Inoue, and T. Yamashiro (2017): First evidence of coherent bands of strong turbulent layers associated with high-wavenumber internal-wave shear in the upstream Kuroshio. *Sci. Rep.*, **7**, 14555.
- Nagai, T., H. Saito, K. Suzuki, and M. Takahashi (2019): *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical, and Ecosystem Dynamics*. Geophysical Monograph 243, AGU-Wiley, 336 pp.
- Nakamura, Y., and A. Oka (2019): CMIP5 model analysis of future changes in ocean net primary production focusing on differences among individual oceans and models. *J. Oceanogr.*, **75**, 441-462.
- Naveira Garabato, A. C., D. P. Stevens, A. J. Watson, and W. Roether (2007): Short-circuiting of the overturning circulation in the Antarctic Circumpolar Current. *Nature*, **447**, 194-197.
- Nelson, N. B., and J. M. Gauglitz (2016): Optical signatures of dissolved organic matter transformation in the global ocean. *Front. Mar. Sci.*, **2**, doi:10.3389/fmars.2015.00118.
- Nelson, N. B., D. A. Siegel, C. A. Carlson, C. Swan, W. M. Smethie, and S. Khatiwala (2007): Hydrography of chromophoric dissolved organic matter in the North Atlantic. *Deep Sea Res. Part I*, **54**, 710-731.
- Netburn, A. N., and J. Anthony Koslow (2015): Dissolved oxygen as a constraint on daytime deep scattering layer depth in the southern California current ecosystem. *Deep Sea Res. Part I*, **104**, 149-158.
- 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 (2013a): Intensive mixing along an island chain controls oceanic biogeochemical cycles. *Global Biogeochem. Cycles*, **27**, 920-929.
- Nishioka, J., and H. Obata (2017): Dissolved iron distribution in the western and central subarctic Pacific: HNLC water formation and biogeochemical processes: Dissolved Fe distribution in the western and central subarctic Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, **62**, 2004-2022.
- Nishioka, J., H. Obata, T. Hirawake, Y. Kondo, Y. Yamashita, K. Misumi, and I. Yasuda (2021): A review: iron and nutrient supply in the subarctic Pacific and its impact on phytoplankton production. *J. Oceanogr.*, **77**, 561-587.
- 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.
- Nishioka, J., H. Obata, and D. Tsumune (2013b) Evidence of an extensive spread of hydrothermal dissolved iron in the Indian Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **361**, 26-33.
- Noriega-Ortega, B. E., G. Wienhausen, A. Mentges, T. Dittmar, M. Simon, and J. Niggemann (2019): Does the chemodiversity of bacterial exometabolomes sustain the chemodiversity of marine dissolved organic matter? *Front. Microbiol.*, **10**, 215.
- Nunoura, T., Y. Takaki, M. Hirai, S. Shimamura, A. Makabe, O. Koide, T. Kikuchi, J. Miyazaki, K. Koba, N. Yoshida, M. Sunamura, and K. Takai (2015): Hadal biosphere: insight into the microbial ecosystem in the deepest ocean on Earth. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **112**, E1230-6.
- Oka, A. (2020): Ocean carbon pump decomposition and its application to CMIP5 earth system model simulations. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, 1-17.
- Oka, A., S. Kato, and H. Hasumi (2008): Evaluating effect of ballast mineral on deep-ocean nutrient concentration by using an ocean general circulation model. *Global Biogeochem. Cycles*, **22**, doi:10.1029/2007gb003067.
- Oka, A., and Y. Niwa (2013): Pacific deep circulation and ventilation controlled by tidal mixing away from the sea bottom. *Nat. Commun.*, **4**, 2419.
- Oka, A., H. Tazoe, and H. Obata (2021): Simulation of global distribution of rare earth elements in the ocean using an ocean general circulation model. *J. Oceanogr.*, **77**, 413-430.
- 岡頭 (2018): 海洋炭素循環モデルの考え方と基礎. 低温科学, **76**, 43-55.
- 岡頭 (2020): 大西洋深層循環のモデリング. ながれ, **39**, 270-275.
- 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). 海の研究, **22**, 191-218.
- Olsen, A. et al. (2019): GLODAPv2.2019 - an update of GLODAPv2. *Earth Syst. Sci. Data*, **11**, 1437-1461.
- Omand, M. M., E. A. D'Asaro, C. M. Lee, M. J. Perry, N. Briggs, I. Cetinić, and A. Mahadevan (2015): Eddy-driven subduction exports particulate organic carbon from the spring bloom. *Science*, **348**, 222-225.
- Onuki, Y., S. Joubaud, and T. Dauxois (2021): Simulating turbulent mixing caused by local instability of internal gravity waves. *J. Fluid Mech.*, **915**, doi:10.1017/jfm.2021.119.
- Orsi, A. H., W. M. Smethie Jr, and J. L. Bullister (2002). On the total input of Antarctic waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon measurements. *J. Geophys. Res. Oce.*, **107**, 31-1-31-14.
- Ortega-Retuerta, E., Q. Devresse, J. Caparros, B. Marie, O. Crispi, P. Catala, F. Joux, and I. Obernosterer (2021): Dissolved organic matter released by two marine heterotrophic bacterial strains and its bioavailability for natural prokaryotic communities. *Environ. Microbiol.*, **23**, 1363-1378.
- Pachiadaki, M. G., E. Sintes, K. Bergauer, J. M. Brown, N. R. Record, B. K. Swan, M. E. Mathyer, S. J. Hallam, P. Lopez-Garcia, Y. Takaki, T. Nunoura, T. Woyke, G. J. Herndl, and R. Stepanauskas (2017): Major role of nitrite-oxidizing bacteria in dark ocean carbon fixation. *Science*, **358**, 1046-1051.
- Pavia, F. J., R. F. Anderson, P. J. Lam, B. B. Cael, S. M. Vivancos, M. Q. Fleisher, Y. Lu, P. Zhang, H. Cheng, and R. L. Edwards (2019): Shallow particulate organic carbon regeneration in the South Pacific Ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **116**, 9753-9758.
- Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. PÉpin, C. Ritz, E. Saltzman, and M. Stievenard (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, **399**, 429-436.
- Proud, R., N. O. Handegard, R. J. Kloser, M. J. Cox, and A. S. Brierley

