

頂いたパブリックコメントと著者からの回答について

岡 英太郎（「研究に関する将来構想 WG」とりまとめ）

2021 年 4 月に公開 (https://kaiyo-gakkai.jp/jos/archives/jos_announce/8176) した海洋学会「将来構想 2021」、7 グループの草稿に対して、24 名の会員・非会員の方から貴重なコメントを頂きました。お忙しい中ご協力頂き、ありがとうございました。WG を代表して厚く御礼申し上げます。

WG では、頂いたコメントを参考に改訂を行いました。この中で、「大気海洋境界」グループについては、磯口治氏に著者に加わって頂きました。

頂いたコメント（青）とそれに対する著者側からの回答（黒）は、以下の通りです。なお、コメントに関しては、原稿の Word ファイルにコメント機能で書き込まれたのを抜き出したため、一見ぶっきらぼう、あるいは口語的な物言いになっているものもありますが、ご了承ください。また、著者側からの回答についても、長くなるのを避けるため、お礼や「ご指摘を受け」などの文言は可能な限り省略し、実質的な回答部分のみとしています。併せてご了承ください。

目次

1. 極域 p. 2
2. 沿岸域 p. 5
3. 深層 p. 6
4. 熱帯域 p. 7
5. 大気海洋境界 p. 16
6. 中緯度 p. 27
7. 新たな手法と問題 p. 33
8. 複数グループに対するコメント ... p. 37

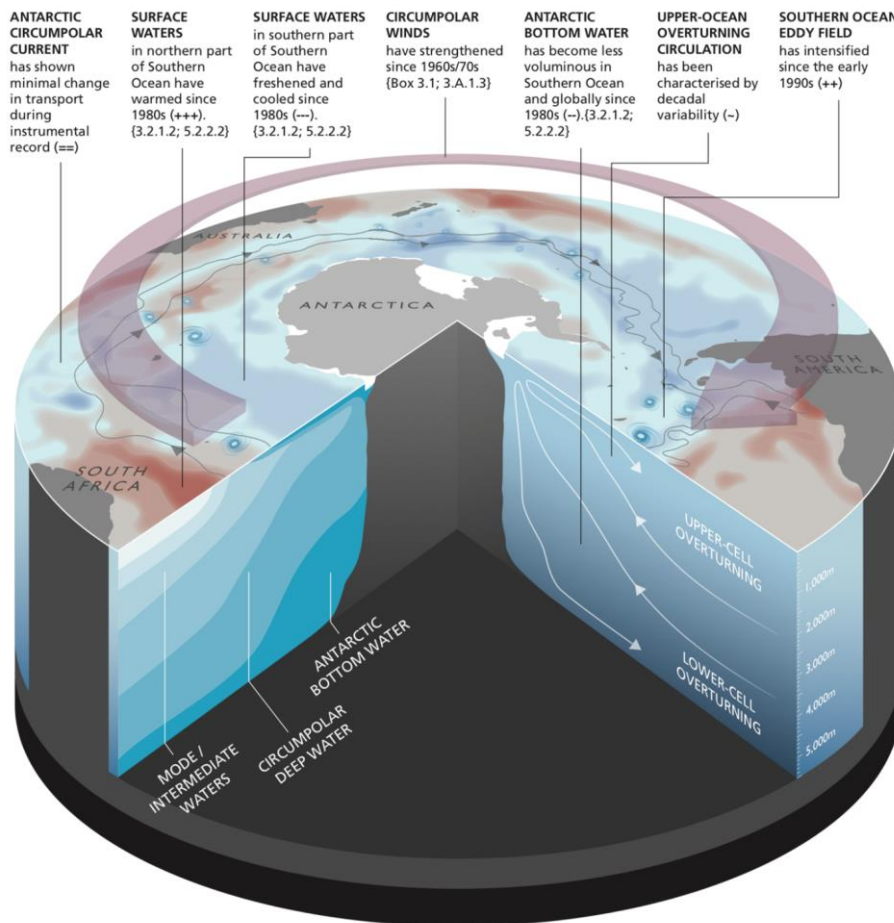
1. 極域

山崎開平

<全体を通した感想>

IPCC SROCC (2019) の内容を、もっと踏まえた方が良いと思います。今のバージョンでは SROCC に関して、北極海の CMIP6 の再現性に関する記述 [L.100] にとどまっており、南大洋についてはほぼ AR5 の知見で止まっています。「地球温暖化に対する気候システムの応答」という文脈で、どのような研究が必要とされるのかが見えにくいと感じます。

特に、SROCC の Chapter3 Polar Regions をより参考とすべきかと思います。地球温暖化に伴う海洋の変化は、海面熱フラックスだけでなく、大気の力学を通して生じますので、偏西風や大気テレコネクションに関する話題もあると良いかと思います。例えば、Cross-Chapter Box 7 で紹介されているような、地球温暖化に伴う南半球の偏西風の強化が、海洋子午面循環と氷床融解にどう影響して、海洋環境に変化をもたらすか、という観点は大事だと思います (下図)。



<各文章に対するコメント>

L.159: 南大洋を特徴づけるものとして南極底層水は良いと思いますが、その面積の大部分を占める南極周極流に触れられていないのには違和感があります。そこで、この節の冒頭として以下を加えてはいかがでしょうか。「南大洋には、地球上最大の海流である南極周極流が存在している。南極周極流は偏西風によって東向きに駆動されており、三大洋を繋ぐことで地球上の熱と物質の再分配を担っている。」

