

# 1 海洋学の 10 年展望 2021 : 深層

2  
3 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>3</sup>

4  
5 <sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所

6 <sup>2</sup> 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

7 <sup>3</sup> 海洋開発研究機構

8 <sup>4</sup> 東京大学大学院農学生命科学研究科

9 <sup>5</sup> 北海道大学大学院地球環境科学研究院

10 \*\* 連絡著者 : 岡 顕

11 〒277-8568

12 TEL: 04-7136-4384 FAX: 04-7136-4375 e-mail: akira@aori.u-tokyo.ac.jp

## 14 要旨

15  
16 深層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 年程度の期間で  
17 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  
18 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  
19 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) 上層から下層への  
20 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  
21 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  
22 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  
23 した。(2)では、生物ポンプに関して近年提唱された新しいポンプの概念を整理するととも  
24 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  
25 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  
26 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  
27 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。

28  
29 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

30

## 31 1. はじめに

32

33 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 2000 m 以深、生物分野で  
34 は太陽光の直接の影響がなくなる 200 m 以深とすることも多いが、ここでは国際プロジェ  
35 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  
36 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  
37 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。  
38 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  
39 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  
40 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につ  
41 いて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  
42 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  
43 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  
44 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  
45 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  
46 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  
47 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  
48 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  
49 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。

50

## 51 2. 深層から中層への物質輸送

52

53 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  
54 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  
55 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  
56 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  
57 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  
58 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  
59 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  
60 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  
61 わち、深層循環の上昇流は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  
62 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

63 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  
64 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  
65 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  
66 ける乱流混合の定量化に向けた内部波に関する研究(Goto et al., 2021; Ijichi et al., 2020; Yasuda  
67 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(Kawasaki et al.,  
68 2021; Oka and Niwa, 2013; Tatebe et al., 2018)なども近年精力的に進められている。日本学術  
69 会議のマスタープラン 2020 に、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  
70 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  
71 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。

72 一方、これまでの深層循環の全球的な描像については、海水に溶存する各種トレーサー  
73 分布に基づいた「Broecker のコンベアベルト」で示される、過度に単純化された海洋循環  
74 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  
75 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  
76 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  
77 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  
78 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  
79 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

80 (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。亜  
81 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.,  
82 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  
83 鉄が供給され(Nishioka et al., 2013a; Nishioka and Obata, 2017; Yamashita et al., 2020)、ベーリ  
84 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  
85 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  
86 における強い乱流に伴う鉛直混合により亜表層から表層に供給される硝酸塩フラックス  
87 は、北太平洋亜寒帯全域表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  
88 (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  
89 に関する知見が蓄積された(Kondo et al., 2021; Yamashita et al., 2020)。亜熱帯域では、黒潮域  
90 表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  
91 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  
92 される強い乱流混合が重要であることが示された(Kobari et al., 2020; Nagai et al., 2017;  
93 Tsutsumi et al., 2017)。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  
94 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  
95 い。

96

## 97 2.1. 海底直上の循環の観測・解明

98

99 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  
100 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  
101 ルの流速を測る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  
102 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。  
103 それにより海底に近いほど（とくに「粗い」海底では）乱流混合が強いことが分かってき  
104 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、海底地形  
105 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)。  
106 その理論研究によると、上昇流は“海底に近いほど乱流混合は弱く”なるはずの海底のごく  
107 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  
108 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  
109 長さ“hypsoetry”）に関係することが予言されている。また、理想化された推定ではある  
110 が、海底地形付近の下降流と上昇流が相殺して全球積分では従来のゆっくりとした湧昇で  
111 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  
112 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-  
113 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  
114 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  
115 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  
116 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  
117 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  
118 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  
119 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  
120 を評価するためのモデリング研究あるいは理論研究の進展も期待される。

121

## 122 2.2. 深層から中層への栄養物質の輸送

123

124 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  
125 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  
126 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  
127 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  
128 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

