

1 海洋学の 10 年展望 2021:熱帯域

2 土井威志¹・安中さやか¹・高橋一生²・渡辺路生¹・東塚知己³・栗原 晴子⁴

3

4 1 海洋研究開発機構

5 2 東京大学大学院農学生命科学研究科

6 3 東京大学大学院理学系研究科

7 4 琉球大学理学部

8

9 ** 連絡著者：土井威志

10 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

11 E-mail: takeshi.doi@jamstec.go.jp

12

13

14 **要旨：**

15 熱帯域に関する近年の研究の進展をレビューするとともに、今後 10 年
16 程度で取り組むべき海洋研究の方向性に関して、特にエルニーニョ現象に焦点
17 を当てて、物理－化学－生物(物・化・生)の各分野を横断して論じた。エルニ
18 ーニョ現象の発生に関する物理的理解が進み、それらを基盤とした数理的な予
19 測シミュレーションもある程度可能となったが、エルニーニョ現象に伴い、炭
20 素循環、窒素循環、溶存酸素、植物プランクトンの生産力などが、どの様に変
21 動するのか、またその予測がどの程度可能なのかは、未だよく解っていない。長
22 期的な地球温暖化を背景に、エルニーニョ現象などの気候システムに内在する
23 自然変動現象の影響が深刻化してきた昨今、物・化・生の統合的理解を飛躍的
24 に進め、その予測を高精度化することは、社会要請と相まって、益々重要にな
25 っている。その鍵になるのが、高頻度・高解像度観測に基づいた化学・生物変
26 数の観測データの飛躍的な増加と、それを活用した地球システムモデルの検証
27 と精緻化、及びそれらを融合(データ同化)することだと考えられる。

28

29 キーワード： 将来構想, 分野横断, エルニーニョ現象, 予測

30

31

32

33

34

35 Decadal Vision in Oceanography 2021: Tropical Oceans

36

37 Takeshi Doi^{1**}, Sayaka Yasunaka¹, Kazutaka Takahashi², Michio Watanabe¹, Tomoki Tozuka³,

38 Yasuko Kurihara⁴

39

40 1 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

41 2 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

42 3 Graduate School of Science, The University of Tokyo

43 4 Faculty of Sciences, University of the Ryukyus

44 ** 3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama-city, Kanagawa, 236-0001, Japan

45

46 **Abstract**

47 A brief review of progress in oceanographic research in the tropics over the
48 past decade is provided and physical and biogeochemical oceanographic perspectives
49 on future directions for the next decade are proposed, with a special focus on the El
50 Niño-Southern Oscillation (ENSO). Although its physical understanding has advanced
51 significantly and its dynamical prediction with one-year lead is now possible, our
52 understanding of mechanisms and predictability of variations in the carbon and nitrogen
53 cycles, dissolved oxygen, and primary production associated with the ENSO is still
54 rudimentary. Since impacts of natural variability intrinsic to the climate system have
55 become more serious under global warming, comprehensive understanding and more
56 accurate prediction of the ENSO are becoming increasingly important, along with
57 societal needs. It is suggested that developing a new observational network based on
58 Biogeochemical Argo floats and earth system models incorporating biogeochemical
59 processes may shed new light on oceanographic research in the tropics.

60 **Keywords:** Decadal vision, Physical and biogeochemical perspective, ENSO, Prediction

61 Corresponding author e-mail address:takeshi.doi@jamstec.go.jp

62

63

64 1. はじめに

65 熱帯海洋は、太陽から多くの放射エネルギーを受けとるため、海面水
66 温が高く、その熱を中・高緯度へと運ぶため、大気・海洋の循環の駆動源にな
67 る。従って、地球全体の気候システムを考える上で大変重要な海域である。ま
68 た、海拔の低い国や地域が多く、海岸侵食や高潮などの被害が頻発しやすい。
69 さらに、多くの熱帯域が湧昇域であり、栄養塩の供給をうけて高い一次生産力
70 を示す。熱帯に位置する発展途上国や島嶼国の多くが、漁業・水産業やサンゴ
71 礁をベースとした観光業に強く依存しているため、海と社会・経済の結びつき
72 も強い。

73 海面水温が高い熱帯では、海洋と大気が相互に作用しながら発達する
74 「気候の内部変動現象」が発生しやすい(地球の気候システムに内在する自然変
75 動現象で、人為起源の放射強制が主要因であると考えられる地球温暖化のよう
76 な気候システムそのものの変化と区別して、ここでは、こう呼ぶ)。その代表的
77 な現象が、太平洋のエルニーニョ現象(Philander, 1989)や、インド洋のダイ
78 ポールモード現象(熱帯インド洋で、数年に1度程度の頻度で、夏から秋にかけ
79 て発生する気候の内部変動現象。ダイポールの名前は、海面水温、外向き長波
80 放射、海面高度などが東西のダイポール(双極子)構造を持っていたことに由
81 来する。Saji *et al.*, 1999)などである。エルニーニョ現象に伴い生物生産性や
82 魚類などの高次栄養生物の分布域は大きく変動する(Bertrand *et al.*, 2020)。
83 世界のサンゴ礁生態系の40%は危機的状況であるとされているが、熱帯にお
84 いても、エルニーニョ現象による海水温上昇は、海洋熱波(Marine Heat
85 Wave; Oliver *et al.*, 2018)とともに、サンゴの白化を引き起こし、サンゴ礁
86 海域に生息する多様な生物種の減少を引き起こすことも知られている
87 (Brainard *et al.*, 2018)。また、エルニーニョ現象はマングローブの成長、分
88 布などに影響する(Lovelock *et al.*, 2017; Riascos *et al.*, 2018)。さらに、エ
89 ルニーニョ現象に伴い、熱帯太平洋の中央部から東部にかけて、海面水位が数
90 cm 上昇するため(Widlansky *et al.*, 2017; Doi *et al.*, 2020c)、海岸侵食や
91 高潮などの被害が甚大化しやすく、海拔の低い地域では大きな脅威となる。

92 熱帯海洋の変動は、周辺域の海洋や気候に大きな影響を与えるだけで
93 はなく、大気を介して中高緯度域にも遠隔的に影響する(テレコネクションと呼
94 ばれる)。例えば、エルニーニョ現象が発生すると、日本は冷夏・暖冬になりや

95 すぐ、インド洋ダイポールモード現象が発生すると、猛暑・暖冬になりやすい
96 (Wang *et al.*, 2000; Saji and Yamagata, 2003; Doi *et al.*, 2020a)。エルニ
97 ーニョ現象は、台風やハリケーンなどの熱帯低気圧の発生にも影響し、世界各
98 地に甚大な被害をもたらす(Lin *et al.*, 2020; Chang *et al.*, 2018)。この様
99 に、熱帯海洋の変動は、大気を介して、日本を含む世界の異常気象・気候不順
100 の引き金となり、ひいては農作物の収量変動(lizumi *et al.*, 2014; Yuan and
101 Yamagata, 2015; lizumi *et al.*, 2013; Doi *et al.*, 2020d; Oettli *et al.*,
102 2018)やマラリアなどの感染症流行(Ikeda *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2020;
103 Hashizume *et al.*, 2012, 2009), 山火事(Harris and Lucas, 2019)や豪雨
104 (Takaya *et al.*, 2020)などにも影響する。従って、自然科学として現象の理解
105 を検証するためにも、社会経済的な被害に備えるためにも、熱帯海洋の研究で
106 は、エルニーニョ現象などの予測研究が先駆的に発展してきた。

107 予測研究の発展は、熱帯の海洋観測網の充実(Smith *et al.*, 2019;
108 Foltz *et al.*, 2019; Hermes *et al.*, 2019)や気候モデルの高度化(Kirtman,
109 2015; Tompkins *et al.*, 2017)などに支えられてきた。エルニーニョ現象につ
110 いては、およそ1年先の発生確率について、各国のスーパーコンピューターを
111 使った予測シミュレーションの結果を毎月確認できるようになった(例えば、
112 気象庁:
113 [http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/elnino/kanshi_joho/kanshi_joho1.ht](http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/elnino/kanshi_joho/kanshi_joho1.html)
114 [ml](http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/elnino/kanshi_joho/kanshi_joho1.html), JAMSTEC/SINTEX-F: :
115 <http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.htm>, 米国
116 IRI: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/enso/>)。これらの予
117 測情報を社会経済活動に利活用するための学際的な研究も展開され始めた。こ
118 れは、まさに先の10年展望(岡ら, 2013)で述べられた通りである。

119 このように水温など物理変数の予測が可能になりつつある一方で、気
120 候の内部変動現象に伴って、化学や生物に関する変数がどの様に変動するの
121 についてはよく解っていないことも多い。例えば、炭素循環、窒素循環、溶
122 存酸素、植物プランクトンの生産力、高次栄養段階生物の分布や回遊などが、
123 エルニーニョ現象に伴ってどの様に変動するのか、さらにそれらの予測がどの
124 程度可能かなどを明らかにすることができれば、海洋の温暖化・酸性化・貧酸
125 素化などに関わる水産資源や熱帯サンゴ礁の管理・保全や、ひいては長期的な
126 地球温暖化の将来予測とその影響評価の精緻化など多くの問題の解決に貢献で

127 きる。そのためには、物理—化学—生物(物・化・生)の各分野を横断して統一
128 的な理解を深めなければならない。物理環境場と生物地球化学的変動との関連
129 の重要性は、先の 10 年展望(岡ら, 2013)でも指摘され、実際に研究大会で
130 も、物・化・生統合型のセッションが頻繁に開かれてきた。しかし、物・化・
131 生の統一的理解には至っていない。それは、主に、1) 化学・生物に関する変
132 数の観測データが圧倒的に不足しているためと、2) それらを統一的に扱うた
133 めの数理モデルに大きな不確実性が存在するためである。予測研究を発展させ
134 るためには、これらの問題を徐々に解消しつつ、物・化・生の統合研究を推進
135 する科学的基盤を、今後 10 年程度で確立する必要がある。その鍵は、高頻
136 度・高解像度観測による化学・生物変数の観測データの飛躍的な増加と、それ
137 を活用した地球システムモデル(炭素循環や窒素循環なども考慮した気候モデ
138 ル)の検証と精緻化、及びそれらを融合(データ同化)することであると考えられ
139 る。

140 近年、極端に異常な大気・海洋の現象が頻発し、人類の生存基盤を脅
141 かしている。これは、50 年以上の長期的な規模で確認されている地球温暖化
142 のトレンドに、エルニーニョ現象などに代表される気候の内部変動現象の影響
143 が重畳した結果だと考えられる。例えば、2019 年に発生した過去最悪と言わ
144 れるオーストラリアの山火事などは、正にそれが顕在化した事象で、地球温暖
145 化に伴う長期的な高温・乾燥化と、半年程度続いたインド洋ダイポールモード
146 現象やエルニーニョモドキ現象(熱帯太平洋の中央部で海面水温が高く、東部と
147 西部で平年より低くなる現象。エルニーニョ現象と似ているが、その世界各地へ
148 の影響はかなり異なる。Ashok *et al.*, 2007)がもたらす高温・乾燥化の影響が
149 重複した結果とされている(Zhang *et al.*, 2021)。従って、進行中の温暖化を
150 背景として、熱帯の気候の内部変動現象の実態を物・化・生で統一的に理解
151 し、それらを予測する技術の高度化と、ひいてはその予測情報を社会問題に利
152 活用するための研究が、より一層重要になっていくと考えられる。水温などの
153 物理場の変動予測がある程度実現している熱帯域では、その実現性も比較的高
154 いと期待される。

155 本報告の 2 節では、過去 10 年間の研究動向の一部について、季節か
156 ら数年規模の変動を軸に、物・化・生の分野毎でレビューをすると共に、それ
157 ぞれの分野の今後の方向性についても、議論する。3 節では、今後 10 年程度
158 の研究の方向性の核として、物・化・生の統一的な研究遂行の重要性に注目

159 し、その鍵を握ると考えられる Biogeochemical (BGC) Argo と地球システム
160 モデルを中心に、現在の課題と今後の発展性を論じる。4 節では、本報告のま
161 とめと共に、熱帯の物・化・生の統一的理解が、SDGs (Sustainable
162 Development Goals, 持続可能な開発目標)などの社会的要請にどのように対
163 応可能かについても、簡単に触れる。

164

165 2. 過去 10 年間の研究動向

166

167 2.1 物理分野

168 エルニーニョ現象について、研究の歴史から 2013 年までの最先端の
169 成果について網羅した内容の日本語文献が渡部・木本 (2013)である。本節で
170 はそれからおよそ 10 年の研究動向の一部を紹介する。

171 Argo データの蓄積に加え、衛星(ESA の SMOS, NASA の Aquarius
172 や SMAP ミッションなど)による海面塩分の観測(Vinogradova *et al.*, 2019)
173 が可能となり、この 10 年間で塩分の観測データが飛躍的に増加したため、塩
174 分が、バリアレイヤー(水温は鉛直方向にほぼ一様の等温層であるが、塩分が深
175 さとともに増加しているために密度成層している層などの海洋表層の成層構造
176 を介して、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象などの熱帯域の
177 気候の内部変動現象に果たす役割に関する研究が進展した(Maes and
178 Belamari, 2011; Kido *et al.*, 2019)。特に、東部熱帯太平洋では、水温逆転
179 を伴うバリアレイヤーの存在が見出されたり(Katsura and Sprintall, 2020)、
180 インド洋赤道域では、バリアレイヤーが海洋混合層下部からの冷却効果を阻害
181 することが報告されるなど(Pujiana and McPhaden, 2018)、熱帯域の様々な
182 海域で塩分の果たす役割について理解が深まりつつある。

183 それぞれの気候の内部変動現象のプロセスの理解を深める研究だけで
184 なく、複数海盆を跨いだ現象間の相互関係の研究についても大きな進展が見ら
185 れる(Cai *et al.*, 2019; Chikamoto *et al.*, 2015)。さらに、現象の典型的な特
186 徴を、統計解析などを使って理解しようとする研究だけでなく、各事例に注目
187 し、その多様性(Diversity)を理解しようとする研究が活発化した(Capotondi
188 *et al.*, 2015; Endo and Tozuka, 2016; Fan *et al.*, 2017; Timmermann *et*
189 *al.*, 2018)。このような研究の潮流のきっかけとして、Ashok *et al.* (2007)や

190 Ashok and Yamagata (2009)によるエルニーニョモドキ現象の発見が挙げら
191 れる。

192 異なる時間スケールを持つ現象間の相互作用プロセスの研究も活発化
193 した。例えば、数ヶ月スケールで発生・衰退するエルニーニョ現象と、より短
194 い時間スケールの気象現象、例えば、3-10日スケールの西風バースト（通常
195 は東風が吹いている太平洋熱帯西部で、稀に強い西風が続く現象）との関係
196 や、数週間スケールのマッデン・ジュリアン振動(熱帯インド洋で発生した雲の
197 大規模な集団が赤道上を東へ進む現象)などとの関係が活発に研究された
198 (Hayashi and Watanabe, 2017; Miyakawa *et al.*, 2017)。また、エルニー
199 ニョ現象と、より長い時間スケールである10年から数10年規模の気候変動
200 現象との関係(Meehl *et al.*, 2016)や、地球温暖化の停滞との関係(Kosaka
201 and Xie, 2013)なども注目された。温暖化が進行した世界でエルニーニョ現象
202 やインド洋ダイポールモード現象がどのように変質するかについても活発に研究
203 された(Cai *et al.*, 2014, 2015, 2021; Kohyama *et al.*, 2017)。

