

— 総 説 —

海洋学の10年展望2021：熱帯域*

土井 威志^{1**}・安中 さやか²・高橋 一生³・
渡辺 路生⁴・東塚 知己^{5,1}・栗原 晴子⁶

要 旨

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年程度で取り組むべき海洋研究の方向性に関して、物理・化学・生物の各分野を横断して論じた。特に、エルニーニョ・南方振動(ENSO)に焦点をあてた。ENSOの予測は、近年の物理的理解の進展によりある程度可能になった。一方、ENSOが、海洋の炭素吸収能、物質循環、生物生産、生物多様性などにどのように影響するのかについては十分に理解されていない。さらに、長期的な気候の変化に伴って進行する熱帯海洋の水温上昇・酸性化・貧酸素化に、ENSOの影響が重なることで、海洋生態系がより深刻な影響をうける可能性も指摘されている。このような事態に備えるために、ENSOに伴って海洋システム全体がどのように変動するのか理解を深め、高精度で予測することが、社会要請と相まって、益々重要になるであろう。今後10年間では特に、Biogeochemical (BGC) Argoフロートによる観測データと地球システムモデルを両輪とした海洋システム研究の展開、ならびに船舶・係留ブイ観測や現場実験・観測など現地調査に基づくプロセス研究の拡充を進め、双方の知見を互いにフィードバックする必要がある。ENSOに伴う経年的な変動予測精度が最も高い熱帯太平洋は、海洋システムの真の統合的理解と予測研究を進めるための最適な実証基盤である。

キーワード：将来構想，分野横断，ENSO，予測

* 2021年7月15日受領 2021年10月11日受理

著作権：日本海洋学会，2021年

1 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25

2 海洋研究開発機構 地球環境部門
〒236-0001 神奈川県横須賀市夏島町2-15

3 東京大学 大学院農学生命科学研究科
〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1

4 海洋研究開発機構 地球環境部門
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25

5 東京大学 大学院理学系研究科
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

6 琉球大学 理学部
〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1

** 連絡著者：土井威志

e-mail: takeshi.doi@jamstec.go.jp

1. はじめに

太陽から多くの放射エネルギーを受けとる熱帯海洋は、海面水温が高く、その熱が大気・海洋循環によって中・高緯度へと輸送されるため、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。また、熱帯域に多く存在する湧昇域は、栄養塩の供給を受けて、高い一次生産力を示す。一方で、全炭酸濃度が高く冷たい水の湧昇は、海洋から大気へ大量のCO₂放出をもたらす。さらに、熱帯に位置する多くの発展途上国や島嶼国では、漁

業・水産業やサンゴ礁をベースとした観光業に強く依存しており、海と社会・経済の結びつきが強い。従って、様々なレベルで社会生活に影響を与える熱帯海洋の実態把握と変動予測は極めて重要な研究課題である。

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「気候の内部変動現象」(地球の気候システムに内在する自然変動現象で、人為起源の放射強制が主要因である地球温暖化のような気候システムそのものの変化と区別して、本稿ではこう呼ぶ)が発生しやすい。その代表的な現象が、熱帯太平洋のエルニーニョ・南方振動(ENSO; Philander, 1990)や、インド洋のダイポールモード現象(Saji *et al.*, 1999)である。エルニーニョ現象は、数年に一回程度の頻度で春から冬にかけて発生する気候の内部変動現象で、熱帯太平洋全体で海と大気が相互作用して発生する。熱帯太平洋の東部から中央部で海面水温が平年より高く、西部で海面水温が低くなるため、通常時は熱帯太平洋の西部で活発な対流活動が東に移動し、インドネシアや南米の北部では平年より雨が少なく暖くなる。エルニーニョ現象と偏差の符号が逆の現象は、ラニーニャ現象と呼ばれる。同様の現象が熱帯インド洋でも、数年に一回程度の頻度で夏から秋にかけて発生し、インド洋ダイポールモード現象と呼ばれている。その名前は、海面水温、外向き長波放射、海面高度などが東西のダイポール(双極子)構造を持っていることに由来する。正と負のイベントがあり、正のインド洋ダイポールモード現象が発生すると、熱帯インド洋の南東部で海面水温が平年より低くなり、西部で海面水温が高くなる。この水温の変動によって、通常時は東インド洋で活発な対流活動が西に移動し、東アフリカで雨が多くなり、インドネシアでは雨が少なくなる。

これらの現象は、熱帯気象だけでなく、水温や海水位変動を通じて、熱帯の海洋生態系、例えば、生物生産や魚類など高次栄養生物の分布域(Bertrand *et al.*, 2020)や、マングローブの成長・分布(Lovelock *et al.*, 2017; Riascos *et al.*, 2018)などに大きな影響を与える。また、エルニーニョ現象による海水温上昇は、より短い時間スケールの現象である海洋熱波(Oliver *et al.*, 2018)とともに、サンゴの白化を引き起こし、サンゴ礁海域に生息する多様な生物種の減少を引き起こす(Brainard *et al.*, 2018)。さらに、エ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、海水位が数cmから数10cm上昇するため(Widlansky *et al.*, 2017; Doi *et al.*, 2020c)、海岸侵食や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。

熱帯海洋の変動は、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)。例えば、エルニーニョ現象が発生すると、日本は冷夏・暖冬になりやすく、正の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(Wang *et al.*, 2000; Saji and Yamagata, 2003; Doi *et al.*, 2020a)。世界各地に甚大な被害をもたらす台風やハリケーンなどの熱帯低気圧の発生にもENSOが影響することが指摘されている(Chang *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2020)。このような日本を含む世界の異常気象・気候不順が、農作物の収量変動(Iizumi *et al.*, 2013; Iizumi *et al.*, 2014; Yuan and Yamagata, 2015; Oettli *et al.*, 2018; Doi *et al.*, 2020d)、マラリアなどの感染症流行(Hashizume *et al.*, 2009, 2012; Ikeda *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2020)、山火事(Harris and Lucas, 2019)や豪雨(Takaya *et al.*, 2020)などの引き金にもなる。従って、自然科学として現象の理解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、熱帯海洋の研究では、ENSOなどの予測研究が先駆的に発展してきた(L'Heureux *et al.*, 2020)。

予測研究の発展は、熱帯の海洋観測網の充実(Foltz *et al.*, 2019; Hermes *et al.*, 2019; Smith *et al.*, 2019)や気候モデルの高度化(Kirtman *et al.*, 2014; Tompkins *et al.*, 2017)などに支えられてきた。エルニーニョ・ラニーニャ現象については、およそ1年先までの発生確率について、各国のスーパーコンピューターを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、気象庁: http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/elnino/kanshi_joho/kanshi_joho1.html, JAMSTEC/SINTEX-F: <http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.htm>, 米国IRI: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/enso/>)。これらの予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。これは、まさに前回の10年展望(岡ら, 2013)で述べられたとおりである。

水温など物理変数の予測が可能になりつつある一方、気候の内部変動現象に伴って化学および生物過程がどの

ように変動するののかについては、よく解っていない。例えば、炭素循環、窒素循環、溶存酸素、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、ENSOに伴ってどのように変動するのか、さらにそれらの予測がどの程度可能かは、未だよく解っていない。加えて、50年以上の長期的な規模で確認されている気候変化に伴って熱帯海洋の水温上昇・酸性化・貧酸素化が進行する状況に、数年規模で発生するENSOの影響が重なることで、さらにそれらの影響が深刻化することが危惧される。そのような事態に備えるためにも、熱帯の気候の内部変動現象の実態を、物理・化学・生物(物・化・生)の各分野を横断して統合的に理解し、それらを予測する技術の高度化を進める必要がある。また、その予測情報を、海洋の水温上昇・酸性化・貧酸素化などと関わる水産資源や熱帯サンゴ礁の管理・保全などに活用するための研究が、社会要請の観点から、より一層重要になっていくと考えられる。物理環境場と生物地球化学的変動との関連の重要性は、前回の10年展望(岡ら, 2013)でも指摘され、実際に、物・化・生の3分野統合型のセッションが海洋学会などの研究大会で開催されるとともに、3分野横断型の船舶観測も行われてきたが、物・化・生の統合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) それらを統合的に扱うた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。予測研究をさらに発展させるためには、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する科学的基盤を、今後10年程度で確立する必要がある。

本稿では2節において、過去10年間の研究動向の一部について、季節か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ともに、それぞれの分野の今後の方向性について議論する。3節では、今後10年程度の研究の方向性の核として、Biogeochemical (BGC) Argoによる観測データと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ル)を両輪とした海洋システムを扱う研究に加えて、船舶・係留ブイ観測など現場調査を基盤としたプロセス研究の重要性に注目し、現在の課題と今後の発展性を論じる。4節では、本稿のまとめとともに、熱帯の物・化・生の統合的理解が、SDGs (Sustainable 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応可能かについても、簡単に触れる。

2. 過去10年間の研究動向

2.1. 物理分野

本節ではENSOに関する研究の進展を中心に記載する。ENSOについて、2013年までの研究の成果について網羅した文献として渡部・木本(2013)があるが、本節ではそれからおよそ10年の研究動向の一部を紹介する。

Argoデータの蓄積に加え、人工衛星(以下、衛星と略す; ESAのSMOS, NASAのAquariusやSMAPミッションなど)による海面塩分の観測(Vinogradova *et al.*, 2019)が可能となり、この10年間で塩分の広域観測データが飛躍的に増加した(船舶・係留ブイなどの「点」・「線」的な観測と比較して、衛星やArgoは「面」的な観測であるため、以後、後者を「広域観測」と呼ぶ)。その結果、塩分が、バリエイヤーなどの海洋表層の成層構造を介して、ENSOやインド洋ダイポールモード現象に果たす役割に関する研究が進展した(Maes and Belamari, 2011; Kido *et al.*, 2019)。特に、熱帯太平洋の東部で水温逆転を伴うバリエイヤーの存在が見出されたり(Katsura and Sprintall, 2020)、インド洋赤道域でバリエイヤーが海洋混合層下部からの冷却効果を阻害することが報告されたりするなど(Pujana and McPhaden, 2018)、熱帯域の様々な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。

エルニーニョモドキ現象、すなわち熱帯太平洋の東部と西部で海面水温が平年より低くなり中央部で海面水温が高くなる現象が発見されたことが契機となり、統計解析などを使ってENSOやインド洋ダイポールモード現象の典型的な特徴を理解しようとする研究だけでなく、各事例それぞれの多様性(例えば、その強さや、空間的な広がり)を理解しようとする研究が活発化した(Ashok *et al.*, 2007; Ashok and Yamagata, 2009; Capotondi *et al.*, 2015; Endo and Tozuka, 2016; Fan *et al.*, 2017; Timmermann *et al.*, 2018)。さらに、各海盆で起こる気候の内部変動現象それぞれのプロセスの理解を深める研究だけでなく、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れ (Chikamoto *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2019), CLIVAR の Research Focus (<https://www.clivar.org/research-foci/basin-interaction>) として活発に研究が進められている。

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した。例えば、数ヶ月スケールで発生・衰退する ENSO と、より短い時間スケールの気象現象、例えば、3日から10日スケールの西風バーストとの関係や、数週間スケールのマッデン・ジュリアン振動などとの関係が活発に研究された (Hayashi and Watanabe, 2017; Miyakawa *et al.*, 2017)。また、ENSO と、より長い時間スケールである10年から数10年規模の気候変動現象との関係 (Meehl *et al.*, 2016) や、地球温暖化の停滞との関係 (Kosaka and Xie, 2013) なども注目された。温暖化が進行した世界で ENSO 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された (Cai *et al.*, 2014, 2015, 2021; Kohyama *et al.*, 2017)。

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てきた (橋濱ら, 2021, 本特集)。一例として、台風の発生海域か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論じた Nagano *et al.* (2017) がある。沿岸で発生する海洋熱波と ENSO などの大規模な現象との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、沿岸で発生する大気海洋相互を伴う気候の内部変動現象 (沿岸ニーニョ現象) が世界各地で見出された (Kataoka *et al.*, 2014; Yuan and Yamagata, 2014; Oettli *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2020)。その他にも、インド洋ダイポールモード現象がジャワ島沖沿岸湧昇に影響を与える可能性 (Horii *et al.*, 2018) や、パプアニューギニア沖の沿岸湧昇がエルニーニョ発生に影響を与える可能性 (Miyama and Hasegawa, 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変動現象と、沿岸海洋との相互関係を理解しようとする研究は、沿岸海洋のプロセ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)。

これらの研究の多くは、前回の10年展望 (岡ら,

2013) において、熱帯の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く進展した結果であると言える。しかしながら、観測データの時間方向のサンプル数が少ないことや、気候モデルで海盆間および異なる時空間スケー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。

予測研究に目を向けると、前節でも述べたように、エルニーニョ・ラニーニャ現象が発生するか否か自体は、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 *et al.*, 2014)。さらに、ENSO の予測だけでなく、インド洋のダイポールモード現象の予測 (Luo *et al.*, 2007; Doi *et al.*, 2020b) や海盆モード現象 (Wu and Tang, 2019) の予測、エルニーニョモード現象の予測 (Hendon *et al.*, 2009)、大西洋ニーニョ現象の予測 (Counillon *et al.*, 2021)、海盆東岸域の沿岸ニーニョ現象の予測 (Doi *et al.*, 2013, 2015a, b, 2016) などもある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れるようになった (豪州 BoM: <http://www.bom.gov.au/climate/model-summary/#region=NINO34>, JAMSTEC/SINTEX-F: <http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.htm>, APEC: <https://apcc21.org/ser/enso.do?lang=en> など)。しかし、事例毎の多様性や、発生・衰退のタイミングなどを予測することが難しい段階にあり、これらに踏み込んだ予測の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されている (Hackert *et al.*, 2020)。また、予測シミュレーションのアンサンブル法に注目した研究も発展してきた。例えば、少数のアンサンブルでは、発生する可能性のある大気・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い問題が指摘されている (Doi *et al.*, 2019)。さらに、アンサンブル平均値を使って、ENSO を決定論的に予測した際、自信過剰になる、すなわちアンサンブル予測で見積もられる予測の不確実性が、予測結果の誤差に比べて小さ過ぎる問題などが指摘された (Tompkins *et al.*, 2017)。この問題は、

2014年の春先からのエルニーニョ現象予測の失敗などでも大きく取り上げられ、その改善方法についても活発に議論されてきた (Masuda *et al.*, 2015; Hu and Fedorov, 2016; Imada *et al.*, 2016; Dong and McPhaden, 2018)。今後は、多アンサンブ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、シグナルとして予測できる成分と、ノイズとして予測が難しい成分との境界付近の理解を深める必要がある。