L.160-161、「全球の熱塩（子午面）循環は沈み込む南極底層水を出発点として駆動されていると言える。」： 南大洋の主たる熱源である周極深層水（CDW）を、もっと強調したほうが良いと思います。成層化に伴う亜表層の水温上昇も、CDW が暖かいことを前提としています。そこで、この文章を「南大洋の中深層では、北大西洋深層水を起源とする周極深層水が極向きに湧昇することで、南極沿岸域に熱と塩を供給し、海氷生産に伴う熱塩フラックスを補償している。したがって、南大洋は全球の海洋子午面循環における出発点であると同時に、終着点でもあると言える。」と差し替えることができます。

L.177-178、「IPCC 第五次報告書では、海洋中深層の最も顕著な変化は、南極底層水の高温・低塩化である事が指摘されている。」： AR5 から SROCC に更新したほうが良いです。また、現状では中深層と底層が混同して書かれています。そこで、以下ではいかがでしょうか。「海洋の 2000 m 以深の水温上昇は南大洋において最も顕著であり、南極底層水と周極深層水の温暖化がこれに関係している (IPCC SROCC, 2019)。」

L.200-201、「日本の研究コミュニティは東南極域を中心に観測研究を進めており、その結果、様々な知見や新たな課題が明らかとなってきた。」： 東南極沖に重点を置いて書かれているのは、伝統的に日本の観測領域であった経緯から理解しますが、「南大洋全体において東南極沖がどのような特徴を持った海域であり、なぜ重要なのか」ということに関する記述が弱いと感じます。東南極に留まらず、南大洋全体まで俯瞰することで、全球海洋における南大洋ないし東南極の重要性が顕わになり、気候モデルとの繋がりも生じてくるかと思います。そこで、この文章を以下のように変更してみてはいかがでしょうか。「日本の研究コミュニティは東南極域を中心に観測研究を進めている。東南極域では南極周極流が大陸に比較的近いところに位置しているため、南大洋の他の海域よりも亜表層の水温が高く、暖水が棚氷下部へ流入しやすい状況にある。また、東南極氷床は南極氷床質量全体の 90% 近くを占めており、全球海面上昇 50 m に相当する卓越した潜在性を有している。」

L.202: 周極流 を「周極深層水」に訂正してください。

L.205-207、「しかし、時計回り循環の形成要因や循環流量の変動要因については風応力では説明できておらず、今後さらなる研究が必要である。」： グローバルな影響を考えると、南極斜面流

(Antarctic Slope Current) に対する言及もあった方が良いでしょう。さらに、SROCC の Cross-Chapter Box 7 に照らし合わせて、下記のようにより具体的に書き換えることができます。「より岸寄りで西向きに流れる南極斜面流 (Antarctic Slope Current) は、暖かい周極深層水の大陸棚への流入を妨げるバリアの役割を果たしている。時計回り循環による暖水輸送が、沖合の南極周極流と沿岸の南極斜面流の変動性とどう関係しているのかについては、海洋力学における最先端の課題である。地球温暖化に伴って予測されている南半球の偏西風の強化に対して (IPCC SROCC, 2019)、東南極域の海洋循環がどのように応答するかについて、今後さらなる研究が必要である。」

L.363-364、「3. 2. 1. 海洋循環を軸とした東南極の氷床-海氷-海洋結合システムの実態解明 ～海水準変動予測研究への貢献を見据えて～」：「地球温暖化に対する応答」を考える上で、大気は欠かせないと思います。そこで「氷床-海氷-海洋結合」を、例えば「大気-海洋-海氷-氷床結合」とするのはいかがでしょうか。また、確かに「海水準変動予測」への貢献は非常に大切ですが、海洋循環が担う熱と物質の輸送自体も気候学的に重要です。なので「～海水準変動予測研究への貢献を見据えて～」と、あえて限定する必要はないと思いました。

L.376-378、「このため、重要な調査地域である東南極をターゲットとし、海洋、氷床、固体地球、生態系の実態と変遷について、研究と観測を集中的に実施する必要がある。」：「重要な」の重要性が示されていないので、「海面上昇に対する潜在的なインパクトが大きい東南極」などに変更すると良いと思います。また、固体地球がいきなり登場するので、南極科学に明るくない人にとっては難しいかもしれません。一方で、大気も含めた方が良くと思います。例えば、氷期間氷期サイクルに伴う CO₂ 変動には、風の変化に伴う深層循環の遷移が重要だったという意見があります (LGM の風が弱かったことで、深層水の湧昇弱体化と長期間の炭素隔離を生じさせた。Toggweiler & Russell 2008, doi:10.1038/nature06590)。また、大陸由来の偏東風の将来変化についても、よく分かっていない状況です (Hazel & Stewart 2019, doi:10.1175/JCLI-D-18-0402.1)。

L.387： 数値モデルの高解像度化に伴って、モデルと直接比較できるような高水平解像観測に対する国際的な需要が高まっています。南極の陸棚域は変形半径が 10km オーダーです。最先端の渦潮汐解像モデルでは、陸棚外縁の岸向き熱輸送において渦拡散や潮汐成分が卓越している (平均流は表層エクマンで沖向き熱輸送) という結果も出ています (Stewart et al. 2018, doi:10.1002/2017GL075677)。Underway CTD や AUV/グライダーといった高水平解像観測は、大陸棚斜面を横切る・棚氷下部に流入する暖水の同定、モデルにおける渦/潮汐パラメタリゼーション開発、海氷融解水による混合層の変質、ポリニヤ域での海氷形成とプランクトンブルームの発達過程など、応用範囲が広いので、今後重点化したほうが良いと思います (耐海氷 UCTD があると強力)。一方で、冬季の観測を実現するために、海水下の Argo フロート等も今まで以上に活用する必要があります。