204 熱帯の熱が中緯度へどのように運ばれるかについても活発に研究され
205 てきた(橋濱ら, 2021, 本特集)。一例として、西部北太平洋域で台風の発生
206 海域で且つ黒潮の源流域であるフィリピン沖合から、台湾沖合への熱の移流を
207 論じたNagano *et al.* (2017)などがある。

208 沿岸で発生する海洋熱波とエルニーニョ現象などの大規模な現象との
209 関係を理解しようとする研究も活発化した(Sen Gupta *et al.*, 2020)。例え
210 ば、2011年に豪州西岸で発生した海洋熱波はラニーニャ現象との関係が指摘
211 されたが(Feng *et al.*, 2013)、このような研究が契機になり、沿岸で発生する
212 大気海洋相互を伴う気候の内部変動現象(沿岸ニニョ現象)が世界各地で見出
213 された(Kataoka *et al.*, 2014; Yuan and Yamagata, 2014; Oettli *et al.*,
214 2016; Xue *et al.*, 2020)。その他にも、インド洋ダイポールモード現象とジ
215 ャワ島沖沿岸湧昇の関係や(Horii *et al.* 2018)、パプアニューギニア沖の沿岸
216 湧昇がエルニーニョ発生に影響を与える可能性(Miyama and Hasegawa,
217 2014)などが指摘されている。このように海盆スケールの大規模な気候の内部
218 変動現象と、沿岸海洋との関係を理解しようとする研究は、沿岸海洋のプロセ
219 ス研究や予測研究に益々重要になってくるであろう(木田ら, 2021, 本特集)。

220 これらの研究の多くは、先の10年展望(岡ら, 2013)において、熱帯の
221 予測精度向上のために必要とされていたもので、熱帯域のプロセス研究が大き

222 く進展したと言える。しかしながら、観測データの時間方向のサンプル数が少
223 ないことや、気候モデルで海盆間の相互作用プロセスや、異なる時空間スケ
224 ル間の相互作用プロセスの再現が難しいことが原因で、しばしば結論が対立し
225 ている。このような不確実性を軽減するために、今後も、大気・海洋観測網の
226 維持・発展や、気候モデルの精緻化などの努力を続ける必要がある。

227 予測研究に目を向けると、エルニーニョ現象が発生するか否か自体
228 は、1年程度前からでも比較的高い精度で予測可能になった(Kirtman,
229 2015)。さらに、エルニーニョ現象の予測だけでなく、インド洋のダイポール
230 モード現象の予測(Luo *et al.*, 2007; Doi *et al.*, 2020a)や海盆モード現象(イ
231 ンド洋海盆全体で一様に海面水温が上昇あるいは低下する年々変動の現象, Wu
232 and Tang, 2019)の予測、太平洋のエルニーニョモドキ現象の予測(Hendon
233 *et al.*, 2009)、大西洋ニニョ現象の予測(Counillon *et al.*, 2021)、海盆東岸
234 域の沿岸ニニョ現象らの予測(Doi *et al.*, 2013, 2015b,a, 2016)などもある
235 程度可能であることが指摘され、一部の機関では、実験的に予測情報が配信さ
236 れるようになった(豪州 BoM: [http://www.bom.gov.au/climate/model-](http://www.bom.gov.au/climate/model-summary/#region=NINO34)
237 [summary/#region=NINO34](http://www.bom.gov.au/climate/model-summary/#region=NINO34), JAMSTEC/SINTEX-F:
238 <http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.htm>, APEC:
239 <https://apcc21.org/ser/enso.do?lang=en> など)。しかし、事例毎の多様
240 性(例えば、その規模や、海面水温偏差の水平構造)や、発生・衰退のタイミン
241 グなどを含めて予測することが難しい段階であり、これらに踏み込んだ予測の
242 精緻化が求められている。従来のように水温だけでなく、塩分の影響などを含
243 めた正確なプロセスの理解とモデル開発が予測精度向上へ寄与する可能性も示
244 唆された(Hackert *et al.*, 2020)。また、予測シミュレーションのアンサンブ
245 ル法(初期値やモデルの設定を有り得る範囲で僅かに変えた計算を複数回実施
246 し、将来起こる可能性のある状態を多数作り出す手法)に注目した研究も発展
247 してきた。例えば、小規模なアンサンブルでは、発生する可能性のある大気・
248 海洋状態の表現が不十分なため、極端ゆえに発生確率が低い現象を捉えきれな
249 い問題などが指摘されている(Doi *et al.*, 2019)。さらに、アンサンブル平均値
250 を使って、エルニーニョ現象を決定論的に予測した際、自信過剰になる、すな
251 わちアンサンブル平均値の予測誤差に対して、予測の不確実性が小さ過ぎる)
252 問題などが指摘された(Tompkins *et al.*, 2017)。この問題は、2014年の春先
253 からのエルニーニョ予測の失敗例などでも大きく取り上げられ、その改善方法

254 ついても活発に議論されてきた(Masuda *et al.*, 2015; Hu and Fedorov,
255 2016; Imada *et al.*, 2016; Dong and McPhaden, 2018)。今後は、多アン
256 サンプルの数値実験などを駆使し、数ヶ月から数年規模の時間スケールで、シ
257 グナルとして予測できる成分と、ノイズとして予測できない成分との境界付近
258 の理解を深める必要があると考えられる。

259

260 2.2 化学分野

261 人為起源の二酸化炭素(CO₂)が大気に大量に排出されてきたことが、地
262 球温暖化の主な原因とされているが、陸域とともに主要な吸収源であるのが海
263 洋である(Friedlingstein *et al.*, 2019)。海洋が CO₂を吸収することで、大気
264 の CO₂濃度の増加が抑制されているとも言える。地球上での、炭素収支を理解
265 することは、将来の地球温暖化の評価を精緻化するために極めて重要である。
266 海洋の CO₂吸収量は、海洋表層 CO₂分圧と大気 CO₂分圧の差で見積もられる
267 が、その詳細を知るためには、大気 CO₂分圧に比べて、時空間的な変動が大き
268 い海洋 CO₂分圧の広域かつ長期的な観測が必要である。1990 年代から近年に
269 かけて、日本を含む国際協力で設計された観測網の維持・発展と国際的なデー
270 タ共有・統合が進んだ(Wanninkhof *et al.*, 2019)。代表的なデータセットと
271 しては、LDEO([https://www.ncei.noaa.gov/access/ocean-carbon-data-](https://www.ncei.noaa.gov/access/ocean-carbon-data-system/oceans/LDEO_Underway_Database/)
272 [system/oceans/LDEO Underway Database/](https://www.ncei.noaa.gov/access/ocean-carbon-data-system/oceans/LDEO_Underway_Database/), Takahashi *et al.*, 2020)や
273 SOCAT(<https://www.socat.info/>, Bakker *et al.*, 2016)などがあげられる。
274 その結果、現在では、CO₂分圧の平均場を研究する段階を超えて、長期変化傾
275 向だけでなく、経年変動や 10 年規模変動も研究できる段階になった。特に、
276 太平洋熱帯域は、海洋で最大の CO₂放出源であるが、その経年変動が大きく、
277 エルニーニョ現象の発生に伴い、中央部から東部において CO₂分圧が低下する
278 (Feely *et al.*, 1997; Ishii *et al.*, 2014; Yasunaka *et al.*, 2019)。海洋中に
279 CO₂が溶解することによって、海水の炭酸化学平衡(海水中の炭酸、炭酸水素
280 イオン、炭酸イオンの存在比が、ほぼ一定に保たれた状態)の位置が変化し、
281 海水の pH が低下すると共に海水の炭酸カルシウム飽和度(Ω)が低下する(炭
282 酸カルシウムは、サンゴなど様々な海の生物の骨格や殻を形成するもので、海
283 水中の飽和度が低下することで、それらの形成が鈍化する)。この現象は、海洋
284 酸性化と呼ばれており、海洋生態系に深刻な影響を及ぼすことが指摘されてい
285 る(Doney *et al.*, 2009)。特に、熱帯では、太平洋赤道域西部の暖水プール

286 で、海洋酸性化が長期的に進んでいることが指摘され、そのプロセス研究など
287 も活発に行われる様になってきた(Midorikawa *et al.*, 2010; Ishii *et al.*,
288 2020)。また、その 10 年規模変動についても議論され始めた(Ono *et al.*,
289 2019)。さらに、表層の主要栄養塩(リン酸塩, 硝酸塩, ケイ酸)についても,
290 平均的な水平分布を研究する段階を超えて、その季節・経年変動などを研究で
291 ける段階になりつつある(Yasunaka *et al.*, 2019)。化学系の変数を使って、
292 この様な長期にわたる変化や変動を研究できるようになったのには、気象庁
293 が、50 年以上前から継続・発展させてきた東経 137 度定線の観測が大きく貢
294 献している。このような長期の定線観測は国際的にも類を見ず、大変画期的で
295 ある(Oka *et al.*, 2018)。

296 地球温暖化に伴い、海面での酸素溶解度の低下、表層での成層強化、
297 さらには深層子午面循環の弱化などにより、海水中の酸素濃度の低下が懸念さ
298 れている(海洋貧酸素化と呼ばれる)。太平洋やインド洋の熱帯域では、亜表
299 層(数 100m 深)付近を中心に、もともと酸素濃度の低い水が広がっており、
300 軽微な貧酸素化でも、海洋生物などに甚大な影響を及ぼす可能性がある。ま
301 た、貧酸素化は、窒素や微量金属元素の循環に影響を与え、 N_2O などの温室効
302 果ガスの大気中への放出が増えることが懸念されている。実際にインド洋や東
303 太平洋熱帯域亜表層に広がる貧酸素水塊では、窒素代謝に不可欠な鉄も溶解度
304 の高い還元態鉄(二価鉄)として存在しやすくなるため、海洋中の他の物質へ
305 の吸着除去が抑制され、溶存鉄の長距離輸送が起こっている可能性も示唆されて
306 いる(Moffett *et al.*, 2007; Kondo and Moffett, 2015)。熱帯太平洋東部の
307 貧酸素化は既に始まっており、今後更に進行する可能性が指摘され始めた
308 (Long *et al.*, 2016; Schmidtko *et al.*, 2017)。一方で、エルニーニョ・ラニ
309 ーニャ現象やモンスーンに影響された溶存酸素量の季節から数 10 年規模の変
310 動の規模や、その水平及び鉛直分布などは、観測データの不足により、未だ不
311 確実な部分が非常に大きい。今後、10 年規模変動や地球温暖化トレンドの影
312 響を含めて、さらに詳細な研究を実施するため、引き続き、観測データの蓄積
313 や統合が求められている。

314

315 2.3 生物分野

316 物理・化学分野と比べて、生物分野では広域・定常の観測が圧倒的に
317 不足しているが、衛星観測が可能な表層のクロロフィル *a* 濃度(Chl*a*)の広域分

318 布は、同じく衛星観測される海面水温や海面高度などの物理変数の解析と親和
319 性が高く、海盆スケールでの一次生産変動の理解が進んでいる。

320 熱帯太平洋は、基本場として、湧昇による栄養塩供給の豊富な東部の
321 湧昇域と、貧栄養な暖水が分布する西部との東西コントラストが明確である
322 が、それぞれの海域では海流や表層水塊分布に対応して生物生産性は地理的な
323 特徴を示す。太平洋全体の一次生産の約2割を担う東部海域は、一次生産の高
324 い東部縁辺部、赤道湧昇域に加えて、南半球、北半球の海流系に対応した7つ
325 の水域に区分される(Lavín *et al.*, 2006; Pennington *et al.*, 2006)。このう
326 ち、赤道湧昇域、南赤道海域、ペルー海流沖合は、植物プランクトンの成長
327 に必要な栄養塩が多いにも関わらず、植物プランクトン自体の発生数が少ない
328 海域(HNLC 海域)であることが知られている(Coale *et al.*, 1996; Behrenfeld
329 *et al.*, 2006)。これは、湧昇で下層から供給される硝酸塩に対して鉄が不足す
330 るためだと考えられており、表層での鉄の再生速度に影響する湧昇速度が、新
331 生産(表層での有機物生産のうち、大気や表層の下部など外部から供給される栄
332 養塩類に依存する部分)を高める鍵であることが近年指摘されている(Rafter *et*
333 *al.*, 2017)。また、中米沖合の東太平洋暖水プール (Eastern Pacific Warm
334 Pool) 域に、熱帯収束帯(ITCZ)の季節的な南北移動によって局所的に形成され
335 る湧昇域 (Costa Rica Dome; Umatani and Yamagata, 1991)では、ケイ素、
336 鉄に加えて亜鉛も植物プランクトン増殖の制限要因となっていることが報告さ
337 れている(Chappell *et al.*, 2016)。東部から西部にかけて生じる水温躍層の深
338 化は、同時に下層からの栄養塩供給を妨げるため、西部海域は、表層の Chl *a*
339 が低い貧栄養海域となるが、物理環境に対応した海域毎の特徴把握は、東部海
340 域と比べて進んでいない。一般に、西部海域では表層の顕著な栄養塩枯渇と、
341 低塩分水によって形成されるバリアレイヤーの影響を受けて、亜表層 Chl *a* 極
342 大が発達する。一方で、亜表層では、光の強度が低く、光合成を律速するた
343 め、その一次生産速度は東部の半分程度であるとされている。東部の沿岸湧昇
344 域を除くと、熱帯域植物プランクトン群集全体では、2 μ m以下のピコサイズの
345 グループが常に優占(常に総 Chl *a* の70%以上)しているが、その優占群は
346 水温、栄養塩躍層の東西環境勾配に対応して変化する。熱帯太平洋東部ではピ
347 コサイズ真核、西部では *Prochlorococcus*、両者の移行域で *Synechococcus*
348 と優占群が変化する(Matsumoto *et al.*, 2004)。また、表層で硝酸塩が枯渇す
349 る一方、ダストを介して陸域から鉄が供給されやすい西部海域では、窒素固定

350 性シアノバクテリアが一次生産者として重要な役割を果たしている(Bonnet *et*
351 *al.*, 2009; Shiozaki *et al.*, 2013; Berthelot *et al.*, 2017)。

352 エルニーニョ現象が一次生産に与える影響については、海色衛星による
353 観測データの蓄積が進み、長期間・広域にわたる変動解析が進展している
354 (Gierach *et al.*, 2012; Messié and Chavez, 2013; Racault *et al.*, 2017)。
355 一般に東部では、エルニーニョ現象が発生すると栄養塩供給の低下にともない
356 一次生産速度が半減する一方、西部ではバリアレイヤーが薄くなり、栄養塩躍
357 層や水温躍層が浅化するため、一次生産速度が高まることが報告されているが
358 (Matsumoto and Furuya, 2011), その変動はエルニーニョ現象の規模やタイ
359 プにより異なる(Racault *et al.*, 2017)。同様の研究が、熱帯インド洋にも拡
360 張・展開されてきた(Currie *et al.*, 2013)。インド洋ダイポールモード現象の
361 発生に伴い、スマトラ島・ジャバ島の沖合、ベンガル湾北西部、アラビア海南
362 東部などでは植物プランクトンの量(Iskandar *et al.*, 2009; Gomes *et al.*,
363 2016; Thushara and Vinayachandran, 2020)やサイズ分布(Brewin *et al.*,
364 2012)が変動することが指摘されている。最近では、2019年のイベントを契
365 機に、「生物学的なインド洋ダイポールモード現象」も見出された(Shi and
366 Wang, 2021)。これらの海盆規模の気候の内部変動が、外洋域だけでなく海
367 洋大陸付近の Chl *a* に与える影響なども指摘されてきた(Siswanto *et al.*,
368 2020)。