2.2. 化学分野

人為起源 CO₂ の大気中への大量排出が地球温暖化の主な原因となっているが、全球的に見た場合、海洋はその主要な吸収源である (Friedlingstein *et al.*, 2019)。海洋が CO₂ を吸収することで、大気 CO₂ 濃度の増加が抑制されているとも言えるが、その効果は吸収海域と放出海域のバランスの上に成り立っている。熱帯太平洋は海洋で最大の CO₂ 放出域であり、その動態を理解することは、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。海洋の CO₂ 吸収量は、海面における大気と海洋の CO₂ 分圧の差で見積もられるが、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い海表面 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タ共有・統合が進み (Wanninkhof *et al.*, 2019)、LDEO (https://www.ncei.noaa.gov/access/ocean-carbon-data-system/oceans/LDEO_Underway_Database/, Takahashi *et al.*, 2020) や SOCAT (<https://www.socat.info/>, Bakker *et al.*, 2016) などのデータベースとして公開されている。その結果、現在では、海表面 CO₂ 分圧の平均場を研究する段階を超えて、長期変化傾向だけでなく、経年変動や10年規模変動も研究できる段階になった。熱帯太平洋中央部から東部では、エルニーニョ現象の発生に伴い、海表面 CO₂ 分圧が低下する (Feely *et al.*, 1997; Ishii *et al.*, 2014; Yasunaka *et al.*, 2019)。また、海洋中における CO₂ の溶解は、海水の pH および炭酸カルシウム飽和度が低下する海洋酸性化をもたらす、海洋生態系に深刻な影響を及ぼす (Doney *et al.*, 2009)。特に、熱帯太平洋の西部にある暖水プールでは、海洋酸性化の進行が見出され、そのプロセス研究なども活発に行われるように

なってきた (Midorikawa *et al.*, 2010; Ishii *et al.*, 2020)。さらに、その10年規模変動についても議論され始めた (Ono *et al.*, 2019)。

主要栄養塩 (リン酸塩, 硝酸塩, ケイ酸) についても、海面に限れば、長期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きる段階になりつつある (Yasunaka *et al.*, 2019)。化学系の変数を使って、このよう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、10年以上にわたる観測プロジェクト JGOFS (Steinberg *et al.*, 2003) が熱帯太平洋で行われたことや、気象庁が、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献している。137度定線のような長期の定線観測は国際的にも類を見ず、その観測成果は熱帯太平洋の物質循環・生物生産の理解において極めて貴重なデータベースとなっている (Oka *et al.*, 2018)。

地球温暖化に伴い、海面での酸素溶解度の低下、温度躍層での成層強化、さらには深層子午面循環の弱化などにより、海洋内部の酸素濃度の低下が懸念されている (海洋貧酸素化)。熱帯太平洋や熱帯インド洋では、数100m深付近を中心に貧酸素層が広がっているが、熱帯太平洋の東部での貧酸素化は既に始まっており、今後さらに進行する可能性が指摘されている (Long *et al.*, 2016; Schmidtke *et al.*, 2017)。また、ENSOに伴い海水中の酸素濃度変動することで、海洋生物の生息域などに甚大な影響が及ぶ可能性がある (Worm *et al.*, 2005)。さらに、貧酸素化が、窒素や微量元素の循環に影響を与えることによって、N₂Oなど温室効果ガスの大気中への放出を変化させることも懸念されている (Martinez-Rey *et al.*, 2015; Battaglia and Joos, 2018)。実際に熱帯インド洋や熱帯太平洋の東部の亜表層に広がる貧酸素水塊では、窒素代謝に不可欠な鉄が溶解度の高い還元態鉄 (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が指摘されている (Moffett *et al.*, 2007; Kondo and Moffett, 2015)。一方で、ENSOやモンスーンに影響された溶存酸素量の季節から数10年規模の変動の大きさや、その水平及び鉛直分布などは、観測データの不足により、未だ不明な部分が多い。今後、10年規模変動や地球温暖化トレンドの影響を含めて、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や統合が求められている。

2.3. 生物分野

物理・化学分野と比べて、生物分野では広域・定常ともに観測が圧倒的に不足しているが、衛星観測が可能な海表面のクロロフィル *a* 濃度の広域分布は、同じく衛星で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。

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特徴的な地理分布を示す(松本, 2012)。太平洋全体の一次生産の約2割を担う熱帯太平洋の東部は、一次生産の高い東縁辺部、赤道付近の湧昇域に加えて、南半球、北半球の海流系に対応した7つの水域に区分される(Lavin *et al.*, 2006; Pennington *et al.*, 2006)。このうち、赤道付近の湧昇域、南半球の海流系に対応した海域、東縁辺部は、植物プランクトンの成長に必要な栄養塩が多いのにも関わらず、植物プランクトンの生物量が少ない HNLC 海域であることが知られている(Coale *et al.*, 1996; Behrenfeld *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るためであり、表層での鉄の再生速度に影響する湧昇速度が、新生産を高める鍵であることが近年指摘されている(Landry *et al.*, 1997; Rafter *et al.*, 2017)。また、中米沖合いの熱帯太平洋の東部にある暖水プール域に、熱帯収束帯の季節的な南北移動によって局所的に形成される湧昇域(コスタリカドーム; Umatani and Yamagata, 1991)では、ケイ素、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(Chappell *et al.*, 2016)。東部から西部にかけて生じる水温躍層の深化は、同時に下層からの栄養塩供給を妨げるため、西部は、海表面のクロロフィル *a* 濃度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、東部と比べて進んでいない。一般に、西部では海面付近の顕著な栄養塩枯渇と、低塩分水によって形成されるバリエイヤーの影響を受けて、亜表層クロロフィル *a* 極大が発達する。一方で、亜表層では、放射照度が低く、光

合成を律速するため、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(Le Borgne *et al.*, 2002)。熱帯太平洋の東部の東縁辺部を除くと、熱帯域植物プランクトン群集全体では、2 μm 以下のピコサイズのグループが常に優占(総クロロフィル *a* の70%以上)しているが、その優占群は水温、栄養塩躍層の東西環境勾配に対応して変化する。熱帯太平洋の東部ではピコサイズ真核、西部では *Prochlorococcus*、両者の移行域で *Synechococcus* と優占群が変化する(Matsumoto *et al.*, 2004)。また、海面付近で硝酸塩が枯渇する一方、ダストを介して陸域から鉄が供給されやすい西部では、窒素固定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 al.*, 2009; Shiozaki *et al.*, 2013; Berthelot *et al.*, 2017)。

ENSO が一次生産に与える影響については、海色衛星による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(Gierach *et al.*, 2012; Messié and Chavez, 2013; Racault *et al.*, 2017)。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一次生産速度が半減する一方、西部ではバリエイヤーが薄くなり、栄養塩躍層や水温躍層が浅化するため、一次生産速度が高まるが(Matsumoto and Furuya, 2011)、その変動はエルニーニョ現象の規模やタイプにより異なる(Racault *et al.*, 2017)。同様の研究は、熱帯インド洋にも拡張・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、アラビア海南東部などでは植物プランクトンの量(Iskandar *et al.*, 2009; Gomes *et al.*, 2016; Thushara and Vinayachandran, 2020)やサイズ分布(Brewin *et al.*, 2012)が変動する。最近では、2019年のイベントを契機に、「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 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洋大陸付近のクロロフィル *a* に与える影響なども指摘されている(Siswanto *et al.*, 2020)。

動物プランクトンより上の栄養段階についてはさらに知見が乏しい。動物プランクトン(200 μm 以上)を1としたときの、植物プランクトンの現存量比は、熱帯太平洋の東部で4.1、西部で7.3と明確な東西差が認められる

が、これは一次生産が低い西部では食物網構造が複雑化するため、動物プランクトンに転送される生産割合が東部に比べて低くなることを反映していると考えられている (Le Borgne *et al.*, 2011)。一方、三次生産者であるマイクロネクトンの生物量は両海域で同程度であることから、熱帯太平洋の西部は一次生産に比して、魚類や大型生物の生物量が多い海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違い、食物網構造の違いなどが挙げられているが、詳細は不明である。近年、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、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うになってきた (Wang *et al.*, 2014; de Vargas *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 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、新たな洞察を与えることが期待される。

水産・魚類資源の分布や漁獲量と ENSO との関係も指摘されている (Bertrand *et al.*, 2020)。例えば、熱帯太平洋の西部に分布するカツオや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 (Lehodey *et al.*, 2020)。また熱帯太平洋の西部はカツオの産卵場、幼魚の生育場となっており (田邊, 2002)、その加入量は ENSO に強く影響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、その加入量変動を高精度で予測可能であることが示されている (Lehodey *et al.*, 2020)。また、ENSO がニホンウナギの仔稚魚輸送期間に影響することも指摘されている (Hsiung *et al.*, 2018)。熱帯インド洋の西部では、マグロ類の生息分布が、ENSO やインド洋ダイポールモード現象の影響を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の研究の多くは統計に基づく経験的な解析と議論に留まっており、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。しかし近年、物・化・生の連携でそのプロセス解明を目指すような野心的な研究もされ始めた (Gehlen *et al.*, 2015)。今後は、栄養塩供給から植物プランクトンに及ぼす影響について理解する段階を超えて、その上位の栄養段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。

熱帯海域生物相の最も重要な特徴は、生物多様性の高

さである。海・陸に限らず基本的に地球上の生物の多様性は熱帯域で最も高く、高緯度域に行くに従って低下する (Pianka, 1966)。この生物多様性の緯度勾配の背景にあるメカニズムを説明する仮説は多く提唱されているが、未だ完全な理解には至っていない (e.g. Rohde, 1992; Hill-Brand, 2004)。熱帯域の生物多様性は地球温暖化の影響を最も受けやすいとされており (Yasuhara *et al.*, 2020)、その多様性パターンを把握し、今後の変化を予測することは、熱帯域だけではなく全球的な生物多様性研究において極めて重要な課題である。

熱帯海洋の生物多様性を支える代表的生物としてサンゴ類が挙げられる。本生物群は、ENSO による影響を最も顕著に受けることでも知られている。多くのサンゴ種は生息場の夏の平均水温よりも 1°C から 2°C 高い状態が数日から数週間続くと白化し、その状態が長期化するとやがて死滅する。サンゴの白化はこれまででもエルニーニョ現象の度に繰り返し起こってきたが (Barkley *et al.*, 2018)、特に 1998 年に発生した最大規模のエルニーニョ現象は、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大な影響を与えた。その後 2010 年、さらに 2016 年から 2017 年にも再び世界的なサンゴの大規模白化が引き起こされ、エルニーニョ現象と地球温暖化による水温上昇が重なることによってその規模と頻度が増している (Hughes *et al.*, 2018)。さらに熱帯太平洋のマイクロネシア海域では、エルニーニョ時には水温の上昇に伴うサンゴの白化に加えて、一次生産の増加に伴ってサンゴを捕食するオニヒトデが増加した可能性も報告されている (Houk *et al.*, 2020)。また近年エルニーニョ現象に加え、海洋熱波による大規模白化の報告例も急速に増えている (Le Nohaïc *et al.*, 2017)。元来健全なサンゴ礁生態系では、サンゴ群集は 10 年程度である程度回復する力を有している (Gilmour *et al.*, 2013)。しかし現在は水温上昇に加えて酸性化や人為活動による水質環境の悪化により、その回復力が大きく低下しており、回復する間もなく繰り返し高水温に晒されることが問題視されている (Hughes, 2003)。特に熱帯太平洋では IPCC の RCP8.5 シナリオにおいて、2030 年から 2040 年には毎年大規模な白化に見舞われるようになることが予測されている (van Hooidonk *et al.*, 2014)。サンゴの死滅はそこに生息する甲殻類や貝類、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、さらにはサンゴ礁のもつ生態系機能の低下に直結する (Bellwood *et al.*, 2004)。加えて酸性化に伴う海水の炭酸カルシウム飽和度の低下に伴い、サンゴなどの石灰化生物による炭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止し、やがて溶解へと転じる可能性がある (Eyre *et al.*, 2018)。東南アジア諸国など熱帯域に住む人々の多くはサンゴ礁がもたらす様々な生態系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失に直結する (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2009)。また、海洋生物多様性の中心である熱帯太平洋の西部にあるサンゴ礁海域 (コーラルトライアングル) は、黒潮に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 (Wood *et al.*, 2013)、その健全性保全は、日本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、急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、多くのサンゴ礁では既に危機的な状況にあることから、その対策は喫緊の課題である。

以上述べた、熱帯太平洋の平年時とエルニーニョ時における物・化・生のプロセスを、Fig. 1で模式的に示す。

3. 熱帯域海洋システムの統合的理解とその予測にむけた将来構想

前節で紹介したとおり、分野や海域間に差はあるものの、過去10年を通して熱帯域の研究は着実に進展している。これらを踏まえて、今後は、物・化・生の統合的理解を進める必要がある。その将来構想を実現するための基盤として、3.1節では、化学・生物系の観測データの不足を解消するBGC Argo、3.2節では、物・化・生を包括的に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、3.3節では、船舶による高頻度・高解像度観測、3.4節では、その他研究基盤の拡充、3.5節では、観測網の最適化とデータベース化について議論を行う。3.6節で

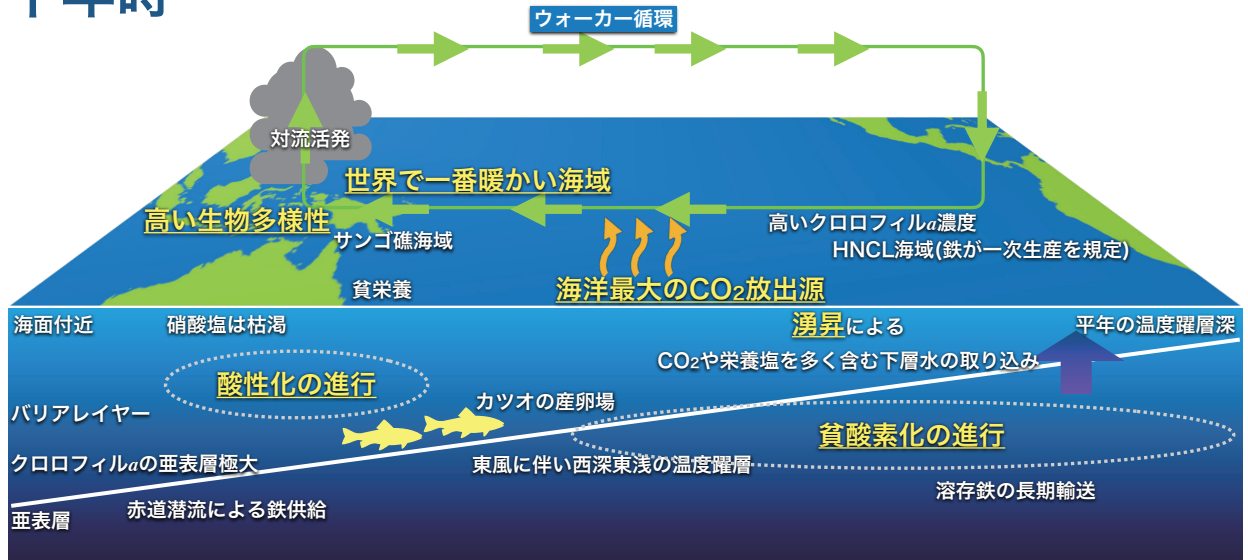
は、それらの研究基盤を融合させた熱帯海洋システムの実況や将来予測の可能性を論じ、3.7節では、大規模プロジェクトの立案・実施に向けて推進すべき具体的な科学的課題について構想する。最後に、3.8節でこれらの研究を推進する主体となる国内外の研究者ネットワークの構築・強化について触れる。