IPCC SROCC の記述、東南極の重要性の説明、大気を含めることなど、ほぼ全てのご提案を修

正版に取り入れました。

池田元美

中堅研究者の経験と計画に基づいた10年展望を展開していることは評価したい。その一方で注力すべき研究テーマにおいて、重要な視点が取り上げられていない点にコメントする。今世紀前半に北極海は海氷の激減、それと相互作用するであろう海洋の変化、さらに大気と影響しあうことによって、現在とは大きく異なる状態になると予想される。本章においてもそのような予想は述べられているものの、3.1節の北極海に関する注力すべきテーマでは、ベーリング海峡からの流入水を調べる計画が簡単に記されているだけで、本質的な展望を見出すことができない。現在と大きく異なる状態のうち、例えば、海氷が減って脆弱になった場合の海氷運動、大気と海洋の熱輸送、さらに海洋循環の根本的变化など、観測とモデリングの両面から取り組むべきであると考えられる。そのような計画を示してもらうことを期待する。

今後注力すべき研究テーマとして、新たに3.1.1節（「海氷減少メカニズムとそれに伴う海洋環境変化の定量的解明」）を加えました。

2. 沿岸域

大石俊

国際プロジェクト"CoastPredict" (<https://www.coastpredict.org/>) が UN Decade に提案され、受理される見通しとなっています。CoastPredict の目的には、沿岸域の観測・予測システムの実装・発展などがあります。詳細については、上述の HP をご覧ください。

現在、データ同化システムおよび沿岸モデルを専門とする日本の研究者（気象研・JAMSTEC・理研・九大など）が"Japan CoastPredict"を立ち上げ、Coast Predict へ参加する予定です。僭越ながら、この代表を私がつとめていることもあり、ご連絡差し上げた次第です。

もし可能でしたら、CoastPredict および Japan CoastPredict についての記述を追加していただければと思います。どうぞよろしく願いいたします。

CoastPredict および Japan CoastPredict の計画についての記述を加えました。

井桁庸介

L54、「時空間スケールが小さい」： 「時空間スケールが大きい」では？

L146、「富山湾」： 富山トラフの方が良い

L152,「・・・推測される。」： 大陸斜面の切れ目で沿岸境界流起源の渦が沖合に波及し、沖合の流動の変化を誘発するという発想はありだと思っています。渦度供給による沖合ジェット流の加速・蛇行の誘発等、沿岸由来の現象が沖合の流動をコントロールする可能性です。物質循環だけでなくエネルギー循環のコネクティビティの要所でもあるということになるのでしょうか。

L549、「より広域的に」： 「沿岸・沖合の関連性を意識してより広域的に」はいかがでしょうか？

沿岸から沖合への作用に関する記述を加えました。

3. 深層

本多牧生

L277： 「中層水や深層水形成に伴う」の後に「従来は重力沈降しない」を挿入。

L278-279、「Particle-Injection Pumps (PIPs)」： Boyd 論文では「世界の海洋で見られる中層に生息する動物プランクトン・微生物の炭素要求量と重力沈降する炭素フラックス供給量とのミスマッチ（前者が多い）はこの PIPs である程度はカバーできるのではないか？」ということを示唆している、ということを記述してはどうか？

L284： 「“沈まない”浮遊粒子」の後に「(懸濁粒子)」を挿入。

L285： 「海洋物理過程に伴う浮遊粒子」の「浮遊粒子」は「懸濁粒子」の方が一般的では？

L286： 「センサー観測により」の直前に「光学的粒子測定」を挿入。

L507、「S1」： JAMSTEC による亜熱帯観測定点 S1（北緯 30 度、東経 145 度）での定点観測は 2010 年-2014 年。現在は S1 に代わって、2014 年以降は、KEO（北緯 32.5 度、東経 144.5 度、NOAA-PMEL の表層ブイ近傍）で係留系観測を実施中。

L617： interdisciplinary → interdisciplinary

ご指摘頂いたコメントを参考に、修正・追記しました。

4. 熱帯域

永野憲

良くまとまった将来展望だと思いますが、BGC アルゴ計画と地球システムモデルだけにスポットがあたり、やや視野の狭い展望となっている印象です。また、生物化学分野の研究課題の追及のための海洋物理の側面がやや強く強調されすぎているように思います。海洋物理分野でもまだまだ追求すべき課題は、ENSO 等の予測以外にも多くあるはずですが。加えて、観測ファシリティについても、BGC アルゴ計画と地球システムモデルに力点が置かれたまとめとなっているためか、なにかもやもやしたのを感じます。これら以外にも熱帯域の海洋学、特に海洋物理学にも他の方向性は多くあると思います。以下に、私の知っている範囲ですが、現場と今後の展開としてありそうな研究課題について述べたいと思います。参考になれば幸いです。

