

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21

## 海洋学の10年展望：新たな手法と問題

平井 惇也<sup>1\*\*</sup>・宮 正樹<sup>2</sup>・藤木 徹一<sup>3</sup>・吉田 聡<sup>4</sup>・乙坂 重嘉<sup>1</sup>・帰山 秀樹<sup>5</sup>・加古 真一郎<sup>6</sup>・片岡 智哉<sup>7</sup>・松岡 大祐<sup>3</sup>・日高 弥子<sup>3</sup>・杉山 大祐<sup>3</sup>・小嶋 不二夫<sup>8</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>2</sup> 千葉県立中央博物館

<sup>3</sup> 海洋研究開発機構

<sup>4</sup> 京都大学防災研究所

<sup>5</sup> 水産研究・教育機構 水産資源研究所

<sup>6</sup> 鹿児島大学大学院 理工学研究科

<sup>7</sup> 愛媛大学大学院 理工学研究科

<sup>8</sup> 一般社団法人/株式会社 ピリカ

\*\* 連絡著者：平井 惇也

〒277-8564 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

TEL: 04-7136-6163

e-mail: hirai@aori.u-tokyo.ac.jp

22

## 要旨

23 観測や分析技術の革新は海洋学を大いに発展させてきたが、同時に海洋環境汚染など人間  
24 活動に伴う新たな問題も浮き彫りにしてきた。本稿では、今後 10 年の海洋学の発展に関わ  
25 る新たな手法として、環境 DNA, BGC Argo, バイオロギングに着目した。また、2011 年の  
26 東北地方太平洋沖地震以降の継続した問題である海洋放射能、ならびに近年急速に注目を  
27 集める海洋プラスチックを、新たな問題として取り上げた。各節ではそれぞれの研究や問題  
28 の現状を論じるとともに、次の 10 年に向けての展望や課題について議論した。

29

30 キーワード：環境 DNA, BGC Argo, バイオロギング, 放射能, プラスチック

## 31 1. はじめに

32 海洋は人々の関心を引き、古くは 18 世紀後半のジェームズ・クック、19 世紀前半にはチ  
33 ャールズ・ダーウィンのビーグル号航海をはじめとして海洋図の作成や生物相の把握が精  
34 力的に行われてきた。19 世紀後半からはより体系だった海洋観測により物理・化学・生物  
35 の科学的知見が蓄積され、近代海洋学につながる礎が形成された。近代、特に 20 世紀後半  
36 には観測や分析技術が発展し、新たな手法の導入がさらなる海洋学の発展をもたらした。例  
37 えば、1970 年代に開発された GPS は海洋上でも正確な位置を把握可能にし、航行精度の向  
38 上や観測データの正確な比較において大きな技術革新となった。また、水温や塩分の精密で  
39 連続的な測定もセンサー技術の発展により可能となり、安定同位体の測定技術は海洋大循  
40 環、古環境復元、海洋生態系の食物網構造の解明に大きく貢献した。海洋学における新たな  
41 手法の導入は近年も積極的に行われ、前回の日本海洋学会将来構想（花輪・津田 2013; 岡  
42 ら, 2013; 神田ら, 2013; 濱崎ら, 2013）では Core Argo の全球的な観測網の整備、観測衛星、  
43 データ同化システム、各種センサー（溶存酸素・栄養塩・一次生産等）の開発、プランクト  
44 ンレコーダー等の光学的手法、安定同位体、DNA シークエンサなどの手法が近年の海洋学  
45 の発展に大きく貢献したことを指摘している。

46 新たな手法は近年の海洋学の発展に大いに貢献するとともに、人間活動に起因すると  
47 考えられる新たな問題を浮き彫りにしてきた。例えば、1950 年代より始まったハワイのマ  
48 ウナロアでの大気観測 (<https://keelingcurve.ucsd.edu/>) は CO<sub>2</sub> 濃度の上昇を明瞭に捉え続け、  
49 温室効果ガスの排出が原因と考えられる地球温暖化は現在進行形で社会問題となっている。  
50 大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇や温暖化は海洋酸性化や海面上昇を引き起こし、生物分布域の変  
51 化や水産重要種の資源量変動への影響も報告されている。また、原油流出、重金属、内分泌  
52 かく乱物質等は海洋生態系に悪影響を与えるのみならず、我が国の水俣病など生物濃縮を  
53 通じて人類へ影響を与える事象もある。人間活動による直接的影響と断定はできないが、乱  
54 獲による北海道のニシン漁の崩壊、内湾の富栄養化に伴う赤潮の頻発、バラスト水による外  
55 来種の流入出など、海洋に関わる多くの問題が生じているのが現状である。

56 本稿では今後 10 年の海洋学の発展に関わる多くの新たな手法の中でも環境 DNA, BGC  
57 Argo, バイオロギングを 3 つのトピックとして第 2 節で取り上げ、手法やその技術を用い  
58 た研究の現状を概説し、将来的な海洋学における発展を議論した。また、人類は多くの海洋  
59 に関わる問題を抱えているが、2011 年の東北地方太平洋沖地震以降の継続的な問題である  
60 海洋放射能、ならびに従来から問題となっており、近年国際的に大きな注目を集める海洋プ  
61 ラスチックを新たな問題として第 3 節で取り上げ、問題の現状や展望について論じた。

62

## 63 2. 新たな手法

### 64 2.1. 環境 DNA

65 環境 DNA 分析は、大型生物を含めた生物多様性モニタリングが可能な新たな手法として  
66 着目されている技術である。広義の環境 DNA は、微生物本体を含む環境媒体中に存在する  
67 DNA 全般を指すが、本稿では大型生物から体外に放出された DNA を環境 DNA として扱  
68 う。環境 DNA が最初に生物調査に用いられたのは、フランスの溜め池に生息する外来種ウ  
69 シガエルの検出に対してである (Ficetola et al., 2008)。その後、2012 年には日本の河川  
70 (Minamoto et al., 2012) とデンマーク沿岸 (Thomsen et al., 2012) で環境 DNA による魚類群集  
71 調査が行われ、以降は様々な生物群の環境 DNA 論文が世界中から発表されるようになった。  
72 我が国では JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「環境 DNA 分析に基づく魚類群集の定  
73 量モニタリングと生態系評価手法の開発」による研究開発が 2013–2018 年に進められ、世界  
74 に先駆け魚類の多種同時並列検出法の開発が行われた (Miya et al., 2015)。

75 環境 DNA 分析には大きく分けて種特異的検出法と多種同時並列検出法の 2 つがある。前  
76 者はウイルス検出でも利用されている定量 PCR (標的領域の増幅) を用い、対象種は限られ  
77 るが検出力が高く定量化が容易である。後者はメタバーコーディング法とも呼ばれ、群集全  
78 体が把握可能であるが検出力で劣り定量化が難しい (坂田ら, 2021)。本節では、特定種に限  
79 らず生態系全体を対象としたモニタリング手法に移りつつある現状を踏まえ、海産魚類を  
80 中心とした環境 DNA メタバーコーディング法(以下 EMB 法)の概要を説明するとともに、

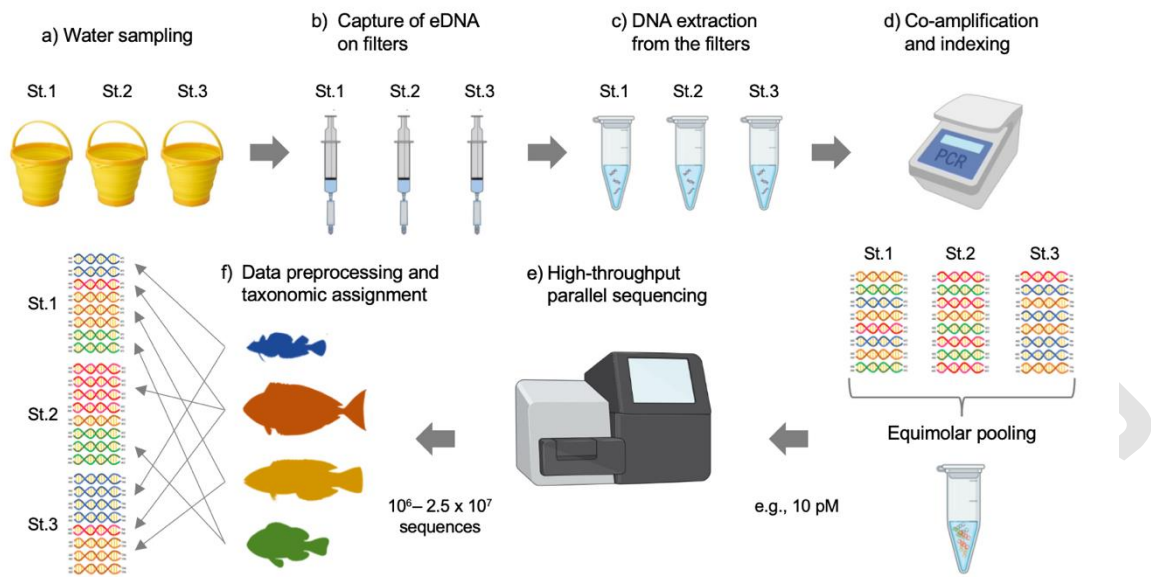
81 この新たな手法の課題と展望についても論じる。なお、環境 DNA 分析全般は土居・近藤  
82 (2021), MiFish プライマーを用いた魚類 EMB 法は Miya et al. (2020) の英文総説とその和文  
83 版である宮 (2021), 海産魚類の EMB 法全般は Miya (in press) の総説に詳しく解説されて  
84 いるので参照されたい。

85

### 86 2.1.1. EMB 法の概要

87 EMB 法は(a)採水, (b)ろ過, (c)ろ過残渣からの DNA 抽出後は通常分子生物学実験と  
88 同様に実験を進めることができる (Fig. 1)。しかし、対象とする DNA 濃度が事前に不明で、  
89 その濃度が極めて希薄なことに注意する必要がある。魚類の例では海水中を漂う DNA のわ  
90 ずか 0.004%が魚類由来との報告があり (Stat et al., 2017), 環境 DNA 分析では PCR 法によ  
91 り魚類由来の DNA のみを分析可能な量に増幅する必要がある。PCR 法では特定分類群の種  
92 判別が可能な短い超可変領域 (100–200 塩基対), それを挟み込む分類群横断的な保存領域  
93 (20 塩基対前後)を探索し, その 2 つの保存領域に結合するユニバーサルプライマーを設  
94 計する。魚類では上述の CREST の成果として MiFish プライマーが開発され (Miya et al.,  
95 2015), 他のプライマーと比べて優れた性能を有し (Collins et al., 2019), 三大洋・六大陸の内  
96 外を含む世界中で広く使われるようになった (Miya et al., 2020)。MiFish プライマーを用い  
97 た PCR により (d)魚類の DNA 断片の網羅的な増幅, 断片の両端にサンプル識別のタグ配列  
98 や各種アダプター配列の付加を行い, (e)次世代シーケンサを用いた超並列分析 (複数サ  
99 ンプルの同時並列的分析)により大量の目的領域の配列を取得する。さらに, (f)決定した大  
100 量の DNA 配列をコンピュータ上でリファレンス配列 (魚種と紐づけられた参照配列) と比  
101 較することで, 各サンプルに含まれる魚種が検出可能となる。

102



103

104 Fig. 1 Schematic representation of the eDNA metabarcoding workflow. a) Water sampling from three  
 105 stations; b) on-site filtration using a filter cartridge and syringe to concentrate and collect eDNA on  
 106 the filter membrane; c) eDNA extraction from the membrane; d) co-amplification of fish eDNA  
 107 fragments using universal PCR primers and addition of adapter and index sequences to both ends of  
 108 the fragments; e) high-throughput parallel sequencing; f) bioinformatic analysis of DNA sequences  
 109 for taxonomic assignment.

110

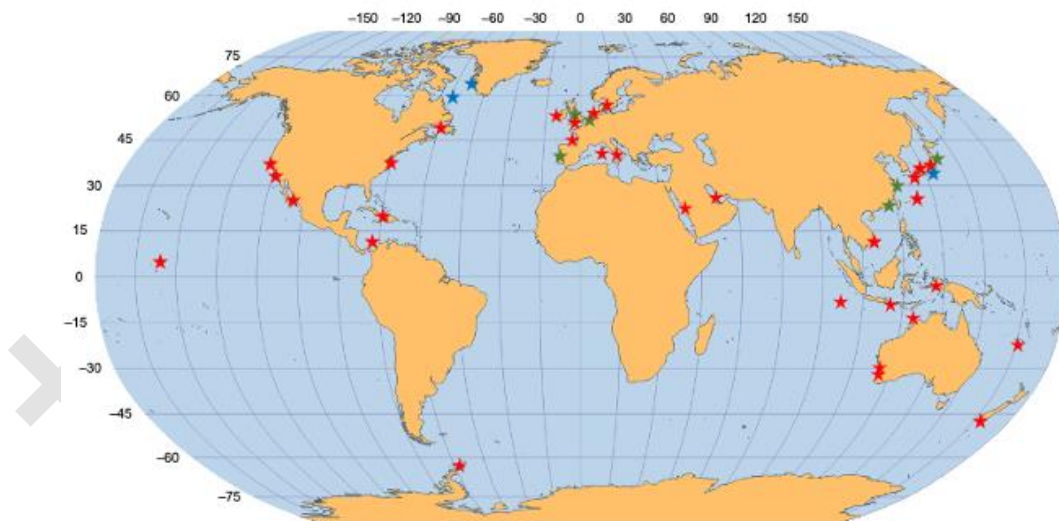
### 111 2. 1. 2. 海産魚類の EMB 研究

112 2021年2月現在、汽水域を含む海洋生態系で行われた魚類の EMB 研究は 50 件にのぼる  
 113 (Miya, in press)。地理的にはアフリカ大陸を除くすべての大陸沿岸と沖合から研究成果が発  
 114 表されており、ほぼ全球的に研究が行われている (Fig. 2)。EMB 法を用いた海産魚類研究  
 115 の詳細は Miya (in press) の総説を参照されたいが、以下では魚類群集の種数推定、種組成  
 116 の時空間動態について言及する。

117 直接採集や目視観察等の従来法による魚類の種数や種組成の把握は膨大な時間・経費、ま  
 118 た正確な種同定のため高度な専門的知識を必要とする。そのため、従来法による調査を少人

119 数で短期間に多地点で実施するのは現実的に難しい。一方、EMB 法は調査自体は採水のみ  
120 であり、従来法と比べて実現性が格段に高い。実際、高度に多様化が進んだ熱帯・亜熱帯海  
121 域でも、EMB 法を用いた多地点調査により魚種数を予測できることが示されている (Juhel  
122 et al., 2020; Oka et al., 2021)。また、EMB 法により魚類群集構造の季節変動 (Port et al., 2016;  
123 Sigsgaard et al., 2017; Zou et al., 2020; Oka et al., 2021)、鉛直・水平方向の空間変動を捉えられ  
124 ることが明らかになっている (Andruszkiewicz et al., 2017; West et al., in press)。このような経  
125 験的に得られた環境 DNA の検出と生物の存在の一致性 (site fidelity) は、野外調査でも実  
126 験的に確かめられている (Murakami et al., 2019)。これらの研究例のように、海洋生態系にお  
127 いて EMB 法を用いた魚類群集調査を行うことにより、これまでは長年の断片的な採集記録  
128 を集積するか、大規模な調査を行わない限り知りえなかった魚類の群集構造が明らかにな  
129 った。さらに、従来法では検出が困難な魚類群集の時空間動態をかなりの精度で把握するこ  
130 とが可能になった。

131



132

133 Fig. 2 The approximate geographic locations of the survey sites from the 50 selected papers that  
134 performed eDNA metabarcoding for marine fish communities (for details, see Miya in press). Green,  
135 blue, and red stars represent studies conducted in estuaries, deep-sea, and other shallow coastal areas,  
136 respectively. Multiple studies conducted in the same area are indicated by a single symbol.