369 動物プランクトンより上の栄養段階については比較的知見が乏しい。
370 植物プランクトンと動物プランクトン(200 μ m以上)の比は、東部湧昇域で
371 4.1, 西部暖水域で7.3と東西差が明確であり、貧栄養海域では一次生産から
372 二次生産者への転送効率が低いことが示唆されている(Le Borgne *et al.*,
373 2011)。一方、三次生産者であるマイクロネクトン(オキアミ類, エビ類, 魚類
374 など, プランクトンより遊泳力が高いもので, 浮遊しているプランクトンと,
375 自分で移動するネクトンの間に位置する生態群)の生物量は両海域で同程度であ
376 ることから, 西部海域は一次生産に比して, 魚類や大型生物の生物量が多い海
377 域であるという特徴を持つ。その理由について, 移流や各生物群の成長速度の
378 違い, 食物網構造の違いなどが挙げられているが, その詳細は不明である。近
379 年, 熱帯域のプランクトン群集の遺伝的多様性についての理解が進み, 分布,
380 環境変動に対する応答, 食物構造等を理解するうえで重要な示唆を提供するよ
381 うになってきた(Wang *et al.*, 2014; de Vargas *et al.*, 2015; Yan *et al.*,

382 2021)。このような解析結果を、従来の観測結果に取り入れることで、各海域
383 の物理構造の変動が、低次栄養段階の生物に与える影響に、新たな洞察を与え
384 ることが期待される。

385 水産・魚類資源の分布や漁獲量は、エルニーニョ現象との関係が指摘
386 されている(Bertrand *et al.*, 2020)。例えば、西部暖水域に分布するカツオや
387 キハダマグロの漁場は、エルニーニョ現象が生じると東側へ移動する
388 (Lehoday *et al.*, 2021)。また西部熱帯海域はカツオの産卵場、幼魚の生育
389 場となっており(Tanabe, 2002)、その加入量はエルニーニョ現象に強く影響
390 されることが知られているが、物理変数のみを用いたモデルにより、その加入
391 量変動を高精度で予測することが可能となっている (Lehoday *et al.*,
392 2021)。また、エルニーニョ現象がニホンウナギの仔稚魚輸送期間に影響す
393 ること(Hsiung *et al.*, 2018)も指摘されている。熱帯インド洋西部では、マグ
394 ロの生息分布が、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の影響を
395 受けて大きく変動する(Marsac, 2017)。これら海洋現象と水産資源との関係
396 について、関連する研究の多くが、統計に基づく経験的な解析と議論に留まっ
397 ており、その変動に関与する実際のメカニズムの多くが未解明である。しか
398 し、近年になって、物・化・生の連携でそのプロセス解明を目指すような野心
399 的な研究もされ始めてきた(Gehlen *et al.*, 2015)。今後 10 年程度は、栄養塩
400 供給から植物プランクトンについて理解する段階を超えて、その上位の栄養段
401 階についての知見を深め、食物連鎖構造の知見を再構築する必要がある。

402 熱帯域においてエルニーニョ現象による影響を最も顕著に受ける生物
403 としてサンゴ類があげられる。塊状ハマサンゴなど比較的水温耐性の高いサン
404 ゴ種はその骨格中の酸素同位体やストロンチウムとカルシウムの比(Sr/Ca 比)
405 に海水温や塩分の履歴を残し、過去のエルニーニョの発生など古環境復元とし
406 て多く利用されてきた(Charles, 1997)。しかし多くのサンゴ種は生息場の夏
407 の平均水温よりも 1-2°C 高い状態が数日から数週間続くと白化し、その状態が
408 長期化するとやがて死滅してしまうことが知られている。サンゴの白化は過去
409 これまでもエルニーニョ現象の度に繰り返し起こってきたことが示されている
410 が(Barkley *et al.*, 2018)、特に 1998 年に発生した最大規模のエルニーニョ
411 現象の際は、全世界のサンゴの大規模白化を引き起こし、サンゴ礁生態系に多
412 大な影響を与えた。その後 2010 年、さらに 2016-17 年にも再び世界的なサ
413 ンゴの大規模白化が引き起こされ、エルニーニョ現象と温暖化による水温上昇

414 が重なることによってその規模と頻度が増していることが指摘されている
415 (Hughes *et al.*, 2018)。また近年エルニーニョ現象に加え、海洋熱波による
416 大規模白化の報告例も急速に増えている(Le Nohaïc *et al.*, 2017)。健全なサ
417 ンゴ礁生態系では、約 10 年程度でサンゴ群集はある程度まで回復する力を有
418 する一方で(Gilmour *et al.*, 2013)、現在は温暖化に加えて酸性化や人為的影
419 響による水質環境の悪化によって、その回復力が大きく低下していることが問
420 題視されている(Hughes, 2003)。サンゴの死滅はそこに生息する甲殻類や貝
421 類、魚類などの生物の生息の場の消失に繋がり、生物多様性の低下、さらには
422 生態系機能の低下に直結する(Bellwood *et al.*, 2004)。さらには酸性化に伴う
423 海水の炭酸カルシウム飽和度の低下によってサンゴなどの石灰化生物による炭
424 酸カルシウムの合成量が低下することによって、サンゴ礁の形成そのものが停
425 止し、やがて溶解へと転じる可能性が指摘されている(Eyre *et al.*, 2018)。東
426 南アジア諸国など熱帯域に住む多くの人々はサンゴ礁がもたらす様々な生態系
427 サービスを受けながら暮らしているため、サンゴ礁生態系の劣化は経済的な損
428 失に直結する(Hoegh-Guldberg *et al.*, 2009)。また、海洋生物多様性の中心
429 である熱帯西太平洋サンゴ礁海域（コーラルトライアングル）は、黒潮海流に
430 よって琉球列島海域への多様な生物の供給源となっていることから、その健全
431 性保全是、国内のサンゴ礁生態系の動態を考える上でも重要である。近年は急
432 速なサンゴ礁劣化を防ぐ方法として、サンゴの遺伝子操作や高水温耐性の個体
433 の交配など人為的な進化支援（Assisted Evolution）なども議論されはじめて
434 おり、実証実験などが行われつつある(Anthony *et al.*, 2017)。このような保
435 全対策手段には、その妥当性をめぐり未だ多くの議論があるが、一方で温暖
436 化、酸性化に伴うサンゴ礁生態系の劣化・縮小は確実に進行しており、多くの
437 サンゴ礁では既に危機的な状況にあるとする意見も多い。より現実的で効果的
438 な対策を講じるためにも、海洋環境変動将来予測の精緻化が求められる。

439

440 3. 将来構想

441 物・化・生のそれぞれの分野で、推進すべき研究は多々あるが、その
442 一部を前節で紹介した。それらに加えて、今後は、物・化・生の統合理解を深
443 める必要があると考えられる。そのために、3.1 節では、化学・生物系の観測
444 データの不足を解消する BGC Argo を、3.2 節では、物・化・生を包括的に
445 扱う数理モデルである地球システムモデルの開発の動向を紹介する。3.3 節で

446 はそれらを組み合わせた将来構想を紹介する。BGC Argo も地球システムモデ
447 ルも、全球を対象とした観測，モデリングであるが，熱帯における現象の理解
448 に有用なツールとなりうる。3.4 節ではその他のアプローチについても触れ
449 る。

450

451 3.1 BGC Argo

452 2.1 節の通り，化学に関する変数の観測は，表層に限れば，基本場だけ
453 でなく，変動場の議論が可能になる程度には充実してきた。しかし，亜表層の
454 データは未だ圧倒的に不足している。そのため，近年の国際熱帯観測プロジェ
455 クトでは，物理変数だけでなく，物・生・化での連携をキーワードに，船舶に
456 による集中観測などが実施され，先駆的な成果が出始めた(例えば，Second
457 International Indian Ocean Expedition: [https://iioe-2.incois.gov.in/IIOE-](https://iioe-2.incois.gov.in/IIOE-2/index.jsp)
458 [2/index.jsp](https://iioe-2.incois.gov.in/IIOE-2/index.jsp) 関連など)。特に，熱帯太平洋では，JGOFS(Steinberg *et al.*,
459 2003；日本からは海洋研究開発機構などが参加)が先駆的なプロジェクトであ
460 り，熱帯で栄養塩の観測データが蓄積されたことで，およその気候値の描像が
461 可能となったと考えられる。しかし，これらはキャンペーンとして行われてい
462 るため，それが終われば，時々刻々と変動する海洋の化学場を繰り返し観測す
463 ることはできない。この状況を打破できるのが，BGC Argo である(Bittig *et*
464 *al.*, 2019)。これは，海中の水温・塩分の観測網を飛躍的に発展させた
465 Argo(熱帯での貢献については Smith *et al.* (2019)を参照)を，化学・生物変
466 数の観測に拡張させるもので，溶存酸素に加えて，pH，硝酸塩，Chl a など
467 の，プロファイルデータが桁違いに増える予定である(平井ら，2021，本特
468 集)。その結果，エルニーニョ現象に伴う化学変数や生物のダイナミックな応答
469 を三次元的に捉えられるようになることが期待される。例えば，Chl a は，エル
470 ニーニョ現象の発生時に，東部熱帯太平洋海面付近で低下することが知られて
471 いるが，もともと鉄制限を受ける海面付近よりも亜表層に極大があり，亜表層
472 での変動を捉えることが重要である。さらに，硝酸塩や照射強度のデータと一
473 緒に解析することで，Chl a 極大の形成や変動のメカニズムを解明できる。ま
474 た，後方散乱係数から粒子状物質の量を，pH から全炭酸濃度を推定できれ
475 ば，単位 Chl a あたりの炭素固定量の詳細な時空間変化や，表層から深層への
476 炭素輸送量（輸出生産量）の定量的把握など，海洋炭素循環の重要なパラメー
477 タを得ることができる。

478 最新の熱帯太平洋海洋観測システムをデザインするための TPOS2020
479 プロジェクトでは、太平洋の北緯 10 度から南緯 10 度の間に、BGC Argo フ
480 ロートを 124 本展開することが提案されている(Kessler *et al.*, 2019)。全球
481 では 1000 台を目指しており、2021 年 6 月では 350 台程度が稼働中である
482 (Chai *et al.*, 2020)。2020 年 12 月では、熱帯太平洋でおよそ 30 台、熱帯イ
483 ンド洋でおよそ 10 台が稼働中である（平井ら, 2021, 本特集）。

484 一方で、BGC Argo フロートは、通常の Argo フロートよりも高価で
485 ある上、水温・塩分に比べて、データ精度や安定性の確保に困難さを伴う（平
486 井ら, 2021, 本特集）。そのため、データ取得後は、現場観測や衛星観測デー
487 タを用いたより丁寧な品質管理が求められ、そのための観測資源および人的資
488 源の確保が課題である。また、後述のような数値モデルを使った観測システムシ
489 ミュレーション実験などを活用した戦略的な展開が必要である。

490

491 3.2 地球システムモデル

492 地球システムモデルとは、大気・海洋・陸域における物理現象を中心
493 に取り扱う気候モデルに、炭素循環、窒素循環をはじめとする物質循環や、そ
494 れに関わる生態過程を組み込んだモデルであり(Fig. 1; Hajima *et al.*, 2014;
495 Bonan and Doney, 2018; Kawamiya *et al.*, 2020) , 海洋の物・化・生の統
496 合的理解とその予測を実現させるための基盤的な技術である(Watanabe *et al.*,
497 2018)。その最大のメリットは、物・化・生の双方向のフィードバックが表現
498 可能なことである(Séférian *et al.*, 2020)。例えば、CO₂の溶解度の水温依存
499 性に注目すると、地球温暖化に伴う水温上昇は溶解度の低下と海洋の CO₂ 吸収
500 の抑制をもたらすが、このことは、さらなる大気中の CO₂ 濃度の上昇と溶解度
501 の低下をもたらす。実際の地球システムでは、このようなフィードバック
502 機構のみならず、水の移流・拡散や、生物活動、大気との物質交換など、さま
503 ざまな過程が複雑に絡み合っている。熱帯（あるいは各海域で）でどのような
504 機構が働いているのか明らかにし、その役割を定量的に見積もるためには、地
505 球システムモデルのように、物・化・生を同時に統合的に扱うアプローチが必要
506 である。また、気候の変動が海洋生態系にもたらす影響について、一方向の
507 アプローチ、すなわち水平 100km スケールの気候モデルのアウトプットを、
508 高解像度領域海洋モデルなどでダウンスケーリングしてから、海洋生態系モデ
509 ルを駆動するなどアプローチ(Jacox *et al.*, 2020)を用いた研究が広く行われ

510 ているが、海洋 CO₂ 吸収と密接に関わる海洋生物生産量に付随して計算される
511 Chla は、海洋表層での短波吸収に関わるため、その熱収支などにも影響を与え
512 うる。このような問題を扱うためには、地球システムモデルを使ったアプロー
513 チが必要である。