3.1. BGC Argo

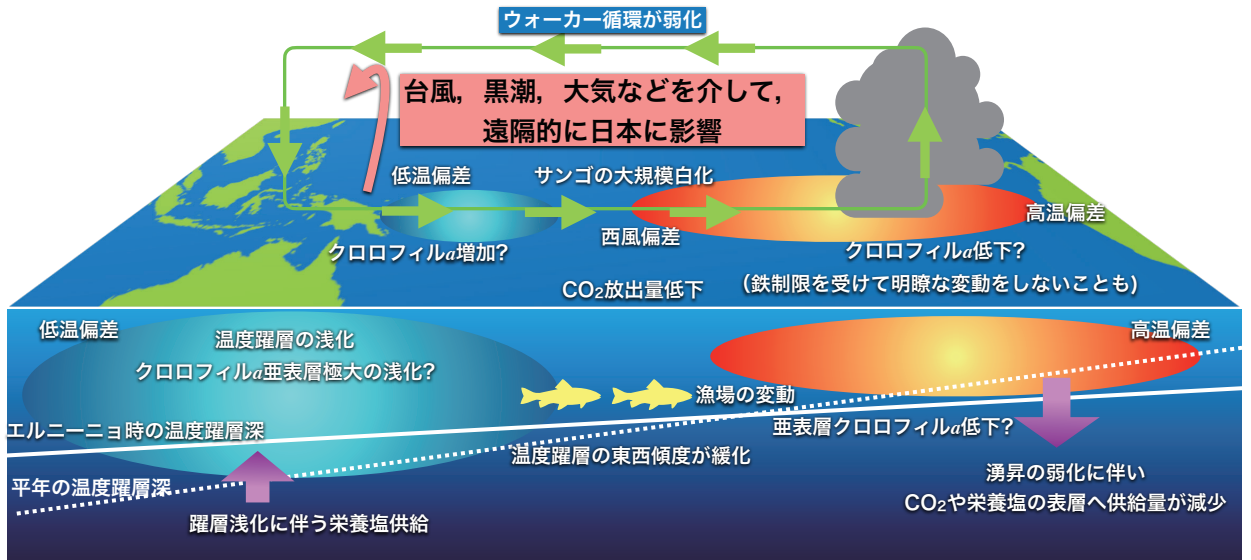
2.2節で述べたとおり、化学変数の観測は、海面付近に限れば、基本場だけでなく、変動場の議論が可能になる程度には充実してきた。しかし、亜表層のデータは未だ圧倒的に不足している。そのため、近年の国際熱帯観測プロジェクトでは、物理変数だけでなく、物・生・化の連携をキーワードに、船舶による集中観測などが実施され、先駆的な成果も出始めた (例えば、Second International Indian Ocean Expedition: <https://iioe-2.incois.gov.in/IIOE-2/index.jsp> 関連など)。しかし、これらはキャンペーンとして期間限定で行われているため、時々刻々と変動する海洋の化学場を繰り返し観測することはできない。この状況を打破できるのが、BGC Argoである (Bittig *et al.*, 2019)。これは、亜表層の水温・塩分の観測網を飛躍的に発展させたArgo (BGC Argoと区別するために、以下Core Argoと表記する；熱帯での貢献についてはSmith *et al.* (2019)を参照) を、化学・生物変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、クロロフィル *a*、後方散乱などのプロファイルデータを桁違いに増やすことができる (平井ら, 2021, 本特集)。BGC Argo観測網が完成すれば、ENSOに伴う化学変数や生物のダイナミックな応答を3次元的に捉えられるようになる。例えば、クロロフィル *a* は、鉄制限を受ける海面付近よりも亜表層に極大があり (Lee *et al.*, 2014)、その変動を捉えることが重要であるが、硝酸塩や放射照度のデータと一緒に解析することができれば、亜表層極大の形成や変動のメカニズムの理解が可能となる。また、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することにより、単位クロロフィル *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タを得ることができる。

最新の熱帯太平洋海洋観測システムをデザインするた

平年時



エルニーニョ時



◆海洋酸性化・貧酸素化，海洋生態系，炭素循環などはどのような影響を受けるのか？

Fig. 1 Schematic images of physical and biogeochemical oceanographic processes in the tropical Pacific for (a) the mean state and (b) an El Niño-like state.

めの TPOS2020 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 を 124 台展開することが提案されている (Kessler *et al.*, 2019)。全球では 1000

台を目指しており、2021 年 6 月時点では 350 台程度が稼働中である (Chai *et al.*, 2020)。熱帯では、2020 年 12 月時点で、太平洋でおよそ 30 台、インド洋でおよそ 10 台

が稼働中である(平井ら, 2021, 本特集)。ただ, BGC Argo フロートは, Core Argo フロートよりも高価である上, 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。そのため, データ取得後, 現場観測や衛星観測データを用いたより丁寧な品質管理が求められ, これに対応した観測資源および人的資源の確保が課題である。また, その効率的な展開のために, 数値モデルを使った観測システムシミュレーション実験活用などの戦略が必要である(3.5節で後述)。

3.2. 地球システムモデル

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に扱う気候モデルに, 炭素循環, 窒素循環をはじめとする物質循環や, それに関わる生態過程を組み込んだモデルであり(Hajima *et al.*, 2014; Bonan and Doney, 2018; Kawamiya *et al.*, 2020), 海洋の物・化・生の統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(渡辺ら, 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による海洋のCO₂吸収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)でどのような機構が働いているのかを明らかにし, その役割を定量的に見積もるためには, 地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である。

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や, CO₂排出シナリオに応じた地球温暖化の将来評価などに役立てることができる。また, 地球システムモデルではENSOなどが再現されていることから, 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5次報告書(AR5)では, 地球システムモデルを用いた研究結果に基づき, 将来のCO₂排出増加に伴う気候変化や, 海洋の熱, CO₂吸収といった役割, さらに地球温暖化の海洋生

態系への影響などが取り上げられている(IPCC, 2013)。加えて, 季節から数年規模の予測に関して, 地球システムモデルを使うことで, 物理変数の予測を超えて, クロロフィル *a* (Park *et al.*, 2019; Ham *et al.*, 2021) や, 海面CO₂フラックス(Ilyina *et al.*, 2021)の変動予測を行った研究が出始めた。これらの予測システムでは, 初期値作成の際, 海水温などの一部の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は充分になされていない。将来, 生物・化学変数の観測が増えて, それらの情報も初期値に取り込むことが可能になれば, 予測精度のさらなる向上が期待される。このような方向で, 物・化・生の統合的な予測の成功例を, 物理場の予測にある程度実績のある熱帯域で積み重ねていくことで, 将来的に他の海域での予測研究にも大きく寄与することが期待される。

最新の地球システムモデルは, 2021年から2022年に刊行予定のIPCCの第6次評価報告書(AR6)に合わせて, 各国の研究者・技術者が開発したものである。しかしながら, 計算機資源の都合から, 水平解像度は約100 km程度と粗く, これよりも細かいスケール(サブグリッドスケール)の中規模渦や乱流など物理現象については, モデルで表現できないためにパラメタリゼーションを行わざるを得ない。また, 海洋生態系モデルが考慮しているプランクトンはたかだか数種類程度であり, 種ごとに異なる生長(成長)速度や, その温度依存性, 栄養塩濃度依存性といった生物多様性に起因する変動要素については十分に考慮されていない(Keller *et al.*, 2012)。例えば, 海洋生態系モデルの出力に大きな影響を与える植物プランクトンの生長速度の報告値は0.11 day⁻¹から1.08 day⁻¹(Eppley, 1972; Redalje and Laws, 1981; Gieskes and Kraay, 1989), 栄養塩制限のない条件でも0.26 day⁻¹から2.75 day⁻¹(MacIntyre *et al.*, 2002)と, 非常に幅が大きい。この変動には生物種毎に異なる成長および呼吸・代謝における水温, 光環境依存性や栄養塩要求性が影響していると考えられるが, その知見は限られている。さらに, 有機物の沈降速度の粒子サイズ依存性についても現場の知見が不足しており, モデル中では考慮されていない(Omand *et al.*, 2020)。モデルの改善のためには, パラメタリゼーションの高度化が有効ではあるが, 特に生態系に関して, 多様性のある生態系

を数種類のプランクトンで表現することには限界がある。今後、モデルを高度化するためには、高解像度化、パラメタリゼーションの高度化を行うとともに、生物多様性を考慮し、生態系モデルの複雑化・精緻化を図る必要がある。このためには、計算機能力の向上に加えて、パラメタリゼーションの基盤となるサブグリッドスケール現象のプロセス解明のための船舶を用いた研究の進展が欠かせない(3.3節で後述)。それゆえ、高性能なモデリングを実現するには、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となる基盤的技術であり、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続けるために、人類全体の科学的な財産になりうる。

地球システムモデルの高度化のためには、シミュレーション結果を、観測データを使って丁寧に検証する作業が必要である。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が一般的であるが、2.2節で述べたように観測網が充実してきたとはいえ、観測データを元に推定された広域分布図にも不確実性が残されている(Watson *et al.*, 2020)。また、観測が十分に進んでいないためにモデル研究でもあまり注目されてこなかった海洋内部のプロセスについても、観測、モデル両面から研究を発展させる必要がある。前述したBGC Argoに代表される観測網の発展により、地球システムモデルの丁寧な検証が可能となり、その結果として、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とが期待される。

3.3. 船舶による高頻度・高解像度観測

船舶等を用いた現場観測に基づくプロセス研究の充実も必要である。BGC Argoや衛星は、海洋全体の環境を高頻度で把握できるという利点がある一方、搭載できるセンサーの数やデータ精度に限界があり、また常に現場の観測値を用いたキャリブレーションを必要とする。さ

らに、地球システムモデルに必要となる変数には、現場でしか測定できないパラメータが数多くあり、これらの変数の取得のためにも、船舶観測が不可欠である。国内研究船による熱帯域調査航海は、ブイ観測が実施されていた1990年代後半から2000年代にかけてJAMSTECの「かいよう」や「みらい」等を中心に赤道東西横断観測や、長期定点観測などが活発に実施され、ENSOに伴う海洋環境変動の実態理解に大きく貢献してきた(松本, 2012; Shiozaki *et al.*, 2013)。近年は、ブイ観測の中断に伴う運航日数や船舶の削減の影響もあり、現場観測の機会は大きく減少しているものの、広域モニタリングによるデータ蓄積や地球システムモデルの開発が進み、多くのパラメータにおいて現場における観測・測定の必要性が高まっている。例えば、モデル間で用いられている係数が異なり、出力に大きな影響を与える植物プランクトン等生物の成長や呼吸・代謝と水温の関係、一次生産を左右する微量金属元素の化学形態や動態、窒素固定・脱窒・硝化速度、生物ポンプを介した有光層以深への炭素輸送の動態を左右する生物群集の種多様性、これらの過程に関与する生態系の頑健性・脆弱性などは、高度な観測性能を備えた研究船による現場調査でなければ明らかにすることができない。従来から維持されている各機関のモニタリング観測に加えて、出来るかぎり広い時空間スケールを網羅した船舶観測の充実は、熱帯海洋における物・化・生過程の統合的理解の要である。最新の観測手法を取り入れて、可能な限り物・化・生の変数を同時に観測する熱帯太平洋の横断観測に加えて、南北赤道反流域を網羅した子午線面縦断観測や、東部に比べ未だ調査例の少ない西部暖水プール周辺域や東部インド洋などを対象とした継続的な調査航海の実施が望まれる。一般に広大な熱帯域を対象とする船舶調査は、各測点につき1日から2日程度の時間を充てるスナップショット的な観測が主体となることが多いが、より細かい時空間変動に着目した停船観測や複数船同時観測なども今後は推進する必要がある。これら多面的な観測アプローチは、地球システムモデルの高度化に不可欠であるばかりでなく、広域モニタリングでは検出できない未知の過程を発見できる可能性を秘めている。プロセス研究で得られた知見を、領域海洋システムモデリングや地球システムモデリングの研究にフィードバックすることで、その生物・化

学パラメータの精緻化や高精度化を実現させることが重要である。

また、機会が限定される研究船による調査航海の観測を補う手法として、漁船や商船などとの連携も強化すべきである。海面水温を含む海上気象データやXBTによる亜表層水温などのボランティア船観測は古くから行われてきたが、近年はさらに多岐にわたる観測が行われている (Smith *et al.*, 2019)。例えば、国立環境研究所では、日本を発着する商船によるCO₂分圧測定に加えて、表層海水サンプリングによる栄養塩観測を行っており、各項目の海盆スケール分布が明らかにされつつある (Nakaoka *et al.*, 2013; Yasunaka *et al.*, 2014)。また、連続採集器による動物プランクトン観測の多くも、貨物船やフェリーで行われている (Chiba *et al.*, 2012)。近年は、フィルターサンプリングによる遺伝子解析も可能になった (Cheung *et al.*, 2020, 2021)。このような成功例を契機に、日本を発着し、熱帯域を経由する商船 (例えば、中南米、オセアニア、インド洋方面便など) と連携ができれば、観測基盤の飛躍的な発展が期待できる。商船・漁船による試料採取は、研究船による観測に比べて、項目や精度に限界がある上に、排他的経済水域などの政治的問題や、冷凍サンプルの検出限界の技術的問題、センサーの自動化・小型化や人的リソースなど多くの課題があるものの、連携によって得られる膨大なデータは、観測機会が限定される熱帯域の研究においてデータの空白を埋める効果的なアプローチになる。

3.4. その他研究基盤の拡充

大気海洋相互作用の活発な熱帯域においては、表層海洋や海上気象の連続観測は極めて重要であり、係留ブイが果たす役割は大きい。主に日米協力で展開してきた熱帯太平洋のTAO/TRITONブイの観測網が、2014年に一時崩壊の危機になった事例は、多くの教訓を残し、上述のTPOS2020の開始につながった (Ando *et al.*, 2017)。今後、熱帯域と日本の気候・海流を繋ぐ重要な海域であるフィリピンや台湾の沖合で、新たにブイ観測を強化することが計画されており (Ando *et al.*, 2021; 橋濱ら, 2021, 本特集)、熱帯太平洋の西部から日本への影響について新たな知見が得られることが期待される。さらに、熱帯太平洋の東部では、海面付近と亜表層の流速