129 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  
130 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  
131 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  
132 ていない。2.1.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  
133 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、  
134 深層から中層への上昇流の生じる海域を特定し、鉛直移流や乱流混合等の物理観測および  
135 化学観測を同時に実施することにより、深層から中層への硝酸塩、リン酸塩およびケイ酸  
136 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、中層から表層への栄養塩に  
137 加えて、微量元素（鉄、希土類や亜鉛など）のフラックスの見積もりについても精緻化し、  
138 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物質輸送フラッ  
139 クスを3次元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  
140 続して進める必要がある。鉄は生物に必須な微量栄養素の一つであるが、酸素の豊富な海  
141 水中では速やかな酸化に伴い吸着除去（スキャベンジング）されるため、外部からの鉄供  
142 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  
143 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  
144 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、  
145 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  
146 の同定、さらにはその生物利用性に関しても評価を進めることが望まれる。鉄の長距離輸  
147 送を担うプロセスについての理解を進めるための研究を進めることは、中深層の物質循環  
148 の3次元的な描像の構築にもつながるであろう。

149

### 150 2.3. 化学トレーサーを用いた深層循環の評価

151

152 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 ( $\Delta^{14}\text{C}$ ) や  
153 溶存ヘリウムの同位体 ( $\delta^3\text{He}$ ) 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  
154 窒素原子から生成され、 $^{14}\text{C}$  を含む二酸化炭素は大気-海洋間のガス交換により海水に溶け  
155 込む。表層海水が沈み込んだ後、 $^{14}\text{C}$  は半減期 5730 年で崩壊するが、これは深層循環の時  
156 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  
157 リウムは大気-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  
158 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、  
159  $\delta^3\text{He}$  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  
160 al., 2007)。近年、全球的な鉄の分布を支配する要因として、海底熱水活動から供給される  
161 鉄の貢献が多大であることが明らかになってきた(Nishioka et al., 2013b; Resing et al., 2015;

162 Tagliabue et al., 2010)。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  
163 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  
164 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  
165 ロセスを理解する必要があるとともに、深層から中層への物質輸送を議論するうえでも、  
166 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。

167  $\Delta^{14}\text{C}$  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  
168 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  
169 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(Key et al., 2004)には系統的な  
170 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  
171 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、  
172 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  
173 を評価する研究に用いられている(DeVries and Holzer, 2019; Gebbie and Huybers, 2012; Holzer  
174 et al., 2017; Jenkins, 2020; Khatiwala et al., 2012; Schlitzer, 2016)。これらのトレーサーとモデル  
175 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  
176 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,  
177 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  
178 く残されている。

179 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  
180 流量を推定する上で有用なトレーサーである。これまでは、とくに深層水の形成域に近い  
181 北大西洋や南大洋において活発に利用されてきたトレーサーであるが、今後は深層水の形  
182 成域から離れた太平洋にもそのシグナルが検出されるであろうことを考えると、今後継続  
183 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  
184 重要なデータとなるであろう。

185 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  
186 光性溶存有機物 (FDOM<sub>H</sub>) に関する研究も進んだ。FDOM<sub>H</sub> は外来性 (河川水や堆積物由来)  
187 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。  
188 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  
189 て有用である(Amon, 2003; Nelson et al., 2007)。北太平洋中層に存在する FDOM<sub>H</sub> 中には pre-  
190 formed FDOM<sub>H</sub> が存在することも示されており(Yamashita et al., 2021), 保存的な化学トレー  
191 サーとして活用できる可能性が示唆される。また、FDOM<sub>H</sub> は CTD に接続可能なセンサーを  
192 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,  
193 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  
194 ーを用いた FDOM<sub>H</sub> の観測は、ここ 10 年で増加している(Cyr et al., 2017; Nelson and Gauglitz,

2016; Shigemitsu et al., 2020; Yamashita et al., 2015; Xing et al., 2012)。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), 亜鉛(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)などの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制約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. 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(Hiraoka et al., 2020; Nunoura et al., 2015), 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  
昇流が生じているであろう海域(伊豆小笠原海嶺が好例)において, 物理・化学・生物の  
他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。

220

### 221 3. 上層から下層への有機物の輸送と動態

222

223 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,  
224 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  
225 機物ポンプ(有機物による輸送), アルカリポンプ(炭酸カルシウム殻による輸送), 溶  
226 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  
227 られる(岡, 2018; Oka, 2020; Sarmiento and Gruber, 2006)。生物ポンプとは, 生物が関わるポ