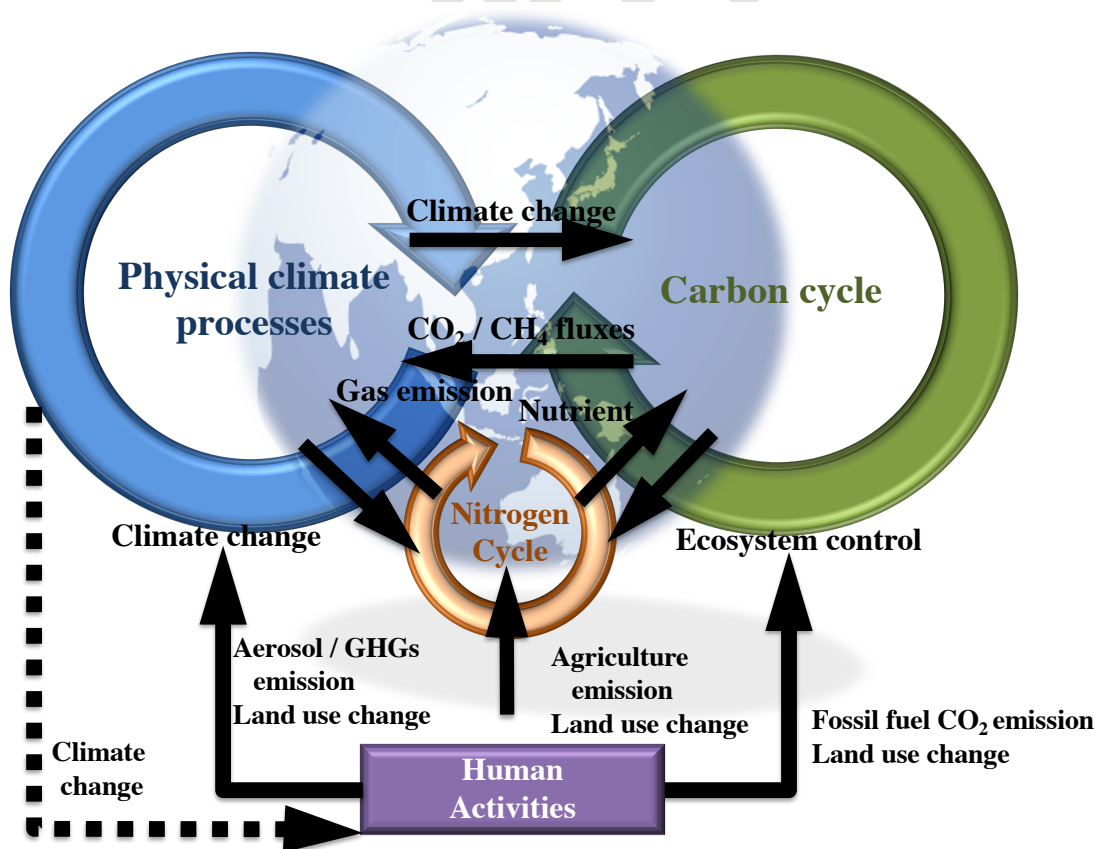
514 地球システムモデルは、過去から現在までの地球環境の変動の理解
515 や、CO₂ 排出シナリオから地球温暖化の将来評価などに役立てることができ
516 る。また、地球システムモデルではエルニーニョ現象などが再現されているこ
517 とから、熱帯における現象の理解、さらにそれが全球気候にもたらす影響など
518 も明らかにすることが可能である。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第
519 5次報告書(AR5)では、地球システムモデルを用いた研究の結果から、将来の
520 CO₂ 排出増加に伴う気候変動や、海洋の熱、CO₂ 吸収といった役割、さらに地
521 球温暖化の海洋生態系への影響などが取り上げられている(IPCC 2013)。加え
522 て、本報告の軸である季節から数年規模の予測に関して、地球システムモデル
523 を使うことで、物理変数の予測を超えて、Chla (Park *et al.*, 2019; Ham *et*
524 *al.*, 2021)や、海面 CO₂ フラックス(Ilyina *et al.*, 2021)の変動予測をした研究
525 が出始めた。これらの予測システムは、初期値作成の際、海水温などの一部の
526 物理変数のデータ同化をしているが、生物・化学変数のデータ同化などは充分
527 になされていない。将来、生物・化学変数の観測が増えて、それらの情報をも
528 初期値に取り込むことが可能になれば、さらに予測精度が向上することが期待
529 される。このような方向で、物・化・生の統合的な予測の成功例を、物理場の
530 予測にある程度実績のある熱帯域で積み重ねていけば、他の海域での予測研究
531 にも波及することが期待される。

532 地球システムモデルは、2021年から2022年に刊行予定の気候変動
533 に関する政府間パネル(IPCC)の第6次評価報告書(AR6)に合わせて、各
534 国の最先端の研究者や技術者らが、しのぎを削って開発したものである。しか
535 しながら、計算機資源の都合から、解像度は水平約100km程度と粗く、海洋
536 生態系が考慮しているプランクトンも数種類程度である。また、サブグリッド
537 スケールの現象については、パラメータ化を行わざるを得ない。今後、高解像
538 度化や、生態系モデルの複雑化・精緻化を図るためには、計算機能力の向上が
539 必要不可欠である。さらに、パラメータ化の基盤となるサブグリッドスケール
540 現象のプロセスの研究の進展が欠かせない。それゆえに、高性能なモデリング
541 を実現するには、相当な時間が必要であると考えられる。今後は、地球システ

542 ムモデルの高度化とともに、地球システムモデルの結果を高解像度領域モデル
543 に組み込みダウンスケーリングしていく研究の進展が見込まれる。このよう
544 に、改善の余地は多々あるものの、地球システムモデルは、自然科学の多岐に
545 渡る分野の個々の知見を包括的に統合・反映するための土台になりうる基盤的
546 技術であり、その高度化・高性能化の努力は、地球環境のもと持続的な活動を
547 続けるために、人類全体の科学的な財産になりうる。

548 地球システムモデルの高度化のためには、そのシミュレーション結果
549 やプロセスについて、観測データを使って丁寧に検証する作業が必要である。
550 しかし、そのための観測データが圧倒的に不足している。例えば、炭素循環に
551 ついては、唯一広域分布図が存在する海面 CO₂ フラックスを用いて検証するの
552 が一般的だが、2.2 節で述べたように観測網が充実してきたとはいえ、観測デ
553 ータを元に推定された広域分布図のデータセットにも不確実性が残されている
554 (Watson *et al.*, 2020)。また、海洋内部のプロセスに注目したモデル研究や
555 観測研究も今後発展させる必要がある。

556



557

558 Fig. 1): Conceptual diagram of Earth system model (ESM) (Source:
559 Kawamiya *et al.*, 2020)

560

561 3.3 BGC Argo と地球システムモデルが切り開く物・化・生の統合的理解と 562 その予測

563 化学・生物に関連する変数の観測データの圧倒的な不足が BGC Argo
564 により解消されれば、地球システムモデルの丁寧な検証が可能となり、その結
565 果として、モデルの検証と改善が進み、その不確実性も徐々に低減していくこ
566 とが期待される。その先には、現在のように水温や塩分などの海洋物理変数の
567 再解析データを超えて、物・化・生が統合された再解析データの構築の現実味
568 が増すであろう(Fennel *et al.*, 2019; Capotondi *et al.*, 2019)。大気では、
569 物理場と化学場の再解析データ作成への試みが既に始まっているが(Gaubert
570 *et al.*, 2016)、非線形的な相互作用の影響が強く、不確実性が大きいなどの問
571 題がある。海洋の場合でも同様の問題が大きいのしかかると想定される。た
572 だ、海洋の物・化・生に関する複数のデータを同化させようとするアプローチ
573 は、近年、急速に注目されてきており、いくつかの成功実績もある。例えば、
574 Salon *et al.* (2019)では、BGC Argo で観測された化学・生物関連変数や、衛
575 星から観測された表層 2 次元 Chl_a データを海洋領域モデルにデータ同化した
576 実績がある。このような研究も、BGC Argo の観測データが増えることで、飛
577 躍的な進歩が期待できる。

578 このような将来構想を実現させるためには、まず、ある程度明確な科学
579 研究の目的をもった大規模プロジェクトでのフロート投入とそのデータの利活
580 用を推進し、具体的な成功例を積み重ねる努力が欠かせない。例えば、Chl_a の
581 経年変動を考慮したエルニーニョ予測の改善プロジェクトが考えられる。現
582 在、エルニーニョ予測に使われている気候モデルのほぼ全てが、Chl_a の月別気
583 候値を入力しているが、Chl_a の経年変動による短波放射の吸収量に変調するこ
584 とを考慮することで、ENSO の振幅が 10-30%程度小さくシミュレーションさ
585 れることが報告されている(Jochum *et al.*, 2010; Kang *et al.*, 2017)。風応
586 力に対する力学的応答より、短波放射による熱力学的応答の方が早い
587 ため、Chl_a がエルニーニョ予測の予兆として重要である可能性なども指摘されて
588 いる(Park *et al.*, 2018)。そのプロセスには、鉄も重要な要素になりうる。従って、
589 表層水温、亜表層水温、対流活発、風などが関わる物理変数のフィードバック

590 機構に加えて、Chla, 鉄, 短波放射の吸収などが新たに関わる物・化・生の双
591 方向のフィードバック(Zhang *et al.*, 2018; Tian *et al.*, 2020)を表現可能な
592 地球システムモデルを使って, 既存の物理変数だけでなく, BGC Argo などで
593 観測された Chla や, 鉄に関する変数も初期値に取り込むことで, エルニーニ
594 ョ予測が改善する可能性が考えられる。このような研究を進めるためには, ま
595 ずは, エルニーニョ予測に実績のある気候モデルなどで, どの海域の Chla の
596 経年変動が, 過去のエルニーニョ事例の予測(規模, 水平構造, 発生・衰退のタ
597 イミングなど)にどのようなインパクトがあったのかを評価する必要がある。ま
598 た, 実在しない仮想的な観測データの同化インパクトを評価するシミュレーシ
599 ョン実験(観測システムシミュレーション実験)や, 実際に投入され始めた BGC
600 Argo フロートによる観測データの同化インパクトを評価する実験(観測システ
601 ム実験)などを駆使し, どのような海域で, どのような変数の観測が, どのくら
602 いの精度で, どのくらいの数必要かと言ったことを定量的に見積もることで,
603 戦略的に観測網を発展させることが重要である。このような数値実験は, 最先
604 端の地球システムモデルだけでなく, 既にも実績のある気候モデル, 領域海洋モ
605 デル, 海洋生態系モデルなども使い, 多様なデータ同化手法を掛け合わせて,
606 マルチアプローチで取り組むことで, 頑健性の高い評価が可能になると考えら
607 れる。

608 さらに先の未来を見据えた時, 物理循環-炭素循環-窒素循環を含め
609 た物・化・生の変数が統合された再解析データがリアルタイムに更新されて,
610 さらにそれを初期値として, その数日後から数年後の将来予測シミュレーシ
611 ョンの情報が随時更新されていくような技術が実現が期待できる。その結果, 例
612 えば, 海洋の温暖化・酸性化・貧酸素化・CO₂吸収が, 現在, どこで・どのよ
613 うに進んでいるか, また, 数ヶ月後に予測されるエルニーニョ現象の発生(規模
614 や水平構造などにも踏み込んで)で, どのような地域で, それらが促進・停滞す
615 るのか, 早期に警戒情報を伝えることが可能になるだろう。さらに, 沿岸研究
616 と連携することで, より人間社会・経済活動に直接的に関係することが可能と
617 なるかもしれない(木田ら, 2021, 本特集)。また, 2.3 節でレビューしたよ
618 うな研究が, さらに発展することで, 海洋環境場の変動が, 水産・魚類資源な
619 どにどのような影響が現れるかなどについても予測情報を提供できるようにな
620 るかもしれない。その萌芽的な研究成果も発表され始めた(Song and Park,

621 2021)。そうならば、SDGs「14.海の豊さを守ろう」などの社会要請により直
622 接的に対応可能となる。

623

624 3.4 その他の研究アプローチ

625 BGC Argo の充実や、地球システムモデルの精緻化だけではなく、そ
626 の他のアプローチの研究も必要である。観測データに関して言えば、化学・生
627 物系の観測データの圧倒的な不足を嘆くだけではなく、現在でも潤沢に得られ
628 るデータ、例えば衛星観測される表層 Chl a データなどを、海洋生態系モデル
629 の検証だけでなく、今までより一層積極的にデータ同化に活用するべきである
630 (International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), 2020)。さら
631 に、日周鉛直性生物群の分布量(生物量)を衛星から観測する試みが発表され
632 (Behrenfeld *et al.*, 2019)、動物プランクトンやマイクロネクトンについて
633 も衛星で観測できる可能性が出てきた。また、近年、海洋観測データについ
634 て、多種多様なデータを、容易に、統合的かつ包括的に扱うためのシステム構
635 築が進んできた。例えば、衛星、Argo、係留ブイ、船舶観測などによる水温
636 と塩分のプロファイルデータを全球で準リアルタイムに誰でも入手可能なシス
637 テムなどがある(Good *et al.*, 2013)。一方で、化・生データは、非公開のもの
638 も多く、公開されていてもプロジェクトごとのデータサイトで単発的で、ユー
639 ザーにとって利便性に欠ける場合も多い。海洋 CO $_2$ 分圧や栄養塩に関しては、
640 前述した SOCAT や LDEO の他に、World Ocean Database (WOD,
641 <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database>)や Global
642 Ocean Data Analysis Project (GLODAP, <https://www.glodap.info/>),
643 GEOTRACES (<https://www.geotraces.org/>)でも、データの収集・公開がな
644 されているが、未登録のデータも多くある。

645 PANGEA(<https://www.pangaea.de/>)と呼ばれるデータ登録・共有サイトに
646 登録されているデータもあるが、データフォーマットが統一されておらず、デ
647 ータを抽出し解析するのは容易ではない。水産資源のデータなどでは、国際連
648 合食糧農業機関(FAO)のサイト

649 (<http://www.fao.org/fishery/statistics/global-production/en>)などから入
650 手できるが、物理場や化学場などと統合的に解析を進めるのが容易ではない。

651 まずは、物・化・生の統一的研究を始める基盤を整えるため、データの入手と
652 解析準備のハードルが高すぎることを解消すべきである。また、今後は、何か

653 異常な海洋現象が起こった時に、早急にその理由を解析し、速報的にでも状況
654 を説明することを、益々社会から求められるようになると考えられる。学術的に
655 も、新鮮なデータを解析できた方が、好奇心が刺激され、科学の発展も促進さ
656 れるであろう。そのため、より統一的で、速報性の高いデータ共有サイトを構
657 築し、速やかに解析できる基盤を整えることが、学術的にも社会要請的にも必
658 要となる。

659 古くから設計され、飛躍的な発展を遂げてきた物理的な海洋観測網の
660 維持・発展も欠かせない(Brett *et al.*, 2020; Smith *et al.*, 2019; Beal *et al.*,
661 2020; Hermes *et al.*, 2019)。現在、衛星や Argo のおかげで、恒常的に入手
662 可能な水温・塩分観測であるが、時空間的にさらに密な観測が手に入ること
663 で、新たな現象やプロセスの発見につながることを期待される。加えて、新た
664 な変数として、運動量・熱フラックス、海流などの観測も増えれば、今後さら
665 に研究が発展するであろう。例えば、熱帯不安定波とエルニーニョ現象の関係
666 (Imada and Kimoto, 2012)や、アラビア海西部の渦活動とインド洋モンスー
667 ンの関係(Seo, 2017)など、従来からその重要性を指摘されてきたマルチスケ
668 ールの相互関係も、サブメソスケールの変動を観測できる高頻度・高分解海洋
669 観測データにより、さらに理解が進むであろう。そのためには、衛星観測の充
670 実も欠かせない(岩本ら, 2021, 本特集)。

671 また、熱帯太平洋の沿岸付近や島嶼近辺海など比較的浅い海において
672 は、既存の国際海洋観測網のデザインをそのまま適用するのが難しい。しかし
673 ながら、既存の観測網では捉えられないこのような海域での比較的小規模なス
674 ケールの変動を監視できるようになれば、海盆スケールの変動との相互関係の
675 理解が飛躍的に進むことが期待される。例えば、熱帯太平洋と熱帯インド洋を
676 結ぶ海洋大陸は、熱塩循環や海洋物質循環などで重要な役割を担う海域で、エ
677 ルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の相互関係の理解にも重要で
678 あることが知られている(Iskandar *et al.*, 2020)。さらに本海域は世界の生物
679 多様性中心として知られるコーラルトライアングル海域を含むが、人口の急増
680 及び経済の発展と共に海洋環境が激変している海域でもある。しかしこれら海
681 域での観測データが不足しており、今後の改善が期待される(Sprintall *et al.*,
682 2019)

683 従来の観測手法の強化だけでなく、例えば、バイオリビング(March *et*
684 *al.*, 2019; Harcourt *et al.*, 2019; 平井ら, 2021, 本特集)や、Wave グライ