137

### 138 2.1.3. 今後の課題と展望

139 環境 DNA 分析の今後の課題と展望を考える上で、この手法のもつ制約や限界を正しく  
140 認識することが重要となる。第一に、環境 DNA は大型生物から放出された間接的な遺伝的  
141 マーカーにすぎず、生物本体の個体数、体長、体重、年齢、(多くの場合)性に関する情報  
142 を含んでいない。第二に、EMB 法においても DNA の定量法は開発されたが (Ushio et al.,  
143 2018), 定量された DNA に基づき個体数や生物量を推定するには越えるべき壁が多い。上記  
144 の CREST のプロジェクトでモデルとなった舞鶴湾のマアジでは、海流や環境 DNA 産出・  
145 移送・分解速度をモデリングすることで妥当な個体数推定が可能となったが (Fukaya et al.,  
146 2020), 一海域の単一種でさえ解析に要する時間と手間は大きなものになる。第三に、環境  
147 DNA 分析において避けられない偽陰性や偽陽性の問題にも注意を払う必要がある。EMB 法  
148 も例外ではなく、PCR の取りこぼしや同属近縁種間を識別できないために起こる偽陰性、  
149 さらに野外や実験室で実験系を汚染する外来 DNA による偽陽性は代表的なものである  
150 (Miya et al., 2020)。第四に、EMB 法で検出された DNA 配列の正確な種判定にはリファレン  
151 ス配列が必須であるが、その網羅率は日本産魚類でもまだ 70%を少し越えたにすぎない  
152 (Miya et al., 2020)。

153 こうした制約や限界があるとはいえ、環境 DNA 分析のもつ可能性が極めて大きいことは  
154 疑いようがない。調査は採水のみであり、非侵襲的で対象生物も生態系も傷めることがなく、  
155 少人数で多地点高頻度の調査が可能である。実際に、宮ら (未発表) は房総半島南部沿岸に  
156 設けた 11 定点での隔週調査を 2017 年 8 月から 2 年間実施し、欠測することなくデータ 50  
157 回分を得ることができた。また、千葉県沿岸全域の約 350 km の海岸線に設けた 100 地点の  
158 調査は 5 日間で完了した。これらの試料の予備的な分析結果から、魚類群集の時空間動態が  
159 手に取るように把握できることがわかってきた。また、本節では魚類の環境 DNA 分析につ  
160 いて言及したが、沿岸の生物群集構造が科レベルとはいえ環境 DNA から明確に再構成され  
161 たように (Stat et al., 2017), 同手法は微生物から鯨まで分類群を問わない手法であり、今後

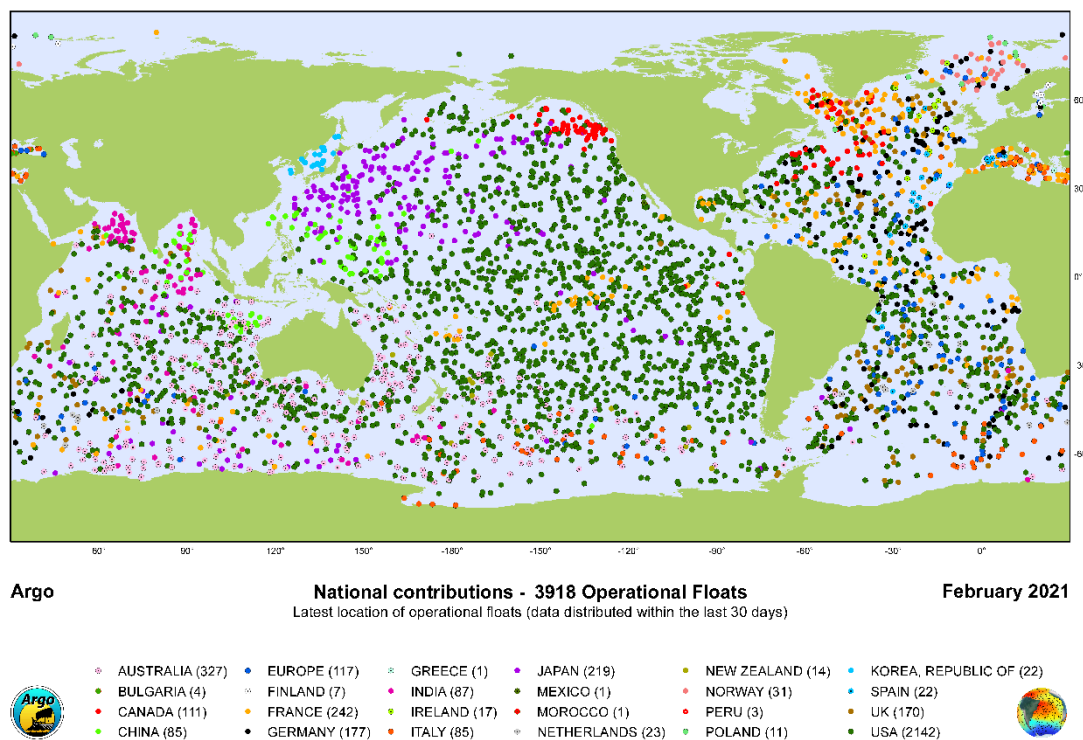


162 は海洋生態系の全容を復元する手法としても期待される。加えて、サンプリングは採水のみ  
163 と容易なことから、今後は市民との連携による協働調査も期待できる。将来的には、自動採  
164 水・ろ過装置が開発され大量生産が可能となれば (Yamahara et al., 2019), 全国各地の大規模  
165 な時空間規模の観測が可能となる。装置の DNA 抽出や分析の全自動化が進み、結果を遠隔  
166 でモニタリングできるようになれば、海洋生物群集の時空間動態を天気のように予報でき  
167 るような日が来るかもしれない。そのような「夢物語」に向かった道筋をつけるのが、今後  
168 10 年の課題と言える。

169

## 170 2. 2. BGC Argo

171 1999 年に始まった Argo Program は、Global Ocean Observing System (GOOS) の主要なコン  
172 ポネントであり、世界各国 が CTD センサーを搭載した昇降フロートで測定した水温・塩  
173 分プロファイルデータ (0–2,000 m) を全球規模で収集し、公開してきた (Riser et al., 2016)。  
174 Core Argo と呼ばれるこれらのフロートは、現在も 3,500–4,000 台の観測網が維持され、世界  
175 中の海で稼働している (<https://argo.ucsd.edu/>; Fig. 3)。Core Argo の速報データは測定後 24 時  
176 間以内に Global Data Assembly Center (GDAC) から公開され、海況監視・予報に利用されて  
177 いる。また、国際的に基準化した方法で品質管理した高精度データも 1 年以内に公開され、  
178 気候・海洋環境変動研究に活用されている。この Argo Program の観測手法を生物地球化学  
179 研究に応用するため、2000 年代に入ると様々な会議 (例えば Rudnick and Perry, 2003; Johnson  
180 et al., 2009; Claustre et al., 2010) やパイロット研究 (例えば Körtzinger et al., 2004; Boss et al.,  
181 2008; Johnson et al., 2010) が行われ、2016 年に現在の Biogeochemical Argo (BGC Argo) Program  
182 が立ち上がった (Johnson and Claustre, 2016)。本節では生物地球化学研究の新たな手法とし  
183 て着目される BGC Argo の現状と課題、また今後の展望について述べる。BGC Argo の重要  
184 性については、本特集の熱帯域 (土井ら, 2021, 本特集), 中緯度域 (橋濱ら, 2021, 本特集),  
185 深層 (岡ら, 2021, 本特集), 極域 (川合ら, 2021, 本特集) の将来構想でも繰り返し強調され  
186 ているので参照されたい。



187

188 Fig. 3 Global map of operational Core Argo floats, by nation, in February 2021 ([https://www.ocean-](https://www.ocean-ops.org/board)  
 189 [ops.org/board](https://www.ocean-ops.org/board)).

190

### 191 2. 2. 1. BGC Argo の現状と課題

192 BGC Argo Program では、全球規模の水深 0–2,000 m の生態系や物質循環に関わるパラメ  
 193 ーターをフロートで観測し、生物地球化学プロセス (生物ポンプや大気海洋間のガス交換)  
 194 の解明、人為起源物質による海洋環境変化 (海洋酸性化や貧酸素化) と生態系への影響評価、  
 195 炭素収支推定の改良や海洋資源の管理への貢献などを目的としている (Biogeochemical-  
 196 Argo Planning Group, 2016)。

197 船舶による全球的な生物地球化学観測は、1970–1990 年代に行われた Geochemical Ocean  
 198 Sections Study (GEOSECS) や World Ocean Circulation Experiment (WOCE) の一部として実施  
 199 された。現在は Global Ocean Ship-Based Hydrographic Investigations Program (GO-SHIP) で継  
 200 続され (Talley et al., 2016), 様々な生物地球化学データを高精度に且つ大陸から大陸まで海

201 盆を縦横断し、海面から海底直上まで全層にわたって広範囲に取得している。しかし、船舶  
202 観測は高額な費用を必要とし、スナップショット的な観測のため細かな時空間的な変動の  
203 検出は困難であり、調査時期も海況が穏やかな季節に偏ってしまう。BGC Argo Program は  
204 これらの問題に対処するため Argo Program と密に連携し、1,000 台の BGC Argo フロート  
205 (Fig. 4) を展開し、全海洋・全季節での時空間的に高頻度の生物地球化学観測網を構築する  
206 ことを目指している。  
207



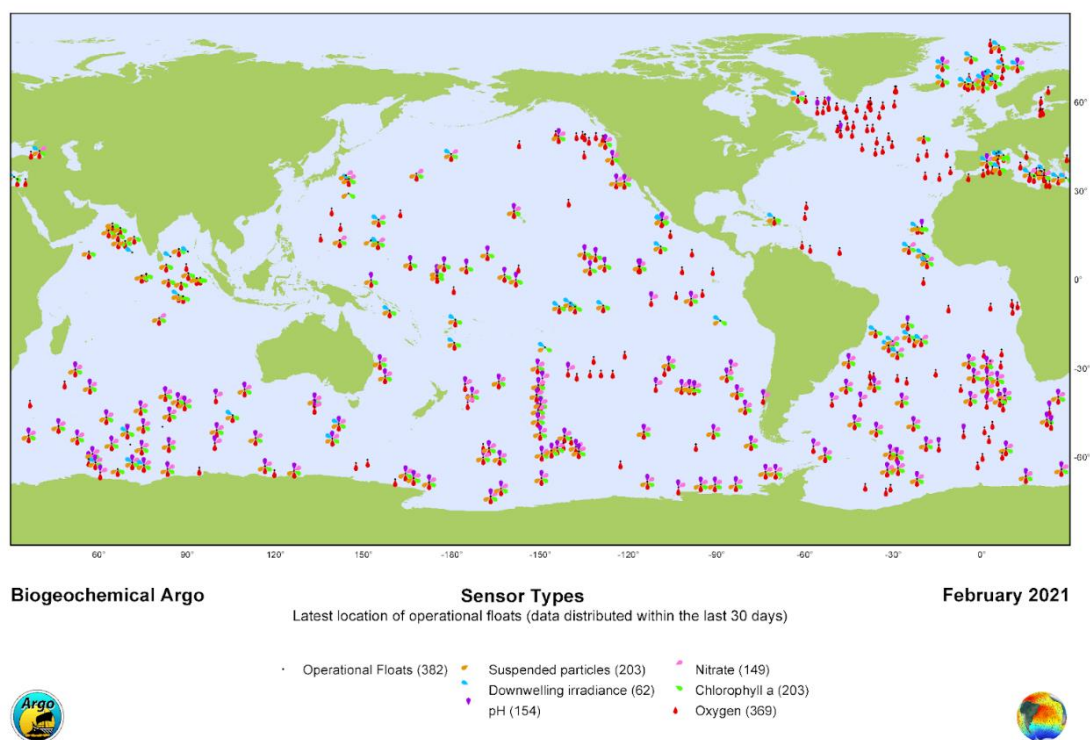
208  
209 Fig. 4 BGC Argo floats equipped with CTD and six BGC sensors (oxygen, nitrate, pH, chlorophyll *a*,  
210 suspended particles and downwelling irradiance) (photo courtesy of Xiaogang Xing, Second Institute  
211 of Oceanography, Ministry of Natural Resources, China.).  
212

213 BGC Argo で測定する項目は GOOS の 3 つの主課題（気候変動，海洋生態系の健全性，沿  
214 岸域管理）に対応し，水温，塩分に加えて 6 種類の BGC パラメーター（酸素，硝酸塩，pH，  
215 クロロフィル *a*，懸濁粒子，下方向放射照度）が推奨されている（Biogeochemical-Argo  
216 Planning Group, 2016）。また，センサー機種は小型で低電力かつ長期安定性を備えたものが  
217 選定されている。BGC Argo で取得された速報データは Core Argo と同様に，ほぼリアルタ  
218 イムで GDAC より公開されている。現在，高精度データの公開に向けて，パラメーターご  
219 とに国際的に基準化した品質管理法の開発・検証が進められている（Bittig et al., 2019）。今  
220 後，測定する BGC パラメーター項目を増やす場合は，上述の条件を満たし，将来の BGC  
221 Argo 観測網を拡張する可能性のあるものが望まれている。

222 2021 年 2 月時点で 382 台の BGC Argo フロートが稼働し観測を行っている（Fig. 5）。1 台  
223 のフロートには複数のセンサーが搭載可能で，全 382 台のうち 369 台が酸素センサーを，  
224 203 台が一体型のクロロフィル *a*・懸濁粒子センサーを，154 台が pH センサーを搭載して  
225 いる。しかし，BGC Argo Program が推奨する 6 種類全ての BGC パラメーターを測定するセ  
226 ンサーが搭載されたフロートは限られ，1-4 種類の BGC パラメーターを測定するフロート  
227 が多数を占めている。これは，多数のセンサーを搭載するとフロート一式の価格が高くなる  
228 こと，早いバッテリー消耗により観測回数・期間が減少することが要因である。また，1 台  
229 の BGC Argo フロートは，6 日おきに 2,000 m から海面までのプロファイル観測を行い，そ  
230 の平均稼働期間を 4 年と想定した場合，1,000 台の観測網を維持するために毎年 250 台のフ  
231 ロートを新たに投入することが必要で，その費用は毎年約 2,700 万米ドル（日本円で約 30  
232 億円）に及ぶ（Biogeochemical-Argo Planning Group, 2016）。従って，BGC Argo Program が目  
233 指す 6 種類の BGC パラメーターを測定する 1,000 台のフロート観測網の構築には，フロ  
234 ートとセンサーの低価格化や省電力化，バッテリー容量の増強などが大きな課題となってい  
235 る。

236 国別の投入数（現在稼働中のフロートのみ）では，米国が 160 台と最も多く，次いでフラ  
237 ンスが 76 台，英国の 23 台となっている（Fig. 6）。海域は南大洋での投入数が最も多いが，

238 これは気候変動や生物地球化学サイクルにおける南太平洋の役割を明らかにするため、  
 239 2014 年から始まった米国の Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling  
 240 (SOCCOM) プロジェクト (<https://socom.princeton.edu/>) による貢献が大きい。日本では、  
 241 2011–2014 年にかけて 25 本の BGC Argo フロートを北西太平洋亜熱帯域に投入した海洋研  
 242 究開発機構の研究プロジェクト「北西太平洋物理・生物地球化学統合海洋観測実験 (INBOX)」  
 243 (Inoue et al., 2016) を皮切りに、毎年継続的に BGC Argo フロートの投入が行なわれ、2021  
 244 年 2 月時点で、北西太平洋、インド洋、南大洋で 9 台のフロートが稼働し、観測を行ってい  
 245 る。今後も、新学術領域研究「変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot」  
 246 や海洋研究開発機構の研究プロジェクト「アジア大気微量物質による海洋生物化学への影  
 247 響評価」で、2021 年に 17 本の BGC Argo フロートを北西太平洋に投入予定で、全球観測網  
 248 の構築に貢献している。  
 249



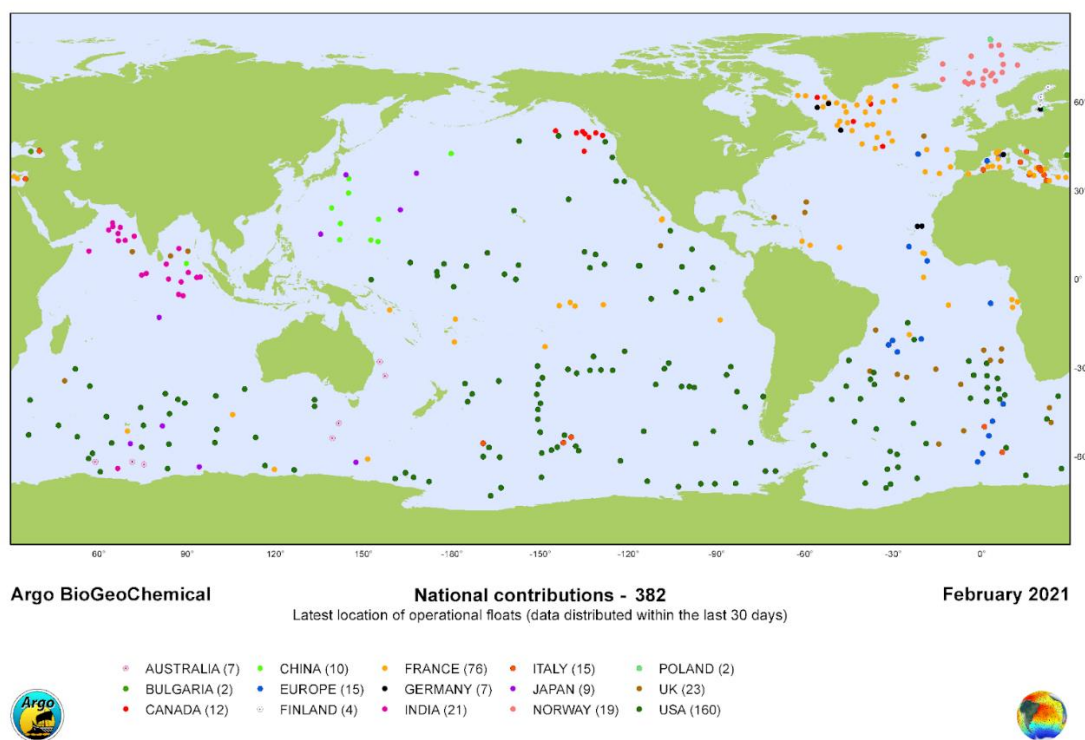
250

251 Fig. 5 Global map of operational BGC-Argo floats, indicating sensor types on each float, as of



252 February 2021 (<https://www.ocean-ops.org/board>).

253



254

255 Fig. 6 Global map of operational BGC Argo floats, by nation, in February 2021 ([https://www.ocean-](https://www.ocean-ops.org/board)  
256 [ops.org/board](https://www.ocean-ops.org/board)).