シアが強く、活発な鉛直混合が起きている可能性があるため、ENSOの物理的な知見を深めるためにも鉛直混合過程に関する観測の強化が必要である。実際、1点のみではあるが、赤道西経110度のTAOブイに設置された χ podと呼ばれる測器による観測は、鉛直混合がENSOの盛衰に重要である可能性を示した (Warner and Moum, 2019)。乱流センサーを搭載したプロファイリングフロートの展開 (岡ら, 2021, 本特集; 橋濱ら, 2021, 本特集) と連携することで、このような研究の発展が期待される。さらに、係留ブイは、他の観測データのキャリブレーションにおいても重要である。

衛星やCore Argoの維持・発展も欠かせない (Hermes *et al.*, 2019; Smith *et al.*, 2019; Beal *et al.*, 2020; Brett *et al.*, 2020)。現在、衛星によって海面高度や海面の水温、塩分、運動量・熱フラックス、海流などが観測されている (岩本ら, 2021, 本特集)。また、Core Argoにより海洋内部の水温・塩分が観測されている。これら恒常的に入手可能な広域観測データを、時空間的にさらに密に入手することができれば、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。例えば、熱帯不安定波とENSOの関係 (Imada and Kimoto, 2012) や、アラビア海西部の渦活動とインドモンスーンの関係 (Seo, 2017) などの理解が進むであろう。また、海色衛星によって植物プランクトン量を解析する段階を超えて、植物プランクトンを高次分類群毎に定量できる手法が確立されつつあるほか (Hirata *et al.*, 2013; Bracher *et al.*, 2017)、日周鉛直移動性動物プランクトン・マイクロネクトンの分布量 (生物量) を観測する試みも発表されている (Behrenfeld *et al.*, 2019)。その実用化のためには、現場観測とのキャリブレーションが不可欠であるが、物理・化学パラメータに比べて広域データの不足が顕著な生物パラメータの取得状況を劇的に改善する可能性を持つため、その発展に対する期待は大きい。

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は、既存の広域観測網のデザインをそのまま適用するのが難しいため、バイオロギング (Harcourt *et al.*, 2019; March *et al.*, 2019; 平井ら, 2021, 本特集) や、Waveグライダー及びセイルドローンなどの活用 (Fujita *et al.*, 2020; Nagano and Ando, 2020)、浅い海のために設定したプロファイリングフロート展開などによる観測

の導入を積極的に検討する必要がある。例えば、熱帯太平洋と熱帯インド洋を結ぶ海洋大陸は、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あるが、比較的小規模な変動を監視できるようになれば、太平洋-インド洋間における海盆規模変動の相互関係の理解が飛躍的に進むと期待される (Iskandar *et al.*, 2020)。また、上述のコーラルトライアングル海域などを含む熱帯浅海域は世界の生物多様性中心であると同時に、人口の急増及び経済の発展とともに海洋環境が激変している海域でもあるが、観測データの不足が問題となっている (Sprintall *et al.*, 2019)。これらの海域は複雑な地形を示すことから、数から数100 m 規模で面的な観測網を設定することが、生態系の保全や対策に企てる上で重要である。また、サンゴの白化や酸性化の監視のためには、より高頻度・高密度な観測が重要であることから、小型係留ブイなどによる多定点での連続的な環境観測に自動採水器を組み合わせた観測手法の確立が望まれる。さらに、サンゴ礁やマングローブのモニタリングとして、ドローン、水中ドローン、遠隔操作型の無人潜水機など (木田ら, 2021, 本特集) による画像観測を実施し、得られた大量のデータを AI 技術によって解析することで、より正確で効率性の高いモニタリングシステムが構築できると期待される。

ENSO による生態系や環境への比較的広域な影響を理解・予測することに加えて、その情報を対象海域にダウンスケールし、現地調査・実験などの沿岸研究と連携することで、人間社会・経済活動により直接的に働きかけることが可能となるかもしれない (木田ら, 2021, 本特集)。そのような沿岸プロセス研究を強化するための一例として、日本の地の利を生かして、琉球列島に、温暖化や酸性化、サンゴ礁への影響などについて研究する観測・研究ステーションを建設することを提案したい。ブイ観測などと連携し黒潮上流域にあたる熱帯太平洋の西部に遡るような観測網を構築できれば、熱帯の変動が下流域生態系にどのような影響を与えるのかを理解する上で大きな進展をもたらす。熱帯域研究の中緯度域研究への貢献という意味でも重要である。さらに、施設には観測機能と同時に、例えば海水温、pH、光、栄養塩、塩分、溶存酸素、流速などの環境要因を制御可能な実験室を整備できれば、様々な熱帯・亜熱帯域の各種生物の成

長速度や生物活性と環境の影響などに関するプロセス研究を促進させ、現在最も不足している各種モデルのパラメタリゼーションに必要なデータを取得することが可能になる。このような機能を有する施設は2010年にオーストラリアで設置されているが (SeaSim: <https://www.aims.gov.au/seasim>)、サンゴ礁海域への近さ、生物多様性の高さ、安全性、電力の安定的な供給の面においてより優位な立地条件をもつ琉球列島に研究施設を設置できれば、現地調査・実験・広域モニタリング・モデリングなどの融合研究が可能な唯一無二の拠点として、熱帯太平洋の海洋生物研究の飛躍的な発展に繋がると期待される。

3.5. 観測網の最適化とデータベース化

海洋観測網の発展は、科学の発展に必要な不可欠であるが、そのための測器の購入や船舶の運航には多大な費用がかかるため、その費用対効果を考え、持続可能な観測網の設計を議論する必要がある。国際協力のもと、日本の限ら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を考えていくことは今後益々重要になってくる。そのためには、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ョン実験 (観測システムシミュレーション実験) や、実際の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、どのくらいの精度で、どのくらいの数必要かなどを定量的に見積もることで、最適な観測網の設計を議論できるようになるのが望ましい。例えば、ENSO の事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、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.*, 2019)。そのため、地球システムモデルのような最先端のモデルだけでなく、既の実績のある気候モデル、領域海洋モデル、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、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れる。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的に進めるために重要である。

海洋観測データを取得する機会は限られるため、質、数、手段などを考慮しながら、多種多様なデータを、容易に、統合的かつ包括的に共有するためのシステムを構築し、その価値を最大限に高めていくことも重要である。例えば、衛星、Core Argo、係留ブイ、船舶観測などによる水温と塩分のプロファイルデータに関しては、統合された格子データが全球で準リアルタイムに誰でも入手可能なシステムなどがある (EN4, <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/>)。一方で、化学・生物データは、非公開のものも多く、公開されていても限定的であり、ユーザーにとって利便性に欠ける場合も多い。このような、存在するが使える状況にないデータ (いわゆる眠っているデータ) の有効活用は重要な課題である。前述のように、海洋 CO₂ 分圧に関しては、SOCAT や LDEO といったデータベースがある。栄養塩に関しては、World Ocean Database (WOD, <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database>) や Global Ocean Data Analysis Project (GLODAP, <https://www.glodap.info/>)、GEOTRACES (<https://www.geotraces.org/>) などで、データの収集・公開がなされているが、未登録のデータも多くある。データの種類が多種多様であるだけでなく、同じ変数でも、観測手法や測定方法による差があるなど、画一的なフォーマットで扱うことが難しいことも、その要因だろう。その他、データ共有サイト PANGAEA (<https://www.pangaea.de/>) にも多数のデータが登録されている。こちらは、あらゆるデータを登録することができるものの、データフォーマットが統一されておらず、データを抽出し解析するのは容易ではない。水産資源のデータは、国際連合食糧農業機関 (FAO) のサイト (<http://www.fao.org/fishery/statistics/global-production/en>) などから入手できるが、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。加えて、経済戦略や外交に関連する水産資源のデータは公開されてないことも多い。

近年、海洋環境と海洋生態系の現状把握のために重要な変数の洗い出しとデータ収集の枠組み構築が、国際的に議論されるようになってきた (Muller-Karger *et al.*, 2018; Pinardi *et al.*, 2019)。物・化・生の統合的研究を

始める基盤を整えるために、重要変数の統一的なデータベースの構築が望まれる。さらに、観測値を用いたプロセス研究やモデル検証のためには、時空間的に不均一に存在する観測データの格子化が有用である。これまで、統計的手法による海洋 CO₂ 分圧や海表面の栄養塩の格子化が行われてきたが (Yasunaka *et al.*, 2019; Iida *et al.*, 2021)、他の変数に関しても格子化データセットの作成が望まれる。人工知能解析などを駆使し、観測された変数を学習し、観測のない過去のデータを推定する手法などが確立することも期待される。また今後は、何か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れるであろう。すなわち、データベースには、速報性の高さも必要である。

3.6. 熱帯海洋システムの実況や将来予測の可能性

ここまで議論してきた観測やモデルなどの研究基盤の充実化により、物・化・生の統合的理解を深めることができれば、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を構築する現実味が増す (Fennel *et al.*, 2019; Capotondi *et al.*, 2019)。大気では、物理場と化学場の再解析データ作成の試みが既に始まっているが (Gaubert *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題がある。海洋の場合も同様の問題が大きいのしかかると想定される。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、Salon *et al.* (2019) では、BGC Argo で観測された化学・生物関連変数や、衛星で観測された海表面 2 次元クロロフィル *a* データを海洋領域モデルにデータ同化した。このように、現在でも潤沢に得られるデータ (例えば衛星観測される海表面クロロフィル *a* データなど) に加えて、新たに BGC Argo フロートの観測データを、今までより一層積極的にデータ同化に活用することが期待される (International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), 2020)。

さらに先の未来を見据えた時、物・化・生の変数が統

合的に扱われた広域再解析データがリアルタイムに更新されて、さらにそれを初期値として、その数か月後から数年後の将来予測シミュレーションの情報が随時更新されていくような技術の実現が期待される。その結果、例えば、海水温の上昇・海洋の酸性化・貧酸素化・CO₂吸収が、現在、熱帯海洋のどこで、どのように進んでいるのかを実況することに加えて、数ヶ月後に予測されるENSOの発生に伴い、どのような海域で、それらが促進・停滞するのかなどについて早期に警戒情報を伝えることが可能になるだろう。このような比較的広域な予測情報を沿岸地域にダウンスケールすることで (Jacox *et al.*, 2020), 人間社会・経済活動により直接的に関係する情報を創出し、どの程度の損失が見積もられるか、あるいはそれに備える対策が可能かなどを評価・議論することも可能となるかもしれない。また、2.3節でレビューしたような生物学的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・魚類資源などにどのような影響を

及ぼすかについても予測情報を提供できるようになるかもしれない。そのような萌芽的研究成果も発表され始めており (Song and Park, 2021), SDGs「14.海の豊かさを守ろう」などの社会要請により直接的に貢献可能となることが期待される。

以上、述べた将来構想を Fig. 2 で模式的に示す。

3.7. 大規模プロジェクトの立案・実施に向けて

ここまで研究の将来構想を論じてきたが、これらを実現・推進し、得られた知見を統合していくためには、分野横断型の大規模プロジェクトの立案、実施が鍵となる。これまで日本の熱帯海洋研究では、他の領域に比べて分野横断型の大型プロジェクトが少ないという問題点があった。ENSO など経年的な変動予測精度が最も高い熱帯太平洋は、物・化・生の各過程が連携・協働し、海洋システムの真の統合的理解を進めるための最適な実証基盤であり、この視点から、新たに分野横断型の大型プロ

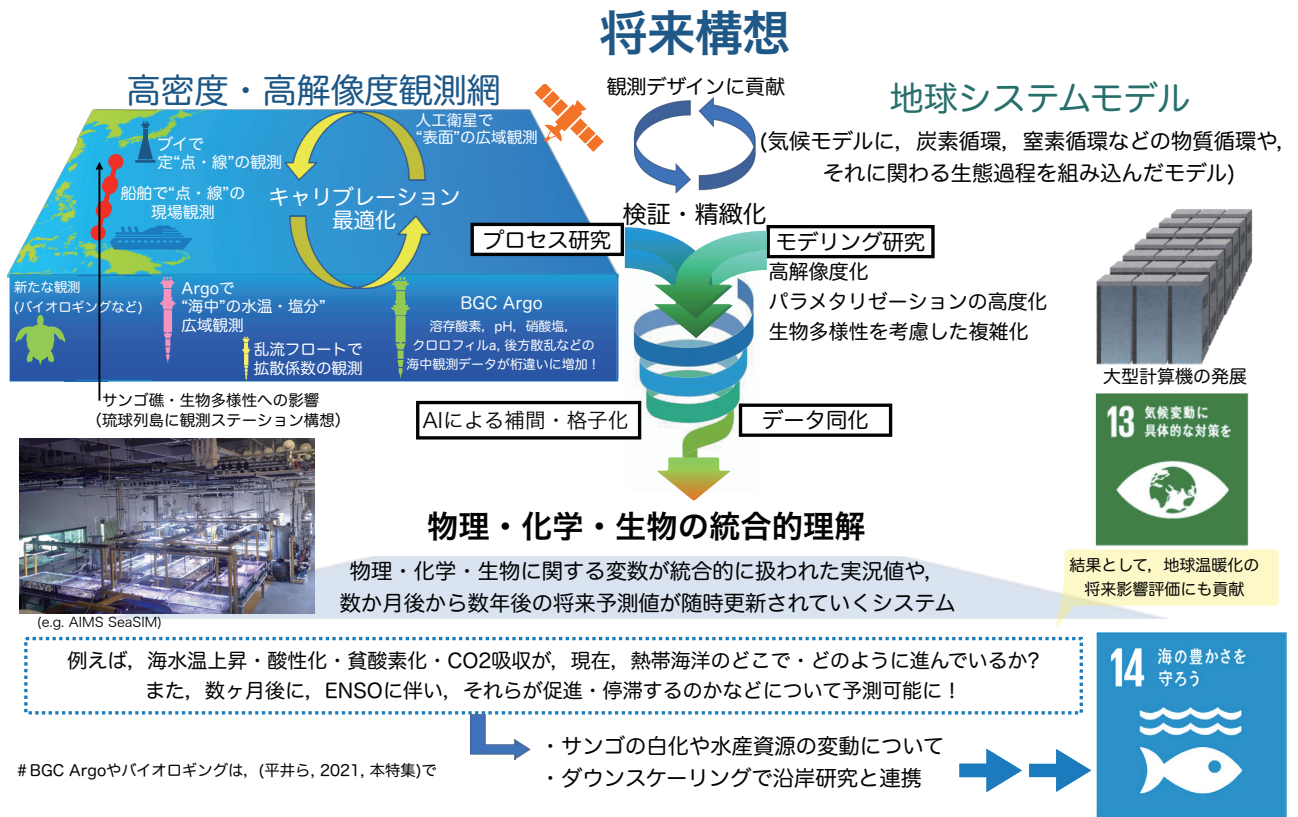


Fig. 2 Schematic image of the decadal vision.