228 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  
229 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  
230 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  
231 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  
232 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  
233 pump）と呼ぶ。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  
234 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  
235 の高度化と生物学的プロセスの関係について言及する。

236

### 237 3.1. 表層から中深層への有機物輸送

238

239 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水深の増加に伴い  
240 減衰する。その減衰率は、べき乗関数である Martin カーブによって数式化され、その輸送効  
241 率は、べき指数である“b”で評価された(Martin et al., 1987)。その後の研究では、減衰率を指  
242 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  
243 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  
244 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  
245 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  
246 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  
247 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  
248 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  
249 る微生物学的要因に関する評価は十分であるとは言い難く、今後も微生物生物量および生  
250 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  
251 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  
252 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  
253 いる(Buesseler et al., 2020; Marsay et al., 2015)。近年、国際 GEOTRACES 計画や米国の大規模  
254 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、  
255 集中的観測・数値モデリングが実施されている(Hayes et al., 2018; Pavia et al., 2019; Siegel et  
256 al., 2016)。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  
257 化学的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  
258 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。

259 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  
260 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

261 な因子であるとの報告が多くなされている(DeVries and Weber, 2017; Sukigara et al., 2019;  
262 Weber et al., 2016)。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  
263 区別して考えることもある(Armstrong et al., 2001; DeVries and Weber, 2017; Pavia et al., 2019;  
264 Riley et al., 2012)。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  
265 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  
266 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  
267 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  
268 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、  
269 その難分解化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  
270 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  
271 ての議論も進めていくことができると期待される。

272 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、  
273 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  
274 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、  
275 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  
276 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  
277 Particle-Injection Pumps (PIPs) と称された(Boyd et al., 2019)。この PIPs は、中層に生息する  
278 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  
279 量とのミスマッチをある程度解消できるとの指摘もされている(Boyd et al., 2019)。季節や対  
280 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  
281 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  
282 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  
283 る。下記でそれぞれについて取り上げる。

284 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  
285 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し  
286 ての理解は、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)。  
287 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  
288 (Emerson, 2014; Fernández-Castro et al., 2019; Hansell et al., 2009; Resplandy et al., 2019)、全海洋  
289 平均では、表層から亜表層 (74 m 以深) へ輸送される有機物フラックスの 20%を溶存有機  
290 物が占めると見積もられている(Roshan and DeVries 2017)。一方で、表層では分解され難い  
291 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  
292 に分解されると考えられている(Calleja et al., 2019; Letscher et al., 2013, 2015)が、その分解性  
293 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

294 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  
295 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  
296 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  
297 (～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  
298 な溶存有機物の観測(Lopez et al., 2020; Pachiadaki et al., 2017)や観測結果のデータベースの構  
299 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  
300 であり, 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,  
301 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を分析可能な手法を開発するこ  
302 とも必要である。

303 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  
304 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  
305 た Seasonal lipid Pump (Jónasdóttir et al., 2015)の寄与が太平洋, 大西洋亜寒帯域において定量  
306 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  
307 表層から個体が能動的に 500m～1000m 以深に移動するため, 沈降に伴う減衰が小さく, ま  
308 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  
309 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(1000m  
310 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。  
311 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  
312 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  
313 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。

314 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  
315 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  
316 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  
317 性が示され, その重要性が指摘されている(Boyd et al., 2019 Fig. 2C)。とくに魚類マイクロネ  
318 クトンの日周鉛直移動に伴う輸送は真光層から移出する炭素の平均 16%に相当すると見積  
319 もらわれているが(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  
320 に輸送量計算の鍵となる生物量の定量法については, 音響や画像解析などを組み合わせた  
321 より精度の高い方法の開発が必要である。また, 種多様性を考慮した鉛直移動や食性, 代  
322 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調査スケ  
323 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。

324 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  
325 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  
326 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

327 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  
328 同が明らかにされることが望まれる。