257

### 258 2. 2. 2. BGC Argo の今後の展望

259 BGC Argo Program が目的とする生物地球化学プロセスの解明，人為起源物質による海洋  
260 環境変化と生態系への影響評価，海洋資源管理への貢献に取り組む上では，Argo Program と  
261 同様に，他の海洋観測手法と連携が不可欠である。例えば GO-SHIP との連携では，航海で  
262 測定される高精度データが BGC Argo で測定されるデータのエラー検出や校正に用いられ  
263 る (Johnson et al., 2017)。BGC Argo の現場データは，海色リモートセンシングの水中生物光  
264 学アルゴリズムの検証や補間に利用できるが (IOCCG, 2011)，一方で，海色リモートセンシ  
265 ングは BGC Argo 投入点を決める上で有用であり，地中海での Novel Argo ocean Observing

266 System (NAOS) プロジェクトでは衛星データによるクロロフィルマップを基に本海域を 5  
267 つに区分し, BGC Argo の投入点を決定している(D’Ortenzio et al., 2020)。数値モデルも今後  
268 の BGC Argo の投入計画を立案する上で欠かせない。例えば, Kamenkovich et al. (2017)は,  
269 数値モデルの中に仮想的な観測データを配置して, その再現性を確かめる観測システムシ  
270 ミュレーション実験をもとに, 南大洋での生物地球化学観測に最適な BGC Argo フロート  
271 の本数を見積り, SOCCOM プロジェクトでのフロート投入計画の策定に貢献している。

272 BGC Argo の全球観測網の構築には, 国際的な協力関係の強化と, 継続的な予算の確保が  
273 必須である。米国では, 2020 年に National Science Foundation (NSF) が, BGC Argo の拡張  
274 に向けて 5 年間で総額 5,300 万米ドル (日本円で約 58 億円) の予算を決定し, 今後 5 年間  
275 で Global Ocean Biogeochemistry array (GO-BGC) プロジェクトのもと, 500 本の BGC Argo  
276 フロートを投入する計画である (Voosen, 2020)。同様に, フランスやカナダは今後, 100 台  
277 以上の BGC Argo フロート投入を予定しており, その他の国も全球観測網の構築に向け, 着  
278 実に投入計画を進めている。日本も今後, これまで以上に積極的な貢献が望まれる。例えば,  
279 日本が面する北西太平洋は, 世界の大洋の中でも最も生物活動による CO<sub>2</sub> 吸収が大きく,  
280 水産資源の豊富な海域であり, 気候変動や海洋生態系の健全性を評価する上で極めて重要  
281 であるが, 大部分が BGC Argo フロートの観測空白域となっている (Figs. 5, 6)。日本は今後,  
282 北西太平洋での BGC Argo フロートの多数展開とそのデータの利活用を積極的に行い, 全球  
283 観測網の構築に貢献するとともに研究を先頭に立って推進していくべきであろう。このため  
284 にも, 日本が中心となって, 北西太平洋での BGC Argo フロートによる学際的な科学研究プ  
285 ロジェクトを早期に立ち上げることが望まれる。また, フロートとセンサーの省電力化や高  
286 性能化などの技術的な課題においては, 高度な技術開発力を有する日本の貢献が大いに期  
287 待できる。

288 BGC Argo で取得されたデータは全世界に無償で公開されており, そのデータを使った論  
289 文数は毎年右肩あがりに増加し, 2021 年 2 月時点で 250 編を超えている (BGC Argo website:  
290 <https://biogeochemical-argo.org/>)。このように, BGC Argo の学術的また社会的有用性の裏付け

291 が、今後の BGC Argo Program の成功の鍵となると言える。BGC Argo の観測網の発展に伴  
292 い、デスクにいながらいつでも世界中の海の生態系や物質循環の状況を把握可能な時代が  
293 やってくるかもしれない。

294

## 295 2.3. バイオロギング

296 バイオロギングは、動物に様々なセンサーを取り付け、その行動や生理を観察するために  
297 生態学の分野で発達した手法である。動物の視点を活用するという発想は古くからあり、20  
298 世紀初頭には鳩に小型カメラをつける手法が考案されている。近年のバイオロギングは、  
299 1960 年代に直接観察が難しい海氷下を行動するアザラシ類を対象に始まった (DeVries and  
300 Wohlshlag, 1964; Kooyman, 1965)。技術革新と共に、測器の小型化と多様なセンサーの開発  
301 が進み、新たなパラメーターが長期かつ高頻度で、準リアルタイムに得られるようになって  
302 きた。これを受けて、地球環境のモニタリングにバイオロギングを活用しようとする動きが  
303 世界中で起こっている。本節では、海洋学の新たな手法としてのバイオロギングについて、  
304 現状と展望を述べる。

305

### 306 2.3.1. 観測手法

307 バイオロギングのデータ取得手法には大きく二つの方法がある。一つは動物に装着した  
308 ロガーにデータが記録され、ロガーを回収することでのみデータを取得する方法である。こ  
309 の場合、装着した動物を再捕獲するか、何らかの方法で動物から取り外したロガーを回収す  
310 る必要がある。もう一つは、衛星や無線を使った通信により、データを取得するバイオテレ  
311 メトリーとも呼ばれる方法である。前者は後者に比べ多くのデータが取得可能だが、回収で  
312 きないリスクを含む。いずれの方法でも、ロガーを動物に装着することが必要である。

313 当初、バイオロギングの観測項目は圧力、水温、時間のみであった。しかし、現在はスマ  
314 ートフォンなどの IT 機器の発展に伴い、人工衛星測位システム (GNSS)、加速度、角速度、  
315 地磁気、速度などの多項目のセンサー一つの基板上に備えた小型センサーロガーが開発さ



316 れ、海上を飛行する鳥類に取り付けることで、海上と海洋表面の環境観測ができるようにな  
317 っている (Yonehara et al. 2016)。また、ウミガメ類といった爬虫類やアザラシ・クジラ類な  
318 どの大型海洋哺乳類では、圧力、水温、塩分センサーとアルゴス発信機を内蔵したロガーに  
319 より、位置情報を含めた準リアルタイムの鉛直プロファイル観測がなされている (Narazaki  
320 et al., 2015; Teilmann et al., 2020)。これらの動物は海面での呼吸のため、海面に浮上しなけれ  
321 ばならず、いわば動物 Argo フロートとも言える。

322 海洋動物は直接観察をすることが難しいためビデオカメラによる動物目線の撮影も重要  
323 な要素である。バッテリーの制約から長時間の撮影が難しいものの、動物の実際の行動や環  
324 境の映像記録は有用な情報となる。例えば、ウミガメに装着したビデオ撮影から、動物食の  
325 アカウミガメよりも海藻食のアオウミガメのほうが海洋ゴミの誤食率が高いことが発見さ  
326 れている (Fukuoka et al., 2016)。また、Korpela et al. (2020)は事前の加速度データの機械学習  
327 により海鳥の採餌を検出し、自動撮影をする人工知能をデータロガーに組み込み、従来のラ  
328 ンダム撮影に比べて 15 倍の効率で採餌行動を撮影することに成功している。現在の自動航  
329 行型測器では餌生物を追跡することは難しく、動物ならではの生態系とリンクした観測手  
330 法である。

331

### 332 2.3.2. 海洋学への応用

333 バイオロギングを用いた海洋動物の行動や生理の解明は海洋学の一部であるが、以下で  
334 は海洋物理学や環境学へのバイオロギングの活用例を紹介する。まず、海洋物理学に最も直  
335 接的な活用は水温・塩分観測である。バイオロギングの歴史的経緯から最も観測が蓄積され  
336 ているのは、南極のアザラシ類によるものである。Boehme et al. (2008)では、Argo フロート  
337 とミナミゾウアザラシによる水温・塩分観測により、南極周極流に伴う前線構造を捉えるこ  
338 とに成功した。また、Carse et al. (2015)では、英国気象局の全球海洋同化予測システム (FOAM)  
339 にアザラシで得られた水温、塩分のプロファイルデータの同化を試みた。水温データの同化  
340 は南大洋の前線構造の再現性向上に貢献した。しかし、塩分データは電気伝導度センサーの

341 電場とアザラシの体との干渉によりバイアスが生じ、個体ごとに異なるバイアスのリアル  
342 タイム補正は困難であった。特筆すべきは、この実験で用いられたアザラシには個体毎に特  
343 定の世界気象機関の観測番号（WMO 番号）が付けられ、リアルタイムに報告されたデータ  
344 は通常の Argo フロート観測と同様に品質管理を経由し、現業の海洋同化システムに入力す  
345 る体制を構築した上で行われていたことである。日本でも気象庁や海洋研究開発機構と連  
346 携したバイオロギング海洋観測体制を早急に構築することが望まれる。

347 熱帯・中緯度域においては、ウミガメが極域におけるアザラシ類の役割を担う。岩手県で  
348 定置網に混獲されたウミガメ類のバイオロギングでは、混合水域から黒潮続流とその南方  
349 海域までウミガメが回遊し、1 年程度の水温プロファイルデータをリアルタイム観測してい  
350 る（Narazaki et al., 2015）。Miyazawa et al. (2019)では、このウミガメによる水温プロファイル  
351 データを海流予測システムに同化し、中規模渦の再現性が向上した。また、アラフラ海では  
352 ヒメウミガメによって観測された水温データを季節予測システムに同化し、3 か月後の水温  
353 予測精度が向上することが示された(Doi et al., 2019)。北大西洋においてもアカウミガメによ  
354 る水温観測は盛んに行われ（Patel et al., 2018）、ハリケーン通過時の水温データ観測が報告  
355 されている（Crowe et al., 2020）。また、10 日に 1 回、2,000 m まで潜る設定としている Argo  
356 計画のフロートでは沿岸域への投入は難しく、流れの速い西岸境界流域の観測密度が低く  
357 なる。一方、ウミガメは沿岸域や西岸境界流域でも留まることができ、毎日のデータ取得が  
358 可能である。March et al. (2019)は様々な海洋動物の観測可能な海域や深さの情報をまとめ、  
359 バイオロギングが Argo 計画のどこを補完しうるかを提示している。

360 近年、センサーによる直接観測だけではなく、動物の位置情報から環境場を推定する手法  
361 が提案されている。猛禽類で計測した数秒毎の GPS データから対流スケールの風速を推定  
362 する手法（Treep et al., 2016）や、海上を飛行するオオミズナギドリやアホウドリの 1 秒毎の  
363 GNSS 水平位置情報から 5 分毎の平均風向風速を求める手法（Yonehara et al., 2016)が提案さ  
364 れている。これらは飛行中の位置情報データから移動速度と方向を計算すると、追い風の時は  
365 は速く、向かい風の時は遅いという分布を利用しており、その推定値は衛星搭載散乱計によ

366 る風向風速とよく一致した。また、1分毎の位置情報からでも、鳥が行きたい方向を目指し  
367 ていると仮定し、鳥の進行方向と実際にたどり着いた位置の差から、1時間平均の風向風速  
368 を逆推定する手法も提案されている (Goto et al., 2017)。一方、海鳥の着水時の位置情報は  
369 海洋表層流を反映していることが見出されている (Yoda et al., 2014)。この流速データを海  
370 洋データ同化システム JCOPE2 に同化すると、東北沖の中規模渦に伴う流れの再現性が向  
371 上することが示された (Miyazawa et al., 2015)。また、アイリッシュ海ではオオハシウミガ  
372 ラス着水時の位置情報が、潮流変動とよく一致した (Cooper et al., 2018)。これらの手法はい  
373 ずれも鳥の飛行方法や行動特性を理解した生態学者ならではの発想であり、生態学者と物  
374 理学者の融合的研究がバイオリギング環境観測に必須であることを示している。

375 しかし、動物の移動から環境場の流れを推定する場合、厳密には動物自身の対気速度や対  
376 水速度のデータが必要になる。大型海洋動物にはプロペラ型の対水速度計を取り付けるこ  
377 とができるが、重量制限が厳しい鳥類へ装着は難しい。この問題を解決するため、航空機な  
378 どで使われている圧力計を用いた流速計(ピトー管)の鳥向けの開発が進んでいる (Thomas  
379 et al., 2018)。さらに、海水中に潜る海鳥への装着を念頭に置いた防水型ピトー管式風速計の  
380 開発も進められている (Takahashi et al., 2018)。前述の位置情報を使った流れ推定では、滑  
381 空や休息など対気・対水速度は一定もしくは無視できるものとして扱ってきた。対気風速計  
382 が実用化されれば、動物が空中を羽ばたいたり、水面を泳いだりしている場合でも流れ場の  
383 推定が可能になり、対象とする種や観測領域が著しく拡大すると期待される。

384

### 385 2.3.3. 今後の展望と課題

386 バイオリギングによる大気海洋観測は、人間が長時間滞在することができない領域を観  
387 測する手段として、大きな可能性を秘めている。実際、2000年代初頭に起こった海洋観測  
388 の急増、「データ津波」の波頭は海洋性動物による海洋観測データに起因し、その数は2010  
389 年代のArgoプロファイル数に匹敵している (Boyer et al., 2018; Brett et al., 2020)。しかし、  
390 一過的なプロジェクトが終了した現在はアルゴ等の自動観測測器がその大部分を占めてい

391 る。今後、バイオリギングが海洋観測の一旦を担うものとして確立していくには、いくつか  
392 越えなければならない課題がある。一つは観測情報取得の即時性である。肺呼吸をする大型  
393 の海洋動物なら、海上での呼吸の際に衛星通信が利用でき、小型の鳥類でも 1 日数点のデー  
394 タは衛星発信機によるリアルタイムデータ取得が可能である。しかし、装着できる測器の重  
395 量が小さい鳥類では、加速度などの高速サンプリングデータの取得にロガーの回収が必須  
396 となる。例えばオオミズナギドリでのバイオリギングの場合には、日帰りで帰巢する 8 月中  
397 旬から 9 月の子育て期にしか、1 日毎に測器を回収できない (Yonehara et al., 2016; Goto et al.,  
398 2017)。一方、夏に岩手県で繁殖するオオミズナギドリは冬季には熱帯に渡り、南シナ海、  
399 アラフラ海、ニューギニア島北方沖で越冬することがバイオリギングによって明らかにな  
400 っている (Yamamoto et al., 2010)。このような広範囲に渡る長期観測データは気象学、海洋  
401 学にとっても重要であり、将来の衛星通信網の発達や太陽電池の高効率化、バッテリーの小  
402 型軽量化により、この課題が解決されることが期待される。例えば、Ocean Sentinel という  
403 プロジェクトでは船舶レーダー電波を感知するセンサーと GPS、アルゴス発信機、太陽光  
404 発電パネル、リチウム充電機を組み合わせた 65 g のロガーを開発し、アホウドリに搭載す  
405 ることで漁船の操業状態を把握するシステムを構築している (Weimerskirch et al., 2020)。

406 また、天気予報や海洋予測など、実社会に直接還元するには、生態学研究者が取得したデ  
407 ータを各国の気象機関が気象観測データをやり取りする世界気象通信網 GTS に通報するシ  
408 ステムの確立が必要である。このためには従来の気象通報やアルゴ計画に準じた品質管理  
409 や誤差情報、通報スキームの整備を気象庁や海洋研究開発機構といった現業的機関と海洋  
410 学研究者、生態学研究者が一体となって進めなければならない。研究に限っても、バイオリ  
411 ギングデータのアーカイブと公開は必須である。現在いくつかのプロジェクトがバイオリ  
412 ギングデータの収集を図っている (Campbell et al., 2016) が、動物の移動データが主で、大  
413 気海洋観測データは少ない。そのため、今後はバイオリギング観測のプロジェクトに海洋学  
414 研究者が参画し、データ共有の土壌を作っていくことが肝要である。全球海洋観測システム  
415 GOOS においても、OCG (Observation Coordination Group) ネットワークの中で、動物によ

416 る海洋観測データのアーカイブに関する議論が始まっており (Moltmann et al. 2019), Animal  
417 Borne Ocean Sensors (AniBOS)として, OCG Emerging Network の一つとして位置づけられて  
418 いる。日本のバイオリギングコミュニティでも, これらの国際観測ネットワークへの積極的  
419 な参画と展開が望まれる (Iwata, 2021)。

420 本節では, バイオリギングによる海洋観測を海洋物理へ応用する側面を述べたが, バイオ  
421 リギングによって環境場が動物の行動や生理に及ぼす影響も, 気候変動と生態系の観点か  
422 ら重要である。バイオリギングで海洋動物の採餌行動や行動範囲が様々な時間スケールの  
423 気候変動に影響されていることを明らかになる中 (Biuw et al., 2007; Bost et al., 2009; Watanabe  
424 et al. 2020; Yoshino et al., 2020), 海洋学におけるバイオリギングの役割は今後ますます重要  
425 になると期待される。