プロジェクトを推し進める必要がある。まずは、熱帯太平洋の西部を対象に、ENSOに伴う海洋循環・物質循環・生態系の変動機構を、各プロセスの時空間規模が異なる可能性を考慮しつつ、統合的に理解することを目的としたプロジェクトが考えられる。

また、ENSOそのものの予測を改善するためのプロジェクトも考えられる。クロロフィル a は、海洋表層での短波吸収に関わるため、混合層の熱収支にも影響を与える (Lewis *et al.*, 1983; Nakamoto *et al.*, 2001)。現在、エルニーニョ予測に使用されている気候モデルのほとんどでは、衛星から得られた海表面クロロフィル a の月別気候値を入力値として、海洋表層での短波放射の吸収量を計算している。しかし、海表面と亜表層のクロロフィル a は必ずしも連動して変動しておらず、短波放射の吸収量の変動が現実的に表現できているとは言い難い。また、海表面クロロフィル a の経年変動を考慮することで、ENSOの振幅が10-30%程度小さくシミュレーションされることも報告されている (Jochum *et al.*, 2010; Kang *et al.*, 2017)。熱帯太平洋の東部では、エルニーニョ現象に伴い、温度躍層が深くなり、湧昇による栄養塩の供給が減少する。その結果、海表面クロロフィル a 濃度が低下し、生物系による短波放射の吸収量が減少するため、エルニーニョ現象による高温偏差を抑制するフィードバックが働くことが示唆されている。風応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ため、クロロフィル a が ENSO の予兆として重要である可能性も指摘されている (Park *et al.*, 2018)。さらに、熱帯太平洋の東部は、鉄が一次生産を規定しているため、海表面水温、亜表層水温、対流活動、風などが関わる物理変数のフィードバック機構に加えて、クロロフィル a 、鉄、硝酸塩、短波放射の吸収などが新たに関わる物・化・生の双方向のフィードバック (Lee *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2018; Tian *et al.*, 2020) を、モデル内で精緻に表現する必要がある。地球システムモデルは、海洋 CO₂ 吸収と密接に関わる海洋一次生産量に付随してクロロフィル a を計算するため、このような研究に有効である。その上で、既存の物理変数だけでなく、BGC Argoなどで観測されたクロロフィル a や硝酸塩の濃度に関するプロファイルデータに加えて、船舶でのみ観測可能な鉄に関する変数を初期値に取り込むことで、エルニーニョ予測が改

善する可能性を評価する。

その他の節でも、いくつかの具体的な研究課題を例示したが、更なるアイデアや議論が必要であることは言うまでもない。分野横断型のプロジェクトを立案する際には、個々の研究者の研究をマージさせていくのではなく、現象・現場側から必要なアウトプットを考えていくアプローチの方が、実質的な連携像を描きやすいかもしれない。本構想では海洋システムとして物・化・生の統合的理解を軸としたが、実際の海洋システムは大気、陸域、人間圏などとも密接に関っている。そのため、大気化学や陸域生態系の影響 (例えば、窒素沈着、ダストの巻き上げと鉄沈着、河川による栄養塩流入、亜酸化窒素やジメチルスルフィドの大気への物質供給と温暖化の影響) など、様々な課題も考えられる。本構想をきっかけにまずは問題意識を共有し、継続的な議論を通して、熱帯での分野横断型の大規模プロジェクトを始動する努力を続けていく必要がある。

3.8. 研究者ネットワークの構築・強化

物・化・生の研究者が、完全に独立して研究していた時代から、個々の研究者の手の届く範囲で少しずつ協力するようになったのが現在の状況である。実際に、物・化・生の統合的理解と予測研究を実施するためには、分野を跨いだ研究者間のコミュニケーションの強化が必要不可欠である。まず、日本の熱帯海洋学コミュニティとしては、世界の研究の潮流を意識しながらも、その動向に影響されすぎないように、しっかりとした研究の軸を構築し、コミュニティの活性維持を図ることが重要である。例えば、熱帯太平洋の西部における船舶やブイによる観測を基盤とした海洋循環や栄養塩循環、カツオ・マグロ類の初期生態などについての理解の大幅な進展には、日本の研究者が果たしてきた役割が大きい。日本の熱帯海洋学コミュニティの独自性を考慮して、研究基盤を持続的に発展させることが重要である。個々の研究の質の高さが重要になるのは言うまでもないが、一個人でできることには限界がある。まずは国内コミュニティのネットワーク形成を強化し、日本独自に重点的に取り組む課題を持つことで、限られた研究資源 (人や観測など) を集中させることが必要である。その結果、日本の熱帯海洋学コミュニティの国際的なプレゼンスが高まり、熱

帯研究を推進する国際大型プロジェクトにも大きく貢献できるようになると期待される。例えば、分野横断型の勉強会やブレインストーミングを定期的実施し、国内のプロジェクトや研究航海の計画を立てる作業は重要である。熱帯域をフィールドとする国内研究者が比較的小さいという点が、このようなコミュニケーションの強化に有利に働くかもしれない。一方で、熱帯研究者が少ない現状を解消するため、熱帯研究の重要性や科学的な面白さを発信する基盤を強化することも必要である。熱帯域と連結する環境を扱う研究への親和性を高めるため、熱帯から他の領域（例えば、中緯度域や深層域など）への影響がどの程度及んでいるのかという情報を共有することによって、熱帯域に対する研究者の関心を高めることが効果的であろう。さらに、海洋学会の大会セッションやシンポジウムだけでなく、他学会（例えば、サンゴ学、水産学、気象学、陸域生態系学、社会学など）との連携によって、学際的な国内の熱帯研究者のネットワークを作ることは有効である。そのためには、例えば、「ENSO」など、共通のキーワードを軸として、これに興味がある研究者を学際的に集めたコミュニティの形成などが考えられる。

さらには、官庁や企業なども含んだコミュニティを形成し、このような研究活動を広く知ってもらうことも重要である。例えば、3.3節で議論したように、漁船や商船などとの連携促進のためには、研究者と企業の双方にメリットがある体制を考える必要がある。「市民参加型の科学」が謳われている「国連海洋科学の10年」(<https://oceanpolicy.jp/decade/>)のフレームワークを活用し、環境保全活動の一環として、ENSO予測や温暖化将来予測への貢献を強調することで、官庁や企業側と連携する体制を、研究者との協働・対話で新しく見出すことができるかもしれない。併せて、気象、海流、水温などの情報を考慮した上で、燃料やCO₂排出量を最低限に抑えるための最適な航路の情報などを研究者側から提供することで、効率的な操業を支援することも考えられる。このような取り組みは、CO₂排出量の削減を通じた地球温暖化対策にも繋がる。加えて漁船に関しては、得られたパラメータを漁獲データと併せて解析することで、漁場環境の形成や変動過程についての解析結果を還元し、漁場探索や資源変動予測に活用できるような仕組みを考えるこ

とも可能であろう。持続可能な漁業に対する認証制度として考案された、海のエコラベル (<https://www.msc.org/jp/what-we-are-doing/thisiswildJP>)などを参考に、協力企業に学会として認証を発行する案も考えられる。

船舶による熱帯の現場観測では、観測時間の確保と同時に、排他的経済水域内での相手国との交渉も重要である。また、陸側からアプローチする沿岸域の観測においては、現地研究者の協力が不可欠である。そのため、関連国との国際共同研究の枠組み構築が熱帯研究の推進には欠かせない。近年、国内の大学院において多くのインドネシアやフィリピンなど東南アジアからの留学生が学位を取得し、母国で活躍している。彼ら・彼女らを中心に、出身講座や国内コミュニティとの関係を維持・発展させ、国際ネットワーク形成を強化していくことが期待される。また、同じ観測船に乗り、同じフィールドで現場観測を行うことは、コミュニティの連携強化と研究進展に大きく寄与する。その意味でも船舶による現場観測は、熱帯研究の進展の強い推進力になる。まずは、比較的少数の研究者でも確保できる予算（例えば、科学研究費助成事業の国際交流事業や科学技術振興機構の地球規模課題対応国際科学技術協力プログラムなど）を利用し、小規模でも国際研究コミュニティを形成することが重要である。

4. まとめ

近年、持続可能な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なった（例えば、「国連海洋科学の10年」）。特に、熱帯の海には、ENSOなどのように、世界の異常気象・気候不順の引き金となる大規模現象があり、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ろう。

そのような方向性で将来を構想した時、今後10年程度の熱帯海洋研究の鍵になるのが、衛星やBGC Argoフロートによる化学・生物変数の広域観測データの飛躍的

な増加と、それらでは把握できない重要変数を観測するための船舶や係留ブイによる現場観測の発展である。このような様々なスケールで得られた高頻度・高解像度データセットに基づき、個々の現象について、物・化・生の統合的なプロセス研究やモデリング研究を進めると同時に、それらの融合（データ同化）や予測についての研究を進展させることが重要である。特に、BGC Argo フロートによる観測データと地球システムモデルを両輪とした広域な海洋システムを扱う研究に加えて、船舶・係留ブイ観測など現地調査を基盤としたプロセス研究を進め、得られた新しい知見を、双方にフィードバックすることで、熱帯海洋システムの統合的理解を深めることが必要である。これらを実現・推進していくためには、分野横断型の科学的課題を解決するための大規模プロジェクトの立案、実施が鍵となる。プロジェクトを通して研究基盤を進展させるとともに、その利活用を通じて各分野の研究員の連携・協働をより一層強化することが、地球システム全体の変動機構の理解や予測向上に大きく貢献することが期待される。

今後は、科学者の果たすべき役割として、学術的知見を深めることだけでなく、環境変動・変化に関する社会経済的な損害に関して、科学的知見に基づく対策・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あろう。そのため、好奇心に突き動かされた科学と、社会要請に対応するための科学の両方の適度なバランスを、個人あるいはコミュニティで考えていくことが、今後の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を契機として、個々の研究成果が、海洋学・環境学全体の発展においてどのような位置づけにあるのか、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。

謝辞

本稿の作成にあたり、以下の方々（敬称略）と2名の匿名の査読者から貴重な助言をいただきました：相木秀則、植木巖、江淵直人、岡英太郎、桂将太、須賀利雄、永野憲、西岡純、長谷川拓也、升本順夫。深く感謝申し上げます。

References

- Ando, K., Y. Kuroda, Y. Fujii, T. Fukuda, T. Hasegawa, T. Horii, Y. Ishihara, Y. Kashino, Y. Masumoto, K. Mizuno, M. Nagura, and I. Ueki (2017): Fifteen years progress of the TRITON array in the Western Pacific and Eastern Indian Oceans. *J. Oceanogr.*, **73**, 403-426.
- Ando, K. *et al.* (2021): Half-century of scientific advancements since the Cooperative Study of the Kuroshio and Adjacent Regions (CSK) Programme—Need for a new Kuroshio research. *Prog. Oceanogr.*, **193**, 102513.
- Anthony, K. *et al.* (2017): New interventions are needed to save coral reefs. *Nat. Ecol. Evol.*, **1**, 1420-1422.
- Ashok, K., and T. Yamagata (2009): The El Niño with a difference. *Nature*, **461**, 481-484.
- Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata (2007): El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res. Oce.*, **112**, 1-27.
- Battaglia, G., and F. Joos (2018): Hazards of decreasing marine oxygen: the near-term and millennial-scale benefits of meeting the Paris climate targets. *Earth Syst. Dynam.*, **9**, 797-816.
- Bakker, D. C. E. *et al.* (2016): A multi-decade record of high quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth Syst. Sci. Data*, **8**, 383-413.
- Barkley, H. C., A. L. Cohen, N. R. Mollica, R. E. Brainard, H. E. Rivera, T. M. DeCarlo, G. P. Lohmann, E. J. Drenkard, A. E. Alpert, C. W. Young, B. Vargas-Ángel, K. C. Lino, T. A. Oliver, K. R. Pietro, and V. H. Luu (2018): Repeat bleaching of a central Pacific coral reef over the past six decades (1960-2016). *Commun. Biol.*, **1**, 177.
- Beal, L. M. *et al.* (2020): A Road Map to IndOOS-2: Better observations of the rapidly warming Indian Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **101**, 1891-1913.
- Behrenfeld, M. J., K. Worthington, R. M. Sherrell, F. P. Chavez, P. Strutton, M. McPhaden, and D. M. Shea (2006): Controls on tropical Pacific Ocean productivity revealed through nutrient stress diagnostics. *Nature*, **442**, 1025-1028.
- Behrenfeld, M. J., P. Gaube, A. D. Penna, R. T. O'Malley, W. J. Burt, Y. Hu, P. S. Bontempi, D. K. Steinberg, E. S. Boss, D. A. Siegel, C. A. Hostetler, P. D. Tortell, and S. C. Doney (2019): Global satellite-observed daily vertical migrations of ocean animals. *Nature*, **576**, 257-261.
- Bellwood, D. R., T. P. Hughes, C. Folke, and M. Nyström (2004): Confronting the coral reef crisis. *Nature*, **429**, 827-833.
- Berthelot, H., M. Benavides, P. H. Moisander, O. Grosso, and S. Bonnet (2017): High-nitrogen fixation rates in the particulate and dissolved pools in the Western Tropical Pacific (Solomon and Bismarck Seas). *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 8414-8423.
- Bertrand, A., M. Lengaigne, K. Takahashi, A. Avadí, F. Poulain, and C. Harrod (2020): El Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on fisheries and aquaculture. FAO. doi:10.4060/ca8348en.
- Bittig, H. C. *et al.* (2019): A BGC-Argo guide: Planning, deployment, data handling and usage. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00502.
- Bonan, G. B., and S. C. Doney (2018): Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models. *Science*, **359**, 8328. doi:10.1126/science.aam8328.
- Bonnet, S., I. C. Biegala, P. Dutrieux, L. O. Slemons, and D. G. Capone