329 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、  
330 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  
331 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  
332 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  
333 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  
334 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  
335 なる。真光層下に分布する中層性カイアシ類の多くは、マリンスノー食者であり、分解さ  
336 れながら沈降してきた有機物を摂餌し、密度の高い糞粒として排泄することで、下層への  
337 物質輸送を促進する働きをもつ。一方ここで同化された有機物の多くは、呼吸や死亡によ  
338 って中層で無機化され、炭素隔離に寄与する。種毎に異なったタイプのマリンスノーを選  
339 択的に食べる可能性が示されており、沈降粒子の組成とカイアシ類群集組成の組み合わせ  
340 は中層以深への炭素輸送の収支に影響を与える可能性もある。さらに、凝集体のような粒  
341 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  
342 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  
343 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  
344 まれる。

345

### 346 3.2. 中層および深層の微生物活動による物質の変化

347

348 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  
349 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  
350 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  
351 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  
352 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  
353 Reinthaler, 2013; Yokokawa et al., 2013)。

354 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  
355 酸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  
356 al., 2017)。海洋における炭酸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  
357 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  
358 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/  
359 亜硝酸の増加(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

360 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  
361 菌が中深層での炭酸固定を担い、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  
362 ほど大きいことが明らかになってきている。現在では炭酸固定は中深層生態系でおきる普  
363 遍的な現象として理解されている。分子微生物学的な手法の適用により、微生物 DNA 情報  
364 から炭素固定機能遺伝子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。一方  
365 で、方法的な制限により炭酸固定速度等の定量的なデータの取得にはまだ課題も多い。炭  
366 酸固定は中深層生態系における基礎/再生生産であり、中深層物質循環の主要過程である可  
367 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取得が期待される。

368 微生物による易分解性有機物から難分解性溶存有機物の生成（微生物炭素ポンプ: Jiao et  
369 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  
370 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  
371 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  
372 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  
373 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  
374 物の生成機構が評価された(Koch et al., 2014; Lechtenfeld et al., 2015; Zark and Dittmar, 2018)。  
375 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  
376 とを示唆する実験結果も得られている(Goto et al., 2020; Noriega-Ortega et al., 2019; Ortega-  
377 Retuerta et al., 2020)。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  
378 (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  
379 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  
380 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  
381 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  
382 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  
383 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。

384 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  
385 有機物は少ないであろう。また、中深層における炭酸固定により生産される有機物は、表  
386 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  
387 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。  
388 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  
389 (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  
390 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  
391 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  
392 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

393 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  
394 のかについての評価や予測へと繋げていくことが期待される。

395

### 396 3.3. 素過程の追求と物質循環モデル

397

398 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  
399 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  
400 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  
401 デルへの適用という方向性は、相容れない側面がある。この手の隔たりは、モデル研究と  
402 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  
403 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  
404 を進めていくことが重要であろう。本稿ではそのためのひとつの視点として、生物を介し  
405 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整理  
406 してみる。

407

- 408 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  
409 ールド比, 栄養塩/有機物濃度など; Sarmiento and Gruber, 2006)
- 410 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  
411 メータとの相関など; Hasumi and Nagata, 2014)
- 412 3) 物質循環過程における生物群集の機能 (基礎生産, 有機物分解, 無機栄養塩再生等)
- 413 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・成長速度等の生物パラメー  
414 タ)
- 415 5) 生物群集の環境応答 (生物パラメータのダイナミクスと物理化学パラメータとの相  
416 関)
- 417 6) 個体群の環境応答 (個体群の観察およびその定量化が難しい)
- 418 7) 個体の環境応答 (個体観察およびその定量化が難しい)

419

420 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  
421 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  
422 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  
423 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  
424 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  
425 ことが必要となる。

426 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  
427 food chain, Biological pump, Microbial loop, Microbial carbon pump, Viral shunt, Mycoloop) とそ  
428 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  
429 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  
430 (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)  
431 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  
432 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  
433 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  
434 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  
435 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  
436 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。

437

## 438 4. 時間変化する深層

439

### 440 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

441

442 2.1 で紹介した「ゆっくりと湧昇する上昇流」から「海底近くでの下降流と海底地形をすり  
443 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  
444 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  
445 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  
446 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  
447 回りりの 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  
448 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  
449 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  
450 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 (Kawabe and Fujio, 2010)は  
451 これをインバース法などなんらかのスミージングで代替してきたが、これからの十年は乱  
452 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  
453 器である深層フロートが実用化の域に達してきた (Roemmich et al., 2019)。これらのフロ  
454 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  
455 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、  
456 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していく必要  
457 がある。