685 ダー(自然を動力とする自律型海洋プラットフォームで、任意の海域へ移動し、
686 一定範囲内に留まることが可能な海洋観測測器)及びセイルドローン(同じく自
687 律型航行で、風力を推進力とし、太陽光発電でデータ取得を行い、衛星通信を
688 利用してリアルタイムで地上にデータを送る測器)などの展開(Fujita *et al.*,
689 2020; Nagano and Ando, 2020), 浅い海用に設定したプロファイリングフ
690 ード展開などによる観測の充実を検討すべきである。特に熱帯の多島サンゴ
691 礁浅海域は複雑な地形を示すことから、例えばエルニーニョ現象などによって
692 広範囲な水温上昇が予測されていても、その場の流動場によって海水温がより
693 上がりやすい・上がりにくい海域が数m~数百メートルの水平規模で局在する
694 ことによって、その場の生物はそれぞれ全く異なる環境に晒されることがしば
695 しば起こる。このような浅海域での面的な観測は、より注視すべき海域の同定
696 やより環境の変動耐性が高い海域の発見にも繋がり、生態系の保全や対策に企
697 てる上で重要な情報となるだろう。またブイなどによる多定点での連続的な環
698 境観測や自動採水器の組み合わせによって、例えば各場での海水温とともにp
699 Hやアルカリ度の短期的な変動を捉えることによって、より精密なサンゴの白
700 化予測や酸性化の監視が可能となることが期待される。さらに、空中や水中ド
701 ローン、ROVなどによる大量画像の取得およびAI技術による解析を用いるな
702 ど、マングローブやサンゴ礁海域の生物観測を同時に行うことによって、熱帯
703 生態系が持つ機能や高い多様性・生産性の維持機構の理解にも繋がることが期
704 待される。

705 海洋観測網の発展は、科学の発展に必要不可欠であるが、そのための
706 測器や船舶の運航には大変な費用がかかるため、その費用対効果を考え、持続
707 可能な観測網の設計を真剣に議論する必要もある。そのためには、観測システ
708 ム実験や観測システムシミュレーション実験を駆使し、最適な観測網の設計を
709 定量的に議論できるようになるのが望ましい。例えば、エルニーニョ現象の事
710 例毎の多様性に踏み込んだ予測を成功づける海域などが特定できれば、限られ
711 た観測リソースを対象海域に重点的に割り当てることが可能となる。一方で、
712 このような実験結果は、使用するモデルやデータ同化に関するパラメータに強
713 く依存することがあり、その結果の解釈には注意が必要である(Fujii *et al.*,
714 2019)。まずは、数値モデル間や、再解析データ間で、不確実性が大きい海域
715 や変数を評価し特定することが、海洋観測網の発展や数値モデルの改良を戦略
716 的に進めるために重要である。

717 主に日米協力で展開してきた熱帯太平洋の TAO/TRITON ブイの観測
718 網が、2014 年に一時崩壊の危機になった事件は、多くの教訓を残し、
719 TPOS2020 につながった(Ando *et al.*, 2017)。国際協力のもと、日本の限ら
720 れた観測リソースを巧みに活用して、どのように大きな成果を創出していくか
721 を考えていくことは今後益々重要になってくる。熱帯だけでなく、中緯度域へ
722 の影響を考慮して、日本の気候・海流を繋ぐ重要な海域であるフィリピンや台
723 湾の沖合で、新たに海洋観測を強化する計画もその1つである(Ando *et al.*,
724 2021；橋濱ら, 2021, 本特集)。

725

726

727 4. まとめ

728 近年、持続社会の発展のために海洋の重要性が益々認識されるように
729 なった(例えば、「国連海洋科学の10年」
730 (<https://oceanpolicy.jp/decade/>) など)。特に、熱帯の海は、エルニーニ
731 ョ現象などのように、世界の異常気象・気候不順の引き金となる現象があり、
732 水産業や漁獲に影響するだけでなく、農作物の収量変動や、マラリアなどの感
733 染症流行、山火事などにも大きく影響する。従って、物・化・生の統合的理解
734 とその予測が実現すれば、SDGsのうち、「14.海の豊さを守ろう」、「13.気
735 候変動に具体的な対策を」はもちろん、「2.食の安全」、「3.健康」に具体的
736 に貢献できるため、人類の持続可能な社会構造を支える科学的基盤になるであ
737 るう。

738 今後は、科学者自身の興味を駆動源に学術的知見を深めることだけで
739 なく、環境変動・変化に関する社会経済的な被害に関して、科学的知見に基づ
740 く対策・適応策を提言することを社会から一層求められるようになっていくで
741 あろう。そのため、興味を駆動源にした科学と、社会要請に対応するための科
742 学の両方の適度なバランスを、個人あるいは団体で考えていくことが、今後の
743 海洋学の発展を考える上で避けられない。今回のような将来構想の過程で、
744 個々の研究成果が、海洋学・環境学全体の発展としてどのような位置づけにあ
745 るのか、ひいてはどのように人類全体の利益に繋がりを考える機会が
746 増えれば、それ自体も大変意味があることのように思われる。

747

748 謝辞

749 図 1 は河宮未知生様からご提供頂きました。本稿の作成にあたり、以下の
750 方々（敬称略）から貴重な助言をいただきました：植木巖，江淵直人，岡英太
751 郎，桂将太，須賀利雄，永野憲，長谷川拓也。深く感謝申し上げます。

752 References

- 753 Ando, K., and Coauthors, 2017: Fifteen years progress of the TRITON
754 array in the Western Pacific and Eastern Indian Oceans. *J. Oceanogr.*,
755 **73**, 403–426, doi:10.1007/s10872-017-0414-4.
- 756 —, and Coauthors, 2021: *Half-Century of Scientific Advancements*
757 *Since the Cooperative Study of the Kuroshio and Adjacent Regions*
758 *(CSK) Programme - Need for a new Kuroshio Research*. Elsevier Ltd,
759 102513 pp. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102513>.
- 760 Anthony, K., and Coauthors, 2017: New interventions are needed to
761 save coral reefs. *Nat. Ecol. Evol.*, **1**, 1420–1422,
762 doi:10.1038/s41559-017-0313-5.
763 <http://www.nature.com/articles/s41559-017-0313-5>.
- 764 Ashok, K., and T. Yamagata, 2009: The El Niño with a difference.
765 *Nature*, **461**, 481–484, doi:10.1038/461481a.
- 766 —, S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007: El Niño
767 Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res. Ocean.*,
768 **112**, 1–27, doi:10.1029/2006JC003798.
- 769 Bakker, D. C. E., and Coauthors, 2016: A multi-decade record of high
770 quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas
771 (SOCAT). *Earth Syst. Sci. Data*, **8**, 383–413, doi:10.5194/essd-8-
772 383-2016. <https://essd.copernicus.org/articles/8/383/2016/>.
- 773 Barkley, H. C., and Coauthors, 2018: Repeat bleaching of a central
774 Pacific coral reef over the past six decades (1960–2016). *Commun.*
775 *Biol.*, **1**, 177, doi:10.1038/s42003-018-0183-7.
776 <http://www.nature.com/articles/s42003-018-0183-7>.
- 777 Beal, L. M., and Coauthors, 2020: A Road Map to IndOOS-2: Better
778 Observations of the Rapidly Warming Indian Ocean. *Bull. Am.*
779 *Meteorol. Soc.*, **101**, E1891–E1913, doi:10.1175/BAMS-D-19-

780 0209.1. <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-19->
781 0209.1.

782 Behrenfeld, M. J., K. Worthington, R. M. Sherrell, F. P. Chavez, P.
783 Strutton, M. McPhaden, and D. M. Shea, 2006: Controls on tropical
784 Pacific Ocean productivity revealed through nutrient stress
785 diagnostics. *Nature*, **442**, 1025–1028, doi:10.1038/nature05083.
786 <http://www.nature.com/articles/nature05083>.

787 —, and Coauthors, 2019: Global satellite-observed daily vertical
788 migrations of ocean animals. *Nature*, **576**, 257–261,
789 doi:10.1038/s41586-019-1796-9.
790 <http://www.nature.com/articles/s41586-019-1796-9>.

791 Bellwood, D. R., T. P. Hughes, C. Folke, and M. Nyström, 2004:
792 Confronting the coral reef crisis. *Nature*, **429**, 827–833,
793 doi:10.1038/nature02691.
794 <http://www.nature.com/articles/nature02691>.

795 Berthelot, H., M. Benavides, P. H. Moisan, O. Grosso, and S.
796 Bonnet, 2017: High-nitrogen fixation rates in the particulate and
797 dissolved pools in the Western Tropical Pacific (Solomon and
798 Bismarck Seas). *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 8414–8423,
799 doi:10.1002/2017GL073856.
800 <http://doi.wiley.com/10.1002/2017GL073856>.

801 Bertrand, A., Lengaigne, M., Takahashi, K., Avadí, A., Poulain, F. &
802 Harrod, C., 2020: *El Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on*
803 *fisheries and aquaculture*. FAO, <https://doi.org/10.4060/ca8348en>.

804 Bittig, H. C., and Coauthors, 2019: A BGC-Argo Guide: Planning,
805 Deployment, Data Handling and Usage. *Front. Mar. Sci.*, **6**,
806 doi:10.3389/fmars.2019.00502.
807 <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00502/full>.

808 Bonan, G. B., and S. C. Doney, 2018: Climate, ecosystems, and
809 planetary futures: The challenge to predict life in Earth system
810 models. *Science*, **359**, eaam8328, doi:10.1126/science.aam8328.
811 <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aam8328>.

- 812 Bonnet, S., I. C. Biegala, P. Dutrieux, L. O. Slemons, and D. G. Capone,
813 2009: Nitrogen fixation in the western equatorial Pacific: Rates,
814 diazotrophic cyanobacterial size class distribution, and
815 biogeochemical significance. *Global Biogeochem. Cycles*, **23**, GB3012,
816 doi:10.1029/2008GB003439.
817 <http://doi.wiley.com/10.1029/2008GB003439>.
- 818 Le Borgne, R., V. Allain, S. P. Griffiths, R. J. Matear, A. D. McKinnon,
819 and A. J. Richardson, 2011: Vulnerability of open ocean food webs in
820 the tropical Pacific to climate change. *Vulnerability of Tropical Pacific*
821 *Fisheries and Aquaculture to Climate Change*, 189–250.
- 822 Brainard, R. E., and Coauthors, 2018: Ecological Impacts of the
823 2015/16 El Niño in the Central Equatorial Pacific. *Bull. Am. Meteorol.*
824 *Soc.*, **99**, S21–S26, doi:10.1175/BAMS-D-17-0128.1.
825 [https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/99/1/bams-](https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/99/1/bams-explainingextremeevents2016.1.xml)
826 [explainingextremeevents2016.1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/99/1/bams-explainingextremeevents2016.1.xml).
- 827 Brett, A., and Coauthors, 2020: Ocean data need a sea change to help
828 navigate the warming world. *Nature*, **582**, 181–183,
829 doi:10.1038/d41586-020-01668-z.
830 <http://www.nature.com/articles/d41586-020-01668-z>.
- 831 Brewin, R. J. W., T. Hirata, N. J. Hardman-Mountford, S. J. Lavender, S.
832 Sathyendranath, and R. Barlow, 2012: The influence of the Indian
833 Ocean Dipole on interannual variations in phytoplankton size structure
834 as revealed by Earth Observation. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud.*
835 *Oceanogr.*, **77–80**, 117–127, doi:10.1016/j.dsr2.2012.04.009.
836 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967064512000574>.
- 837 Cai, W., A. Santoso, G. Wang, E. Weller, L. Wu, K. Ashok, Y. Masumoto,
838 and T. Yamagata, 2014: Increased frequency of extreme Indian ocean
839 dipole events due to greenhouse warming. *Nature*, **510**, 254–258,
840 doi:10.1038/nature13327.
- 841 —, and Coauthors, 2015: Increased frequency of extreme La Niña
842 events under greenhouse warming. *Nat. Clim. Chang.*, **5**, 132–137,
843 doi:10.1038/nclimate2492.

844 —, and Coauthors, 2019: Pantropical climate interactions. *Science*,
845 **363**, eaav4236, doi:10.1126/science.aav4236.
846 <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aav4236>.
847 —, K. Yang, L. Wu, G. Huang, A. Santoso, B. Ng, G. Wang, and T.
848 Yamagata, 2021: Opposite response of strong and moderate positive
849 Indian Ocean Dipole to global warming. *Nat. Clim. Chang.*, **11**, 27–32,
850 doi:10.1038/s41558-020-00943-1.
851 <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-020-00943-1>.
852 Capotondi, A., and Coauthors, 2015: Understanding ENSO diversity.
853 *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **96**, 921–938, doi:10.1175/BAMS-D-13-
854 00117.1.
855 [https://journals.ametsoc.org/bams/article/96/6/921/69514/Underst](https://journals.ametsoc.org/bams/article/96/6/921/69514/Understanding-ENSO-Diversity)
856 [anding-ENSO-Diversity](https://journals.ametsoc.org/bams/article/96/6/921/69514/Understanding-ENSO-Diversity).
857 —, and Coauthors, 2019: Observational Needs Supporting Marine
858 Ecosystems Modeling and Forecasting: From the Global Ocean to
859 Regional and Coastal Systems. *Front. Mar. Sci.*, **6**,
860 doi:10.3389/fmars.2019.00623.
861 <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00623/full>.
862 Chai, F., and Coauthors, 2020: Monitoring ocean biogeochemistry with
863 autonomous platforms. *Nat. Rev. Earth Environ.*, **1**, 315–326,
864 doi:10.1038/s43017-020-0053-y.
865 <http://www.nature.com/articles/s43017-020-0053-y>.
866 Chang, Y. L. K., Y. Miyazawa, T. Kodaira, and S. Behera, 2018:
867 Philippines–Taiwan Oscillations and its connection to tropical cyclone
868 frequency in the western North Pacific Ocean. *Sci. Rep.*, **8**, 17454,
869 doi:10.1038/s41598-018-35617-8.
870 <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-35617-8>.
871 Charles, C. D., 1997: Interaction Between the ENSO and the Asian
872 Monsoon in a Coral Record of Tropical Climate. *Science*, **277**, 925–
873 928, doi:10.1126/science.277.5328.925.
874 [https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.277.5328.](https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.277.5328.925)
875 [925](https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.277.5328.925).

876 Chikamoto, Y., and Coauthors, 2015: Skilful multi-year predictions of
877 tropical trans-basin climate variability. *Nat. Commun.*, **6**, 6869,
878 doi:10.1038/ncomms7869.
879 [http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-](http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84928390568&partnerID=tZOtx3y1)
880 [84928390568&partnerID=tZOtx3y1](http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84928390568&partnerID=tZOtx3y1).

881 Coale, K. H., and Coauthors, 1996: A massive phytoplankton bloom
882 induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the
883 equatorial Pacific Ocean. *Nature*, **383**, 495–501,
884 doi:10.1038/383495a0. <http://www.nature.com/articles/383495a0>.

885 Counillon, F., N. Keenlyside, T. Toniazzo, S. Koseki, T. Demissie, I.
886 Bethke, and Y. Wang, 2021: Relating model bias and prediction skill in
887 the equatorial Atlantic. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-020-05605-
888 8. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05605-8>.