- (2009): Nitrogen fixation in the western equatorial Pacific: Rates, diazotrophic cyanobacterial size class distribution, and biogeochemical significance. *Global Biogeochem. Cycles*, **23**, doi:10.1029/2008GB003439.
- Bracher, A. *et al.* (2017): Obtaining phytoplankton diversity from ocean color: A scientific roadmap for future development. *Front. Mar. Sci.*, **4**, doi:10.3389/fmars.2017.00055.
- Brainard, R. E., T. Oliver, M. J. McPhaden, A. Cohen, R. Venegas, A. Heenan, B. Vargas-Ángel, R. Rotjan, S. Mangubhai, E. Flint, and S. A. Hunter (2018): Ecological impacts of the 2015/16 El Niño in the central equatorial Pacific. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, 21–26.
- Brett, A., J. Leape, M. Abbott, H. Sakaguchi, L. Cao, K. Chand, Y. Golbuu, T. J. Martin, J. Mayorga, and M. S. Myksovoll (2020): Ocean data need a sea change to help navigate the warming world. *Nature*, **582**, 181–183.
- Brewin, R. J. W., T. Hirata, N. J. Hardman-Mountford, S. J. Lavender, S. Sathyendranath, and R. Barlow (2012): The influence of the Indian Ocean Dipole on interannual variations in phytoplankton size structure as revealed by Earth Observation. *Deep Sea Res. Part II*, **77**, 117–127.
- Cai, W., A. Santoso, G. Wang, E. Weller, L. Wu, K. Ashok, Y. Masumoto, and T. Yamagata (2014): Increased frequency of extreme Indian ocean dipole events due to greenhouse warming. *Nature*, **510**, 254–258.
- Cai, W., G. Wang, A. Santoso, M. J. McPhaden, L. Wu, F.-F. Jin, A. Timmermann, M. Collins, G. Vecchi, M. Lengaigne, M. H. England, D. Dommenget, K. Takahashi, and E. Guilyardi (2015): Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nat. Clim. Chang.*, **5**, 132–137.
- Cai, W. *et al.* (2019): Pantropical climate interactions. *Science*, **363**, 4236.
- Cai, W., K. Yang, L. Wu, G. Huang, A. Santoso, B. Ng, G. Wang, and T. Yamagata (2021): Opposite response of strong and moderate positive Indian Ocean Dipole to global warming. *Nat. Clim. Chang.*, **11**, 27–32.
- Capotondi, A., A. T. Wittenberg, M. Newman, E. Di Lorenzo, J.-Y. Yu, P. Braconnot, J. Cole, B. Dewitte, B. Giese, E. Guilyardi, F.-F. Jin, K. Karnauskas, B. Kirtman, T. Lee, N. Schneider, Y. Xue, and S.-W. Yeh (2015): Understanding ENSO diversity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 921–938.
- Capotondi, A. *et al.* (2019): Observational needs supporting marine ecosystems modeling and forecasting: From the global ocean to regional and coastal systems. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00623.
- Chai, F., K. S. Johnson, H. Claustre, X. Xing, Y. Wang, E. Boss, S. Riser, K. Fennel, O. Schofield, and A. Sutton (2020): Monitoring ocean biogeochemistry with autonomous platforms. *Nat. Rev. Earth Environ.*, **1**, 315–326.
- Chang, Y. L. K., Y. Miyazawa, T. Kodaira, and S. Behera (2018): Philippines-Taiwan Oscillations and its connection to tropical cyclone frequency in the western North Pacific Ocean. *Sci. Rep.*, **8**, doi:10.1038/s41598-018-35617-8.
- Chappell, P. D., J. Vedmati, K. E. Selph, H. A. Cyr, B. D. Jenkins, M. R. Landry, and J. W. Moffett (2016): Preferential depletion of zinc within Costa Rica upwelling dome creates conditions for zinc co-limitation of primary production. *J. Plankton Res.*, **38**, 244–255.
- Cheung, S., R. Nitanai, C. Tsurumoto, H. Endo, S. Nakaoka, W. Cheah, J. F. Lorda, X. Xia, H. Liu, and K. Suzuki (2020): Physical forcing controls the basin-scale occurrence of nitrogen-fixing organisms in the North Pacific Ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, **34**, doi:10.1029/2019GB006452.
- Cheung, S., J. P. Zehr, X. Xia, C. Tsurumoto, H. Endo, S. Nakaoka, W. Mak, K. Suzuki, and H. Liu (2021): Gamma4: a genetically versatile Gammaproteobacterial *nifH* phylotype that is widely distributed in the North Pacific Ocean. *Environ. Microbiol.*, **23**, 4246–4259.
- Chiba, S., S. Batten, K. Sasaoka, Y. Sasai, and H. Sugisaki (2012): Influence of the Pacific Decadal Oscillation on phytoplankton phenology and community structure in the western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, 15603.
- Chikamoto, Y., A. Timmermann, J.-J. Luo, T. Mochizuki, M. Kimoto, M. Watanabe, M. Ishii, S.-P. Xie, and F.-F. Jin (2015): Skilful multi-year predictions of tropical trans-basin climate variability. *Nat. Commun.*, **6**, 6869.
- Coale, K. H. *et al.* (1996): A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, **383**, 495–501.
- Counillon, F., N. Keenlyside, T. Toniazzi, S. Koseki, T. Demissie, I. Bethke, and Y. Wang (2021): Relating model bias and prediction skill in the equatorial Atlantic. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-020-05605-8.
- Currie, J. C., M. Lengaigne, J. Vialard, D. M. Kaplan, O. Aumont, S. W. A. Naqvi, and O. Maury (2013): Indian Ocean Dipole and El Niño/Southern Oscillation impacts on regional chlorophyll anomalies in the Indian Ocean. *Biogeosciences*, **10**, 6677–6698.
- de Vargas, C. *et al.* (2015): Eukaryotic plankton diversity in the sunlit ocean. *Science*, **348**, 1261605.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata (2013): Predictability of the Ningaloo Niño/Niña. *Sci. Rep.*, **3**, doi:10.1038/srep02892.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata (2015a): An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s. *J. Geophys. Res. Oceans*, **120**, 1388–1396.
- Doi, T., C. Yuan, S. K. Behera, and T. Yamagata (2015b): Predictability of the California Niño/Niña. *J. Climate*, **28**, 7237–7249.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata (2016): Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **8**, 1847–1867.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata (2019): Merits of a 108-member ensemble system in ENSO and IOD predictions. *J. Climate*, **32**, 957–972.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata (2020a): Wintertime impacts of the 2019 super IOD on East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL089456.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata (2020b): Predictability of the super IOD event in 2019 and its link with El Niño Modoki. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi:10.1029/2019GL086713.
- Doi, T., M. Nonaka, and S. Behera (2020c): Skill assessment of seasonal-to-interannual prediction of sea level anomaly in the North Pacific based on the SINTEX-F climate model. *Front. Mar. Sci.*, **7**, doi:10.3389/fmars.2020.546587.
- Doi, T., G. Sakurai, and T. Iizumi (2020d): Seasonal predictability of four major crop yields worldwide by a hybrid system of dynamical climate prediction and eco-physiological crop-growth simulation. *Front. Sustain. Food Syst.*, **4**, doi:10.3389/fsufs.2020.00084.
- Doney, S., W. Balch, V. Fabry, and R. Feely (2009): Ocean acidification: A critical emerging problem for the ocean sciences. *Oceanogr.*, **22**, 16–25.
- Dong, L., and M. J. McPhaden (2018): Unusually warm Indian Ocean sea surface temperatures help to arrest development of El Niño in 2014. *Sci. Rep.*, **8**, doi:10.1038/s41598-018-20294-4.

- Endo, S., and T. Tozuka (2016): Two flavors of the Indian Ocean Dipole. *Clim. Dyn.*, **46**, 3371-3385.
- Eppley, R. (1972): Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.*, **70**, 1063-1085.
- Eyre, B. D., T. Cyronak, P. Drupp, E. H. De Carlo, J. P. Sachs, and A. J. Andersson (2018): Coral reefs will transition to net dissolving before end of century. *Science*, **359**, 908-911.
- Fan, L., Q. Liu, C. Wang, and F. Guo (2017): Indian Ocean Dipole modes associated with different types of ENSO development. *J. Climate*, **30**, 2233-2249.
- Feely, R. A., R. Wanninkhof, C. Goyet, D. E. Archer, and T. Takahashi (1997): Variability of CO₂ distributions and sea-air fluxes in the central and eastern equatorial Pacific during the 1991-1994 El Niño. *Deep Sea Res. Part II*, **44**, 1851-1867.
- Feng, M., M. J. McPhaden, S. P. Xie, and J. Hafner (2013): La Niña forces unprecedented Leeuwin Current warming in 2011. *Sci. Rep.*, **3**, doi:10.1038/srep01277.
- Fennel, K. *et al.* (2019): Advancing marine biogeochemical and ecosystem reanalyses and forecasts as tools for monitoring and managing ecosystem health. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00089.
- Foltz, G. R. *et al.* (2019): The Tropical Atlantic Observing System. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00206.
- Friedlingstein, P. *et al.* (2019): Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data*, **11**, 1783-1838.
- Fujii, Y. *et al.* (2019): Observing system evaluation based on ocean data assimilation and prediction systems: On-going challenges and a future vision for designing and supporting ocean observational networks. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00417.
- Fujita, M., T. Fukuda, I. Ueki, Q. Moteki, T. Ushiyama, and K. Yoneyama (2020): Experimental observations of precipitable water vapor over the open ocean collected by autonomous surface vehicles for real-time monitoring applications. *SOLA*, **16**, 19-24.
- Gaubert, B. *et al.* (2016): Toward a chemical reanalysis in a coupled chemistry-climate model: An evaluation of MOPITT CO assimilation and its impact on tropospheric composition. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 7310-7343.
- Gehlen, M., R. Barciela, L. Bertino, P. Brasseur, M. Butenschön, F. Chai, A. Crise, Y. Drillet, D. Ford, D. Lavoie, P. Lehodey, C. Perruche, A. Samuelsen, and E. Simon (2015): Building the capacity for forecasting marine biogeochemistry and ecosystems: recent advances and future developments. *J. Oper. Oceanogr.*, **8**, 168-187.
- Gierach, M. M., T. Lee, D. Turk, and M. J. McPhaden (2012): Biological response to the 1997-98 and 2009-10 El Niño events in the equatorial Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi:10.1029/2012GL051103.
- Gieskes, W. W. C., and G. W. Kraay (1989): Estimating the carbon-specific growth rate of the major algal species groups in eastern Indonesian waters by ¹⁴C labeling of taxon-specific carotenoids. *Deep Sea Res. Part I*, **36**, 1127-1139.
- Gilmour, J. P., L. D. Smith, A. J. Heyward, A. H. Baird, and M. S. Pratchett (2013): Recovery of an isolated coral reef system following severe disturbance. *Science*, **340**, 69-71.
- Gomes, H. do R., S. DeRada, J. I. Goes, and F. Chai (2016): Examining features of enhanced phytoplankton biomass in the Bay of Bengal using a coupled physical-biological model. *J. Geophys. Res. Oce.*, **121**, 5112-5133.
- Hackert, E., R. M. Kovach, A. Molod, G. Vernieres, A. Borovikov, J. Marshak, and Y. Chang (2020): Satellite sea surface salinity observations impact on El Niño/Southern Oscillation predictions: Case studies from the NASA GEOS seasonal forecast system. *J. Geophys. Res. Oce.*, **125**, doi:10.1029/2019JC015788.
- Hajima, T., M. Kawamiya, M. Watanabe, E. Kato, K. Tachiiri, M. Sugiyama, S. Watanabe, H. Okajima, and A. Ito (2014): Modeling in Earth system science up to and beyond IPCC AR5. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **29**, doi:10.1186/s40645-014-0029-y.
- Ham, Y.-G., Y.-S. Joo, and J.-Y. Park (2021): Mechanism of skillful seasonal surface chlorophyll prediction over the southern Pacific using a global earth system model. *Clim. Dyn.*, **56**, 45-64.
- Harcourt, R. *et al.* (2019): Animal-Borne Telemetry: An integral component of the ocean observing toolkit. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00326.
- Harris, S., and C. Lucas (2019): Understanding the variability of Australian fire weather between 1973 and 2017. *PLoS ONE*, **14**, e0222328.
- 橋濱史典・額顕慎也・近藤能子・佐々木克徳・杉本周作・高橋一生・長井健容・西岡純・林田博士・平井惇也 (2021): 海洋学の10年展望2021: 中緯度。海の研究, **30**, 131-158.
- Hashizume, M., T. Terao, and N. Minakawa (2009): The Indian Ocean Dipole and malaria risk in the highlands of western Kenya. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **106**, 1857-1862.
- Hashizume, M., L. F. Chaves, and N. Minakawa (2012): Indian Ocean Dipole drives malaria resurgence in East African highlands. *Sci. Rep.*, **2**, doi:10.1038/srep00269.
- Hayashi, M., and M. Watanabe (2017): ENSO complexity induced by state dependence of Westerly wind events. *J. Climate*, **30**, 3401-3420.
- Hendon, H. H., E. Lim, G. Wang, O. Alves, and D. Hudson (2009): Prospects for predicting two flavors of El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, doi:10.1029/2009GL040100.
- Hermes, J. C. *et al.* (2019): A sustained ocean observing system in the Indian Ocean for climate related scientific knowledge and societal needs. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00355.
- Hillebrand, H. (2004): On the generality of the latitudinal devirity gradient. *Am. Nat.*, **163**, doi:10.1086/381004.
- 平井惇也・宮正樹・藤木徹一・吉田聡・乙坂重嘉・埴山秀樹・加古真一郎・片岡智哉・松岡大祐・日高弥子・杉山大祐・小嵩不二夫 (2021): 海洋学の10年展望: 新たな手法と問題。海の研究, **30**, 227-253.
- Hirata, T., S. Saux-Picart, T. Hashioka, M. Aita-Noguchi, H. Sumata, M. Shigemitsu, I. Allen, and Y. Yamanaka (2012): A comparison between phytoplankton community structures derived from a global 3D ecosystem model and satellite observation. *J. Mar. Syst.*, **109**, 129-137.
- Hoegh-Guldberg, O. *et al.* (2009): *The Coral Triangle and Climate Change: Ecosystems, People and Societies at Risk* 276 pp. WWF Australia, Sydney, Australia, https://wwf.panda.org/discover/knowledge_hub/where_we_work/coraltriangle/.
- Horii, T., I. Ueki, and K. Ando (2018): Coastal upwelling events along the southern coast of Java during the 2008 positive Indian Ocean Dipole. *J. Oceanogr.*, **74**, 499-508.
- Houk, P., A. Yalon, S. Maxin, C. Starsinic, A. McInnis, M. Gouezo, Y. Golbuu, and R. van Woesik (2020): Predicting coral-reef futures from El Niño and Pacific Oscillation events. *Sci. Rep.*, **10**, 7735.
- Hsiung, K.-M., S. Kimura, Y.-S. Han, A. Takeshige, and Y. Iizuka (2018): Effect of ENSO events on larval and juvenile duration and transport