458 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  
459 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  
460 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  
461 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  
462 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プ  
463 ロキシ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  
464 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  
465 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、state  
466 estimate、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  
467 は 1000 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、  
468 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」  
469 内で観測した値を 1000 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  
470 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  
471 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 フロートに代表されるクロ  
472 ロフィル、後方散乱光、溶存酸素、窒素化合物などが考えられる。また、近年用いられて  
473 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  
474 ルを持つ（2.3. 参照）。

475 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  
476 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 4000m の海  
477 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  
478 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.,  
479 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  
480 した水平方向からの餌料供給の影響が大きいことがわかってきた(Smith et al., 2001)。とく  
481 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  
482 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  
483 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  
484 して注目されている(Selvaraj et al., 2015)。

485

#### 486 4.2. 深層の過去の長期変動

487

488 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  
489 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  
490 マである。例えば、大西洋深層循環についての過去 1000 年間の変動を記録したプロキシデ

491 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  
492 ている(Caesar et al., 2021)。また過去 150 年間では、1960 年以降にその弱化が顕著になって  
493 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-  
494 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  
495 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  
496 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、  
497 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。太平洋は太  
498 平洋に比べて貯熱量・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  
499 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  
500 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  
501 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),  
502 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は重要となることは明らかである。  
503 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太平洋係留の K2 や  
504 KEO 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 とされる深層  
505 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  
506 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  
507 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  
508 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  
509 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  
510 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  
511 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  
512 であろう。

513 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  
514 量の大きさ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  
515 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  
516 大期(2 万年前)における大気中二酸化炭素濃度は、現在に比べて 100ppm 程度低かったこ  
517 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  
518 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),  
519 シリカリーケージ仮説(Matsumoto et al., 2002)などさまざまな説が提案されている。しかし  
520 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  
521 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  
522 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  
523 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。

524 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  
525 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。

526

#### 527 4.3. 深層の将来変化

528

529 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  
530 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  
531 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  
532 シグナルは、南極での南極底層水形成を起源するものをはじめ、大西洋深層水形成を起源  
533 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  
534 10 年から 20 年の時間スケールで考えると、南極での底層水を起源とするシグナルが太平  
535 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  
536 シグナルが到達しているという報告もあり (Kouketsu et al., 2011; Masuda et al., 2010)、今後太  
537 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  
538 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、  
539 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  
540 塩分化にリバウンドしたことが報告された (Aoki et al., 2020; Castagno et al., 2019)。この変化  
541 は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  
542 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、深海アルゴフロート  
543 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  
544 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  
545 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。  
546 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  
547 ながることが期待される。

548 海洋の有機物に関する各生物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  
549 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  
550 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、海洋は二酸  
551 化炭素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  
552 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  
553 無機化速度が加速される可能性が高い。結果として、中層生態系内での有機物のリサイク  
554 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  
555 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  
556 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

557 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  
558 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  
559 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  
560 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酸固  
561 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  
562 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  
563 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  
564 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  
565 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  
566 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、  
567 重点化が必須である。

568 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  
569 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  
570 として全球的な貧酸素化の進行が顕著であり、水温上昇や酸性化と連動した **Multiple**  
571 **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  
572 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  
573 の拡大が東部太平洋熱帯域、亜寒帯太平洋、北部インド洋において顕著である。沿岸域で  
574 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  
575 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  
576 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.,  
577 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  
578 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.,  
579 2011; Netburn and Anthony Koslow, 2015; Wishner et al., 2020)、その結果これら生物を餌料と  
580 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  
581 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  
582 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  
583 測のために知見の蓄積が望まれる。

584 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)、  
585 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  
586 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  
587 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  
588 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  
589 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

590 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  
591 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  
592 理解は人類共通の課題であるといえる。

593 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  
594 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  
595 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  
596 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  
597 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  
598 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。  
599 温暖化の進行により、大西洋深層循環の弱化が引き起こされることは多くの研究で議論さ  
600 れているが、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  
601 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  
602 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  
603 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.,  
604 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  
605 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、  
606 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  
607 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。

608

## 609 5. おわりに

610

611 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  
612 年で取り組むべき研究の方向性について議論した。本稿では物理・化学・生物が分野横断  
613 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  
614 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  
615 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。  
616 船舶観測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  
617 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  
618 留観測でも同じロブを物理・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  
619 ある。深海アルゴ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  
620 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  
621 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  
622 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