1. タイトルは熱帯域の展望についてですが、ENSO や PDO の解明はおそらく熱帯域だけでは閉じず、中緯度まで含めた観測の必要性が認識されていると思います。論文にもすでに言及されているように、TAO/TRITON も TPOS2020 で将来あるべき姿が見直されています。TPOS2020 では、観測網を中緯度に拡張する必要性が認識されていると思います。例えば、NOAA の設置した黒潮続流域に KEO でも熱帯起源の ENSO スケールの塩分変動のシグナルが見られます (Nagano et al., 2014, 2017)。それを踏まえ、JAMSTEC でも、通称「フィリピン海ブイ」と呼ばれる大気海洋観測ブイを 13°N, 137°E に設置し、観測を行なっています (Nagano et al., 2018)。すでに約 4 年間のデータが蓄積されており、今後 10 年で、さらにデータが蓄積すると期待されます。それらのデータをもとに、熱帯域から中高緯度域の海洋のリンクが明らかになってくるものと思います。ぜひ、熱帯域から中高緯度域への拡張の重要性についても盛り込んでいただけたらと思います。

Nagano, A., K. Uehara, T. Suga, Y. Kawai, H. Ichikawa, and M. F. Cronin (2014) Origin of near-surface high-salinity water observed in the Kuroshio Extension region, *J. Oceanogr.*, 70, 389-403, doi: 10.1007/s10872-014-0237-5

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, doi: 10.1002/2017GL073573

Nagano, A., I. Ueki, T. Hasegawa, and K. Ando (2018) Ocean-atmosphere Observations in Philippine Sea by Moored Buoy, 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean (OTO), doi: 10.1109/OCEANSKOB.2018.8558886

2. 上記 1 と関連しますが、2nd Cooperative Study of the Kuroshio and adjacent regions (CSK-2) として、Intergovernmental Session of the IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC) に flagship project として Science Action Plan が提出されています。これは、黒潮

と黒潮周辺海域の国際観測プロジェクトですが、北太平洋西部熱帯域も観測海域として入っています。特に、暖水プールの北部に関しては、黒潮の源流域でもあるため、CSK-2 プロジェクトの中心海域の一つです。CSK-2 を本論文に盛り込んでいただくことで、より有意義な議論ができるのではないかと思います。また、下に述べるように、熱帯域の西岸境界流をターゲットとする研究課題も 含んでいます。CSK-2 の背景等につきましては、Ando et al. (2021)を参照していただければと思います。

これまで赤道域は、TAO/TRITON 等のような観測ファシリティが比較的整った海域であったと言えるかと思います。将来、このような状態が維持されるとは限らないことも認識すべきです。実際、JAMSTEC は TRITON ブイを全て回収し、上に述べたフィリピン海ブイのみを維持する予定です。これまでのブイアレーは、大きく見直しをされ、中国によって新たにブイアレーが構築されることが予定されています。そのような状況を踏まえた上で、この機会に新しい観測ファシリティのあるべき姿も議論することも有益だと思います。

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, doi:10.1016/j.pocean.2021.102513

3. Low-latitude western boundary currents (LLWBC) が最近注目を集めているように感じます。CSK-2 でも、LLWC に関する研究課題が提案されています。熱帯域の熱および物質の再分配に重要だと考えられますが、西岸に沿って小さな幅で流れるため、既存の観測システムで実態を捉えることが難しいターゲットです。特に、インドネシア通過流 (ITF) については、コンベヤーベルトの一部であるだけでなく、太平洋からインド洋への海水の輸送を担い、気候変動とも関係があり、中心的な研究課題になると期待されますが、TAO/TRITON は、ENSO のモニタリングのための観測網なので、西岸境界域はカバーしていません。これまでのブイアレーにアルゴフロートのような観測を加えたとしても、LLWBC や ITF のような空間規模の小さな流れを捉えるには不十分だと考えられます。例えば、Sprintall et al. (2019) でもその観測の重要性が指摘されており、ITF を含む LLWBC も将来取り組むべき課題の一つであると思います。ここの様な西岸に沿って流れる海流の実態を把握するためには、海洋に面するアジア各国との共同観測の推進は今後さらに重要になってくると考えられます。CSK-2 のような国際的な観測プロジェクトの推進が不可欠です。

Sprintall et al. (2019) Detecting Change in the Indonesian Seas. Front. Mar. Sci. 6:257, doi:10.3389/fmars.2019.00257

4. 161~163 行目「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の相互作用プロセスや、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。」と、マルチスケール相互作用についての言及があります。マルチスケール相互作用は重要な研究課題だと思います。また、既存の空間的に粗い観

測では捉えられない小規模スケールの変動や、上に述べた LLWBC とも関係しているようにも思えます。ここら辺をもう少し膨らませていただけるとさらに有意義な展望になると感じました。

5. これまでの約 10 年は、シップタイムは減少しましたが、船舶観測や TRITON ブイを維持することが出来る程度にはシップタイムを確保できていたように思います。しかしながら、これらの観測は今後ますます縮小されるか廃止になると考えられます。そこで、新たな観測方法を模索する必要もあります。現在、世界の海洋観測を行う研究機関では、水中グライダー、WaveGlider, Saildrone 等の新しいプラットフォームを如何に使うかを模索している段階にあります。JAMSTEC でも、TRITON 観測にかわるプラットフォームとして WaveGlider や Saildrone による観測を行なっています (<https://www.saildrone.com/news/jamstec-data-collection-western-pacific-kuroshio-current>)。その一部は、Fujita et al. (2020)や Nagano and Ando (2020)でも報告されています。これらのプラットフォームがこれまでのブイ観測の代わりとなるかは不明ですが、小規模スケールの大気海洋変動の観測には適しているプラットフォームであると認識しています。今後、プラットフォームの利点を生かした観測計画を考えていくことは重要であると思います。