889 Currie, J. C., M. Lengaigne, J. Vialard, D. M. Kaplan, O. Aumont, S. W.
890 A. Naqvi, and O. Maury, 2013: Indian ocean dipole and El
891 Niño/Southern Oscillation impacts on regional chlorophyll anomalies in
892 the Indian Ocean. *Biogeosciences*, **10**, 6677–6698, doi:10.5194/bg-
893 10-6677-2013.

894 Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2013: Predictability of the
895 Ningaloo Niño/Niña. *Sci. Rep.*, **3**, 2892, doi:10.1038/srep02892.

896 —, —, and —, 2015a: An interdecadal regime shift in rainfall
897 predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s. *J.*
898 *Geophys. Res. Ocean.*, **120**, 1388–1396,
899 doi:10.1002/2014JC010562.

900 —, C. Yuan, S. K. Behera, and T. Yamagata, 2015b: Predictability of
901 the California Niño/Niña. *J. Clim.*, **28**, 7237–7249, doi:10.1175/JCLI-
902 D-15-0112.1.

903 —, S. K. Behera, and T. Yamagata, 2016: Improved seasonal
904 prediction using the SINTEX-F2 coupled model. *J. Adv. Model. Earth*
905 *Syst.*, **8**, 1847–1867, doi:10.1002/2016MS000744.

906 —, —, and —, 2019: Merits of a 108-member ensemble system in
907 ENSO and IOD predictions. *J. Clim.*, **32**, 957–972, doi:10.1175/JCLI-
908 D-18-0193.1.

909 —, S. K. Behera, and T. Yamagata, 2020a: Wintertime impacts of the
910 2019 super IOD on East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **47**,
911 e2020GL089456, doi:10.1029/2020GL089456.
912 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL089456>
913 .

914 —, S. K. Behera, and T. Yamagata, 2020b: Predictability of the Super
915 IOD Event in 2019 and Its Link With El Niño Modoki. *Geophys. Res.*
916 *Lett.*, **47**, e2019GL086713, doi:10.1029/2019GL086713.

917 Doi, T., M. Nonaka, and S. Behera, 2020c: Skill Assessment of
918 Seasonal-to-Interannual Prediction of Sea Level Anomaly in the North
919 Pacific Based on the SINTEX-F Climate Model. *Front. Mar. Sci.*, **7**,
920 doi:10.3389/fmars.2020.546587.

921 Doi, T., G. Sakurai, and T. Iizumi, 2020d: Seasonal Predictability of Four
922 Major Crop Yields Worldwide by a Hybrid System of Dynamical
923 Climate Prediction and Eco-Physiological Crop-Growth Simulation.
924 *Front. Sustain. Food Syst.*, **4**, doi:10.3389/fsufs.2020.00084.

925 Doney, S., W. Balch, V. Fabry, and R. Feely, 2009: Ocean Acidification:
926 A Critical Emerging Problem for the Ocean Sciences. *Oceanography*,
927 **22**, 16–25, doi:10.5670/oceanog.2009.93.
928 [https://tos.org/oceanography/article/ocean-acidification-a-critical-
929 emerging-problem-for-the-ocean-sciences](https://tos.org/oceanography/article/ocean-acidification-a-critical-emerging-problem-for-the-ocean-sciences).

930 Dong, L., and M. J. McPhaden, 2018: Unusually warm Indian Ocean sea
931 surface temperatures help to arrest development of El Niño in 2014.
932 *Sci. Rep.*, **8**, 2249, doi:10.1038/s41598-018-20294-4.
933 <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-20294-4>.

934 Dreux Chappell, P., J. Vedmati, K. E. Selph, H. A. Cyr, B. D. Jenkins, M.
935 R. Landry, and J. W. Moffett, 2016: Preferential depletion of zinc
936 within Costa Rica upwelling dome creates conditions for zinc co-
937 limitation of primary production. *J. Plankton Res.*, **38**, 244–255,

938 doi:10.1093/plankt/fbw018.
939 [https://academic.oup.com/plankt/article-](https://academic.oup.com/plankt/article-lookup/doi/10.1093/plankt/fbw018)
940 [lookup/doi/10.1093/plankt/fbw018](https://academic.oup.com/plankt/article-lookup/doi/10.1093/plankt/fbw018).
941 Endo, S., and T. Tozuka, 2016: Two flavors of the Indian Ocean Dipole.
942 *Clim. Dyn.*, **46**, 3371–3385, doi:10.1007/s00382-015-2773-0.
943 Eyre, B. D., T. Cyronak, P. Drupp, E. H. De Carlo, J. P. Sachs, and A. J.
944 Andersson, 2018: Coral reefs will transition to net dissolving before
945 end of century. *Science*, **359**, 908–911,
946 doi:10.1126/science.aao1118.
947 <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aao1118>.
948 Fan, L., Q. Liu, C. Wang, and F. Guo, 2017: Indian Ocean Dipole Modes
949 Associated with Different Types of ENSO Development. *J. Clim.*, **30**,
950 2233–2249, doi:10.1175/jcli-d-16-0426.1.
951 Feely, R. A., R. Wanninkhof, C. Goyet, D. E. Archer, and T. Takahashi,
952 1997: Variability of CO₂ distributions and sea-air fluxes in the central
953 and eastern equatorial Pacific during the 199–1994 El Niño. *Deep*
954 *Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, **44**, 1851–1867,
955 doi:10.1016/S0967-0645(97)00061-1.
956 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967064597000611>.
957 Feng, M., M. J. McPhaden, S. P. Xie, and J. Hafner, 2013: La Niña
958 forces unprecedented Leeuwin Current warming in 2011. *Sci. Rep.*, **3**,
959 1277, doi:10.1038/srep01277.
960 Fennel, K., and Coauthors, 2019: Advancing Marine Biogeochemical
961 and Ecosystem Reanalyses and Forecasts as Tools for Monitoring
962 and Managing Ecosystem Health. *Front. Mar. Sci.*, **6**,
963 doi:10.3389/fmars.2019.00089.
964 <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00089/full>.
965 Foltz, G. R., and Coauthors, 2019: The Tropical Atlantic Observing
966 System. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00206.
967 Friedlingstein, P., and Coauthors, 2019: Global Carbon Budget 2019.
968 *Earth Syst. Sci. Data*, **11**, 1783–1838, doi:10.5194/essd-11-1783-
969 2019. <https://essd.copernicus.org/articles/11/1783/2019/>.

970 Fujii, Y., and Coauthors, 2019: Observing System Evaluation Based on
971 Ocean Data Assimilation and Prediction Systems: On-Going
972 Challenges and a Future Vision for Designing and Supporting Ocean
973 Observational Networks. *Front. Mar. Sci.*, **6**,
974 doi:10.3389/fmars.2019.00417.
975 <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00417/full>.
976 Fujita, M., T. Fukuda, I. Ueki, Q. Moteki, T. Ushiyama, and K. Yoneyama,
977 2020: Experimental Observations of Precipitable Water Vapor over
978 the Open Ocean Collected by Autonomous Surface Vehicles for Real-
979 Time Monitoring Applications. *SOLA*, **16A**, 19–24,
980 doi:10.2151/sola.16A-004.
981 https://www.jstage.jst.go.jp/article/sola/16A/Special_Edition/16A_16
982 [A-004/_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sola/16A/Special_Edition/16A_16).
983 Gaubert, B., and Coauthors, 2016: Toward a chemical reanalysis in a
984 coupled chemistry-climate model: An evaluation of MOPITT CO
985 assimilation and its impact on tropospheric composition. *J. Geophys.*
986 *Res. Atmos.*, **121**, 7310–7343, doi:10.1002/2016JD024863.
987 <http://doi.wiley.com/10.1002/2016JD024863>.
988 Gehlen, M., and Coauthors, 2015: Building the capacity for forecasting
989 marine biogeochemistry and ecosystems: recent advances and future
990 developments. *J. Oper. Oceanogr.*, **8**, s168–s187,
991 doi:10.1080/1755876X.2015.1022350.
992 <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1755876X.2015.102>
993 [2350](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1755876X.2015.102).
994 Gierach, M. M., T. Lee, D. Turk, and M. J. McPhaden, 2012: Biological
995 response to the 1997-98 and 2009-10 El Niño events in the
996 equatorial Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L10602,
997 doi:10.1029/2012GL051103.
998 <http://doi.wiley.com/10.1029/2012GL051103>.
999 Gilmour, J. P., L. D. Smith, A. J. Heyward, A. H. Baird, and M. S.
1000 Pratchett, 2013: Recovery of an Isolated Coral Reef System
1001 Following Severe Disturbance. *Science*, **340**, 69–71,

1002 doi:10.1126/science.1232310.
1003 <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1232310>.
1004 Gomes, H. do R., S. DeRada, J. I. Goes, and F. Chai, 2016: Examining
1005 features of enhanced phytoplankton biomass in the Bay of Bengal
1006 using a coupled physical-biological model. *J. Geophys. Res. Ocean.*,
1007 **121**, 5112–5133, doi:10.1002/2015JC011508.
1008 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015JC011508>.
1009 Good, S. A., M. J. Martin, and N. A. Rayner, 2013: EN4: Quality
1010 controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly
1011 objective analyses with uncertainty estimates. *J. Geophys. Res.*
1012 *Ocean.*, **118**, 6704–6716, doi:10.1002/2013JC009067.
1013 Hackert, E., R. M. Kovach, A. Molod, G. Vernieres, A. Borovikov, J.
1014 Marshak, and Y. Chang, 2020: Satellite Sea Surface Salinity
1015 Observations Impact on El Niño/Southern Oscillation Predictions:
1016 Case Studies From the NASA GEOS Seasonal Forecast System. *J.*
1017 *Geophys. Res. Ocean.*, **125**, doi:10.1029/2019JC015788.
1018 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JC015788>.
1019 Hajima, T., and Coauthors, 2014: Modeling in Earth system science up
1020 to and beyond IPCC AR5. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**, 29,
1021 doi:10.1186/s40645-014-0029-y.
1022 <http://www.progearthplanetosci.com/content/1/1/29>.
1023 Ham, Y.-G., Y.-S. Joo, and J.-Y. Park, 2021: Mechanism of skillful
1024 seasonal surface chlorophyll prediction over the southern Pacific
1025 using a global earth system model. *Clim. Dyn.*, **56**, 45–64,
1026 doi:10.1007/s00382-020-05403-2.
1027 <http://link.springer.com/10.1007/s00382-020-05403-2>.
1028 Harcourt, R., and Coauthors, 2019: Animal-Borne Telemetry: An
1029 Integral Component of the Ocean Observing Toolkit. *Front. Mar. Sci.*,
1030 **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00326.
1031 <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00326/full>.
1032 Harris, S., and C. Lucas, 2019: *Understanding the variability of*
1033 *Australian fire weather between 1973 and 2017*. 1–33 pp.

- 1034 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
1035 容, 西岡純, 林田博士, 平井惇也 (2021): 海洋学の 10 年展望 2021:中緯
1036 度. 海の研究, 投稿中.
- 1037 Hashizume, M., T. Terao, and N. Minakawa, 2009: The Indian Ocean
1038 Dipole and malaria risk in the highlands of western Kenya. *Proc. Natl.*
1039 *Acad. Sci. U. S. A.*, **106**, 1857–1862,
1040 doi:10.1073/pnas.0806544106.
- 1041 —, L. F. Chaves, and N. Minakawa, 2012: Indian Ocean Dipole drives
1042 malaria resurgence in East African highlands. *Sci. Rep.*, **2**, 269,
1043 doi:10.1038/srep00269.
- 1044 Hayashi, M., and M. Watanabe, 2017: ENSO complexity induced by
1045 state dependence of Westerly wind events. *J. Clim.*, **30**, 3401–3420,
1046 doi:10.1175/JCLI-D-16-0406.1.
- 1047 Hendon, H. H., E. Lim, G. Wang, O. Alves, and D. Hudson, 2009:
1048 Prospects for predicting two flavors of El Niño. *Geophys. Res. Lett.*,
1049 **36**, L19713 , doi:10.1029/2009GL040100.
- 1050 Hermes, J. C., and Coauthors, 2019: A Sustained Ocean Observing
1051 System in the Indian Ocean for Climate Related Scientific Knowledge
1052 and Societal Needs. *Front. Mar. Sci.*, **6**,
1053 doi:10.3389/fmars.2019.00355.
- 1054 平井惇也, 宮正樹, 藤木徹一, 吉田聡, 乙坂重嘉, 帰山秀樹, 加古真一郎, 片岡
1055 智哉, 松岡大祐, 日高弥子, 杉山大祐, 小嶋不二夫 (2021): 海洋学の 10 年
1056 展望:新たな手法と問題. 海の研究, 投稿中.
- 1057 Hoegh-Guldberg, and Coauthors, 2009: *The Coral Triangle and Climate*
1058 *Change: Ecosystems, People and Societies at Risk*. 276 pp.
- 1059 Horii, T., I. Ueki, and K. Ando, 2018: Coastal upwelling events along the
1060 southern coast of Java during the 2008 positive Indian Ocean Dipole.
1061 *J. Oceanogr.*, **74**, 499–508, doi:10.1007/s10872-018-0475-z.
1062 <http://link.springer.com/10.1007/s10872-018-0475-z>.
- 1063 Hsiung, K.-M., S. Kimura, Y.-S. Han, A. Takeshige, and Y. Iizuka, 2018:
1064 Effect of ENSO events on larval and juvenile duration and transport
1065 of Japanese eel (*Anguilla japonica*). *PLoS One*, **13**, e0195544,

1066 doi:10.1371/journal.pone.0195544.
1067 <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0195544>.
1068 Hu, S., and A. Fedorov, 2016: Exceptionally strong easterly wind burst
1069 stalling El Niño of 2014. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **113**, 2005–2010.
1070 Hughes, T. P., 2003: Climate Change, Human Impacts, and the
1071 Resilience of Coral Reefs. *Science*, **301**, 929–933,
1072 doi:10.1126/science.1085046.
1073 <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1085046>.
1074 Hughes, T. P., and Coauthors, 2018: Spatial and temporal patterns of
1075 mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, **359**, 80–83,
1076 doi:10.1126/science.aan8048.
1077 <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aan8048>.
1078 Iizumi, T., H. Sakuma, M. Yokozawa, J. J. Luo, A. J. Challinor, M. E.
1079 Brown, G. Sakurai, and T. Yamagata, 2013: Prediction of seasonal
1080 climate-induced variations in global food production. *Nat. Clim.*
1081 *Chang.*, **3**, 904–908, doi:10.1038/nclimate1945.
1082 <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1945>.
1083 —, J. J. Luo, A. J. Challinor, G. Sakurai, M. Yokozawa, H. Sakuma, M.
1084 E. Brown, and T. Yamagata, 2014: Impacts of El Niño Southern
1085 Oscillation on the global yields of major crops. *Nat. Commun.*, **5**,
1086 3712, doi:10.1038/ncomms4712.
1087 <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms4712>.
1088 Ikeda, T., S. Behera, Y. Morioka, N. Minakawa, M. Hashizume, A.
1089 Tsuzuki, R. Maharaj, and P. Kruger, 2017: Seasonally lagged effects
1090 of climatic factors on malaria incidence in South Africa. *Sci. Rep.*, **7**,
1091 2458.
1092 Ilyina, T., and Coauthors, 2021: Predictable Variations of the Carbon
1093 Sinks and Atmospheric CO₂ Growth in a Multi-Model Framework.
1094 *Geophys. Res. Lett.*, **48**, doi:10.1029/2020GL090695.
1095 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL090695>.
1096 Imada, Y., and M. Kimoto, 2012: Parameterization of Tropical Instability
1097 Waves and Examination of Their Impact on ENSO Characteristics. *J.*