- (2019): From siphonophores to deep scattering layers: uncertainty ranges for the estimation of global mesopelagic fish biomass. *ICES J. Mar. Sci.*, **76**, 718–733.
- Ramirez-Llodra, E., P. A. Tyler, M. C. Baker, O. A. Bergstad, M. R. Clark, E. Escobar, L. A. Levin, L. Menot, A. A. Rowden, C. R. Smith, and C. L. Van Dover (2011): Man and the last great wilderness: human impact on the deep sea. *PLoS One*, **6**, e22588.
- Resing, J. A., P. N. Sedwick, C. R. German, W. J. Jenkins, J. W. Moffett, B. M. Sohst, and A. Tagliabue (2015): Basin-scale transport of hydrothermal dissolved metals across the South Pacific Ocean. *Nature*, **523**, 200–203.
- Resplandy, L., M. Lévy, and D. J. McGillicuddy Jr (2019): Effects of eddy-driven subduction on ocean biological carbon pump. *Global Biogeochem. Cycles*, **33**, 1071–1084.
- Riley, J. S., R. Sanders, C. Marsay, F. A. C. Le Moigne, E. P. Achterberg, and A. J. Poulton (2012): The relative contribution of fast and slow sinking particles to ocean carbon export. *Global Biogeochem. Cycles*, **26**, doi:10.1029/2011gb004085.
- Robinson, C., D. Wallace, J.-H. Hyun, L. Polimene, R. Benner, Y. Zhang, R. Cai, R. Zhang, and N. Jiao (2018): An implementation strategy to quantify the marine microbial carbon pump and its sensitivity to global change. *Natl. Sci. Rev.*, **5**, 474–480.
- Roemmich, D., J. T. Sherman, R. E. Davis, K. Grindley, M. McClune, C. J. Parker, D. N. Black, N. Zilberman, S. G. Purkey, P. J. H. Sutton, and J. Gilson (2019): Deep SOLO: A full-depth profiling float for the Argo Program. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **36**, 1967–1981.
- Roshan, S., and T. DeVries (2017): Efficient dissolved organic carbon production and export in the oligotrophic ocean. *Nat. Commun.*, **8**, 2036.
- Saba, G. K., A. B. Burd, J. P. Dunne, S. Hernández-León, A. H. Martin, K. A. Rose, J. Salisbury, D. K. Steinberg, C. N. Trueman, R. W. Wilson, and S. E. Wilson (2021): Toward a better understanding of fish-based contribution to ocean carbon flux. *Limnol. Oceanogr.*, **66**, 1639–1664.
- Sarmiento, J. L., and N. Gruber (2006): *Ocean Biogeochemical Dynamics*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 503 pp.
- Schlitzer, R. (2016): Quantifying He fluxes from the mantle using multi-tracer data assimilation. *Philos. Trans. R. Soc. A*, **374**, doi:10.1098/rsta.2015.0288.
- Schmidtko, S., L. Stramma, and M. Visbeck (2017): Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, **542**, 335–339.
- Sebastián, M., I. Forn, A. Auladell, M. Gómez-Letona, M. M. Sala, J. M. Gasol, and C. Marrasé (2021): Differential recruitment of opportunistic taxa leads to contrasting abilities in carbon processing by bathypelagic and surface microbial communities. *Environ. Microbiol.*, **23**, 190–206.
- Selvaraj, K., T. Y. Lee, J. Y. T. Yang, E. A. Canuel, J. C. Huang, M. Dai, J. T. Liu, and S. J. Kao (2015): Stable isotopic and biomarker evidence of terrigenous organic matter export to the deep sea during tropical storms. *Mar. Geol.*, **364**, 32–42.
- Shigemitsu, M., H. Uchida, T. Yokokawa, K. Arulananthan, and A. Murata (2020): Determining the Distribution of Fluorescent Organic Matter in the Indian Ocean Using in situ Fluorometry. *Front. Microbiol.*, **11**, 589262.
- Siegel, D. A., K. O. Buesseler, M. J. Behrenfeld, C. R. Benitez-Nelson, E. Boss, M. A. Brzezinski, A. Burd, C. A. Carlson, E. A. D'Asaro, S. C. Doney, M. J. Perry, R. H. R. Stanley, and D. K. Steinberg (2016): Prediction of the export and fate of global ocean net primary production: the EXPORTS science plan. *Front. Mar. Sci.*, **3**, 22.