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, 16A, 19–24, doi:10.2151/sola.16A-004

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, 43, doi: 10.1186/s40645-020-00358-8

フィリピン海を介した熱帯から中緯度への影響などは、重要な視点だと思います。全体のバランスを考慮の上、できるだけコメントが反映されるように改訂しました。

植木巖

コミュニティとしての将来構想のとりまとめと言うことで、前回と同様に大変すばらしい取り組みと思います。関係の方々に感謝致します。参考になればと思い、いくつかコメントを述べさせていただきます。

物理・化学・生物の 3 分野あるいは観測から予測までバランス良く取り扱っており、今後 10 年の方向性の一つとして統合的理解を進め、出口として物理のみで無く、化学と生物分野を含む予測の高精度化を目指すという主張は正当なものと感じます。

これまでの 10 年のレビューに関しては物理分野では ENSO のメカニズムに関わる諸プロセスの

同定と予測の精緻化を、化学分野では炭素循環の描像や、酸性化、貧酸素化といった観測による変化の把握を、生物分野では植物プランクトンを中心に動物プランクトン、水産資源、サンゴを含む生物の ENSO に伴う海域毎の変動の把握と言ったものを取り上げてまとめられており、課題に関しても物理分野ではより詳細な過程の把握とモデルや予測の更なる精緻化、化学分野では現象のより詳細な時空間構造の把握、生物分野ではプロセスの解明といったものが上位に挙げられています。この辺りの取り上げ方は基本的によいと思いますが、後に記載する将来構想と結びつけてより具体的な課題の提示ができるとうまいかと思いました。

特に化学・生物分野に関しては状況把握をするための観測データが不十分であることにふれているので、より具体的にどんな観測がどの程度必要かと言ったことをまとめておくとうまいかもしれません。また、その後の同化を含むモデルとの連携についても問題点や発展に必要なものについての整理が役立つと思います。

3 節の将来構想に関しては BGC アルゴ計画についてより踏み込んだ記載が必要と思います。少なくとも現状のセンサやフロートの能力の提示や、これまでに得られた知見や課題を示しておくことが大事かと思います。現状の記載だと数を投入すれば問題が解決するように読めてしまうので、そういう誤解の無い記述にするべきかと思います。実際に、BGC アルゴはコアアルゴよりも高価であったり、水温・塩分に比べて観測に困難さを伴うことが考えられるので、コアアルゴ以上に戦略的な展開が必要かと思われます。そのためのプロジェクト研究やプロセス研究の立ち上げも重要になるかと思います。

また、2 節の中でどの分野においても観測の充実が前提となっているので、将来構想の中で BGC アルゴによるもの以外の観測についても方向性を示しておくべきだと思います。熱帯太平洋・インド洋の観測システムについては TPOS2020 や IndOOS-2 でレビューと今後の方向性に関する議論をしているので（例えば Smith et al. 2019, Beal et al. 2019 など）、その辺りをうまくレビューに加えると良いかと思います。

地球システムモデルについては大枠のゴールは示されているところですが、可能であればこの 10 年で目指すべき次のステップが少し具体的に示されると良いかと思います。また、観測との関わりの中で、どのような観測データが同化あるいは検証に必要なかという部分が示されると観測とモデル研究の連携が取りやすくなると思います。

以上、気にかかったところを述べさせて頂きました。参考にして頂ければ幸いです。

色々な課題が考えられるとは思いますが、著者の興味から、Chla の経年変動とエルニーニョ予測の改善について追記しました。その他、全体のバランスを考慮の上、できるだけコメントが反映されるように改訂しました。

桂将太

L131 : 「塩分が,」の後に「バリエイヤーなど海洋表層の成層構造を介して,」を挿入してはどうでしょうか。

L133 : 「Kido et al., 2019)。」の後に以下を挿入してはどうでしょうか。

特に、東部熱帯太平洋の表層塩分構造の研究は、西部に比べて行われてこなかったが、アルゴデータの蓄積により、東部太平洋淡水プール域では海面塩分フロントに沿った、水温逆転を伴うバリエイヤーの存在が明らかになった(Katsura and Sprintall 2020)。また、この東部太平洋淡水プール域の海洋表層の塩分構造と塩分収支を支配する物理プロセスの調査を目的とした集中観測 the Salinity Processes in the upper-Ocean Regional Study-2 (SPURS-2; Lindstrom et al., 2019)が実施され、淡水プール域における表層塩分の変動メカニズム(Farrar and Plueddemann 2019)や、バリエイヤーとフロント構造の関係など(Katsura et al., 2021)、東部熱帯太平洋の塩分構造の研究が大きく進展した。また、インド洋赤道域ではバリエイヤーがエントレインメントによる海洋混合層の冷却効果を阻害することが報告されるなど(Drushka et al. 2014; Pujiana and McPhaden 2018)、熱帯域の様々な海域で表層塩分構造とそのインパクトの理解が深まりつつある。

L275-277、「低塩分水によって形成されるバリエイヤー(水温は鉛直方向にほぼ一様の等温層であるが、塩分が深さとともに増加しているため密度成層が形成される現象)の影響」： バリエイヤーが生物地球化学に与える影響も重要ですが、バリエイヤーの物理場への影響と、この10年での研究の進展も 2.1 節で言及されてもよいと思いました。

L430、「生物・化学変数の観測」： 具体的に、どのような場所でどのような観測データが必要なのでしょう？全部を細かくここに書くのは無理だと思いますが、一例を挙げられれば良いと思います。また、物理場もモデルによる予測や再現に実績があるとは言え、よりその精度を向上させるためにどのような観測が必要か述べる事が出来れば、今後の物・化・生の統合的な観測案にもつながると思います。

参考文献：

Drushka, K., J. Sprintall, and S. T. Gille, 2014: Subseasonal variations in salinity and barrier-layer thickness in the eastern equatorial Indian Ocean. *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 805–823, <https://doi.org/10.1002/2013JC009422>.