426

### 427 3. 新たな問題

#### 428 3.1. 海洋放射能

429 日本の海洋科学における放射能研究は 1954 年の水爆実験による海洋汚染に端を発し  
430 (Miyake, 1954), 大気圏核実験(~1963 年), 1986 年のチェルノブイリ原発事故等によって海洋  
431 に放出された人工放射性核種の分布の把握, 海洋生物への濃縮機構解明, これらの核種をト  
432 レーサーとした海水流動の解析など多くの研究が展開されてきた。また, 海洋における天然  
433 放射性核種は, 様々な地球化学過程に時間軸を提供するツールとして広く利用されてきた。  
434 さらに, 海洋放射能研究が社会的に大きな関心を集めたのが 2011 年の東京電力福島第一原  
435 子力発電所 (福島第一原発) 事故による放射性物質の海洋流出である。これは事故から 10  
436 年経った 2021 年現在も継続した問題であり, 今一度その事故による影響や現在の状況, ま  
437 た将来に向けての課題について整理する必要がある。

438

##### 439 3.1.1. 福島第一原発事故による海洋への影響

440 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震により生じた遡上高 10 m を超える津波は, 東

441 京電力福島第一原発の電源喪失をもたらした。運転中だった 3 基の原子炉の冷却が困難と  
442 なり、炉内温度および気圧が上昇した結果、大量の放射性物質が大気および海洋に放出され  
443 た。この事故と過去の原子力事象との大きな相違点は、不明量の放射性核種が原子力施設か  
444 ら直接海洋に放出された点にある。当事国として日本の海洋学コミュニティは放射性核種  
445 分布の実態や海洋での動態を調査し(日本学術会議, 2020)、環境中に比較的長い時間にわた  
446 り滞留する放射性セシウム ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) については特に多くの結果が報告された。

447 事故由来の放射性物質の海洋への輸送経路として、①海洋への直接漏洩、②大気中を經由  
448 した海洋への沈着、③大気から陸面に沈着後に河川から流入、の3つが考えられる。経路①  
449 は海水循環のシミュレーションモデルと福島第一原発近傍のモニタリング結果から、事故  
450 直後数ヶ月の海洋への  $^{137}\text{Cs}$  の直接漏洩量が 3–6 PBq (ペタベクレル,  $10^{15}$  ベクレル)と推定さ  
451 れた(Kawamura et al., 2011; Tsumune et al., 2012, 2013)。さらに、原発港湾におけるモニタリ  
452 ング結果に基づく簡易的なモデルにより、この直接流出は事故後数年にわたり継続してい  
453 ることが指摘された(Kanda, 2013; Machida et al., 2020)。経路②は大気モデルと海洋観測結果  
454 との統合により、大気に放出された 15–20 PBq の  $^{137}\text{Cs}$  の約 8 割が海洋に沈着したと推定さ  
455 れた(Aoyama et al., 2015, 2020; Inomata et al., 2016)。経路③は詳細かつ継続的な河川調査、流  
456 量等のデータ復元解析により、他の供給経路に比べて影響が小さいことがわかった (Sakuma  
457 et al., 2019)。

458 海洋に運ばれた放射性 Cs の大部分は、沿岸流、中規模渦、黒潮の影響を強く受け広範囲  
459 に拡散した。例えば、事故由来放射性 Cs の多くは黒潮続流域の表層を東進し、約 3 年で北  
460 米西海岸付近へと到達した後(Smith et al., 2015)、一部はアラスカ湾を経てベーリング海へ運  
461 ばれた(Kumamoto et al., 2019; Inoue et al., 2020)。亜熱帯域では亜熱帯モード水 (STMW) お  
462 よび中央モード水への放射性 Cs の輸送量が定量的に推定され(Kaeriyama et al., 2016; Inomata  
463 et al., 2018)、STMW の放射性 Cs の一部が数年程度で東シナ海の底層付近に達し、表層水と  
464 の混合を経て対馬暖流により日本海に運ばれた(Inomata et al., 2018)。このように、事故由来  
465 の放射性 Cs は図らずも、北太平洋における数年～十年スケールでの海水の動きを検証する

466 高感度トレーサーとして活用されることとなった。

467 海水中の放射性 Cs は水平的に広がるとともに、約 1%は堆積物として海底に蓄積したと  
468 推定された(Kusakabe et al., 2013; Ootosaka and Kato, 2014)。事故によって沿岸の海底に沈着し  
469 た放射性 Cs の堆積物中での濃度は、時間とともに緩やかに減少しているが、その履歴は長  
470 期にわたって記録されると考えられる(Kusakabe et al., 2017; Ootosaka, 2017; Ootosaka et al.,  
471 2020)。堆積物中の放射性 Cs については、沈着形態 (Ootosaka and Kobayashi, 2013; Ono et al.,  
472 2015)、地形依存性・不均質性(Thoroton et al., 2013; Ambe et al., 2014; Tsuruta et al., 2017)、堆  
473 積物深部への輸送(Black and Buesseler, 2014; Ootosaka, 2017)、吸脱着特性(Takata et al., 2015a;  
474 Kakehi et al., 2016; Ootosaka et al., 2020)、粒子態放射性核種の鉛直・水平輸送(Honda et al., 2013;  
475 Ootosaka et al., 2014; Buesseler et al., 2015; Kaeriyama et al., 2020) 等の知見が蓄積された。さら  
476 に、原子炉の構造材の断片とみられる極めて高い放射能を含む微粒子も海水中や海底から  
477 発見され(Ikenoue et al., 2018, 2020; Kubo et al., 2018; Miura et al., 2021)、これらの組成や物理  
478 的特性は事故直後の原子炉内の状況を再解析するうえで貴重な情報となっている。

479 海洋生物への影響に関しては、動物プランクトンの放射性 Cs 濃度が海水の放射性 Cs 濃  
480 度を反映した不均一な水平分布を示し、時間的には緩やかに低下した(Kitamura et al., 2013;  
481 Kaeriyama et al., 2015; Takata et al., 2015b; Ikenoue et al., 2017)。海産魚類の放射性 Cs 濃度は事  
482 故直後より継続的に調査され、食品としての基準値超過の確認が行われている(水産庁,  
483 2021)。放射性核種の海洋生物への移行については、堆積物の有機態画分から底生魚類への  
484 経路の重要性が動的平衡論を用いたシミュレーションモデルにより指摘されている (Tateda  
485 et al., 2016, 2020)。また、事故後に得られた生物種に関する多様な核種の計測データを、適  
486 切に線量評価モデルに導入するための最新の濃縮係数データ集(IAEA, 2014)、魚類や野生動  
487 物のデータを取りまとめた論文(Tagami and Uchida, 2016)は高く評価されている。一方で、膨  
488 大な調査データが未公表のままとなっており、それらの体系的なとりまとめが今後の課題  
489 である。

490

### 491 3.1.2. 次の10年に向けての課題

492 事故後の様々な制限の中で時空間的に連続した観測データを取得することは困難であり、  
493 原発近傍海域における放射性物質分布の理解には数値シミュレーションが積極的に活用さ  
494 れた。中でも、Masumoto et al. (2012) は海洋拡散モデル結果の相互比較プロジェクトに取り  
495 組み、沿岸モデルの信頼性の向上に貢献した。体系的な海洋観測、放射能分析、シミュレー  
496 ションモデルの連携強化は事故以前より課題であったが、一連の研究成果は海洋学コミュ  
497 ニティの分野横断的な取り組みが結実した一つの形といえる。一方、現行の数値シミュレー  
498 ションは即時予測性能がないことが課題であり、解決のための取り組みが急速に進められ  
499 ている(例えば Kobayashi et al., 2019)。今後は事故を機に構築された枠組みを活かし、より高  
500 精度な大気—海洋結合モデルの開発を行い、国内外で起こりうる原子力災害へ備えること  
501 が必要となる。さらに、多様な放射性核種についての挙動特性を網羅的に把握しモデルに取り  
502 り込むことで、海洋における物質循環、生態系動態、資源動態などの理解を深めることも重  
503 要である。

504 一連の調査研究では加速器質量分析(AMS)、高感度型 ICP 質量分析、放射光 XAFS(X 線吸  
505 収微細構造分析)等の先端技術が活用され、極低レベルの放射性核種の分析や極微量試料の  
506 構造解析が海洋学でも身近なものとなった(Zheng et al., 2012; Suzuki et al., 2013; Fan et al.,  
507 2014; Ootosaka et al., 2018)。これらは従来法では困難な微量元素の存在形態別、化学種別の循  
508 環過程の解明(Brandes, 2004; Toner et al., 2009; Evans et al., 2019)、複合的な環境ストレスへの  
509 海洋生物の応答(Nishida et al., 2020)などを解明可能であり、次世代の海洋学を支える重要な  
510 技術となる可能性を秘めている。

511 福島第一原発では、発生した汚染水を多核種除去設備等で浄化した処理水とその敷地内  
512 に保管している。処理水には、除去が困難なトリチウムが残されているばかりでなく、他の  
513 放射性核種もわずかながら残留している。2021年3月末現在、処理水の総量は125万トン  
514 を超えており、同年4月13日には日本政府がこれらの処理水を海洋放出する方針を決定し  
515 た。実際の放出の際は十分な濃度管理が大前提となるが、多様な放射性核種の再度の海洋拡



516 散を、中立的な立場から適切に監視し、その結果に科学的な根拠を提示することで、誤解や  
517 風評被害を抑えることも日本の海洋学の使命である。

518 福島第一原発事故による海洋汚染は、予期せず日本の海洋学が国際的に活躍するきっかけ  
519 となった。実際、IAEA(国際原子力機関)や UNSCEAR (原子放射線の影響に関する国連科  
520 学委員会)では多くの日本人研究者が中心的な役割を務めている。また、日本人研究者が主  
521 導する欧米との共同調査は、日本が公表するデータの透明性を高めることに貢献している。  
522 今回の事故への対応は、チェルノブイリ事故以前より活躍してきた研究者が中心となり、そ  
523 の豊富な経験が十分に活かされた。一方、それに続く研究者の年齢構成は必ずしもバランス  
524 がとれていない。この10年で多くの経験を積んだ中堅・若手研究者は、事故による汚染状  
525 況の監視を支援するとともに、海洋放射能研究の新たな展開を通じ、その知識を確実に次世  
526 代につなげる必要がある。

527

### 528 3.2. 海洋プラスチック

529 海洋ごみの7割を占めるプラスチックごみ (Derraik, 2002; European Commission, 2018; 以  
530 下、プラごみ)の大部分は、街から河川を経て海洋に流出した「生活ごみ」である(Lebreton et  
531 al., 2017)。このプラごみは、軽く頑丈な反面、光・熱など様々な環境要因により劣化・細分  
532 化する。5 mm 以下に細分化されたプラスチックは、マイクロプラスチック (MP) と呼ばれ、  
533 大型の海洋生物だけでなく、動物プランクトンにも誤食される (磯辺, 2020)。そのためプラ  
534 ごみは、景観の悪化だけでなく、海洋の環境や生態系にも悪影響を及ぼす。

535 プラごみには製造過程で混入された添加剤を含むものが存在し、海洋中から PCB (Poly  
536 Chlorinated Biphenyl: ポリ塩化ビフェニル)などの残留性有機汚染物を吸着する特徴もある。  
537 これが海洋生物にも摂食されることで、有害汚染物質が海洋生物の組織内へと運ばれる  
538 (Mato et al., 2001; Yamashita et al., 2011)。さらに最近では、1  $\mu\text{m}$  以下のナノプラスチックの  
539 存在も確認されており、人間を含む生物に対する粒子毒性が調査されている (Prata et al.,  
540 2020)。自然には還らないプラごみの無秩序な海洋流出が続けば、海洋汚染は深刻化する一

541 方であるため、プラスチックは早急に対策が必要な地球環境問題の一つである。

542 しかし、現状ではプラスチック現存量の精度良い調査手法は確立されておらず、どのような時  
543 空間スケールにおいても、プラスチック量に関する精度良いデータは提供されていない。例えば、  
544 海岸プラスチック量は MP 生成の基礎資料の一つであるが、環境省による全国の海岸における  
545 その推定値は、23–59 万トンと幅が広い（環境省, 2014）。また、Jambeck et al. (2015)が示し  
546 た 2010 年における海洋へのプラスチック流入量は、1 年間で 480–1,270 万トンと、さらに不確  
547 実性が高い。ゆえに、海洋中に存在するプラスチック量に関しても大まかな推定しか存在せず、  
548 既往研究間でも結果が一致しない。例えば、Cózar, et al. (2014)は、海洋表層（沿岸域は除く）  
549 を漂う推定プラスチック量を約 7 千から 3 万 5 千トンと見積もっているが、Eriksen et al. (2014)  
550 による推定値は、下限が約 27 万トンである。つまり、「各地の海岸にどの程度の漂着ごみが  
551 存在するのか?」、「どの程度のプラスチックが街から海に毎年流入し、現在どの程度漂流してい  
552 るのか?」といった基本的な問いに対してさえも、観測・定量化手法が確立されておらず、  
553 正確な回答が得られていない。

554 プラスチック問題の現状を理解するためには、観測手法を確立・統一し、日常(街)で発生する  
555 プラスチックの環境中での輸送経路や量(廃棄プラスチックフロー)を算定することが鍵である。  
556 そこで以下では、街から海洋に至る包括的なプラスチック監視技術の開発の試みについて紹介  
557 する。これらが確立されれば、市民の環境リテラシーの向上はもちろん、プラスチックの効率的・  
558 効果的な削減に資する環境政策の立案にも貢献する。また、海洋中の MP ごみ量のより正確  
559 な将来予測が可能となる。

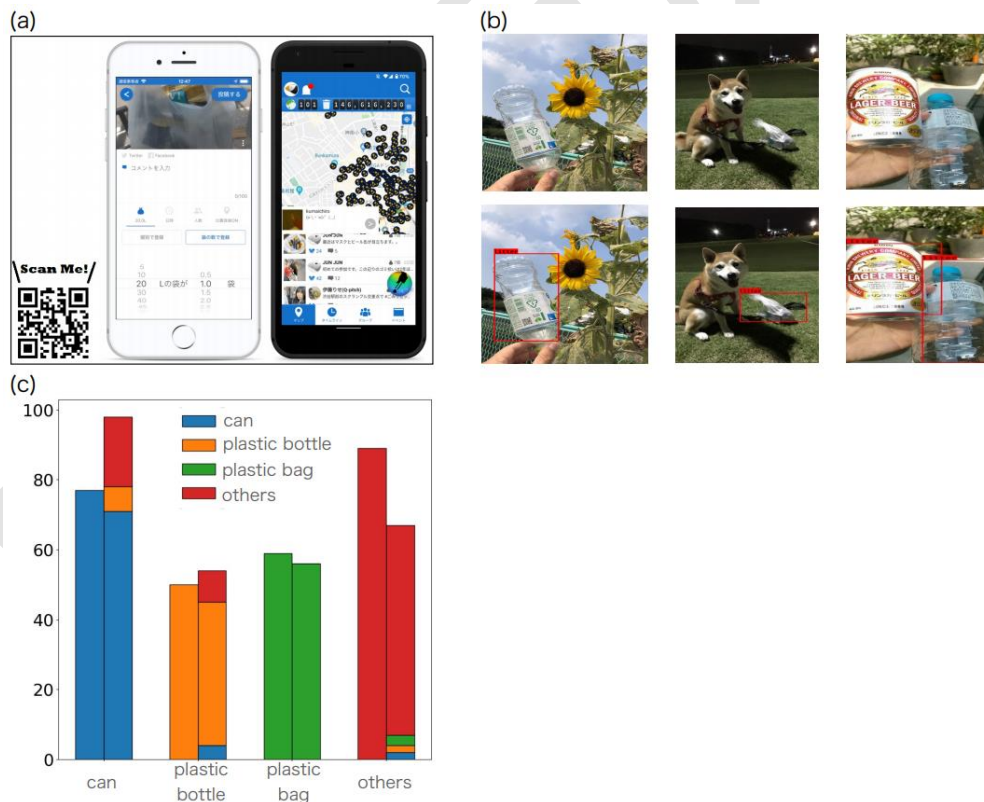
560

### 561 3.2.1. 街中プラスチックの定量化

562 最新の街中プラスチックの定量化手法として、スマートフォン用アプリケーション（スマホア  
563 プリ）「ピリカ」(<https://sns.pirika.org>) を用いた例を紹介する。株式会社/一般社団法人ピリ  
564 カによって開発されたスマホアプリ「ピリカ」は、世界 108 カ国以上で無料 SNS スマホア  
565 プリとして展開され、撮影された街中のごみ画像を位置情報と共にサーバーにアップロー

566 ドし、公開・アーカイブする機能を有している。

567 現在、人工知能の一つである深層学習の「畳み込みニューラルネットワーク」(CNN)を基  
568 盤とし、画像中のプラごみを多クラス分類するシステムの開発が進んでいる。市民からピリ  
569 カに投稿された画像の中から 1,500 枚を CNN の学習データとして使用することで、約 83%  
570 の精度でごみを種類ごとに自動分類可能となった (Fig.7)。本システムが完成すれば、ペッ  
571 トボトルや缶、プラごみ袋などの街中での投棄位置が二次元マップとして可視化され、研究  
572 者のみならず市民や行政にも提示することが可能となる。もちろん、「ピリカ」をどの様に  
573 市民に普及させるか、どの様に統計的に有意なデータ収集をするのかなど、超えなければな  
574 らない壁は存在する。しかし、スマホアプリという身近な技術を利用するこの手法は、街中  
575 プラごみの定量化を可能とするだけでなく、市民の環境リテラシーの向上にも寄与するた  
576 め、今後もこの手法の検討・開発を引き続き進める必要がある。



577

578 Fig. 7 Example of detection, quantification, and classification of litter in cities using smartphone

579 application "Pirika" in conjunction with deep learning. (a) smartphone application "Pirika", (b) litter

580 images in cities collected using “Pirika”; before (upper panels) and after (lower panels) applying  
581 automatic litter detection by deep learning. Red boxes in lower panels denote the results of automatic  
582 detection. (c) result of multi class classification. Left-hand (right-hand) bars in each category denote  
583 the true values (the results of deep learning). For example, orange color of right bar in can category  
584 denotes the number of data which deep learning mistaken cans for plastic bottles.