1098 *Clim.*, **25**, 4568–4581, doi:10.1175/JCLI-D-11-00233.1.
1099 <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-11-00233.1>.
1100 —, H. Tatebe, M. Watanabe, M. Ishii, and M. Kimoto, 2016: South
1101 Pacific influence on the termination of El Niño in 2014. *Sci. Rep.*, **6**,
1102 30341, doi:10.1038/srep30341.
1103 <http://dx.doi.org/10.1038/srep30341>.
1104 International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), Synergy
1105 between Ocean Colour and Biogeochemical/Ecosystem Models.
1106 *Reports Int. Ocean. Coord. Gr.*, **19**,
1107 doi:<http://dx.doi.org/10.25607/OBP-711>.
1108 IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.*
1109 *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of*
1110 *the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D.
1111 Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.
1112 Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press,
1113 Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
1114 Ishii, M., and Coauthors, 2014: Air–sea CO₂ flux in the Pacific Ocean
1115 for the period 1990–2009. *Biogeosciences*, **11**, 709–734,
1116 doi:10.5194/bg-11-709-2014.
1117 <https://bg.copernicus.org/articles/11/709/2014/>.
1118 Ishii, M., and Coauthors, 2020: Ocean Acidification From Below in the
1119 Tropical Pacific. *Global Biogeochem. Cycles*, **34**,
1120 doi:10.1029/2019GB006368.
1121 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019GB006368>.
1122 Iskandar, I., W. Mardiansyah, D. O. Lestari, and Y. Masumoto, 2020:
1123 What did determine the warming trend in the Indonesian sea? *Prog.*
1124 *Earth Planet. Sci.*, **7**, doi:10.1186/s40645-020-00334-2.
1125 Iskandar, I., S. A. Rao, and T. Tozuka, 2009: Chlorophyll- a bloom along
1126 the southern coasts of Java and Sumatra during 2006. *Int. J. Remote*
1127 *Sens.*, **30**, 663–671, doi:10.1080/01431160802372309.
1128 [https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0143116080237230](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431160802372309)
1129 9.

1130 岩本洋子, 相木秀則, 磯口治, 大林由美子, 近藤文義, 近藤能子, 西岡純
1131 (2021):海洋学の10年展望2021: 大気海洋境界. 海の研究, 投稿中.
1132 Jacox, M. G., and Coauthors, 2020: Seasonal-to-interannual prediction
1133 of North American coastal marine ecosystems: Forecast methods,
1134 mechanisms of predictability, and priority developments. *Prog.*
1135 *Oceanogr.*, **183**, 102307, doi:10.1016/j.pocean.2020.102307.
1136 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S007966112030046X>.
1137 Jochum, M., S. Yeager, K. Lindsay, K. Moore, and R. Murtugudde,
1138 2010: Quantification of the Feedback between Phytoplankton and
1139 ENSO in the Community Climate System Model. *J. Clim.*, **23**, 2916–
1140 2925, doi:10.1175/2010JCLI3254.1.
1141 <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2010JCLI3254.1>.
1142 Kang, X., R. H. Zhang, C. Gao, and J. Zhu, 2017: An improved ENSO
1143 simulation by representing chlorophyll-induced climate feedback in
1144 the NCAR Community Earth System Model. *Sci. Rep.*, **7**, 17123,
1145 doi:10.1038/s41598-017-17390-2.
1146 <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-17390-2>.
1147 Kataoka, T., T. Tozuka, S. K. Behera, and T. Yamagata, 2014: On the
1148 Ningaloo Niño/Niña. *Clim. Dyn.*, **43**, 1463–1482,
1149 doi:10.1007/s00382-013-1961-z.
1150 Katsura, S., and J. Sprintall, 2020: Seasonality and Formation of Barrier
1151 Layers and Associated Temperature Inversions in the Eastern
1152 Tropical North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **50**, 791–808,
1153 doi:10.1175/JPO-D-19-0194.1.
1154 [https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/50/3/jpo-d-19-](https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/50/3/jpo-d-19-0194.1.xml)
1155 [0194.1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/50/3/jpo-d-19-0194.1.xml).
1156 Kawamiya, M., T. Hajima, K. Tachiiri, S. Watanabe, and T. Yokohata,
1157 2020: Two decades of Earth system modeling with an emphasis on
1158 Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC). *Prog. Earth*
1159 *Planet. Sci.*, **7**, 64, doi:10.1186/s40645-020-00369-5.
1160 [https://progearthplanetsci.springeropen.com/articles/10.1186/s406](https://progearthplanetsci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-020-00369-5)
1161 [45-020-00369-5](https://progearthplanetsci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-020-00369-5).

1162 Kessler, W. S., S. E. Wijffels, S. Cravatte, and N. Smith, 2019: TPOS
1163 2020 Second Report. 265.

1164 木田新一郎, 栗原晴子, 大林由美子, 川合美千代, 近藤能子, 西岡純 (2021):海
1165 洋学の 10 年展望 2021:沿岸域. 海の研究, 投稿中.

1166 Kido, S., T. Tozuka, and W. Han, 2019: Experimental Assessments on
1167 Impacts of Salinity Anomalies on the Positive Indian Ocean Dipole. *J.*
1168 *Geophys. Res. Ocean.*, **124**, 9462–9486,
1169 doi:10.1029/2019JC015479.
1170 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JC015479>.

1171 Kim, Y., and Coauthors, 2019: Malaria predictions based on seasonal
1172 climate forecasts in South Africa: A time series distributed lag
1173 nonlinear model. *Sci. Rep.*, **9**, 17882, 10.1038/s41598-019-53838-
1174 3.

1175 Kirtman, B., 2015: Current status of ENSO prediction and predictability.
1176 *US Clivar Var.*, **13**, 10–15, doi:10.1175/2010BAMS2962.1.U.

1177 Kohyama, T., D. L. Hartmann, and D. S. Battisti, 2017: La Niña-like
1178 mean-state response to global warming and potential oceanic roles. *J.*
1179 *Clim.*, **30**, 4207–4225, doi:10.1175/JCLI-D-16-0441.1.

1180 Kondo, Y., and J. W. Moffett, 2015: Iron redox cycling and subsurface
1181 offshore transport in the eastern tropical South Pacific oxygen
1182 minimum zone. *Mar. Chem.*, **168**, 95–103,
1183 doi:10.1016/j.marchem.2014.11.007.
1184 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304420314002217>.

1185 Kosaka, Y., and S.-P. Xie, 2013: Recent global-warming hiatus tied to
1186 equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, **501**, 403–407,
1187 doi:10.1038/nature12534.
1188 <http://www.nature.com/articles/nature12534>.

1189 Lavín, M. F., P. C. Fiedler, J. A. Amador, L. T. Ballance, J. Färber-
1190 Lorda, and A. M. Mestas-Nuñez, 2006: A review of eastern tropical
1191 Pacific oceanography: Summary. *Prog. Oceanogr.*, **69**, 391–398,
1192 doi:10.1016/j.pocean.2006.03.005.
1193 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079661106000395>.

- 1194 Lin, I., and Coauthors, 2020: ENSO and Tropical Cyclones. 377–408
1195 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119548164.ch17>.
- 1196 Long, M. C., C. Deutsch, and T. Ito, 2016: Finding forced trends in
1197 oceanic oxygen. *Global Biogeochem. Cycles*, **30**, 381–397,
1198 doi:10.1002/2015GB005310.
1199 <http://doi.wiley.com/10.1002/2015GB005310>.
- 1200 Lovelock, C. E., I. C. Feller, R. Reef, S. Hickey, and M. C. Ball, 2017:
1201 Mangrove dieback during fluctuating sea levels. *Sci. Rep.*, **7**, 1680,
1202 doi:10.1038/s41598-017-01927-6.
1203 <http://www.nature.com/articles/s41598-017-01927-6>.
- 1204 Maes, C., and S. Belamari, 2011: On the Impact of Salinity Barrier
1205 Layer on the Pacific Ocean Mean State and ENSO. *SOLA*, **7**, 97–100,
1206 doi:10.2151/sola.2011-025.
1207 <http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/sola/2011-025?from=CrossRef>.
- 1208 March, D., L. Boehme, J. Tintoré, P. J. Vélez-Belchi, and B. J. Godley,
1209 2019: Towards the integration of animal-borne instruments into
1210 global ocean observing systems. *Glob. Chang. Biol.*, gcb.14902,
1211 doi:10.1111/gcb.14902.
1212 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.14902>.
- 1213 Marsac, F., 2017: The Seychelles Tuna Fishery and Climate Change.
1214 *Climate Change Impacts on Fisheries and Aquaculture*, John Wiley &
1215 Sons, Ltd, Chichester, UK, 523–568
1216 <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119154051.ch16>.
- 1217 Masuda, S., J. Philip Matthews, Y. Ishikawa, T. Mochizuki, Y. Tanaka,
1218 and T. Awaji, 2015: A new Approach to El Niño Prediction beyond the
1219 Spring Season. *Sci. Rep.*, **5**, 16782, doi:10.1038/srep16782.
1220 <http://www.nature.com/articles/srep16782>.
- 1221 Matsumoto, K., and K. Furuya, 2011: Variations in phytoplankton
1222 dynamics and primary production associated with ENSO cycle in the
1223 western and central equatorial Pacific during 1994–2003. *J. Geophys.*
1224 *Res.*, **116**, C12042, doi:10.1029/2010JC006845.
1225 <http://doi.wiley.com/10.1029/2010JC006845>.

- 1226 —, —, and T. Kawano, 2004: Association of picophytoplankton
1227 distribution with ENSO events in the equatorial Pacific between 145°E
1228 and 160°W. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, **51**, 1851–
1229 1871, doi:10.1016/j.dsr.2004.07.015.
1230 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967063704001438>.
- 1231 Meehl, G. A., A. Hu, and H. Teng, 2016: Initialized decadal prediction
1232 for transition to positive phase of the Interdecadal Pacific Oscillation.
1233 *Nat. Commun.*, **7**, 11718, doi:10.1038/ncomms11718.
1234 <http://www.nature.com/articles/ncomms11718>.
- 1235 Messié, M., and F. P. Chavez, 2013: Physical-biological synchrony in
1236 the global ocean associated with recent variability in the central and
1237 western equatorial Pacific. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **118**, 3782–
1238 3794, doi:10.1002/jgrc.20278.
1239 <http://doi.wiley.com/10.1002/jgrc.20278>.
- 1240 Midorikawa, T., and Coauthors, 2010: Decreasing pH trend estimated
1241 from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North
1242 Pacific. *Tellus B Chem. Phys. Meteorol.*, **62**, 649–659,
1243 doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00474.x.
1244 [https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1600-](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1600-0889.2010.00474.x)
1245 [0889.2010.00474.x](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1600-0889.2010.00474.x).
- 1246 Miyakawa, T., H. Yashiro, T. Suzuki, H. Tatebe, and M. Satoh, 2017: A
1247 Madden-Julian Oscillation event remotely accelerates ocean upwelling
1248 to abruptly terminate the 1997/1998 super El Niño. *Geophys. Res.*
1249 *Lett.*, **44**, 9489–9495, doi:10.1002/2017GL074683.
1250 <http://doi.wiley.com/10.1002/2017GL074683>.
- 1251 Miyama, T., and T. Hasegawa, 2014: Impact of Sea Surface
1252 Temperature on Westerlies over the Western Pacific Warm Pool:
1253 Case Study of an Event in 2001/02. *SOLA*, **10**, 5–9,
1254 doi:10.2151/sola.2014-002.
1255 https://www.jstage.jst.go.jp/article/sola/10/0/10_2014-002/_article.
- 1256 Moffett, J. W., T. J. Goepfert, and S. W. A. Naqvi, 2007: Reduced iron
1257 associated with secondary nitrite maxima in the Arabian Sea. *Deep*

1258 *Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, **54**, 1341–1349,
1259 doi:10.1016/j.dsr.2007.04.004.
1260 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967063707000969>.
1261 Nagano, A., and K. Ando, 2020: Saildrone-observed atmospheric
1262 boundary layer response to winter mesoscale warm spot along the
1263 Kuroshio south of Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, 43,
1264 doi:10.1186/s40645-020-00358-8.
1265 [https://progearthplanetsci.springeropen.com/articles/10.1186/s406](https://progearthplanetsci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-020-00358-8)
1266 [45-020-00358-8](https://progearthplanetsci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-020-00358-8).
1267 —, T. Hasegawa, I. Ueki, and K. Ando, 2017: El Niño–Southern
1268 Oscillation-time scale covariation of sea surface salinity and
1269 freshwater flux in the western tropical and northern subtropical
1270 Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 6895–6903,
1271 doi:10.1002/2017GL073573.
1272 Le Nohaïc, M., C. L. Ross, C. E. Cornwall, S. Comeau, R. Lowe, M. T.
1273 McCulloch, and V. Schoepf, 2017: Marine heatwave causes
1274 unprecedented regional mass bleaching of thermally resistant corals
1275 in northwestern Australia. *Sci. Rep.*, **7**, 14999, doi:10.1038/s41598-
1276 017-14794-y. [http://www.nature.com/articles/s41598-017-14794-](http://www.nature.com/articles/s41598-017-14794-y)
1277 [y](http://www.nature.com/articles/s41598-017-14794-y).
1278 Oettli, P., Y. Morioka, and T. Yamagata, 2016: A Regional Climate Mode
1279 Discovered in the North Atlantic: Dakar Niño/Niña. *Sci. Rep.*, **6**,
1280 18782, doi:10.1038/srep18782.
1281 <http://www.nature.com/articles/srep18782>.
1282 Oettli, P., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2018: Climate Based
1283 Predictability of Oil Palm Tree Yield in Malaysia. *Sci. Rep.*, **8**, 2271.
1284 doi: 10.1038/s41598-018-20298-0.
1285 岡ら, 2013: 海洋学の 10年展望(I)* —日本海洋学会将来構想委員会物理サブ
1286 グループの議論から—。 *海の研究*, **22**, 191–218,
1287 doi:10.5928/kaiyou.22.6_191.
1288 [https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaiyou/22/6/22_191/_article/-](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaiyou/22/6/22_191/_article/-char/ja/)
1289 [char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaiyou/22/6/22_191/_article/-char/ja/).