- of Japanese eel (*Anguilla japonica*). *PLoS ONE*, **13**, e0195544.
- Hu, S., and A. Fedorov (2016): Exceptionally strong easterly wind burst stalling El Niño of 2014. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **113**, 2005–2010.
- Hughes, T. P. (2003): Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, **301**, 929–933.
- Hughes, T. P. *et al.* (2018): Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, **359**, doi:10.1126/science.aan8048.
- Iida, Y., Y. Takatani, A. Kojima, and M. Ishii (2021): Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables. *J. Oceanogr.*, **77**, 323–358.
- Iizumi, T., H. Sakuma, M. Yokozawa, J. J. Luo, A. J. Challinor, M. E. Brown, G. Sakurai, and T. Yamagata (2013): Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production. *Nat. Clim. Chang.*, **3**, 904–908.
- Iizumi, T., J. J. Luo, A. J. Challinor, G. Sakurai, M. Yokozawa, H. Sakuma, M. E. Brown, and T. Yamagata (2014): Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nat. Commun.*, **5**, doi:10.1038/ncomms4712.
- Ikeda, T., S. Behera, Y. Morioka, N. Minakawa, M. Hashizume, A. Tsuzuki, R. Maharaj, and P. Kruger (2017): Seasonally lagged effects of climatic factors on malaria incidence in South Africa. *Sci. Rep.*, **7**, 2458.
- Ilyina, T. *et al.* (2021): Predictable variations of the carbon sinks and atmospheric CO₂ growth in a multi-model framework. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, doi:10.1029/2020GL090695.
- Imada, Y., and M. Kimoto (2012): Parameterization of tropical instability waves and examination of their impact on ENSO characteristics. *J. Climate*, **25**, 4568–4581.
- Imada, Y., H. Tatebe, M. Watanabe, M. Ishii, and M. Kimoto (2016): South Pacific influence on the termination of El Niño in 2014. *Sci. Rep.*, **6**, doi:10.1038/srep30341.
- International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), (2020): Synergy between ocean colour and biogeochemical/ecosystem models. *IOCCG Report Series*, **19**, doi: 10.25607/OBP-711.
- IPCC (2013): Evaluation of climate models, p. 741–866. In *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, doi:10.1017/CBO9781107415324.020.
- Ishii, M. *et al.* (2014): Air-sea CO₂ flux in the Pacific Ocean for the period 1990–2009. *Biogeosci.*, **11**, 709–734.
- Ishii, M. *et al.* (2020): Ocean acidification from below in the tropical Pacific. *Global Biogeochem. Cycles*, **34**, doi:10.1029/2019GB006368.
- Iskandar, I., W. Mardiansyah, D. O. Lestari, and Y. Masumoto (2020): What did determine the warming trend in the Indonesian sea? *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, doi:10.1186/s40645-020-00334-2.
- Iskandar, I., S. A. Rao, and T. Tozuka (2009): Chlorophyll-*a* bloom along the southern coasts of Java and Sumatra during 2006. *Int. J. Remote Sens.*, **30**, 663–671.
- 岩本洋子・相木秀則・磯口治・大林由美子・近藤文義・近藤能子・西岡純 (2021): 海洋学の10年展望2021: 大気海洋境界, 海の研究, **30**, 199–225.
- Jacox, M. G. *et al.* (2020): Seasonal-to-interannual prediction of North American coastal marine ecosystems: Forecast methods, mechanisms of predictability, and priority developments. *Prog. Oceanogr.*, **183**, doi:10.1016/j.pocean.2020.102307.
- Jochum, M., S. Yeager, K. Lindsay, K. Moore, and R. Murtugudde (2010): Quantification of the feedback between phytoplankton and ENSO in the Community Climate System Model. *J. Climate*, **23**, 2916–2925.
- Kang, X., R. H. Zhang, C. Gao, and J. Zhu (2017): An improved ENSO simulation by representing chlorophyll-induced climate feedback in the NCAR Community Earth System Model. *Sci. Rep.*, **7**, doi:10.1038/s41598-017-17390-2.
- Kataoka, T., T. Tozuka, S. K. Behera, and T. Yamagata (2014): On the Ningaloo Niño/Nina. *Clim. Dyn.*, **43**, 1463–1482.
- Katsura, S., and J. Sprintall (2020): Seasonality and formation of barrier layers and associated temperature inversions in the eastern tropical North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **50**, 791–808.
- Kawamiya, M., T. Hajima, K. Tachiiri, S. Watanabe, and T. Yokohata (2020): Two decades of Earth system modeling with an emphasis on Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC). *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, doi:10.1186/s40645-020-00369-5.
- Keller, D. P., A. Oschlies, and M. Eby (2012): A new marine ecosystem model for the University of Victoria Earth System Climate Model. *Geosci. Model Dev.*, **5**, 1195–1220.
- Kessler, W. S., S. E. Wijffels, S. Cravatte, and N. Smith (2019): TPOS 2020 Second Report. <https://tpos2020.org/project-reports/second-report/>.
- 木田新一郎・栗原晴子・大林由美子・川合美千代・近藤能子・西岡純 (2021): 海洋学の10年展望2021: 沿岸域, 海の研究, **30**, 87–104.
- Kido, S., T. Tozuka, and W. Han (2019): Experimental assessments on impacts of salinity anomalies on the positive Indian Ocean Dipole. *J. Geophys. Res. Océ.*, **124**, 9462–9486.
- Kim, Y., J. V. Ratnam, T. Doi, Y. Morioka, S. Behera, A. Tsuzuki, N. Minakawa, N. Sweijid, P. Kruger, R. Maharaj, C. C. Imai, C. Fook, S. Ng, Y. Chung, and M. Hashizume (2020): Malaria predictions based on seasonal climate forecasts in South Africa: A time series distributed lag nonlinear model. *Sci. Rep.*, **10**, doi:10.1038/s41598-020-58890-y.
- Kirtman, B. P. *et al.* (2014): The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; Phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 585–601.
- Kohyama, T., D. L. Hartmann, and D. S. Battisti (2017): La Niña-like mean-state response to global warming and potential oceanic roles. *J. Climate*, **30**, 4207–4225.
- Kondo, Y., and J. W. Moffett (2015): Iron redox cycling and subsurface offshore transport in the eastern tropical South Pacific oxygen minimum zone. *Mar. Chem.*, **168**, 95–103.
- Kosaka, Y., and S.-P. Xie (2013): Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, **501**, 403–407.
- Landry, M. R. *et al.* (1997): Iron and grazing constraints on primary production in the central equatorial Pacific: An EqPac synthesis. *Limnol. Oceanogr.*, **42**, 405–418.
- Lavín, M. F., P. C. Fiedler, J. A. Amador, L. T. Ballance, J. Färber-Lorda, and A. M. Mestas-Núñez (2006): A review of eastern tropical Pacific oceanography: Summary. *Prog. Oceanogr.*, **69**, 391–398.
- Le Borgne, R., R. T. Barber, T. Delcroix, H. Y. Inoue, D. J. Mackey, and M. Rodier (2002): Pacific warm pool and divergence: temporal and zonal variations on the equator and their effects on the biological pump. *Deep Sea Res. Part II*, **49**, 2471–2512.
- Le Borgne, R., V. Allain, S. P. Griffiths, R. J. Matear, A. D. McKinnon, and A. J. Richardson (2011): Vulnerability of open ocean food webs in the tropical Pacific to climate change, p. 189–250. In *Vulnerability of Tropical Pacific Fisheries and Aquaculture to Climate Change*, edited by J. D. Bell, J.

- E. Johnson, and A. J. Hobday, Secretariat of the Pacific Community, Noumea, New Caledonia.
- Lee, K.-W., S.-W. Yeh, J.-S. Kug, and J.-Y. Park (2014): Ocean chlorophyll response to two types of El Niño events in an ocean-biogeochemical coupled model. *J. Geophys. Res. Oce.*, **119**, 933–952.
- Lehodey, P., A. Bertrand, A. J. Hobday, H. Kiyofuji, S. McClatchie, C. E. Menkès, G. Pilling, J. Polovina, and D. Tommasi (2020): ENSO impact on marine fisheries and ecosystems, p. 429–451. In *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*, edited by M. J. McPhaden, A. Santoso, and W. Cai, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA, doi:10.1002/9781119548164.ch19.
- Le Nohaïc, M., C. L. Ross, C. E. Cornwall, S. Comeau, R. Lowe, M. T. McCulloch, and V. Schoepf (2017): Marine heatwave causes unprecedented regional mass bleaching of thermally resistant corals in northwestern Australia. *Sci. Rep.*, **7**, doi:10.1038/s41598-017-14794-y.
- Lewis, M. R., J. J. Cullen, and T. Platt (1983): Phytoplankton and thermal structure in the upper ocean: Consequences of nonuniformity in chlorophyll profile. *J. Geophys. Res.*, **88**, 2565–2570.
- L'Heureux, M. L., A. F. Z. Levine, M. Newman, C. Ganter, J.-J. Luo, M. K. Tippett, and T. N. Stockdale (2020): ENSO prediction, p. 227–246. In *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*, edited by M. J. McPhaden, A. Santoso, and W. Cai, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA, doi:10.1002/9781119548164.ch10.
- Lin, I.-L., S. J. Camargo, C. M. Patricola, J. Boucharel, S. Chand, P. Klotzbach, J. C. L. Chan, B. Wang, P. Chang, T. Li, and F.-F. Jin (2020): ENSO and tropical cyclones, p. 377–408. In *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*, edited by M. J. McPhaden, A. Santoso, and W. Cai, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA, doi:10.1002/9781119548164.ch17.
- Long, M. C., C. Deutsch, and T. Ito (2016): Finding forced trends in oceanic oxygen. *Global Biogeochem. Cycles*, **30**, 381–397.
- Lovelock, C. E., I. C. Feller, R. Reef, S. Hickey, and M. C. Ball (2017): Mangrove dieback during fluctuating sea levels. *Sci. Rep.*, **7**, doi:10.1038/s41598-017-01927-6.
- Luo, J.-J., S. Masson, S. Behera, and T. Yamagata (2007): Experimental forecasts of the Indian Ocean Dipole using a coupled OAGCM. *J. Climate*, **20**, 2178–2190.
- MacIntyre, H. L., T. M. Kana, T. Anning, and R. J. Geider (2002): Photoacclimation of photosynthesis irradiance response curves and photosynthetic pigments in microalgae and cyanobacteria. *J. Phycol.*, **38**, 17–38.
- Maes, C., and S. Belamari (2011): On the impact of salinity barrier layer on the Pacific Ocean mean state and ENSO. *SOLA*, **7**, 97–100.
- March, D., L. Boehme, J. Tintoré, P. J. Vélez-Belchi, and B. J. Godley (2019): Towards the integration of animal-borne instruments into global ocean observing systems. *Glob. Chang. Biol.*, **26**, doi:10.1111/gcb.14902.
- Marsac, F. (2017): The Seychelles tuna fishery and climate change, p. 523–568. In *Climate Change Impacts on Fisheries and Aquaculture*, edited by B. F. Phillips, M. Pérez-Ramírez, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, doi:10.1002/9781119154051.ch16.
- Martínez-Rey, J., L. Bopp, M. Gehlen, A. Tagliabue, and N. Grube (2015): Projections of oceanic N₂O emissions in the 21st century using the IPSL Earth system model. *Biogeosciences*, **12**, 4133–4148.
- Masuda, S., J. Philip Matthews, Y. Ishikawa, T. Mochizuki, Y. Tanaka, and T. Awaji (2015): A new approach to El Niño prediction beyond the spring season. *Sci. Rep.*, **5**, doi:10.1038/srep16782.
- 松本和彦 (2012): 太平洋赤道域における ENSO に呼応した植物プランクトン群集動態および一次生産の変動に関する研究. 東京大学博士論文, 乙第17760号
- Matsumoto, K., and K. Furuya (2011): Variations in phytoplankton dynamics and primary production associated with ENSO cycle in the western and central equatorial Pacific during 1994–2003. *J. Geophys. Res. Oce.*, **116**, doi:10.1029/2010JC006845.
- Matsumoto, K., K. Furuya, and T. Kawano (2004): Association of picoplankton distribution with ENSO events in the equatorial Pacific between 145°E and 160°W. *Deep Sea Res. Part I*, **51**, 1851–1871.
- Meehl, G. A., A. Hu, and H. Teng (2016): Initialized decadal prediction for transition to positive phase of the Interdecadal Pacific Oscillation. *Nat. Commun.*, **7**, doi:10.1038/ncomms11718.
- Messié, M., and F. P. Chavez (2013): Physical-biological synchrony in the global ocean associated with recent variability in the central and western equatorial Pacific. *J. Geophys. Res. Oce.*, **118**, 3782–3794.
- Midorikawa, T., M. Ishii, S. Saito, D. Sasano, N. Kosugi, T. Motoi, H. Kamiya, A. Nakadate, K. Nemoto, and H. Y. Inoue (2010): Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific. *Tellus B*, **62**, 649–659.
- Miyakawa, T., H. Yashiro, T. Suzuki, H. Tatebe, and M. Satoh (2017): A Madden-Julian Oscillation event remotely accelerates ocean upwelling to abruptly terminate the 1997/1998 super El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 9489–9495.
- Miyama, T., and T. Hasegawa (2014): Impact of sea surface temperature on westerlies over the western Pacific warm pool: Case study of an event in 2001/02. *SOLA*, **10**, 5–9.
- Moffett, J. W., T. J. Goepfert, and S. W. A. Naqvi (2007): Reduced iron associated with secondary nitrite maxima in the Arabian Sea. *Deep Sea Res. Part I*, **54**, 1341–1349.
- Muller-Karger, F. E. *et al.* (2018): Advancing marine biological observations and data requirements of the complementary essential ocean variables (EOVs) and essential biodiversity variables (EBVs) frameworks. *Front. Mar. Sci.*, **5**, doi:10.3389/fmars.2018.00211.
- Nagano, A., and K. Ando (2020): Saildrone-observed atmospheric boundary layer response to winter mesoscale warm spot along the Kuroshio south of Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, doi:10.1186/s40645-020-00358-8.
- Nagano, A., T. Hasegawa, I. Ueki, and K. Ando (2017): El Niño–Southern Oscillation–time scale covariation of sea surface salinity and freshwater flux in the western tropical and northern subtropical Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 6895–6903.
- Nakamoto, S., S. Prasanna Kumar, J. M. Oberhuber, J. Ishizaka, K. Muneyama, and R. Frouin (2001): Response of the equatorial Pacific to chlorophyll pigment in a mixed layer isopycnal ocean general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2021–2024.
- Nakaoka, S., M. Telszewski, Y. Nojiri, S. Yasunaka, C. Miyazaki, H. Mukai, and N. Usui (2013): Estimating temporal and spatial variation of ocean surface pCO₂ in the North Pacific using a self-organizing map neural network technique. *Biogeosciences*, **10**, 6093–6106.
- Oettli, P., Y. Morioka, and T. Yamagata (2016): A regional climate mode discovered in the North Atlantic: Dakar Niño/Niña. *Sci. Rep.*, **6**, doi:10.1038/srep18782.
- Oettli, P., S. K. Behera, and T. Yamagata (2018): Climate based predictability of oil palm tree yield in Malaysia. *Sci. Rep.*, **8**, 10.1038/s41598-018-

20298-0.