Farrar, J. T., and A. J. Plueddemann, 2019: On the factors driving upper-ocean salinity variability at the western edge of the eastern Pacific fresh pool. *Oceanography*, 32(2), 30–39, <https://doi.org/10.5670/OCEANOLOG.2019.209>.

Kastura, 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, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0194.1>.

Katsura, S., J. Sprintall, and F. M. Bingham, 2021: Upper ocean stratification in the eastern Pacific during the SPURS-2 field campaign. *J. Geophys. Res. Oceans*, 126, e2020JC016591, <https://doi.org/10.1029/2020JC016591>.

Lindstrom, E. J., Edson, J. B., Schanze, J. J., & Shcherbina, A. Y. (2019). SPURS-2: Salinity processes in the upper-ocean regional study 2. The eastern equatorial Pacific experiment. *Oceanography*, 32(2), 15–19. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2019.207>

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. Oceans*, 123, 5727–5741, <https://doi.org/10.1029/2018JC013858>.

塩分やバリエイヤーの視点、大変重要だと思います。また、具体的な研究プロジェクトの可能性を提示することも大変重要だと思います。色々な課題が考えられるとは思いますが、著者の興味から、Chlaの経年変動とエルニーニョ予測の改善について追記しました。その他、全体のバランスを考慮の上、できるだけコメントが反映されるように改訂しました。

須賀利雄

物理・化学・生物の各分野における熱帯研究の近年の発展と課題、さらに分野横断で取り組むべき課題がよく整理されており、幅広い読者にとって大変有益な総説論文だと思います。特に、BGCアルゴと地球システムモデルを取り上げた将来構想には、時節を捉えた極めて重要な指摘と提案が多く含まれていると思います。

BGCアルゴについてコメントがあります。BGCアルゴ（プログラム）は、1000台のBGCフロート（酸素、クロロフィル、硝酸塩、pH、懸濁粒子、照度のセンサーを搭載）の継続的な全球展開を目指すプログラムですが、予算的な裏付けがあるわけではありません。米国のSOCCOMプロジェクトやEUのプロジェクト（これらはいずれもBGCアルゴの立場からするとパイロットプロジェクトに位置付けられる）で、南大洋や大西洋への投入が進んでいるのに対して、北太平洋でのBGCフロートの展開は遅れています。今年から始まった米国NSFのGO-BGCプロジェクトはこれから4~5年ほどで500台のBGCフロートの（一度限りの）全球的な投入を目指していますが、太平洋熱帯域にどれだけ投入されるかは不透明です。将来的には、BGCアルゴを持続的な観測網として維持していくこと目指すにしても、まずは、ある程度明確な科学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用（科学研究そのもの）を熱帯域で進めないと、TPOS2020が提案するようなBGCアルゴ観測網の早期実現は困難かもしれません。そのような大規模プロジェクトを主体的に提案し、実現していくことの重要性について言及してくれることを期待します。

その他のコメント

406-407行目：「熱帯でBGCアルゴを124本投入」は「太平洋の北緯10度から南緯10度の間にBGCアルゴフロートを124本展開」などと記述するほうがより正確だと思います。上記の海域に常時124台のBGCアルゴフロートが展開されていることを推奨しているのだと思います。

具体的な研究プロジェクトの可能性を提示することは大変重要だと思います。色々な課題が考えられるとは思いますが、著者の興味から、Chlaの経年変動とエルニーニョ予測の改善について追記しました。その他、全体のバランスを考慮の上、できるだけコメントが反映されるように改訂しました。

長谷川拓也

本原稿では、物・化・生の3分野ごとに過去10年間の研究動向に関してまず記述されています。物理では、主に海盆・globalスケールの現象としてENSO, IODが取り上げられています。また、沿岸ニーニョなどに関する沿岸域の現象も紹介されています。化学ではENSOに関係したCO2などの影響が記述されています。生物では主に沿岸湧昇に関連する変動や沿岸域におけるサンゴに関する記述に重点があげられていますので、こちらは沿岸海洋を重点に記述されています。そして、10年展望ではアルゴなどによる物・生・化観測と、物・生・化を取り込んだ地球システムモデルなどの予測に関する展望が記述され、最後にSDGsへの貢献を記しています。上記のように本原稿の趣旨を自分なりに理解しました。その点につきまして、エルニーニョのタイプに関する点と、沿岸・外洋および沿岸と外洋リンクにおける物・化・生に関する点につきまして、以下に私のコメントを記載します。

(1) エルニーニョのタイプに関する予測について

本稿では、エルニーニョ発生自体の予測は高い精度で可能になったが、エルニーニョの多様性（例えば、規模や海面水温偏差の水平構造）に関する予測については、現在では難しい面があると述べられています（Line168）。エルニーニョのタイプによって基礎生産速度が異なる点（L297-298）なども述べられています。また、原稿では記載されていませんが、最近の研究では従来の複数のタイプが混ざった「ハイブリッド型」と呼ばれる新しいタイプの存在も指摘されており（Timmermann et al. 2018）、それがオーストラリアの気象予測精度の悪化に影響を与えている点を指摘する研究もあります（Santoso et al. 2019）。

以上の点を考慮しますと、エルニーニョのタイプあるいは多様性をより強調する形で3.3.「BGCアルゴ観測と地球システムモデルが切り開く物・化・生の統合的理解とその予測」において記述するようにしましたら、本原稿で述べられています内容をより強調できるかと思いました。たとえば、エルニーニョ現象と生物・化学との関連について、現在の次のステップとしてエルニーニョのタイプ・多様性に着目した観測研究と予測技術の進歩という点がより強調されれば、4.