- Smith, K. J. L., R. S. Kaufmann, R. J. Baldwin, and A. F. Carlucci (2001): Pelagic—benthic coupling in the abyssal eastern North Pacific: An 8-year time-series study of food supply and demand. *Limnol. Oceanogr.*, **46**, 543–556.
- Stewart, J. S., J. C. Field, U. Markaida, and W. F. Gilly (2013): Behavioral ecology of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) in relation to oxygen minimum zones. *Deep Sea Res. Part II*, **95**, 197–208.
- Sukigara, C., Y. Mino, H. Kawakami, M. C. Honda, T. Fujiki, K. Matsumoto, M. Wakita, and T. Saino (2019): Sinking dynamics of particulate matter in the subarctic and subtropical regions of the western North Pacific. *Deep Sea Res. Part I*, **144**, 17–27.
- Tagliabue, A., L. Bopp, J.-C. Dutay, A. R. Bowie, F. Chever, P. Jean-Baptiste, E. Bucciarelli, D. Lannuzel, T. Remenyi, G. Sarthou, O. Aumont, M. Gehlen, and C. Jeandel (2010): Hydrothermal contribution to the oceanic dissolved iron inventory. *Nat. Geosci.*, **3**, 252–256.
- Takahashi, A., T. Hibiya, and A. C. Naveira Garabato (2021): Influence of the distortion of vertical wavenumber spectra on estimates of turbulent dissipation using the finescale parameterization: eikonal calculations. *J. Phys. Oceanogr.*, **51**, 1723–1733.
- Tatebe, H., Y. Tanaka, Y. Komuro, and H. Hasumi (2018): Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean. *Sci. Rep.*, **8**, doi:10.1038/s41598-018-32768-6.
- Thornalley, D. J. R., D. W. Oppo, P. Ortega, J. I. Robson, C. M. Brierley, R. Davis, I. R. Hall, P. Moffa-Sanchez, N. L. Rose, P. T. Spooner, I. Yashayaev, and L. D. Keigwin (2018): Anomalously weak Labrador Sea convection and Atlantic overturning during the past 150 years. *Nature*, **556**, 227–230.
- Tsutsumi, E., T. Matsuno, R.-C. Lien, H. Nakamura, T. Senjyu, and X. Guo (2017): Turbulent mixing within the Kuroshio in the Tokara strait: Turbulent mixing within the Kuroshio. *J. Geophys. Res. Oce.*, **122**, 7082–7094.
- Uchimiya, M., H. Fukuda, M. Wakita, M. Kitamura, H. Kawakami, M. C. Honda, H. Ogawa, and T. Nagata (2018): Balancing organic carbon supply and consumption in the ocean's interior: Evidence from repeated biogeochemical observations conducted in the subarctic and subtropical western North Pacific: Carbon balance in the deep sea. *Limnol. Oceanogr.*, **63**, 2015–2027.
- Vance, D., G. F. de Souza, Y. Zhao, and J. T. Cullen (2019): The relationship between zinc, its isotopes, and the major nutrients in the North-East Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **525**, 115748.
- Vic, C., A. C. Naveira Garabato, J. A. M. Green, A. F. Waterhouse, Z. Zhao, A. Melet, C. de Lavergne, M. C. Buijsman, and G. R. Stephenson (2019): Deep-ocean mixing driven by small-scale internal tides. *Nat. Commun.*, **10**, 2099.
- Weber, T., J. A. Cram, S. W. Leung, T. DeVries, and C. Deutsch (2016): Deep ocean nutrients imply large latitudinal variation in particle transfer efficiency. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **113**, 8606–8611.
- Wilson, J. D., S. Barker, and A. Ridgwell (2012): Assessment of the spatial variability in particulate organic matter and mineral sinking fluxes in the ocean interior: Implications for the ballast hypothesis. *Global Biogeochem. Cycles*, **26**, doi:10.1029/2012gb004398.
- Wishner, K. F., B. Seibel, and D. Outram (2020): Ocean deoxygenation and