1290 —, and Coauthors, 2018: Fifty years of the 137°E repeat
1291 hydrographic section in the western North Pacific Ocean. *J.*
1292 *Oceanogr.*, **74**, 115–145, doi:10.1007/s10872-017-0461-x.
1293 <http://link.springer.com/10.1007/s10872-017-0461-x>.
1294 Oliver, E. C. J., and Coauthors, 2018: Longer and more frequent marine
1295 heatwaves over the past century. *Nat. Commun.*, **9**, 1324,
1296 doi:10.1038/s41467-018-03732-9.
1297 <http://www.nature.com/articles/s41467-018-03732-9>.
1298 Ono, H., and Coauthors, 2019: Acceleration of Ocean Acidification in
1299 the Western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 13161–13169,
1300 doi:10.1029/2019GL085121.
1301 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019GL085121>.
1302 Park, J.-Y., C. A. Stock, J. P. Dunne, X. Yang, and A. Rosati, 2019:
1303 Seasonal to multiannual marine ecosystem prediction with a global
1304 Earth system model. *Science*, **365**, 284–288,
1305 doi:10.1126/science.aav6634.
1306 <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aav6634>.
1307 Park, J. Y., J. P. Dunne, and C. A. Stock, 2018: Ocean Chlorophyll as a
1308 Precursor of ENSO: An Earth System Modeling Study. *Geophys. Res.*
1309 *Lett.*, **45**, 1939–1947, doi:10.1002/2017GL076077.
1310 Pennington, J. T., K. L. Mahoney, V. S. Kuwahara, D. D. Kolber, R.
1311 Calienes, and F. P. Chavez, 2006: Primary production in the eastern
1312 tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.*, **69**, 285–317,
1313 doi:10.1016/j.pocean.2006.03.012.
1314 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079661106000358>.
1315 Philander, S., 1989: *El Nino, La Nina, and the Southern Oscillation*. S.G.
1316 Philander, Ed. 293 pp.
1317 Pujiana, K., and M. J. McPhaden, 2018: Ocean Surface Layer Response
1318 to Convectively Coupled Kelvin Waves in the Eastern Equatorial Indian
1319 Ocean. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **123**, 5727–5741,
1320 doi:10.1029/2018JC013858.
1321 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018JC013858>.

1322 Racault, M.-F., S. Sathyendranath, R. J. W. Brewin, D. E. Raitsos, T.
1323 Jackson, and T. Platt, 2017: Impact of El Niño Variability on Oceanic
1324 Phytoplankton. *Front. Mar. Sci.*, **4**, 1–15,
1325 doi:10.3389/fmars.2017.00133.
1326 <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2017.00133/full>.
1327 Rafter, P. A., D. M. Sigman, and K. R. M. Mackey, 2017: Recycled iron
1328 fuels new production in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Nat.*
1329 *Comm.*, **8**, 1100, doi:10.1038/s41467-017-01219-7.
1330 <http://www.nature.com/articles/s41467-017-01219-7>.
1331 Riascos, J. M., J. R. Cantera, and J. F. Blanco-Libreros, 2018: Growth
1332 and mortality of mangrove seedlings in the wettest neotropical
1333 mangrove forests during ENSO: Implications for vulnerability to
1334 climate change. *Aquat. Bot.*, **147**, 34–42,
1335 doi:10.1016/j.aquabot.2018.03.002.
1336 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304377017303303>.
1337 Saji, N. H., and T. Yamagata, 2003: Possible impacts of Indian Ocean
1338 Dipole mode events on global climate. *Clim. Res.*, **25**, 151–169,
1339 doi:10.3354/cr025151.
1340 —, B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata, 1999: A
1341 dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, **401**, 360–363,
1342 doi:10.1038/43854.
1343 Salon, S., G. Cossarini, G. Bolzon, L. Feudale, P. Lazzari, A. Teruzzi, C.
1344 Solidoro, and A. Crise, 2019: Novel metrics based on Biogeochemical
1345 Argo data to improve the model uncertainty evaluation of the CMEMS
1346 Mediterranean marine ecosystem forecasts. *Ocean Sci.*, **15**, 997–
1347 1022, doi:10.5194/os-15-997-2019.
1348 <https://os.copernicus.org/articles/15/997/2019/>.
1349 Schmidtko, S., L. Stramma, and M. Visbeck, 2017: Decline in global
1350 oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, **542**,
1351 335–339, doi:10.1038/nature21399.
1352 <http://www.nature.com/articles/nature21399>.

- 1353 Séférian, R., and Coauthors, 2020: Tracking Improvement in Simulated
1354 Marine Biogeochemistry Between CMIP5 and CMIP6. *Curr. Clim.*
1355 *Chang. Reports*, doi:10.1007/s40641-020-00160-0.
1356 <http://link.springer.com/10.1007/s40641-020-00160-0>.
- 1357 Sen Gupta, A., and Coauthors, 2020: Drivers and impacts of the most
1358 extreme marine heatwave events. *Sci. Rep.*, **10**, 19359,
1359 doi:10.1038/s41598-020-75445-3.
1360 <http://www.nature.com/articles/s41598-020-75445-3>.
- 1361 Seo, H., 2017: Distinct Influence of Air–Sea Interactions Mediated by
1362 Mesoscale Sea Surface Temperature and Surface Current in the
1363 Arabian Sea. *J. Clim.*, **30**, 8061–8080, doi:10.1175/JCLI-D-16-
1364 0834.1. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-16-0834.1>.
- 1365 Shi, W., and M. Wang, 2021: A biological Indian Ocean Dipole event in
1366 2019. *Sci. Rep.*, **11**, 2452, doi:10.1038/s41598-021-81410-5.
1367 <http://www.nature.com/articles/s41598-021-81410-5>.
- 1368 Shiozaki, T., T. Kodama, S. Kitajima, M. Sato, and K. Furuya, 2013:
1369 Advective transport of diazotrophs and importance of their nitrogen
1370 fixation on new and primary production in the western Pacific warm
1371 pool. *Limnol. Oceanogr.*, **58**, 49–60, doi:10.4319/lo.2013.58.1.0049.
1372 <http://doi.wiley.com/10.4319/lo.2013.58.1.0049>.
- 1373 Siswanto, E., T. Horii, I. Iskandar, J. L. Gaol, R. Y. Setiawan, and R. D.
1374 Susanto, 2020: Impacts of climate changes on the phytoplankton
1375 biomass of the Indonesian Maritime Continent. *J. Mar. Syst.*, **212**,
1376 103451, doi:10.1016/j.jmarsys.2020.103451.
1377 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924796320301470>.
- 1378 Smith, N., and Coauthors, 2019: Tropical Pacific Observing System.
1379 *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00031.
- 1380 Song, H.-J., and J.-Y. Park, 2021: Bottom-Up Drivers for Global Fish
1381 Catch Assessed with Reconstructed Ocean Biogeochemistry from an
1382 Earth System Model. *Climate*, **9**, 83, doi:10.3390/cli9050083.

1383 Sprintall, J., and Coauthors, 2019: Detecting Change in the Indonesian
1384 Seas. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00257.
1385 <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00257/full>.
1386 Steinberg, D. K., H. W. Ducklow, K. O. Buesseler, and M. C. Bowles,
1387 2003: assessing contributions of jgofs; previewing Studies in Ocean
1388 Ecology, Biogeochemistry. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, **84**, 413–
1389 413, doi:10.1029/2003EO400007.
1390 <http://doi.wiley.com/10.1029/2003EO400007>.
1391 Takahashi, T., S. C. Sutherland, and A. Kozyr, 2020: Global Ocean
1392 Surface Water Partial Pressure of CO₂ Database (LDEO Database
1393 Version 2019): Measurements Performed During 1957–2019 (NCEI
1394 Accession 0160492). *NOAA Natl. Centers Environ. Inf.*,
1395 Takaya, Y., I. Ishikawa, C. Kobayashi, H. Endo, and T. Ose, 2020:
1396 Enhanced Meiyu-Baiu Rainfall in Early Summer 2020: Aftermath of
1397 the 2019 Super IOD Event. *Geophys. Res. Lett.*, **47**,
1398 e2020GL090671, doi:10.1029/2020GL090671.
1399 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL090671>.
1400 Tanabe, T., 2002: Studies on the early life ecology of skipjack tuna,
1401 *Katsuwonus pelamis*, in the tropical western-north Pacific. *Bull. Fish.*
1402 *Res. Agen.*, **3**, 63–132,
1403 doi:<https://www.fra.affrc.go.jp/bulletin/bull/bull03/3-5.pdf>.
1404 Thushara, V., and P. N. Vinayachandran, 2020: Unprecedented Surface
1405 Chlorophyll Blooms in the Southeastern Arabian Sea During an
1406 Extreme Negative Indian Ocean Dipole. *Geophys. Res. Lett.*, **47**,
1407 e2019GL085026, doi:10.1029/2019GL085026.
1408 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019GL085026>.
1409 Tian, F., R. Zhang, and X. Wang, 2020: Effects on Ocean Biology
1410 Induced by El Niño-Accompanied Positive Freshwater Flux Anomalies
1411 in the Tropical Pacific. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **125**,
1412 e2019JC015790, doi:10.1029/2019JC015790.
1413 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JC015790>.

1414 Timmermann, A., and Coauthors, 2018: El Niño–Southern Oscillation
1415 complexity. *Nature*, **559**, 535–545, doi:10.1038/s41586-018-0252-
1416 6. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>.

1417 Tompkins, A. M., and Coauthors, 2017: The Climate-system Historical
1418 Forecast Project: providing open access to seasonal forecast
1419 ensembles from centers around the globe. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*,
1420 **98**, 2293–2301, doi:10.1175/BAMS-D-16-0209.1.

1421 Tozuka, T., J. J. Luo, S. Masson, and T. Yamagata, 2007: Decadal
1422 modulations of the Indian Ocean dipole in the SINTEX-F1 coupled
1423 GCM. *J. Clim.*, **20**, 2881–2894, doi:10.1175/JCLI4168.1.

1424 Umatani, S., and T. Yamagata, 1991: Response of the Eastern Tropical
1425 Pacific to Meridional Migration of the ITCZ: The Generation of the
1426 Costa Rica Dome. *J. Phys. Oceanogr.*, **21**, 346–363,
1427 doi:10.1175/1520-0485(1991)021<0346:ROTETP>2.0.CO;2.
1428 [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-
1429 0485\(1991\)021%3C0346:ROTETP%3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0485(1991)021%3C0346:ROTETP%3E2.0.CO;2).

1430 de Vargas, C., and Coauthors, 2015: Eukaryotic plankton diversity in
1431 the sunlit ocean. *Science*, **348**, 1261605,
1432 doi:10.1126/science.1261605.
1433 <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1261605>.

1434 Vinogradova, N., and Coauthors, 2019: Satellite Salinity Observing
1435 System: Recent Discoveries and the Way Forward. *Front. Mar. Sci.*,
1436 **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00243.
1437 <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00243/full>.

1438 Wang, B., R. Wu, and J. X. Fu, 2000: Pacific – East Asian
1439 Teleconnection : How Does ENSO Affect East Asian Climate ? *J. Clim.*,
1440 **13**, 1517–1536.

1441 Wang, X., P. Singh, Z. Gao, X. Zhang, Z. I. Johnson, and G. Wang,
1442 2014: Distribution and Diversity of Planktonic Fungi in the West
1443 Pacific Warm Pool. *PLoS One*, **9**, e101523,
1444 doi:10.1371/journal.pone.0101523.
1445 <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0101523>.

- 1446 Wanninkhof, R., and Coauthors, 2019: A Surface Ocean CO₂ Reference
1447 Network, SOCONET and Associated Marine Boundary Layer CO₂
1448 Measurements. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00400.
1449 <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00400/full>.
- 1450 渡部雅浩, and 木本昌秀, 2013: エルニーニョ・南方振動(ENSO)研究の現在.
1451 *気象研究ノート*, 第228号
- 1452 Watanabe, M., M. Noguchi-Aita, and T. Hajima, 2018: Development of a
1453 marine ecosystem model to be embedded into an Earth system model.
1454 *Oceanogr. Japan*, **27**, 31–41, doi:10.5928/kaiyou.27.1_31.
1455 [https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaiyou/27/1/27_31/_article/-](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaiyou/27/1/27_31/_article/-char/ja/)
1456 [char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaiyou/27/1/27_31/_article/-char/ja/).
- 1457 Watson, A. J., U. Schuster, J. D. Shutler, T. Holding, I. G. C. Ashton, P.
1458 Landschützer, D. K. Woolf, and L. Goddijn-Murphy, 2020: Revised
1459 estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean
1460 carbon inventory. *Nat. Comm.*, **11**, 4422, doi:10.1038/s41467-020-
1461 18203-3. <http://www.nature.com/articles/s41467-020-18203-3>.
- 1462 Widlansky, M. J., and Coauthors, 2017: Multimodel ensemble sea level
1463 forecasts for tropical Pacific Islands. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **56**,
1464 849–862, doi:10.1175/JAMC-D-16-0284.1.
- 1465 Wu, Y., and Y. Tang, 2019: Seasonal predictability of the tropical Indian
1466 Ocean SST in the North American multimodel ensemble. *Clim. Dyn.*,
1467 **53**, 3361–3372, doi:10.1007/s00382-019-04709-0.
1468 <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-019-04709-0>.
- 1469 Xue, J., J. Luo, C. Yuan, and T. Yamagata, 2020: Discovery of Chile
1470 Niño/Niña. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2019GL086468,
1471 doi:10.1029/2019GL086468.
1472 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019GL086468>.
- 1473 Yan, W., X. Feng, W. Zhang, M. Z. Nawaz, T. Luo, R. Zhang, and N.
1474 Jiao, 2021: Genomes of Diverse Isolates of Prochlorococcus High-
1475 Light-Adapted Clade II in the Western Pacific Ocean. *Front. Mar. Sci.*,
1476 **7**, doi:10.3389/fmars.2020.619826.

1477 [https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2020.619826/ful](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2020.619826/full)
1478 l.

1479 Yasunaka, S., and Coauthors, 2018: Arctic Ocean CO₂ uptake: an
1480 improved multiyear estimate of the air–sea CO₂ flux incorporating
1481 chlorophyll a concentrations. *Biogeosciences*, **15**, 1643–1661,
1482 doi:10.5194/bg-15-1643-2018.
1483 <https://bg.copernicus.org/articles/15/1643/2018/>.

1484 Yasunaka, S., S. Kouketsu, P. G. Strutton, A. J. Sutton, A. Murata, S.
1485 Nakaoka, and Y. Nojiri, 2019: Spatio-temporal variability of surface
1486 water pCO₂ and nutrients in the tropical Pacific from 1981 to 2015.
1487 *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, **169–170**, 104680,
1488 doi:10.1016/j.dsr2.2019.104680.
1489 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967064518302406>.

1490 Yuan, C., and T. Yamagata, 2014: California Niño/Niña. *Sci. Rep.*, 4801,
1491 doi: 10.1038/srep04801.

1492 —, and —, 2015: Impacts of IOD, ENSO and ENSO Modoki on the
1493 Australian winter wheat yields in recent decades. *Sci. Rep.*, **5**, 17252,
1494 doi:10.1038/srep17252. <http://dx.doi.org/10.1038/srep17252>.

1495 Zhang, R. H., F. Tian, and X. Wang, 2018: A New Hybrid Coupled
1496 Model of Atmosphere, Ocean Physics, and Ocean Biogeochemistry to
1497 Represent Biogeophysical Feedback Effects in the Tropical Pacific. *J.*
1498 *Adv. Model. Earth Syst.*, **10**, 1901–1923,
1499 doi:10.1029/2017MS001250.

1500 Zhang, W., W. Mao, F. Jiang, M. F. Stuecker, F. Jin, and L. Qi, 2021:
1501 Tropical Indo-Pacific Compounding Thermal Conditions Drive the
1502 2019 Australian Extreme Drought. *Geophys. Res. Lett.*, **48**,
1503 e2020GL090323, doi:10.1029/2020GL090323.
1504 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL090323>.
1505