585

### 586 3.2.2. 海岸漂着プラスチックの定量化

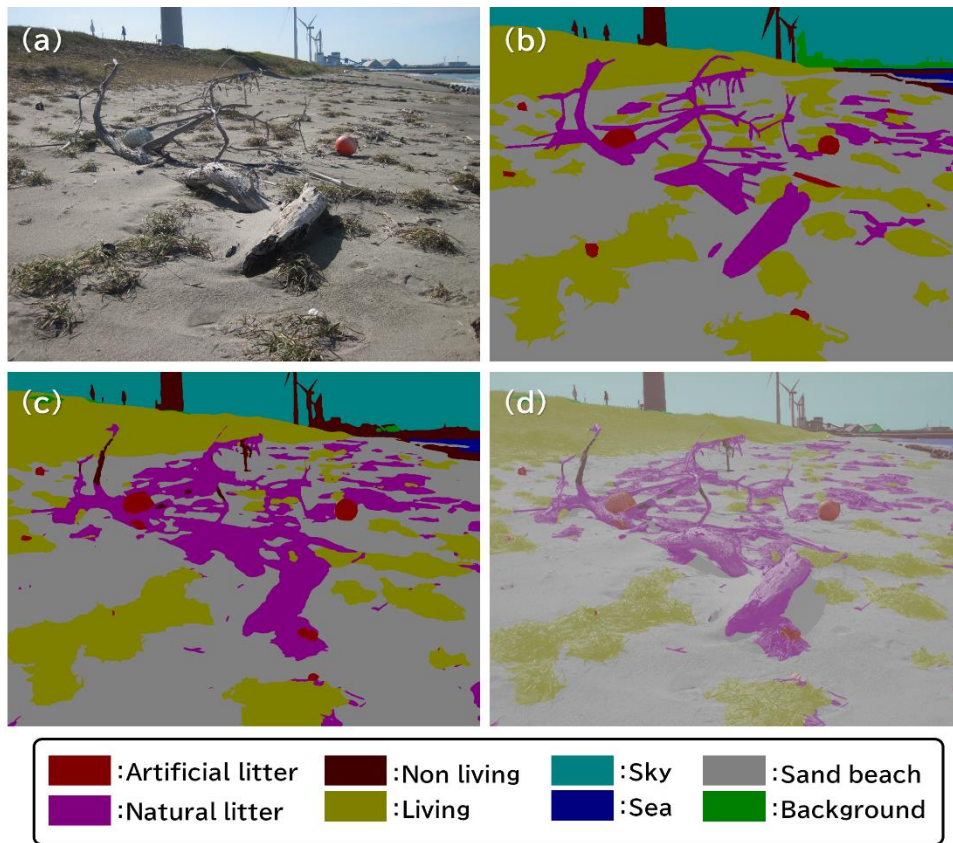
587 深層学習を用いた新しい海岸プラスチック定量化手法を2つ紹介する。1つ目は、ドローンに  
588 よる航空測量と深層学習を組み合わせた手法である。この手法では、ドローンによる航空測  
589 量から得られた海岸の位置情報をもとに、対象海岸の立体的な再現を行う (Digital Surface  
590 Molde; DSM, 付録動画 1: <https://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/~kako/Drone/goto/DSM-1.mov>)。次  
591 に、この DSM に含まれるプラスチック情報を、深層学習ベースの画像解析により抽出し、体積  
592 を算出する (付録動画 2: <https://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/~kako/Drone/goto/DSM-2.mov>)。こ  
593 の手法により推定体積誤差 10%程度でプラスチックの定量化が可能である (Kako et al. 2020)。  
594 その他、ドローン観測と CNN を組み合わせ、海岸プラスチックの被覆面積を推定する手法も提  
595 案されている (例えば Martin et al., 2021)。ドローン測量は 100 x 100 m 程度の海岸であら  
596 ば、15分程度と迅速に実行可能である。また、Real Time Kinematic 方式等の位置情報補正  
597 により、誤差 1 cm/50 m 以下の高精度な海岸測量が可能である。

598 2つ目は、スマホ等によって海岸を撮影した画像から、深層学習を活用して漂着ごみの定  
599 量化を行うものである。深層学習にはセマンティック・セグメンテーションと呼ばれる手法  
600 を用い、入力画像に対してピクセル単位でクラス分類する。この手法は医療画像処理や自動  
601 運転技術でも活用されており (例えば Wang et al., 2020)、色に加え形状も含めた学習による  
602 高精度な分類が見込める。一方で、大量の入力画像と正解ラベルのペアを学習用データとし  
603 て用意する必要がある (一般には 1,000 枚以上)。本手法を山形県が実施する海岸清潔度調  
604 査で取得された海岸画像に適用し、入力画像の各ピクセルを漂着ごみ等の 8 クラスに分類

605 した (Fig. 8)。人が作成した正解画像 (Fig. b) と深層学習による推定画像 (Fig. 8c) を比較  
606 すると、分類結果はおおむね一致していた。また、漂着ごみの 70–80% が正しく検出される  
607 という結果も得られている。この結果を利用し、ごみと砂浜のピクセル比率を算出すれば、  
608 海岸の汚染度の定量化が可能である。また、プラごみに特化したクラスの設定や、汚染度に  
609 応じた画像へのごみ量のラベル付けなどにより、海岸におけるプラスチック現存量の推定  
610 にも発展可能である。

611 ドローンやスマホを用いた手法は特別な機器や高度な計測技術を必要とせず、各自治体  
612 のモニタリング調査や NPO 等による海岸清掃イベントとも親和性が高く、多くのデータを  
613 収集しやすいという利点がある。ドローンの航空測量も全て自動操縦・撮影で行われ、誰で  
614 も実行可能である。一方、高精度な分類予測を可能とする良質な学習データの作成は今後の  
615 課題である。実際、Kako et al. (2020) や Martin et al. (2021) の手法は、学習データ不足により  
616 適用可能な海岸に限られ、精度が天候により変わるなど汎化性能に課題を残す。学習データ  
617 の作成は多くの人手や時間に加え、集中力を要する作業であるが、今後は一般参加のボラン  
618 ティアの協力にも期待がされる。このように、自治体や研究者から一般市民までが一体とな  
619 り環境問題に取り組む「市民科学」が、科学技術の発展と市民の問題意識向上を同時に満た  
620 す今後の鍵となる。

621



622

623 Fig. 8 Application example of sematic segmentation. Images of (a) original, (b) labeled training data,

624 (c) after applying semantic segmentation, and (d) superimposed (c) on (a).

625

### 626 3. 2. 3. 河川プラごみの定量化

627 河川では出水時に多くのプラごみが流入するが、膨大な自然系ごみ（流木や植生など）と

628 一緒に流下するため、プラごみを直接採取して定量化することは難しい。そこで、橋梁直下

629 の水面を撮影した動画を用い、河川を流下するプラごみを定量化する試みが行われている。

630 Kataoka et al. (2020)は、全てのごみの輸送量（単位時間当たりに輸送されるごみ量）を面積

631 ベースで計測する手法を開発した。例えば、Fig.9 では動画の一コマに深層学習モデルが適

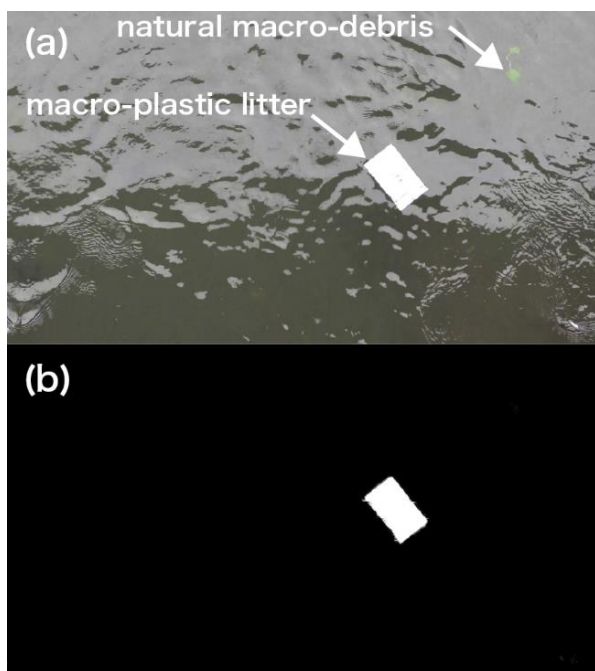
632 用され、自然物が含まれている中でもプラごみのみの抽出に成功している。実際の出水時に

633 は、膨大な自然系ごみと混在してプラごみが流下するため、今後はそのような状況下におけ

634 るプラごみの抽出精度の検証が必要である。また、現在は深層学習を取り入れ、色と物体の

635 形を学習することで、質量推定も可能なプラごみ輸送量の計測技術の開発を進めている。





637

638 Fig. 9 Images of floating litter in river (a) before and (b) after applying image processing based on  
639 deep learning. White pixels in (b) denote the macro-plastic litter.

640

#### 641 3. 2. 4. マイクロプラごみの定量化

642 MP 汚染の実態調査は海水域のみならず、淡水域や大気を含めて実施され (Eerkes-Medrano  
643 et al., 2015; Evangeliou et al., 2020), 既にいくつかのガイドラインが発刊されてきた (Michida  
644 et al., 2019; ISO, 2020)。しかし, MP の定量手法の標準化は未だに発展途上である。

645 MP 定量化の手法は主に, ①目視, ②Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), ③顕微  
646 FTIR, ④ラマン顕微鏡, ⑤Gas Chromatography Mass Spectrometry(GC-MS)の 5 つに分類され  
647 る。手法①は, 実体顕微鏡下で MP をピックアップする方法であり (例えば Hidalgo-Ruz et al.,  
648 2012), 簡便であるが分析者の主観的判断に依存し客観性に欠ける。特に 1 mm 以下の粒子  
649 の目視識別は困難であり, プラスチック同定の信頼性が低い。手法②は最も広く使用されて  
650 いる方法であり, サンプルに赤外光を照射することで分子構造に応じた特定の波長帯の光  
651 を吸収することを利用した樹脂材質を特定する方法である。しかし, 300  $\mu\text{m}$  以下の微細粒

652 子になると、赤外線吸光スペクトル強度が小さくなり、その特定精度は下がる。そこで、  
653 300  $\mu\text{m}$  以下の微細粒子については手法③及び手法④がとられる（例えば Käppler et al., 2016;  
654 Mintenig et al., 2020）。手法③は粒子による赤外光の吸光スペクトル、手法④はラマン光の散  
655 乱スペクトルに基づき、それぞれ 20  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  のプラスチック粒子を同定可能である。し  
656 かし、手法③及び④は多量の MP 分析には多大な時間を要し、効率的な分析のため、分析面  
657 積を狭くする前処理法の確立が重要となる。そこで、近年は手法⑤の GC-MS を用いた MP  
658 定量が着目されている。特に、有機溶媒を用いない熱分解 GC-MS の利用が検討され、この  
659 手法はプラスチックを含むサンプルの熱分解物の信号強度からプラスチックを質量ベース  
660 で定量可能である（La Nasa et al., 2020）。

661 MP 定量化には様々な手法が存在するが、いずれの方法も前処理が必要となる。この前処  
662 理方法は研究者間で大きく異なり、また同じ定量化手法でも精度にばらつきが生じる。実際、  
663 手法①および手法②の研究室間比較の結果、分析者の主観的判断（ピッキングミス等）に起  
664 因した不確かさが確認され、特に 1 mm 以下の微細粒子については 20%程度の誤差が生じる  
665 ことが示された（Isobe et al., 2019）。そのため、今後 MP 定量化の標準化を検討していく上  
666 では、この不確かさを小さくし、適切な前処理方法を統一することが必要不可欠である。

667

#### 668 4. おわりに

669 本稿は「新たな手法と問題」と題し、海洋学で着目される環境 DNA, BGC Argo, バイオ  
670 ロギング, 海洋放射能, 海洋プラスチックについて論じた。新たな手法に関しては前回の日  
671 本海洋学会将来構想（花輪・津田 2013; 岡ら, 2013; 神田ら, 2013; 濱崎ら, 2013）で言及さ  
672 れた Argo, 各種センサー, シークエンス技術などがこの 10 年でさらに発展し、環境 DNA,  
673 BGC Argo, バイオロギングの海洋学への導入が進んだ。今後は各種センサーの高精度化や  
674 小型化, またシークエンス技術の全自動化などが進むと予想され、将来的には環境 DNA 解  
675 析の可能なプロファイリングフロートの開発など、本稿で取り上げた技術の融合も進む可  
676 能性がある。また、本稿で新たな問題として取り上げた海洋放射能, 海洋プラスチックに関



677 しては、質量分析、ドローン、人工知能など最先端の手法を導入し研究が進められている。  
678 これらの技術は単一の話題としては本稿では取り上げなかったが、例えば人工知能は生物  
679 の画像解析にも有効であり、環境 DNA 解析と組み合わせることで海洋生態系をより正確か  
680 つ効率的に把握可能になると考えられる。海洋環境や生態系の把握技術として、生物由来を  
681 含む海水中の音（サウンドスケープ）の解析も近年着目されているが、同時に船舶等の人間  
682 活動に由来する音汚染（noise pollution）の問題も指摘されている（Lin *et al.*, 2019; Duarte *et*  
683 *al.*, 2021）。また、ドローンをはじめとする、無人潜水艇、グライダー、地球観測衛星などの  
684 リモートセンシング技術は、従来の船舶観測では取得困難な物理・化学・生物データを提供  
685 可能である。さらに、新たな手法とは単にこれまでにない技術を生み出すことだけではない。  
686 例えば、従来は動物行動学で活用されていたバイオロギングは、他分野との融合がアイデア  
687 次第で海洋学における新たな手法として活躍しうることを示した。他の学問領域の技術や  
688 ノウハウの活用が今後の海洋学の発展を考える上で鍵となることは間違いない。また、環境  
689 DNA やプラスチック研究では市民ボランティアが積極的に参加しており、バイオロギング  
690 でも漁業者の協力の下に定置網に入ったウミガメが活用されている。このように、研究者だ  
691 けのコミュニティでなく、市民が参加する市民科学の枠組みを作ることも新たな手法であ  
692 り、海洋に関わる市民科学の発展のため、研究者は専門家として市民と密に連携を図る必要  
693 がある。本稿では数ある手法の中でも限られた手法を紹介したにすぎず、今現在海洋学で活  
694 躍する手法、新たに誕生しつつある技術は多く存在するはずである。海洋学における問題も、  
695 冒頭で述べた温暖化、海洋汚染、乱獲などは依然として大きな問題である。また、我々には  
696 認識のされていない新たな問題が現在進行形で生じている可能性もある。今後の海洋学を  
697 考える上で、新技術による科学の発展や問題解決を考えるとともに、社会への啓発や参加を  
698 促すことで、さらなる海洋学の発展や社会貢献が実現されると考えられる。