- copepods: coping with oxygen minimum zone variability. *Biogeosciences*, **17**, 2315-2339.
- Wuchter, C., B. Abbas, M. J. L. Coolen, L. Herfort, J. van Bleijswijk, P. Timmers, M. Strous, E. Teira, G. J. Herndl, J. J. Middelburg, S. Schouten, and J. S. S. Damsté (2006): Archaeal nitrification in the ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 12317-12322.
- Wunsch, C., and P. Heimbach (2013): Two decades of the Atlantic meridional overturning circulation: anatomy, variations, extremes, prediction, and overcoming its limitations. *J. Climate*, **26**, 7167-7186.
- King, X., A. Morel, H. Claustre, F. D'Ortenzio, and A. Poteau (2012): Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorometry from autonomous profiling Bio-Argo floats: 2. Colored dissolved organic matter absorption retrieval. *J. Geophys. Res. Oce.*, **117**, doi:10.1029/2011jc007632.
- 矢萩拓也・C. Chong・川口慎介 (2019): 深海の化学合成生態系動物群集の幼生分散過程. *海の研究*, **28**, 97-125.
- Yamada, N., H. Fukuda, H. Ogawa, H. Saito, and M. Suzumura (2012): Heterotrophic bacterial production and extracellular enzymatic activity in sinking particulate matter in the western North Pacific Ocean. *Front. Microbiol.*, **3**, 379.
- Yamada, Y., H. Fukuda, K. Inoue, K. Kogure, and T. Nagata (2013): Effects of attached bacteria on organic aggregate settling velocity in seawater. *Aquat. Microb. Ecol.*, **70**, 261-272.
- Yamada, Y., H. Fukuda, Y. Tada, K. Kogure, and T. Nagata (2016): Bacterial enhancement of gel particle coagulation in seawater. *Aquat. Microb. Ecol.*, **77**, 11-22.
- Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, R. Ohgaito, A. Ito, and A. Oka (2019): Glacial CO<sub>2</sub> decrease and deep-water deoxygenation by iron fertilization from glaciogenic dust. *Clim. Past*, **15**, 981-996.
- Yamashita, Y., C.-J. Lu, H. Ogawa, J. Nishioka, H. Obata, and H. Saito (2015): Application of an in situ fluorometer to determine the distribution of fluorescent organic matter in the open ocean. *Mar. Chem.*, **177**, 298-305.
- 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. Tosaka, 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.
- 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 (2021): Estimate of turbulent energy dissipation rate using free-fall and CTD-attached fast-response thermistors in weak ocean turbulence. *J. Oceanogr.*, **77**, 17-28.
- Yokokawa, T., Y. Yang, C. Motegi, and T. Nagata (2013): Large-scale geographical variation in prokaryotic abundance and production in meso- and bathypelagic zones of the central Pacific and Southern Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **58**, 61-73.
- Zark, M., and T. Dittmar (2018): Universal molecular structures in natural dissolved organic matter. *Nat. Commun.*, **9**, 3178.
- Zhao, Z., F. Baltar, and G. J. Herndl (2020): Linking extracellular enzymes to phylogeny indicates a predominantly particle-associated lifestyle of deep-sea prokaryotes. *Sci. Adv.*, **6**, eaaz4354.