「まとめ」に記述されています SDGs とのつながりもより強調できるのではないかと思います。

本コメントを反映される場合は、展望に関する 478-488 行の параグラフで、エルニーニョ発生に関わる海洋の酸性化がどのような地域で促進・低下するのかなどをターゲットした予測や早期警戒情報について述べられていますので、この параグラフで、i) 物理モデルを使用した、エルニーニョのタイプ（あるいは多様性）に着目した予測精度向上と、ii) そのような物理モデルを取り入れた地球システムモデルを使用して、タイプ毎に気象や生物・化学へ与える影響を予測する予測モデル構築について、SDGs (Line488)にも貢献できる、というように少し修正を加えることが可能かと思えます。あるいは、その前の 3.2「地球システムモデル」のパートで記述することも可能かと思えます。

観測面における展望におきましても、上記のような地球システムモデル研究の発展と連動しながら、エルニーニョの各タイプや他の現象にとって重要となる海域において、限られた物・化・生の観測リソースを重点的に割り当てることなどを、3.4「その他の研究アプローチ」の観測システム実験シミュレーション実験 (Line 543) 付近で記載することもできるかと思えます。現在の原稿におきましても、そのようなことは意識されていると思えますが、前半からの記述との関連と展望における内容をより関連づけるために、上記のような記述が少しあれば読者の理解を深める一助になるかと思いました。

(2) 沿岸域、外洋域、沿岸域と外洋域を結ぶリンクについて

本原稿では、サンゴを含む生物関連が1つの主要テーマとなっております。また、サンゴの利用を含めた人間活動との関係 (L358-363) や SDGs に関する記述もあります (L556-559)。さらに、熱帯太平洋の湧昇域における植物プランクトンなどに関連する記述 (Line 272) もあります。これらは、主に沿岸域に関係する生物学・化学分野の内容ですが、一方で、物理学で沿岸域に関係する現象としては、沿岸ニーニョ現象 (Line 152) が別のパートで紹介されています。

以上の点を踏まえて、最後に述べられている SDGs について私なりに考慮しますと、(i) 外洋を含めた広い海盆における物・化・生と海盆規模・グローバル規模における地球環境との関連、(ii) より人間社会・経済活動に直接的に関係する沿岸域における物・化・生と沿岸海洋・人間活動、の2つの視点が SDGs と結び付くのではないかと思います。そうだとしますと、物・化・生の融合研究についてより整理するために、(a)外洋域における現象・変動、(b)沿岸域における現象・変動、(c)外洋域と沿岸域が互いに関連する現象・変動、という3つの視点に分けた観点で記述されれば、SDGs への寄与、沿岸から外洋を網羅する観測システム、変動する場所も含めた予測に関する予測モデルの発展について、読者がより理解しやすいかと思えます。

たとえば、3.3.「BGC アルゴ観測と地球システムモデルが切り開く物・化・生の統合的理解とその予測」に、地域における予測について述べられていますので (Line 484)、この前後に、沿岸・

外洋・沿岸外洋リンクに着目した観測システムや予測モデルの将来展開・発展という内容を1、2行追加されましたら、それまでのレビューパートで別個に述べられている物・化・生の沿岸・外洋の内容についてのまとめとなるかと思えますし、SDGs への寄与についても海域・分野を横断する物・化・生の融合研究としてよりイメージしやすいかと思えます。

なお、沿岸域と外洋域を結ぶ観測の将来発展の一例としましては、黒潮の上流域にあたり、エルニーニョやエルニーニョモドキとも関係するフィリピン海をあげることが可能かと思えます。その場合は、フィリピン海に展開していますトライトンブイの発展型であるフィリピン海ブイを活用して、フィリピン海ブイ周辺海域における船舶観測やアルゴなどを用いた無人域観測、航空機観測、沿岸の陸上観測を融合するような国際プロジェクトベースの大気海洋生物化学統合観測をベースとして TPOS ともリンクしながら将来観測システム構築へ向けたパイロット的研究や、モデル研究・同化研究との連携について発展させ得るのではないかと思えます。また、フィリピン海の観測プロジェクトにつきましては、現在計画が進められている西部太平洋の熱帯と中緯度を横断する観測研究である CSK2 国際プロジェクトについても紹介する価値があるかもしれません。