699

## 700 謝辞

701 本稿の作成にあたっては、以下の方々（敬称略）から貴重なご助言や参考資料を頂きました

702 た：磯辺篤彦，岡英太郎，九鬼正人，佐藤克文，須賀利雄，種田哲也，角田智彦，平譚享，

703 細田滋毅，安中さやか，山本虎太郎，依田憲，渡部裕美。深く感謝申し上げます。

704

705

投稿用原稿

706 **References**

- 707 Ambe, D., H. Kaeriyama, Y. Shigenobu, K. Fujimoto, T. Ono, H. Sawada, H. Saito, S. Miki, T.  
 708 Setou, and T. Morita (2014): Five-minute resolved spatial distribution of radiocesium in sea  
 709 sediment derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *J. Environ. Radioact.*, 138,  
 710 264–275.
- 711 Andruszkiewicz, E. A., H. A. Starks, F. P. Chavez, L. M. Sassoubre, B. A. Block, and A. B. Boehm  
 712 (2017): Biomonitoring of marine vertebrates in Monterey Bay using eDNA metabarcoding. *PLoS*  
 713 *ONE*, 12, e0176343.
- 714 Aoyama, M., M. Kajino, Y. Tanaka, T. Sekiyama, D. Tsumune, T. Tsubono, Y. Hamajima, Y.  
 715 Inomata, and T. Gamo (2015): <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs in the North Pacific Ocean derived from the March  
 716 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan: Part Two - Estimation of  
 717 <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs inventories in the North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, 72, 67–76.
- 718 Aoyama, M., D. Tsumune, Y. Inomata, and Y. Tateda (2020): Mass balance and latest fluxes of  
 719 radiocesium derived from the Fukushima accident in the western North Pacific Ocean and coastal  
 720 regions of Japan. *J. Environ. Radioact.*, 217, 106206.
- 721 Bittig, H. C., T. L. Maurer, J. N. Plant, C. Schmechtig, A. P. S. Wong, H. Claustre, T. W. Trull, T. V.  
 722 S. Udaya Bhaskar, E. Boss, G. Dall’Olmo, E. Organelli, A. Poteau, K. S. Johnson, C. Hanstein, E.  
 723 Leymarie, S. Le Reste, S. C. Riser, A. R. Rupan, V. Taillandier, V. Thierry, and V. Xing (2019): A  
 724 BGC-Argo guide: planning, deployment, data handling and usage. *Front. Mar. Sci.*, 6, 502.
- 725 Biogeochemical-Argo Planning Group (2016): *The scientific rationale, design and implementation*  
 726 *plan for a Biogeochemical-Argo float array*. edited by K. Johnson and H. Claustre.
- 727 Biuw, M., L. Boehme, C. Guinet, M. Hindell, D. Costa, J.-B. Charrassin, F. Roquet, F. Bailleul, M.  
 728 Meredith, S. Thorpe, Y. Tremblay, B. McDonald, Y.-H. Park, S. R. Rintoul, N. Bindoff, M.  
 729 Goebel, D. Crocker, P. Lovell, J. Nicholson, F. Monks, and M. A. Fedak (2007): Variations in  
 730 behavior and condition of a Southern Ocean top predator in relation to in situ oceanographic  
 731 conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104, 13705–13710.
- 732 Black, E.E., and K.O. Buesseler (2014): Spatial variability and the fate of cesium in coastal  
 733 sediments near Fukushima, Japan, *Biogeosciences*, 11, 5123–5137.
- 734 Boehme, L., M. P. Meredith, S. E. Thorpe, M. Biuw, and M. Fedak (2008): Antarctic circumpolar  
 735 current frontal system in the South Atlantic: Monitoring using merged Argo and animal-borne  
 736 sensor data. *J. Geophys. Res. Ocean.*, 113, 1–19.
- 737 Boss, E., D. Swift, L. Taylor, P. Brickley, R. Zaneveld, S. Riser, M. J. Perry, and P. G. Stratton  
 738 (2008): Observations of pigment and particle distributions in the western North Atlantic from an  
 739 autonomous float and ocean color satellite. *Limnol. Oceanogr.*, 53, 2112–2122.
- 740 Bost, C. A., C. Cotté, F. Bailleul, Y. Cherel, J. B. Charrassin, C. Guinet, D. G. Ainley, and H.  
 741 Weimerskirch (2009): The importance of oceanographic fronts to marine birds and mammals of  
 742 the southern oceans. *J. Mar. Syst.*, 78, 363–376.
- 743 Boyer, T. P., O. K. Baranova, C. Coleman, H. E. Garcia, A. Grodsky, R. A. Locarnini, A. V.  
 744 Mishonov, C. R. Paver, J. R. Reagan, D. Seidov, I. V. Smolyar, K. W. Weathers, M. M. Zweng  
 745 (2018): World Ocean Database 2018. *NOAA Atlas NESDIS*, 87, 1–207.
- 746 Brandes, J. A., C. Lee, S. Wakeman, M. Peterson, C. Jacobsen, S. Wirick, and G. Cody (2004):  
 747 Examining marine particulate organic matter at sub-micron scales using scanning transmission X-  
 748 ray microscopy and carbon X-ray absorption near edge structure spectroscopy. *Mar. Chem.*, 92,  
 749 107–121.
- 750 Brett, A., J. Leape, M. Abbott, H. Sakaguchi, L. Cao, K. Chand, Y. Golbuu, T. J. Martin, J. Mayorga,  
 751 and M. S. Myksovoll (2020): Ocean data need a sea change to help navigate the warming world.  
 752 *Nature*, 582, 181–183.
- 753 Buesseler, K. O., C. R. German, M. C. Honda, S. Otosaka, E. E. Black, H. Kawakami, S. J.  
 754 Manganini, and S. M. Pike (2015): Tracking the Fate of Particle Associated Fukushima Daiichi  
 755 Cesium in the Ocean off Japan. *Environ. Sci. Technol.*, 49, 9807–9816.
- 756 Campbell, H. A., F. Urbano, S. Davidson, H. Dettki, and F. Cagnacci (2016): A plea for standards in  
 757 reporting data collected by animal-borne electronic devices. *Anim. Biotelemetry*, 4, 1–4.
- 758 Carse, F., M. J. Martin, A. Sellar, and E. W. Blockley (2015): Impact of assimilating temperature and  
 759 salinity measurements by animal-borne sensors on FOAM ocean model fields. *Q. J. R. Meteorol.*

- 760 Soc., 141, 2934–2943.
- 761 Claustre, H., D. Antoine, L. Boehme, E. Boss, F. D’Ortenzio, O. F. D’Andon, C. Guinet, N. Gruber,  
762 N. O. Handegard, M. Hood, K. Johnson, A. Körtzinger, R. Lampitt, P. Y. LeTraon, C. Le Quéré,  
763 M. Lewis, M. J. Perry, T. Platt, D. Roemmich, S. Sathyendranath, U. Send, P. Testor, and J. Yoder  
764 (2010): Guidelines towards an integrated ocean observation system for ecosystems and  
765 biogeochemical cycles. In *Proceedings of the OceanObs’09: Sustained ocean observations and*  
766 *information for society*, edited by J. Hall, D. E. Harrison, and D. Stammer, ESA Publication WPP-  
767 306, Venice.
- 768 Collins, R. A., J. Bakker, O. S. Wangensteen, A. Z. Soto, L. Corrigan, D. W. Sims, M. J. Genner, and  
769 S. Mariani (2019): Non-specific amplification compromises environmental DNA metabarcoding  
770 with COI. *Methods Ecol. Evol.*, 10, 1985–2001.
- 771 Cooper, M., C. Bishop, M. Lewis, D. Bowers, M. Bolton, E. Owen, and S. Dodd (2018): What can  
772 seabirds tell us about the tide? *Ocean Sci.*, 14, 1483–1490.
- 773 Cózar, A., F. Echevarría, J. I. González-Gordillo, X. Irigoien, B. Úbeda, S. Hernández-León, Á. T.  
774 Palma, S. Navarro, J. García-de-Lomas, A. Ruiz, M. L. Fernández-de-Puelles, and C. M. Duarte  
775 (2014): Plastic debris in the open ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 111, 10239–10244.
- 776 Crowe, L. M., J. M. Hatch, S. H. Patel, R. J. Smolowitz, and H. L. Haas (2020): Riders on the storm:  
777 loggerhead sea turtles detect and respond to a major hurricane in the Northwest Atlantic Ocean.  
778 *Mov. Ecol.*, 8, 32.
- 779 Derraik, J. G. B. (2002): The pollution of the marine environment by plastic debris: A review. *Mar.*  
780 *Pollut. Bull.*, 44, 842–852.
- 781 DeVries, A. L., and D. E. Wohlschlag (1964): Diving depths of the Weddell seal. *Science*. 145, 292.
- 782 土居 秀幸, 近藤 倫生 (2021): 環境 DNA—生態系の真の姿を読み解く—. 共立出版, 東京,  
783 300 pp.
- 784 Doi, T., A. Storto, T. Fukuoka, H. Suganuma, and K. Sato (2019): Impacts of Temperature  
785 Measurements From Sea Turtles on Seasonal Prediction Around the Arafura Sea. *Front. Mar. Sci.*,  
786 6, 1–11.
- 787 土井 威志, 安中 さやか, 高橋 一生, 渡辺 路生, 東塚 知己, 栗原 晴子(2021): 海洋学の  
788 10 年展望 2021 : 熱帯域. 海の研究, 投稿中.
- 789 D’Ortenzio, F., V. Taillandier, H. Claustre, L. M. Prieur, E. Leymarie, A. Mignot, A. Poteau, C.  
790 Penkerch, and C. M. Schmechtig (2020): Biogeochemical Argo: the test case of the NAOS  
791 Mediterranean array. *Front. Mar. Sci.*, 7, 120.
- 792 Duarte, C. M., L. Chapuis, S. P. Collin, D. P. Costa, R. P. Devassy, V. M. Eguiluz, C. Erbe, T. A. C.  
793 Gordon, B. S. Halpern, H. R. Harding, M. N. Havlik, M. Meekan, N. D. Merchant, J. L. Miksis-  
794 Olds, M. Parsons, M. Predragovic, A. N. Radford, C. A. Radford, S. D. Simpson, H. Slabbekoorn,  
795 E. Staatterman, I. C. Van Opzeeland, J. Winderen, X. Zhang, and F. Juanes (2021): The soundscape  
796 of the Anthropocene ocean. *Science*, 371, eaba4658.
- 797 Erkes-Medrano, D., R. C. Thompson, and D. C. Aldridge (2015): Microplastics in freshwater  
798 systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of  
799 research needs. *Water Res.*, 75, 63–82.
- 800 Eriksen, M., L. C. M. Lebreton, H. S. Carson, M. Thiel, C. J. Moore, J. C. Borerro, F. Galgani, P. G.  
801 Ryan, and J. Reisser (2014): Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic  
802 pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS ONE*, 9, e111913.
- 803 European Commission (2018): Communication from the Commission to the European Parliament,  
804 the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A  
805 European Strategy for Plastics in a Circular Economy. COM(2018)28 final.
- 806 Evangeliou, N., H. Grythe, Z. Klimont, C. Heyes, S. Eckhardt, S. Lopez-Aparicio, and A. Stohl  
807 (2020): Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. *Nat.*  
808 *Commun.* 11, 3381.
- 809 Evans, T.W., S. Coffinet, M. Könneke, J. S. Lipp, K. W. Becker, M. Elvert, V. Heuer, and K.-U.  
810 Hinrichs (2019): Assessing the carbon assimilation and production of benthic archaeal lipid  
811 biomarkers using lipid-RIP. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 265, 431–442.
- 812 Fan, Q.H., M. Tanaka, K. Tanaka, A. Sakaguchi, and Y. Takahashi (2014): An EXAFS study on the

813 effects of natural organic matter and the expandability of clay minerals on cesium adsorption and  
814 mobility. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 135, 49–65.

815 Ficetola, G.F., C. Miaud, F. Pompanon, and P. Taberlet (2008): Species detection using  
816 environmental DNA from water samples. *Biol. Lett.*, 4, 423–425.

817 Fukaya, K., H. Murakami, S. Yoon, K. Minami, Y. Osada, S. Yamamoto, R. Masuda, A. Kasai, K.  
818 Miyashita, T. Minamoto, and M. Kondoh (2020): Estimating fish population abundance by  
819 integrating quantitative data on environmental DNA and hydrodynamic modeling. *Mol. Ecol.*

820 Fukuoka, T., M. Yamane, C. Kinoshita, T. Narazaki, G. J. Marshall, K. J. Abernathy, N. Miyazaki,  
821 and K. Sato (2016): The feeding habit of sea turtles influences their reaction to artificial marine  
822 debris. *Sci. Rep.*, 6, 28015.

823 Goto, Y., K. Yoda, and K. Sato (2017): Asymmetry hidden in birds' tracks reveals wind, heading, and  
824 orientation ability over the ocean. *Sci. Adv.*, 3, e1700097.

825 濱崎 恒二, 石坂 丞二, 齊藤 宏明, 杉崎 宏哉, 鈴木 光次, 高橋 一生, 千葉 早苗 (2013):  
826 海洋学の 10 年展望 (III)—日本海洋学会将来構想委員会生物サブグループの議論から—,  
827 海の研究, 22, 253–272.

828 花輪 公雄, 津田 敦 (2013): 「海洋学の 10 年展望」 発刊に寄せて. 海の研究, 22, 187–189.

829 橋濱 史典, 瀬瀬 慎也, 近藤 能子, 佐々木 克徳, 杉本 周作, 高橋 一生, 長井 健容,  
830 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,  
831 投稿中.

832 Hidalgo-Ruz, V., L. Gutow, R. C. Thompson, M. Thiel (2012): Microplastics in the marine  
833 environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environ. Sci.*  
834 *Technol.* 46, 3060–3075.

835 Honda, M. C., H. Kawakami, S. Watanabe, and T. Saino (2013): Concentration and vertical flux of  
836 Fukushima-derived radiocesium in sinking particles from two sites in the Northwestern Pacific  
837 Ocean. *Biogeosciences*, 10, 3525–3534.

838 IAEA (2014): *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer to*  
839 *Wildlife. IAEA Technical Reports Series 479.* International Atomic Energy Agency, Vienna.

840 Ikenoue, T., H. Takata, M. Kusakabe, N. Kudo, K. Hasegawa, and T. Ishimaru (2017): Temporal  
841 variation of cesium isotope concentrations and atom ratios in zooplankton in the Pacific off the  
842 east coast of Japan. *Sci. Rep.*, 7, 39874.

843 Ikenoue, T., N. Ishii, M. Kusakabe, and H. Takata (2018): Contribution of <sup>137</sup>Cs-enriched particles to  
844 radiocesium concentrations in seafloor sediment: Reconnaissance experiment, *PLoS ONE*, 13,  
845 e0204289.

846 Ikenoue, T., M. Takehara, K. Morooka, E. Kurihara, R. Takami, N. Ishii, N. Kubo, and S.  
847 Utsunomiya (2020): Occurrence of highly radioactive microparticles in the seafloor sediment  
848 from the pacific coast 35 km northeast of the Fukushima Daiichi nuclear power plant.  
849 *Chemosphere*, 267, 128907.

850 Inomata, Y., M. Aoyama, T. Tsubono, D. Tsumune, and K. Hirose (2016): Spatial and temporal  
851 distributions of (134)Cs and (137)Cs derived from the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power  
852 Plant accident in the North Pacific Ocean by using optimal interpolation analysis, *Environ. Sci.*  
853 *Process Impacts*, 18, 126–136.

854 Inomata, Y., M. Aoyama, Y. Hamajima, and M. Yamada (2018): Transport of FNPP1-derived  
855 radiocaesium from subtropical mode water in the western North Pacific Ocean to the Sea of Japan,  
856 *Ocean Sci.*, 14, 813–826.

857 Inoue, M., R. Takehara, S. Hanaki, H. Kameyama, J. Nishioka, and S. Nagao (2020): Distributions  
858 of radiocesium and radium isotopes in the western Bering Sea in 2018. *Mar. Chem.*, 225, 10.

859 Inoue, R., T. Suga, S. Kouketsu, T. Kita, S. Hosoda, T. Kobayashi, K. Sato, H. Nakajima and T.  
860 Kawano (2016): Western north Pacific integrated physical-biogeochemical ocean observation  
861 experiment (INBOX): Part 1. Specifications and chronology of the S1-INBOX floats, *J. Mar. Res.*,  
862 74, 43–69.