623 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。本稿で取り上げた生物・化学分  
624 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  
625 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  
626 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。

627

#### 628 謝辞

629 本稿の作成にあたり、以下の方々(敬称略)から貴重な助言をいただきました：大貫陽平，  
630 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。

631

## 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 (2003): Dissolved organic carbon distribution and origin in the Nordic Seas: Exchanges with the Arctic Ocean and the North Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 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, *et al.* (2019): Hydrothermal vents trigger massive phytoplankton blooms in the Southern Ocean. *Nat. Commun.*, 10, 1–8.
- 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 2*, 49, 219–236.
- Bianchi, D., E. D. Galbraith, D. A. Carozza, K. A. S. Mislun, 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, *et al.* (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 ning (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., L. A. Levin, A. Oschlies, *et al.* (2018): Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359, doi:10.1126/science.aam7240
- 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. U. S. A.*, 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 n (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 D.A. Hansell and C.A. Carlson [eds.], *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter* (Second Edition). Academic Press.
- 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., Oregon State University, 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 Meijenfildt, J. M. Walter, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2009): Spatial distribution of Bacteria and Archaea and amo A 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. Biol. Sci.*, 277, 2783–2792.
- DeVries, T., and M. Holzer (2019): Radiocarbon and helium isotope constraints on deep ocean ventilation and mantle-<sup>3</sup>He sources. *J. Geophys. Res. Oceans*, 124, 3036–3057, doi:10.1029/2018jc014716
- 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: EXPORT AND FATE OF MARINE ORGANIC MATTER. *Global Biogeochem. Cycles*, 31, 535–555.
- Emerson, S (2014): Annual net community production and the biological carbon flux in the ocean: OCEAN BIOLOGICAL ORGANIC CARBON FLUX. *Global Biogeochem. Cycles*, 28, 14–28.
- 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.
- Flierdt, T. van de, T. van de Flierdt, K. Pahnke, *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. doi:10.4319/lom.2012.10.234
- Frajka-Williams, E., I. J. Ansorge, J. Baehr, *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. *Scientific Reports*, 11, doi:10.1038/s41598-020-80029-2
- 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.
- 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. U. S. A.*, 106, 6513–6518.
- 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, *et al.* (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.
- Hiraoka, S., M. Hirai, Y. Matsui, *et al.* (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  $^{39}\text{Ar}$  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. Chin.*, 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
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): 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.
- 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, *et al.* (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, *et al.* (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. U. S. A.*, 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.
- 神田穰太, 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.
- 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, *et al.* (2004): A global ocean carbon climatology: Results from Global Data Analysis Project (GLODAP): GLOBAL OCEAN CARBON CLIMATOLOGY. *Global Biogeochem. Cycles*, 18, doi:10.1029/2004gb002247
- Khatiwala, 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.
- Kobari, T., T. Honma, D. Hasegawa, *et al.* (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  $\text{CO}_2$  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, *et al.* (2014): Ammonia-oxidizing archaea use the most energy-efficient aerobic pathway for  $\text{CO}_2$  fixation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 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, *et al.* (2011): Deep ocean heat content changes estimated from observation and reanalysis product and their influence on sea level change. *J. Geophys. Res.*, 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: DISSOLVED ORGANIC NITROGEN IN THE GLOBAL SURFACE OCEAN. *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, *et al.* (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. U. S. A.*, 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, *et al.* (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 CO<sub>2</sub>. *Global Biogeochem. Cycles*, 16, 5–15–23.
- 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 A. Mougi [ed.], *Diversity of Functional Traits and Interactions: Perspectives on Community Dynamics*. 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, *et al.* (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*, John Wiley & Sons.
- 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, *et al.* (2013a): Intensive mixing along an island chain controls oceanic biogeochemical cycles: MIXING CONTROLS 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. U. S. A.*, 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, *et al.* (2015): Hadal biosphere: insight into the microbial ecosystem in the deepest ocean on Earth. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 112, E1230–6.
- Oka, A (2020): Ocean carbon pump decomposition and its application to CMIP5 earth system model simulations. *Progress in Earth and Planetary Science*, 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: NUTRIENT TRANSPORT BY BALLAST MINERAL. *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.
- Oka, E., M. Ishii, T. Nakano, *et al.* (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, 1106 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 (I). *海の研究*, 22, 191–218.
- Olsen, A., N. Lange, R. M. Key, *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.
- Ortega-Retuerta, E., Q. Devresse, J. Caparros, B. Marie, O. Crispi, P. Catala, F. Joux, and I. Obernosterer (2020): Dissolved organic matter released by two marine heterotrophic bacterial strains and its bioavailability for natural prokaryotic communities. *Environ. Microbiol.*, doi:10.1111/1462-2920.15306
- Pachiadaki, M. G., E. Sintes, K. Bergauer, *et al.* (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, *et al.* (2019): Shallow particulate organic carbon regeneration in the South Pacific Ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 116, 9753–9758.

- Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, *et al.* (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429–436.
- Ramirez-Llodra, E., P. A. Tyler, M. C. Baker, *et al.* (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: EXPORT OF FAST AND SLOW SINKING POC. *Global Biogeochem. Cycles*, 26, doi:10.1029/2011gb004085
- Robinson, C., D. Wallace, J.-H. Hyun, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2021): Toward a better understanding of fish-based contribution to ocean carbon flux. *Limnol. Oceanogr.*, doi:10.1002/lno.11709
- Sarmiento, J. L., and N. Gruber (2006): *Ocean Biogeochemical Dynamics*, Princeton University Press.
- Schlitzer, R (2016): Quantifying He fluxes from the mantle using multi-tracer data assimilation. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 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. Arulanathan, 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, *et al.* (2016): Prediction of the Export and Fate of Global Ocean Net Primary Production: The EXPORTS Science Plan. *Frontiers in Marine Science*, 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 2*, 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 1*, 144, 17–27.
- Tagliabue, A., L. Bopp, J.-C. Dutay, *et al.* (2010): Hydrothermal contribution to the oceanic dissolved iron inventory. *Nat. Geosci.*, 3, 252–256.
- Tatebe, H., Y. Tanaka, Y. Komuro, and H. Hasumi (2018): Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean. *Scientific Reports*, 8, doi:10.1038/s41598-018-32768-6
- Thornalley, D. J. R., D. W. Oppo, P. Ortega, *et al.* (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. Oceans*, 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, 1, 115748
- Vic, C., A. C. Naveira Garabato, J. A. M. Green, *et al.* (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. U. S. A.*, 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, *et al.* (2006) Archaeal nitrification in the ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 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. Clim.*, 26, 7167–7186.
- Xing, 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: CDOM ABSORPTION RETRIEVAL FROM BIO-ARGO. *J. Geophys. Res.*, 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, *et al.* (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, *et al.* (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.

投稿用原稿

## 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>, Yohei Yamashita<sup>5</sup>,  
Taichi Yokokawa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

<sup>2</sup> Center for Marine Environmental Studies, Ehime University

<sup>3</sup> Japan Agency for Marine-Earth Sciences and Technology

<sup>4</sup> Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

<sup>5</sup> Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

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

### Abstract

By focusing the deep ocean, this paper summarizes the topics currently being discussed and discusses the direction and significance of research to be conducted in the next 10 years. In this paper, we focused on the ocean biogeochemical cycle in the deep ocean as a topic that involves physics, chemistry, and biology in a cross-disciplinary manner. Specifically, three issues are discussed: (1) transport from the deep to the intermediate ocean, (2) transport and changes of organic matter from the upper to the lower layer, and (3) temporal changes in the deep ocean. In (1), we discussed the importance of quantifying the transport from the deep to the intermediate layer in the Pacific Ocean, in order to deepen our understanding from a vertical one-dimensional perspective to a three-dimensional one. In (2), we summarized the new concept of organic matter pumps proposed in recent years and discussed the necessity of approaches from both process and modelling studies. In (3), in order to understand the future changes in the deep ocean that will progress slowly but surely, we discussed the importance of various approaches such as paleoceanographic studies and numerical models, in addition to continuous monitoring by observation.

Keywords: Future planning, Deep oceans, Ocean biogeochemical cycle, Ocean deep circulation, biological pump