- 岡頭・大林由美子・勝又勝郎・高橋一生・山下洋平・横川太一 (2021): 海洋学の10年展望2021: 深層, 海の研究, **30**, 179-198.
- 岡英太郎・磯辺篤彦・市川香・升本順夫・須賀利雄・川合義美・大島慶一郎・島田浩二・羽角博康・見延庄士郎・早稲田卓爾・岩坂直人・河宮未知生・伊藤幸彦・久保田雅久・中野俊也・日比谷紀之・寄高博行 (2013): 海洋学の10年展望 (I) —日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から—, 海の研究, **22**, 191-218.
- Oka, E., M. Ishii, T. Nakano, T. Suga, S. Kouketsu, M. Miyamoto, H. Nakano, B. Qiu, S. Sugimoto, and Y. Takatani (2018): Fifty years of the 137°E repeat hydrographic section in the western North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **74**, 115-145.
- Oliver, E. C. J. *et al.* (2018): Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nat. Commun.*, **9**, doi:10.1038/s41467-018-03732-9.
- Omand, M. M., R. Govindarajan, J. He, and A. Mahadevan (2020): Sinking flux of particulate organic matter in the oceans: Sensitivity to particle characteristics. *Sci. Rep.*, **10**, doi:10.1038/s41598-020-60424-5.
- Ono, H., N. Kosugi, K. Toyama, H. Tsujino, A. Kojima, K. Enyo, Y. Iida, T. Nakano, and M. Ishii (2019): Acceleration of ocean acidification in the western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 13161-13169.
- Park, J.-Y., C. A. Stock, J. P. Dunne, X. Yang, and A. Rosati (2019): Seasonal to multiannual marine ecosystem prediction with a global Earth system model. *Science*, **365**, 284-288.
- Park, J. -Y., J. P. Dunne, and C. A. Stock (2018): Ocean chlorophyll as a precursor of ENSO: An earth system modeling study. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 1939-1947.
- Pennington, J. T., K. L. Mahoney, V. S. Kuwahara, D. D. Kolber, R. Calienes, and F. P. Chavez (2006): Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.*, **69**, 285-317.
- Philander, S. G. (1990): *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press, Cambridge, USA, 293 pp.
- Pianka, E. R. (1966): Latitudinal gradients in species diversity: a review of concepts. *Am. Nat.*, **100**, 33-46.
- Pinardi, N. *et al.* (2019): The joint IOC (of UNESCO) and WMO collaborative effort for Met-Ocean services. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00410.
- Pujiana, K., and M. J. McPhaden (2018): Ocean surface layer response to convectively coupled Kelvin waves in the eastern equatorial Indian Ocean. *J. Geophys. Res. Oce.*, **123**, 5727-5741.
- Racault, M.-F., S. Sathyendranath, R. J. W. Brewin, D. E. Raitsos, T. Jackson, and T. Platt (2017): Impact of El Niño variability on oceanic phytoplankton. *Front. Mar. Sci.*, **4**, doi:10.3389/fmars.2017.00133.
- Rafter, P. A., D. M. Sigman, and K. R. M. Mackey (2017): Recycled iron fuels new production in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Nat. Commun.*, **8**, doi:10.1038/s41467-017-01219-7.
- Redalje, D. G., and Laws, E. A. (1981): A new method for estimating phytoplankton growth rates and carbon biomass. *Mar. Biol.*, **62**, 73-79.
- Riascos, J. M., J. R. Cantera, and J. F. Blanco-Libreros (2018): Growth and mortality of mangrove seedlings in the wettest neotropical mangrove forests during ENSO: Implications for vulnerability to climate change. *Aquat. Bot.*, **147**, 34-42.
- Rohde, K. (1992): Latitudinal gradients in species diversity: the search for the primary cause. *Oikos*, **65**, 514-527.
- Saji, N. H., and T. Yamagata (2003): Possible impacts of Indian Ocean Dipole mode events on global climate. *Clim. Res.*, **25**, 151-169.
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata (1999): A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, **401**, 360-363.
- Salon, S., G. Cossarini, G. Bolzon, L. Feudale, P. Lazzari, A. Teruzzi, C. Solidoro, and A. Crise (2019): Novel metrics based on Biogeochemical Argo data to improve the model uncertainty evaluation of the CMEMS Mediterranean marine ecosystem forecasts. *Ocean Sci.*, **15**, 997-1022.
- Schmidtko, S., L. Stramma, and M. Visbeck (2017): Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, **542**, 335-339.
- Séférian, R. *et al.* (2020): Tracking improvement in simulated marine biogeochemistry between CMIP5 and CMIP6. *Curr. Clim. Change Rep.*, **6**, 95-119.
- Sen Gupta, A. *et al.* (2020): Drivers and impacts of the most extreme marine heatwave events. *Sci. Rep.*, **10**, doi:10.1038/s41598-020-75445-3.
- Seo, H. (2017): Distinct influence of air-sea interactions mediated by meso-scale sea surface temperature and surface current in the Arabian Sea. *J. Climate*, **30**, 8061-8080.
- Shi, W., and M. Wang (2021): A biological Indian Ocean Dipole event in 2019. *Sci. Rep.*, **11**, doi:10.1038/s41598-021-81410-5.
- Shiozaki, T., T. Kodama, S. Kitajima, M. Sato, and K. Furuya (2013): Advective transport of diazotrophs and importance of their nitrogen fixation on new and primary production in the western Pacific warm pool. *Limnol. Oceanogr.*, **58**, 49-60.
- Siswanto, E., T. Horii, I. Iskandar, J. L. Gaol, R. Y. Setiawan, and R. D. Susanto (2020): Impacts of climate changes on the phytoplankton biomass of the Indonesian Maritime Continent. *J. Mar. Syst.*, **212**, doi:10.1016/j.jmarsys.2020.103451.
- Smith, N. *et al.* (2019): Tropical Pacific Observing System. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00031.
- Song, H.-J., and J.-Y. Park (2021): Bottom-up drivers for global fish catch assessed with reconstructed ocean biogeochemistry from an earth system model. *Climate*, **9**, doi:10.3390/cli9050083.
- Sprintall, J. *et al.* (2019): Detecting change in the Indonesian Seas. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00257.
- Steinberg, D. K., H. W. Ducklow, K. O. Buesseler, and M. C. Bowles (2003): Assessing contributions of JGOFS: previewing studies in ocean ecology, biogeochemistry. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, **84**, 413-413, doi:10.1029/2003EO400007.
- Takahashi, T., S. C. Sutherland, and A. Kozyr (2020): Global ocean surface water partial pressure of CO₂ database (LDEO Database Version 2019): Measurements performed during 1957-2019 (NCEI Accession 0160492). *NOAA Natl. Centers Environ. Inf.*, https://www.ncei.noaa.gov/access/ocean-carbon-data-system/oceans/LDEO_Underway_Database/
- Takaya, Y., I. Ishikawa, C. Kobayashi, H. Endo, and T. Ose (2020): Enhanced Meiyu-Baiu rainfall in early summer 2020: Aftermath of the 2019 super IOD event. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi:10.1029/2020GL090671.
- 田邊智唯 (2002): 西部北太平洋熱帯域におけるカツオの初期生態に関する研究. 水研センター研報, **3**, 63-132.
- Thushara, V., and P. N. Vinayachandran (2020): Unprecedented surface chlorophyll blooms in the southeastern Arabian Sea during an extreme negative Indian Ocean Dipole. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi:10.1029/2019GL085026.

- Tian, F., R. Zhang, and X. Wang (2020): Effects on ocean biology induced by El Niño-accompanied positive freshwater flux anomalies in the tropical Pacific. *J. Geophys. Res. Océ.*, **125**, doi:10.1029/2019JC015790.
- Timmermann, A. *et al.* (2018): El Niño–Southern Oscillation complexity. *Nature*, **559**, 535–545.
- Tompkins, A. M. *et al.* (2017): The climate–system historical forecast Project: providing open access to seasonal forecast ensembles from centers around the globe. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 2293–2301.
- Umatani, S., and T. Yamagata (1991): Response of the eastern tropical Pacific to meridional migration of the ITCZ: The generation of the Costa Rica Dome. *J. Phys. Oceanogr.*, **21**, 346–363.
- van Hooidonk, R., J. A. Maynard, D. Manzello, and S. Planes (2014): Opposite latitudinal gradients in projected ocean acidification and bleaching impacts on coral reefs. *Glob. Change Biol.*, **20**, 103–112.
- Vinogradova, N. *et al.* (2019): Satellite salinity observing system: Recent discoveries and the way forward. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00243.
- Wang, B., R. Wu, and J. X. Fu (2000): Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J. Climate*, **13**, 1517–1536.
- Wang, X., P. Singh, Z. Gao, X. Zhang, Z. I. Johnson, and G. Wang (2014): Distribution and diversity of planktonic fungi in the West Pacific Warm Pool. *PLoS ONE*, **9**, e101523.
- Wanninkhof, R. *et al.* (2019): A surface ocean CO₂ reference network, SOCONET and associated marine boundary layer CO₂ measurements. *Front. Mar. Sci.*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00400.
- Warner, S. J., and J. N. Moum (2019): Feedback of mixing to ENSO phase change. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 13920–13927.
- 渡部雅浩・木本昌秀 (2013): エルニーニョ・南方振動(ENSO)研究の現在(気象研究ノート第228号). 日本気象学会, 東京, 236 pp.
- 渡辺路生・野口(相田)真希・羽島知洋 (2018): 地球システムモデルに組み込む海洋生態系モデルの開発—全球窒素・炭素循環の理解に向けて— 海の研究, **27**, 31–41.
- Watson, A. J., U. Schuster, J. D. Shutler, T. Holding, I. G. C. Ashton, P. Landschützer, D. K. Woolf, and L. Goddijn-Murphy (2020): Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory. *Nat. Commun.*, **11**, 4422, doi:10.1038/s41467-020-18203-3.
- Widlansky, M. J. *et al.* (2017): Multimodel ensemble sea level forecasts for tropical Pacific Islands. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **56**, 849–862.
- Wood, S., C. B. Paris, and E. J. Hendy (2013): Modeling dispersal and connectivity of broadspawning corals at the global scale. *Glob. Ecol. Biogeog.*, **23**, 1–11.
- Worm, B., M. Sandow, A. Oschlies, H. K. Lotze, and R. A. Myers (2005): Global patterns of predator diversity in the open oceans. *Science*, **309**, 1365–1369.
- Wu, Y., and Y. Tang (2019): Seasonal predictability of the tropical Indian Ocean SST in the North American multimodel ensemble. *Clim. Dyn.*, **53**, 3361–3372.
- Xue, J., J.-J. Luo, C. Yuan, and T. Yamagata (2020): Discovery of Chile Niño/Niña. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi:10.1029/2019GL086468.
- Yan, W., X. Feng, W. Zhang, M. Z. Nawaz, T. Luo, R. Zhang, and N. Jiao (2021): Genomes of diverse isolates of *Prochlorococcus* High-Light-Adapted Clade II in the western Pacific Ocean. *Front. Mar. Sci.*, **7**, doi:10.3389/fmars.2020.619826.
- Yasuhara, M. *et al.* (2020): Past and future decline of tropical pelagic biodiversity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **117**, 12891–12896.
- Yasunaka, S., Y. Nojiri, S. Nakaoka, T. Ono, F. A. Whitney, and M. Telszewski (2014): Mapping of sea surface nutrients in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability. *J. Geophys. Res. Océ.*, **119**, 7756–7771.
- Yasunaka, S., S. Kouketsu, P. G. Strutton, A. J. Sutton, A. Murata, S. Nakaoka, and Y. Nojiri (2019): Spatio-temporal variability of surface water pCO₂ and nutrients in the tropical Pacific from 1981 to 2015. *Deep Sea Res. Part II*, **169–170**, 104680.
- Yuan, C., and T. Yamagata (2014): California Niño/Niña. *Sci. Rep.*, **4**, doi:10.1038/srep04801
- Yuan, C., and T. Yamagata (2015): Impacts of IOD, ENSO and ENSO Modoki on the Australian winter wheat yields in recent decades. *Sci. Rep.*, **5**, doi:10.1038/srep17252.
- Zhang, R. H., F. Tian, and X. Wang (2018): A new hybrid coupled model of atmosphere, ocean physics, and ocean biogeochemistry to represent biogeophysical feedback effects in the tropical Pacific. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **10**, 1901–1923.

Decadal vision in oceanography 2021: Tropical oceans

Takeshi Doi^{1*}, Sayaka Yasunaka², Kazutaka Takahashi³,
Michio Watanabe⁴, Tomoki Tozuka^{5,1}, and Haruko Kurihara⁶

Abstract

A review of progress in oceanographic research in the tropics over the past decade is provided. Physical and biogeochemical oceanographic perspectives regarding directions for the next decade are proposed, with a special focus on the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) in the tropical Pacific. Although physical understanding of the ENSO has considerably advanced and its dynamical prediction has now become possible, our understanding of mechanisms and ability to predict variations in the material cycles, biological production, and biodiversity associated with the ENSO is still rudimentary. Because effects of internal natural climate variability on the marine system (e.g., ocean warming, acidification, and deoxygenation) have become more serious with global warming, comprehensive understanding and more accurate prediction of the ENSO and its effects on the tropical ocean system are becoming increasingly important. This research will also be key to anticipating changing societal needs as ocean conditions change. In particular, basin-scale studies based on Biogeochemical Argo floats and earth system models, process-oriented studies based on ship/buoy observations and experiment/observation by local research stations, and feedback between the basin-scale studies and the process-oriented studies will be key in the coming decade. The tropical Pacific is an optimal testbed for innovative cross-disciplinary programs that contribute to better understanding and prediction of the ocean system, because its interannual variations associated with the ENSO are highly predictable relative to other oceans.

Key words: future planning, physical and biogeochemical perspectives, ENSO, prediction

(Corresponding author's e-mail address: takeshi.doi@jamstec.go.jp)

(Received 15 July 2021; accepted 11 October 2021)

(doi: [10.5928/kaiyou.30.5_105](https://doi.org/10.5928/kaiyou.30.5_105))

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2021)

-
- 1 Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-0001, Japan
 - 2 Research Institute for Global Change, JAMSTEC, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan
 - 3 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan
 - 4 Research Institute for Global Change, JAMSTEC, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-0001, Japan
 - 5 Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan
 - 6 Faculty of Science, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan
- * Corresponding author: Takeshi Doi
e-mail: takeshi.doi@jamstec.go.jp