863 IOCCG (2011): Bio-optical sensors on Argo floats. In *Reports of the International Ocean Colour*  
864 *Coordinating Group 11*, edited by H. Claustre. International Ocean Colour Coordinating Group

- 865 (IOCCG), Dartmouth.
- 866 ISO (2020): *Plastics — Environmental aspects — State of knowledge and methodologies*. ISO/TR  
867 21960:2020.
- 868 Isobe, A., N. T. Buenaventura, S. Chastain, S. Chavanich, A. Cózar, M. DeLorenzo, P. Hagmann, H.  
869 Hinata, N. Kozlovskii, A. L. Lusher, E. Martí, Y. Michida, J. Mu, M. Ohno, G. Potter, P. S. Ross,  
870 N. Sagawa, W. J. Shim, Y. K. Song, H. Takada, T. Tokai, T. Torii, K. Uchida, K. Vassilenko, V.  
871 Viyakarn, W. Zhang (2019): An interlaboratory comparison exercise for the determination of  
872 microplastics in standard sample bottles. *Mar. Pollut. Bull.* 146, 831–837.
- 873 磯辺 篤彦 (2020): 海洋プラスチックごみ問題の真実: マイクロプラスチックの実態と未来  
874 予測. 化学同人, 188 p.
- 875 Iwata, T., (2021): 日本のバイオロギング研究. *OPRI Perspect.*, 1–8.
- 876 Jambeck, R. J., R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan and K. L.  
877 Law (2015): Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347, 768–771.
- 878 Johnson, K. S., W. M. Berelson, E. S. Boss, Z. Chase, H. Claustre, S. R. Emerson, N. Gruber, A.  
879 Körtzinger, M. J. Perry, and S. C. Riser (2009): Observing biogeochemical cycles at global scales  
880 with profiling floats and gliders: Prospects for a global array. *Oceanography*, 22, 216–225.
- 881 Johnson, K. S., S. C. Riser, and D. M. Karl (2010): Nitrate supply from deep to near-surface waters  
882 of the North Pacific subtropical gyre. *Nature*, 465, 1062–1065.
- 883 Johnson, K.S., and H. Claustre (2016): Bringing biogeochemistry into the Argo age. *Eos*, 97.
- 884 Johnson, K. S., J. N. Plant, L. J. Coletti, H. W. Jannasch, C. M. Sakamoto, S. C. Riser, D. D. Swift,  
885 N. L. Williams, E. Boss, N. Haëntjens, L. D. Talley, and J. L. Sarmiento (2017): Biogeochemical  
886 sensor performance in the SOCCOM profiling float array. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 6416–  
887 6436.
- 888 Juhel, J. B., R. S. Utama, V. Marques, I. B. Vimono, H. Y. Sugeha, Kadarusman, L. Pouyaud, T.  
889 Dejean, D. Mouillot, and R. Hocdé (2020): Accumulation curves of environmental DNA  
890 sequences predict coastal fish diversity in the coral triangle. *Proc. Roy. Soc. B*, 287, 20200248.
- 891 Kaeriyama, H., K. Fujimoto, D. Ambe, Y. Shigenobu, T. Ono, K. Tadokoro, Y. Okazaki, S. Kakehi,  
892 S. Ito, Y. Narimatsu, K. Nakata, T. Morita, and T. Watanabe (2015): Fukushima-derived  
893 radionuclides  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in zooplankton and seawater samples collected off the Joban-  
894 Sanriku coast, in Sendai Bay, and in the Oyashio region. *Fish. Sci.*, 81, 139–153.
- 895 Kaeriyama, H., Y. Shimizu, T. Setou, Y. Kumamoto, M. Okazaki, D. Ambe, and T. Ono (2016):  
896 Intrusion of Fukushima-derived radiocaesium into subsurface water due to formation of mode  
897 waters in the North Pacific. *Sci. Rep.*, 6, 22010.
- 898 Kaeriyama, H., K. Fujimoto, M. Inoue, and M. Minakawa (2020): Radiocaesium in Japan Sea  
899 associated with sinking particles from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J.*  
900 *Environ. Radioact.*, 222, 106348.
- 901 Kakehi, S., H. Kaeriyama, D. Ambe, T. Ono, S.-I. Ito, Y. Shimizu, and T. Watanabe (2016):  
902 Radioactive cesium dynamics derived from hydrographic observations in the Abukuma River  
903 Estuary, Japan. *J. Environ. Radioact.*, 153, 1–9.
- 904 Kako, S., S. Morita, and T. Taneda (2020): Estimation of plastic marine debris volumes on beaches  
905 using unmanned aerial vehicles and image processing based on deep learning. *Mar. Pollut. Bull.*,  
906 155, 1–9.
- 907 Kamenkovich, I., A. Haza, A. R. Gray, C. O. Dufour, and Z. Garraffo (2017): Observing system  
908 simulation experiments for an array of autonomous biogeochemical profiling floats in the  
909 Southern Ocean. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 7595–7611.
- 910 神田 穰太, 石井 雅男, 小川 浩史, 小埜 恒夫, 小畑 元, 川合 美千代, 鈴木 昌弘, 本多 牧  
911 生, 山下 洋平, 渡邊 豊 (2013): 海洋学の 10 年展望 (II)—日本海洋学会将来構想委員会  
912 化学サブグループの議論から—, 海の研究, 22, 219–251.
- 913 Kanda, J. (2013): Continuing  $^{137}\text{Cs}$  release to the sea from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power  
914 Plant through 2012. *Biogeosciences*, 10, 6107–6113.
- 915 環境省 (2014): 平成 26 年度漂着ごみ対策総合検討業務報告書.  
916 [https://www.env.go.jp/water/marine\\_litter/report\\_h26.pdf](https://www.env.go.jp/water/marine_litter/report_h26.pdf)

917 K ppler, A., D. Fischer, S. Oberbeckmann, G. Schernewski, M. Labrenz, K. J. Eichhorn, and B. Voit  
 918 (2016): Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman  
 919 or both? *Anal. Bioanal. Chem.*, 408, 8377–8391.  
 920 Kataoka, T., and Y. Nihei (2020): Quantification of floating riverine macro-debris transport using an  
 921 image processing approach. *Sci. Rep.*, 10, 2198.  
 922 川合 美千代, 田村 岳史, 渡邊 英嗣, 西岡 純, 野村 大樹, 眞壁 竜介, 溝端 浩平, 安  
 923 中 さやか (2021): 海洋学の 10 年展望 2021 : 極域. 海の研究, 投稿中.  
 924 Kawamura, H., T. Kobayashi, A. Furuno, T. In, Y. Ishikawa, T. Nakayama, S. Shima, and T. Awaji  
 925 (2011): Preliminary Numerical Experiments on Oceanic Dispersion of <sup>131</sup>I and <sup>137</sup>Cs Discharged  
 926 into the Ocean because of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster. *J. Nucl. Sci.*  
 927 *Technol.*, 48, 1349–1356.  
 928 Kitamura, M., Y. Kumamoto, H. Kawakami, E. C. Cruz, and K. Fujikura (2013): Horizontal  
 929 distribution of Fukushima-derived radiocesium in zooplankton in the northwestern Pacific Ocean.  
 930 *Biogeosciences*, 10, 5729–5738.  
 931 Kobayashi, T., H. Kawamura, K. Fujii, and Y. Kamidaira (2019): Development of a short-term  
 932 emergency assessment system of the marine environmental radioactivity around Japan. *J. Nucl.*  
 933 *Sci. Technol.*, 54, 609–616.  
 934 Kooyman, G. (1965): Techniques used in measuring diving capacities of Weddell Seals. *Polar Rec.*,  
 935 12, 391–394.  
 936 Korpela, J., H. Suzuki, S. Matsumoto, Y. Mizutani, M. Samejima, T. Maekawa, J. Nakai, and K.  
 937 Yoda (2020): Machine learning enables improved runtime and precision for bio-loggers on  
 938 seabirds. *Commun. Biol.*, 3, 633.  
 939 Körtzinger, A., J. Schimanski, U. Send, and D. Wallace (2004): The ocean takes a deep breath.  
 940 *Science*, 306, 1337.  
 941 Kubo, A., K. Tanabe, G. Suzuki, Y. Ito, T. Ishimaru, N. Kasamatsu-Takasawa, D. Tsumune, T.  
 942 Mizuno, Y.W. Watanabe, H. Arakawa, and J. Kanda (2018): Radioactive cesium concentrations in  
 943 coastal suspended matter after the Fukushima nuclear accident. *Mar. Pollut. Bull.*, 131, 341–346.  
 944 Kumamoto, Y., M. Aoyama, Y. Hamajima, S. Nishino, A. Murata, and T. Kikuchi (2019):  
 945 Radiocesium in the western subarctic area of the North Pacific Ocean, Bering Sea, and Arctic  
 946 Ocean in 2015 and 2017. *Polar Sci.*, 21, 228–232.  
 947 Kusakabe, M., S. Oikawa, H. Takata, and J. Misonoo (2013): Spatiotemporal distributions of  
 948 Fukushima-derived radionuclides in nearby marine surface sediments. *Biogeosciences*, 10, 5019–  
 949 5030.  
 950 Kusakabe, M., N. Inatomi, H. Takata, and T. Ikenoue (2017): Decline in radiocesium in seafloor  
 951 sediments off Fukushima and nearby prefectures. *J. Oceanogr.*, 73, 529–545.  
 952 La Nasa, J., G. Biale, D. Fabbri, and F. Modugno (2020): A review on challenges and developments  
 953 of analytical pyrolysis and other thermoanalytical techniques for the quali-quantitative  
 954 determination of microplastics. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 149, 104841.  
 955 Lebreton, L. C. M., J. V. D. Zwet, J.W. Damsteed, B. Slat, A. Andrady, and J. Reisser (2017): River  
 956 plastic emissions to the world's ocean. *Nat. commun.*, 8, 15611.  
 957 Lin, T.-H., C. Chen, H. K. Watanabe, S. Kawagucci, H. Yamamoto, and T. Akamatsu (2019): Using  
 958 soundscapes to assess deep-sea benthic ecosystems. *Trends Ecol. Evol.*, 34, 1066–1069.  
 959 Machida, M., S. Yamada, A. Iwata, S. Otosaka, S., T. Kobayashi, M. Watababe, H. Funasaka, and T.  
 960 Morita (2020): Seven-year Temporal Variation of Cesium-137 Discharge Inventory from the Port  
 961 of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 57, 939–950.  
 962 March, D., L. Boehme, J. Tintor , P. J. Vélez-Belchi, and B. J. Godley (2019): Towards the  
 963 integration of animal-borne instruments into global ocean observing systems. *Glob. Chang. Biol.*,  
 964 26, 586–596.  
 965 Martin C., Q. Zhang, D. Zhai, X. Zhang, and C. M. Duarte (2021): Enabling a large scale assessment  
 966 of litter along Saudi Arabian red sea shores by combining drones and machine learning, *Environ.*  
 967 *Pollut.*, 277, 116730.  
 968 Masumoto, Y., Y. Miyazawa, D. Tsumune., T. Tsubono, T. Kobayashi, H. Kawamura, C. Estournel, P.  
 969 Marsaleix, L. Lanerolle, A. Mehra, and Z. D. Garraffo (2012): Oceanic Dispersion Simulations of  
 970 <sup>137</sup>Cs Released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Elements*, 8, 207–212.

- 971 Mato, Y., T. Isobe, H. Takada, H. Kanehiro, C. Ohtake, T. Kaminuma (2001): Plastic resin pellets as  
972 a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environ. Sci. Technol.*, 35,  
973 318–324.
- 974 Michida, Y., S. Chavanich, A. C. Cabañas, P. Hagmann, H. Hinata, A. Isobe, P. Kershaw, N.  
975 Kozlovskii, D. Li, A. L. Lusher, E. Martí, S. A. Mason, J. Mu, H. Saito, W. J. Shim, A. D. Syakti,  
976 H. Takada, R. Thompson, T. Tokai, K. Uchida, K. Vasilenko, and J. Wang (2019): *Guidelines for*  
977 *Harmonizing Ocean Surface Microplastic Monitoring Methods*. Ministry of the Environment,  
978 Japan, Tokyo, 68 pp.
- 979 Minamoto T., H. Yamanaka, T. T. Takahara, M.N. Honjo, Z. Kawabata (2012): Surveillance of fish  
980 species composition using environmental DNA. *Limnol.* 13, 193–197.
- 981 Mintenig, S. M., M. Kooi, M. W. Erich, S. Primpke, P. E. R. Hasselerharm, S. C. Dekker, A. A.  
982 Koelmans, and A. P. Van Wezel (2020): A systems approach to understand microplastic occurrence  
983 and variability in Dutch riverine surface waters. *Water Res.*, 176, 115723.
- 984 Miura, H., T. Ishimaru, Y. Ito, Y. Kurihara, S. Ootosaka, A. Sakaguchi, K. Misumi, D. Tsumune, A.  
985 Kubo, S. Higaki, J. Kanda, and Y. Takahashi (2021): First isolation and analysis of caesium-  
986 bearing microparticles from marine samples in the Pacific coastal area near Fukushima Prefecture.  
987 *Sci. Rep.*, 11, 5664.
- 988 Miya, M., Y. Sato, T. Fukunaga, T. Sado, J.Y. Poulsen, K. Sato, T. Minamoto, S. Yamamoto, H.  
989 Yamanaka, H. Araki, M. Kondoh, and W. Iwasaki (2015): MiFish, a set of universal PCR primers  
990 for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical  
991 marine species. *Roy. Soc. Open Sci.*, 2, 150088.
- 992 Miya M., R.O. Gotoh, and T. Sado (2020): MiFish metabarcoding: a high-throughput approach for  
993 simultaneous detection of multiple fish species from environmental DNA and other samples. *Fish.*  
994 *Sci.*, 86, 939–970.
- 995 Miya, M. (in press): Environmental DNA metabarcoding: a novel method for biodiversity  
996 monitoring of marine fish communities. *Ann. Rev. Mar. Sci.*
- 997 宮 正樹 (2021): 第 4 章 : 環境 DNA メタバーコーディング. p. 124–156. In: 環境 DNA — 生  
998 態系の真の姿を読み解く —, 土居秀幸・近藤倫生 (編), 共立出版, 東京.
- 999 Miyazawa, Y., X. Guo, S. M. Varlamov, T. Miyama, K. Yoda, K. Sato, T. Kano, and K. Sato (2015):  
1000 Assimilation of the seabird and ship drift data in the north-eastern sea of Japan into an operational  
1001 ocean nowcast/forecast system. *Sci. Rep.*, 5, 1–10.
- 1002 Miyazawa, Y., A. Kuwano-Yoshida, T. Doi, H. Nishikawa, T. Narazaki, T. Fukuoka, and K. Sato  
1003 (2019): Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the  
1004 Kuroshio-Oyashio Confluence region. *Ocean Dyn.*, 69, 267–282.
- 1005 Miyake, Y. (1954): The artificial radioactivity in rain water observed in Japan from May to August,  
1006 1954, *Papers in Meteorol. Geophys.*, 5, 173–177.
- 1007 Moltmann, T., J. Turton, H.-M. Zhang, G. Nolan, C. Gouldman, L. Griesbauer, Z. Willis, Á. M.  
1008 Piniella, S. Barrell, E. Andersson, C. Gallage, E. Charpentier, M. Belbeoch, P. Poli, A. Rea, E. F.  
1009 Burger, D. M. Legler, R. Lumpkin, C. Meinig, K. O'Brien, K. Saha, A. Sutton, D. Zhang and Y.  
1010 Zhang (2019): A Global Ocean Observing System (GOOS), delivered through enhanced  
1011 collaboration across regions, communities, and new technologies. *Front. Mar. Sci.*, 6, 291.
- 1012 Murakami, H., S. Yoon, A. Kasai, T. Minamoto, S. Yamamoto, M. K. Sakata, T. Horiuchi, H.  
1013 Sawada, M. Kondoh, Y. Yamashita, and R. Masuda (2019): Dispersion and degradation of  
1014 environmental DNA from caged fish in a marine environment. *Fish. Sci.*, 85, 327–337.
- 1015 Narazaki, T., K. Sato, and N. Miyazaki (2015): Summer migration to temperate foraging habitats and  
1016 active winter diving of juvenile loggerhead turtles *Caretta caretta* in the western North Pacific.  
1017 *Mar. Biol.*, 162, 1251–1263.
- 1018 日本学術会議 (2020): 東京電力福島第一原子力発電所事故による環境汚染の調査研究の進  
1019 展と課題, 総合工学委員会原子力安全に関する分科会報告書.
- 1020 Nishida, K., Y. C. Chew, Y. Miyairi, S. Hirabayashi, A. Suzuki, M. Hayashi, Y. Yamamoto, M. Sato,  
1021 Y. Nojiri, and Y. Yokoyama (2020): Novel reverse radioisotope labelling experiment reveals  
1022 carbon assimilation of marine calcifiers under ocean acidification conditions. *Methods Ecol. Evol.*,  
1023 11, 739–790.