## Decadal vision in oceanography 2021: Deep ocean

Akira Oka<sup>1\*</sup>, Yumiko Obayashi<sup>2</sup>, Katsuro Katsumata<sup>3</sup>, Kazutaka Takahashi<sup>4</sup>,  
Youhei Yamashita<sup>5</sup>, and Taichi Yokokawa<sup>6</sup>

### Abstract

Focusing on the deep ocean, in this article, we summarize the existing research topics and discuss the direction and significance of future research. We focused on the ocean biogeochemical cycle in the deep ocean as an interdisciplinary topic that involves physics, chemistry, and biology. In particular, we discussed three issues: (1) transport from the deep to intermediate ocean, (2) transport and changes of organic matter from the surface to deep and intermediate oceans, and (3) temporal changes in the deep ocean. In (1), we discussed the relevance of quantifying the transport from the deep to intermediate layer in the Pacific Ocean to broaden our understanding from a vertical 1D perspective to a 3D one. In (2), we summarized the new concept of recently proposed organic matter pumps and discussed the necessity of approaches from both process and modeling studies. In (3), to understand the future changes in the deep ocean that will progress gradually, we discussed the relevance of various approaches, such as paleoceanographic studies and numerical models, in addition to continuous monitoring by observation.

**Key words:** future planning, deep ocean, ocean biogeochemical cycle,  
ocean deep circulation, biological pump

(Corresponding author's e-mail address: akira@aori.u-tokyo.ac.jp)

(Received 15 July 2021; accepted 24 August 2021)

(doi: 10.5928/kaiyou.30.5\_179)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2021)

---

1 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8568, Japan

2 Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan

3 Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

4 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

5 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, N10W5 Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

6 Institute for Extra-cutting-edge Science and Technology Avant-garde Research (X-star), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

\* Corresponding author: Akira Oka  
e-mail: akira@aori.u-tokyo.ac.jp