- 1024 岡 顕, 大林 由美子, 勝又 勝郎, 高橋 一生, 山下 洋平, 横川 太一 (2021): 海洋学の 10  
1025 年展望 2021 : 深層. 海の研究, 投稿中.
- 1026 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  
1027 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  
1028 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)—日本海洋学  
1029 会将来構想委員会物理サブグループの議論から—, 海の研究, 22, 191–218.
- 1030 Oka, S. I., H. Doi, K. Miyamoto, N. Hanahara, T. Sado, and M. Miya (2021): Environmental DNA  
1031 metabarcoding for biodiversity monitoring of a highly diverse tropical fish community in a coral  
1032 reef lagoon: Estimation of species richness and detection of habitat segregation. *Environ. DNA*, 3,  
1033 55–69.
- 1034 Ono, T., D. Ambe, H. Kaeriyama, Y. Shigenobu, K. Fujimoto, K. Sogame, N. Nishiura, T. Fujikawa,  
1035 T. Morita, and T. Watanabe (2015): Concentration of  $^{134}\text{Cs}$  +  $^{137}\text{Cs}$  bonded to the organic fraction  
1036 of sediments offshore Fukushima, Japan. *Geochem. J.*, 49, 219–227.
- 1037 Otosaka, S. (2017): Processes affecting long-term changes in  $^{137}\text{Cs}$  concentration in surface  
1038 sediments off Fukushima. *J. Oceanogr.*, 73, 559–570.
- 1039 Otosaka, S., and T. Kobayashi (2013): Sedimentation and remobilization of radiocesium in the  
1040 coastal area of Ibaraki, 70 km south of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, *Environ.*  
1041 *Monit. Assess.*, 185, 5419–5433.
- 1042 Otosaka, S., and Y. Kato (2014): Radiocesium derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power  
1043 Plant accident in seabed sediments: initial deposition and inventories. *Environ. Sci. Process*  
1044 *Impacts*, 16, 978–990.
- 1045 Otosaka, S., T. Nakanishi, T. Suzuki, Y. Satoh, and H. Narita (2014): Vertical and lateral transport of  
1046 particulate radiocesium off Fukushima. *Environ. Sci. Technol.*, 48, 12595–12602.
- 1047 Otosaka, S., Y. Satoh, T. Suzuki, J. Kuwabara, and T. Nakanishi (2018): Distribution and fate of  $^{129}\text{I}$   
1048 in the seabed sediment off Fukushima. *J. Environ. Radioact.*, 192, 208–218.
- 1049 Otosaka, S., S. Kambayashi, M. Fukuda, T. Tsuruta, T. Misonou, T. Suzuki, and T. Aono (2020):  
1050 Behavior of Radiocesium in Sediments in Fukushima Coastal Waters: Verification of Desorption  
1051 Potential through Pore Water. *Environ. Sci. Technol.*, 54, 13778–13785.
- 1052 Patel, S. H., S. G. Barco, L. M. Crowe, J. P. Manning, E. Matzen, R. J. Smolowitz, and H. L. Haas  
1053 (2018): Loggerhead turtles are good ocean-observers in stratified mid-latitude regions. *Estuar.*  
1054 *Coast. Shelf Sci.*, 213, 128–136.
- 1055 Port, J. A., J. L. O'Donnell, O. C. Romero-Maraccini, P. R. Leary, S. Y. Litvin, K. J. Nickols, and R.  
1056 P. Kelly (2016): Assessing vertebrate biodiversity in a kelp forest ecosystem using environmental  
1057 DNA. *Mol. Ecol.*, 25, 527–541.
- 1058 Prata, J. C., J. P. da Costa, I. Lopes, A. C. Duarte, T. Rocha-Santos (2020): Environmental exposure  
1059 to microplastics: An overview on possible human health effects. *Sci. Total Environ.* 702, 134455.
- 1060 Riser, S. C., H. J. Freeland, D. Roemmich, S. Wijffels, A. Troisi, M. Belbéoch, D. Gilbert, J. Xu, S.  
1061 Pouliquen, A. Thresher, P.-Y. Le Traon, G. Maze, B. Klein, M. Ravichandran, F. Grant, P.-M.  
1062 Poulain, T. Suga, B. Lim, A. Sterl, P. Sutton, K.-A. Mork, P. J. Vézé-Belchi, I. Ansorge, B. King,  
1063 J. Turton, M. Baringer, and S. R. Jayne (2016) : Fifteen years of ocean observations with the  
1064 global Argo array. *Nature Clim. Change*, 6, 145–153.
- 1065 Rudnick, D. L., and M. J. Perry (2003): ALPS: Autonomous and Lagrangian Platforms and Sensors  
1066 Workshop Report.
- 1067 坂田雅之・徐寿明・源利文 (2021): 第 1 章 : 環境 DNA 分析の概要. p.1–35. In: 環境 DNA  
1068 —生態系の真の姿を読み解く—, 土居秀幸・近藤倫生 (編), 共立出版, 東京.
- 1069 Sakuma, K., T. Nakanishi, K. Yoshimura, H. Kurikami, K. Nanba, and M. Zheleznyak (2019): A  
1070 modeling approach to estimate the  $^{137}\text{Cs}$  discharge in rivers from immediately after the Fukushima  
1071 accident until 2017. *J. Environ. Radioact.*, 208–209, 106041.
- 1072 Sigsgaard, E. E., I. B. Nielsen, H. Carl, M. A. Krag, S. W. Knudsen, Y. Xing, T. H. Holm-Hansen, P.  
1073 R. Møller, and P. F. Thomsen (2017): Seawater environmental DNA reflects seasonality of a  
1074 coastal fish community. *Mar. Biol.*, 164, 128.

- 1075 Smith, J. N., R. M. Brown, W. J. Williams, M. Robert, R. Nelson, and S. B. Moran (2015): Arrival of  
 1076 the Fukushima radioactivity plume in North American continental waters. *Proc. Natl. Acad. Sci.*  
 1077 *USA*, 112, 1310–1315.
- 1078 Stat, M., M. J. Huggett, R. Bernasconi, J. D. DiBattista, T. E. Berry, S. J. Newman, and M. Bunce  
 1079 (2017): Ecosystem biomonitoring with eDNA: metabarcoding across the tree of life in a tropical  
 1080 marine environment. *Sci. Rep.*, 7, 1–11.
- 1081 水産庁 (2021): 水産物の放射性物質調査の結果について。  
 1082 <https://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html> (last access: 26 January 2021)
- 1083 Suzuki, T., S. Ootosaka, J. Kuwabara, H. Kawamura, and T. Kobayashi (2013): Iodine-129  
 1084 concentration in seawater near Fukushima before and after the accident at the Fukushima Daiichi  
 1085 nuclear power plant. *Biogeosciences*, 10, 3839–3847.
- 1086 Tagami, K., and S. Uchida (2016): Consideration on the Long Ecological Half-Life Component of  
 1087 <sup>137</sup>Cs in Demersal Fish Based on Field Observation Results Obtained after the Fukushima  
 1088 Accident, *Environ. Sci. Technol.*, 50, 1804–1811.
- 1089 Takahashi, H., A. Nakai, and I. Shimoyama (2018): Waterproof airflow sensor for seabird bio-  
 1090 logging using a highly sensitive differential pressure sensor and nano-hole array. *Sens. Actuator A-  
 1091 Phys.*, 281, 243–249.
- 1092 Takata, H., K. Hasegawa, S. Oikawa, N. Kudo, T. Ikenoue, R.S. Isono, and M. Kusakabe (2015a):  
 1093 Remobilization of radiocesium on riverine particles in seawater: The contribution of desorption to  
 1094 the export flux to the marine environment. *Mar. Chem.*, 176, 51–63.
- 1095 Takata, H., M. Kusakabe, and S. Oikawa (2015b): Radiocesiums (<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs) in zooplankton in the  
 1096 waters of Miyagi, Fukushima and Ibaraki Prefectures. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 303, 1265–  
 1097 1271.
- 1098 Talley, L. D., R. A. Feely, B. M. Sloyan, R. Wanninkhof, M. O. Baringer, J. L. Bullister, C. A.  
 1099 Carlson, S. C. Doney, R. A. Fine, E. Firing, N. Gruber, D. A. Hansell, M. Ishii, G. C. Johnson, K.  
 1100 Katsumata, R. M. Key, M. Kramp, C. Langdon, A. M. Macdonald, J. T. Mathis, E. L. McDonagh,  
 1101 S. Mecking, F. J. Millero, C. W. Mordy, T. Nakano, C. L. Sabine, W. M. Smethie, J. H. Swift, T.  
 1102 Tanhua, A. M. Thurnherr, M. J. Warner, and J.-Z. Zhang (2016) : Changes in ocean heat,  
 1103 carbon content, and ventilation: a review of the first decade of GO-SHIP global repeat  
 1104 hydrography. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 8, 185–215.
- 1105 Tateda Y., D. Tsumune, T. Tsubono, K. Misumi, M. Yamada, J. Kanda, and T. Ishimaru (2016):  
 1106 Status of <sup>137</sup>Cs contamination in marine biota along the Pacific coast of eastern Japan derived  
 1107 from a dynamic biological model two years simulation following the Fukushima accident. *J.*  
 1108 *Environ. Radioact.*, 151, 495–501.
- 1109 Tateda, Y., K. Misumi, D. Tsumune, M. Aoyama, Y. Hamajima, J. Kanda, T. Ishimaru, and T. Aono  
 1110 (2020): Reconstruction of radiocesium levels in sediment off Fukushima: Simulation analysis of  
 1111 bioavailability using parameters derived from observed <sup>137</sup>Cs concentrations. *J. Environ.*  
 1112 *Radioact.*, 214–215, 106172.
- 1113 Teilmann, J., M. D. Agersted, and M. P. Heide-Jørgensen (2020): A comparison of CTD satellite-  
 1114 linked tags for large cetaceans - Bowhead whales as real-time autonomous sampling platforms.  
 1115 *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, 157, doi:10.1016/j.dsr.2020.103213.
- 1116 Thomas, R. M., A. R. MacKenzie, S. J. Reynolds, J. P. Sadler, F. Cropley, S. Bell, S. J. Dugdale, L.  
 1117 Chapman, A. Quinn, and X. Cai (2018): Avian Sensor Packages for Meteorological  
 1118 Measurements. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 99, 499–511.
- 1119 Thomsen P.F., K. Kielgast, L.L. Iversen, P.R. Møller, M. Rasmussen, E. Willerslev (2012): Detection  
 1120 of a diverse marine fish fauna using environmental DNA from seawater samples. *PLoS ONE* 7:  
 1121 e41732
- 1122 Thornton, B., S. Ohnishi, T. Ura, N. Odano, S. Sasaki, T. Fujita, T. Watanabe, K. Nakata, T. Ono, and  
 1123 D. Ambe (2013): Distribution of local <sup>137</sup>Cs anomalies on the seafloor near the Fukushima Dai-  
 1124 ichi Nuclear Power Plant. *Mar. Poll. Bull.* 74, 344–350.
- 1125 Toner, B. M., S. C. Fakra, S. J. Manganini, C. M. Santelli, M. A. Marcus, J. Moffett, O. Rouxel, C.  
 1126 R. German, and K. J. Edwards (2009): Preservation of iron(II) by carbon-rich matrices in a  
 1127 hydrothermal plume. *Nature Geosci.*, 2, 197–201.
- 1128 Treep, J., G. Bohrer, J. Shamoun-Baranes, O. Duriez, R. P. De Moraes Frasson, W. Bouten, R. Prata

1129 de Moraes Frasson, and W. Bouten, (2016): Using High-Resolution GPS Tracking Data of Bird  
1130 Flight for Meteorological Observations. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 97, 951–961.

1131 Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama, and K. Hirose (2012): Distribution of oceanic  $^{137}\text{Cs}$  from the  
1132 Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model. *J.*  
1133 *Environ. Radioact.*, 111, 100–108.

1134 Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama, M. Uematsu, K. Misumi, Y. Maeda, Y. Yoshida, and H.  
1135 Hayami (2013): One-year, regional-scale simulation of  $^{137}\text{Cs}$  radioactivity in the ocean following  
1136 the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, *Biogeosciences*, 10, 5601.

1137 Tsuruta, T., H. Harada, T. Misonou, T. Matsuoka, and Y. Hodotsuka (2017): Horizontal and vertical  
1138 distributions of  $^{137}\text{Cs}$  in seabed sediments around the river mouth near Fukushima Daiichi Nuclear  
1139 Power Plant. *J. Oceanogr.*, 73, 547–558.

1140 Ushio, M., M. Hiroaki, R. Masuda, T. Sado, M. Miya, S. Sakurai, H. Yamanaka, T. Minamoto, and  
1141 M. Kondoh (2018): Quantitative monitoring of multispecies fish environmental DNA using high-  
1142 throughput sequencing. *Metabarcoding Metagenom.*, 2, e23297.

1143 Voosen, P. (2020): U.S. funds new fleet of probes to explore ocean biogeochemistry. *Science*, 370,  
1144 511–512.

1145 Wang, J., K. Sun, T. Cheng, B. Jiang, C. Deng, Y. Zhao, D. Liu, Y. Mu, M. Tan, X. Wang, W. Liu, and  
1146 B. Xiao (2020): Deep high-resolution Representation Learning for Visual Recognition. *IEEE*  
1147 *Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*

1148 Watanabe, Y. Y., K. Ito, N. Kokubun, and A. Takahashi (2020): Foraging behavior links sea ice to  
1149 breeding success in Antarctic penguins. *Sci. Adv.*, 6, 1–9.

1150 Weimerskirch, H., J. Collet, A. Corbeau, A. Pajot, F. Hoarau, C. Marteau, D. Filippi, and S. C.  
1151 Patrick (2020): Ocean sentinel albatrosses locate illegal vessels and provide the first estimate of  
1152 the extent of nondeclared fishing. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 117, 3006–3014.

1153 West, K., M. J. Travers, M. Stat, E. S. Harvey, Z. T. Richards, J. D. DiBattista, S. J. Newman, A.  
1154 Harry, C. L. Skepper, M. Heydenrych, and M. Bunce (in press): Large-scale eDNA metabarcoding  
1155 survey reveals marine biogeographic break and transitions over tropical north-western Australia.  
1156 *Divers. Distrib.*

1157 Yamahara, K. M., C. M. Preston, J. Birch, K. Walz, R. Marin, S. Jensen, D. Pargett, B. Roman, W.  
1158 Ussler, Y. Zhang, J. Ryan, B. Hobson, B. Kieft, B. Raanan, K. D. Goodwin, F. P. Chavez, and C.  
1159 Scholin (2019): In situ autonomous acquisition and preservation of marine environmental DNA  
1160 using an autonomous underwater vehicle. *Front. Mar. Sci.*, 6, 373.

1161 Yamamoto, T., A. Takahashi, N. Katsumata, K. Sato, P. N. Trathan (2010): At-Sea Distribution and  
1162 Behavior of Streaked Shearwaters (*Calonectris leucomelas*) During the Nonbreeding Period. *The*  
1163 *Auk*, 127, 871–881.

1164 Yamashita, R., H. Takada, M. Fukuwara, and Y. Watanuki (2011): Physical and chemical effects of  
1165 ingested plastic debris on short-tailed shearwaters *Puffinus tenuirostris*, in the North Pacific  
1166 Ocean. *Mar. Pollut. Bull.*, 62, 2845–2849.

1167 Yoda, K., K. Shiomi, and K. Sato (2014): Foraging spots of streaked shearwaters in relation to ocean  
1168 surface currents as identified using their drift movements. *Prog. Oceanogr.*, 122, 54–64.

1169 Yonehara, Y., Y. Goto, K. Yoda, Y. Watanuki, L. C. Young, H. Weimerskirch, C.-A. Bost, and K. Sato  
1170 (2016): Flight paths of seabirds soaring over the ocean surface enable measurement of fine-scale  
1171 wind speed and direction. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 113, 9039–9044.

1172 Yoshino, K., A. Takahashi, T. Adachi, D. P. Costa, P. W. Robinson, S. H. Peterson, L. A. Hückstädt,  
1173 R. R. Holser, and Y. Naito (2020): Acceleration-triggered animal-borne videos show a dominance  
1174 of fish in the diet of female northern elephant seals. *J. Exp. Biol.*, 223, jeb212936.

1175 Zheng, J., T. Aono, S. Uchida, J. Zhang, and M. C. Honda (2012): Distribution of Pu isotopes in  
1176 marine sediments in the Pacific 30 km off Fukushima after the Fukushima Daiichi nuclear power  
1177 plant accident, *Geochem. J.*, 46, 361–369.

1178 Zou, K., J. Chen, H. Ruan, Z. Li, W. Guo, M. Li, and L. Liu (2020): eDNA metabarcoding as a  
1179 promising conservation tool for monitoring fish diversity in a coastal wetland of the Pearl River  
1180 Estuary compared to bottom trawling. *Sci. Total Env.*, 702, 134704.

1181

1182

**Decadal vision in oceanography 2021: New methods and problems**

1183

1184 Junya Hirai<sup>1\*\*</sup>, Masaki Miya<sup>2</sup>, Tetsuichi Fujiki<sup>3</sup>, Akira Kuwano-Yoshida<sup>4</sup>, Shigeyoshi Ootosaka<sup>1</sup>,

1185 Hideki Kaeriyama<sup>5</sup>, Shin'ichiro Kako<sup>6</sup>, Tomoya Kataoka<sup>7</sup>, Daisuke Matsuoka<sup>3</sup>, Mitsuko Hidaka<sup>3</sup>,

1186 Daisuke Sugiyama<sup>3</sup>, Fujio Kojima<sup>8</sup>

1187

1188 <sup>1</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

1189 <sup>2</sup> Natural History Museum and Institute, Chiba

1190 <sup>3</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1191 <sup>4</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1192 <sup>5</sup> Fisheries Resources Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency

1193 <sup>6</sup> Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

1194 <sup>7</sup> Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

1195 <sup>8</sup> Pirika, Inc. / Pirika Association

1196

1197 <sup>\*\*</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa,

1198 Chiba 277-8564, Japan

1199 e-mail: hirai@aori.u-tokyo.ac.jp

1200

1201

**Abstract**

1202 While diverse kinds of new technologies have promoted the development of modern oceanography,  
1203 human activities have brought about many environmental problems such as ocean pollution. In this  
1204 paper, we focused on three topics of environmental DNA, BGC Argo, and bio-logging as a new method  
1205 contributing to the future development in oceanography. Accidentally released radionuclides still have  
1206 been a serious concern since the accident of Fukushima Dai-ichi nuclear power plant in 2011, and  
1207 plastic debris recently have received attentions as an international issue. We thus also focused on two  
1208 topics as a problem in current ocean environments.

1209

1210

1211 Key words: environmental DNA, BGC Argo, bio-logging, radionuclide, plastic