上記の点に関連する、沿岸域や、外洋域、外洋域と沿岸域を結ぶ現象・変動に関する近年の研究としましては、1) アルゴフロートを用いて IOD 最盛期におけるジャワ島沖沿岸湧昇に関する水温と塩分などを指摘した研究 (Horie et al. 2018)、2) 衛星観測データを用いて ENSO や IOD などの海盆規模の変動が、外洋域のクロロフィルに与える影響や、気候変動に関する河川流量変化が沿岸域のクロロフィル変動に影響を与える点などを指摘した研究 (Siswanto et al. 2020)、3) 現場観測データや高解像海洋モデル歴史実験結果を用いて、パプアニューギニア沖の沿岸湧昇が西部赤道太平洋の海面水温冷却や西風バースト強化を導くことで、エルニーニョ発生に影響を与える可能性を指摘した研究 (Hasegawa et al. 2009; 2010)、4) 領域気候モデルを用いて、パプアニューギニアの沿岸湧昇がエルニーニョ発生を導く西風バースト強化に寄与する点を示した敏感度実験研究 (Miyama and Hasegawa 2013)、などが最近 10 年程度の間実施されています。もしも必要でしたら、上記の研究をレビューパート (たとえば「沿岸ニーニョ現象」との記述がある p6 など) に追記することをご検討ください。

(2に関する補足) サンゴを含む環境変化に関する熱帯から亜熱帯への影響評価について

本稿における記述から、生物分野の将来展望におきましてはサンゴが1つの主要テーマであると理解しました。サンゴにつきましては、日本においても沖縄のサンゴ白色化が問題になっていたと、うろ覚えですが聞いた記憶があります。そうだとしましたら、日本以外にも、黒潮をはじめとする西岸境界流によって熱帯から亜熱帯への暖水流量変化が亜熱帯のサンゴ白色化に影響する可能性があるかと思えます。サンゴに関する研究について、私は把握しておりませんが、熱帯に限らず沖縄を含む亜熱帯のサンゴ白色化も重要なテーマであるのでしたら、日本としてはフィリピン海を介した熱帯から亜熱帯への北赤道海流・黒潮に関する海水特性変化・流量変化が着目すべき要因の1つとなるかと思えます。そうだとしましたら、日本南方に位置するフィリピン海

ブイやアルゴを含む物・化・生観測や、その観測データを用いた地球システムモデル・同化への寄与という点も将来展望に加えてもよいかもしれません。このような観測においては、先に述べました、フィリピン海ブイや CSK2 を活用できるかと思えます。サンゴに限らず、「サンゴ白色化を含む、熱帯が亜熱帯へ与える影響に関する評価や予測の発展」という文言も一行程度で良いかと思えますが、10 年展望の終盤で記載しておいても良いかと思いました。

[参考文献]

- Timmermann, A., S.-I. An, J.-S. Kug, et al. (2018): El Niño-Southern Oscillation complexity. *Nature*, 559, 535-545. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>.
- Hasegawa, T., K. Ando, K. Mizuno, and R. Lukas, 2009: Coastal upwelling along the north coast of Papua New Guinea and SST cooling over the Pacific warm pool: A case study for the 2002/03 El Niño event. *J. Oceanogr.*, 65, 817-833. doi: 10.1007/s10872-009-0068-y.
- Hasegawa, T., K. Ando, K. Mizuno, et al. (2010): Coastal upwelling along the north coast of Papua New Guinea and El Niño event during 1981-2005. *Ocean Dynamics*, 60, 1255-1269. doi: 10.1007/s10236-010-0334-y.
- Horii, T., I. Ueki, and A. Ando (2018): Coastal upwelling events along the southern coast of Java during the 2008 positive Indian Ocean Dipole. *J. Oceanogr.*, 74, 499-508. doi: <https://doi.org/10.1007/s10872-018-0475-z>.
- 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. doi: 10.2151/sola.2014-002.
- Santoso, A., H. Hendon, A. Watkins, et al. (2019): Dynamic and predictability of El Niño–Southern Oscillation: An Australian Perspective on Progress and Challenges. *BAMS*, 100, 403-420, doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0057.1>.
- Siswanto, E., T. Horii, I. Iskhaq, et al. (2020): Impacts of climate changes on the phytoplankton biomass of the Indonesian Maritime Continent. *J. Mar. Sys.*, 212, Article 103451. doi: 10.1016/j.jmarsys.2020.103451.

エルニーニョのタイプや、フィリピン海を介した熱帯から中緯度への影響、マルチスケール相互作用など、重要な視点だと思います。全体のバランスを考慮の上、できるだけコメントが反映されるように改訂しました。

5. 大気海洋境界

濱崎恒二

「大気海洋境界」の 3.1 節に、関連する国内の研究を引用していただきたく、少しでも文章と引用の追加をしました。ご検討下さい。

L227 : 「・・・イメージだろうか。」に続けて、以下の文を挿入。

また、相模湾真鶴沖での SML 時系列観測では、春季の植物プランクトンブルーム時に TEP や微生物量の濃縮係数が大きくなることが報告されている (Sugai et al. 2018)。

L241 : 「・・・との報告もある。」の文末に「(e.g., Sugai et al. 2018)」を挿入。

L253 : 「その発現解析も行われるようになり、」に続けて、「特異なアンモニア酸化アーキア群集の存在 (Wong et al. 2018) や、」を挿入。

L259 : 「・・・盛んであるとの報告は興味深い。」に続けて、以下の文を挿入。

その他、大気海洋間の CO 交換 (主には海洋から大気への CO 放出) に着目し、SML に濃集した有機物から光酸化によって生成する CO フラックスと細菌による CO 酸化速度を推定した研究も行われている (Sugai et al. 2020)。

引用文献 :

Sugai, Y., Tsuchiya, K., Shimode, S., & Toda, T. (2018). Seasonal variations in microbial abundance and transparent exopolymer particle concentration in the sea surface microlayer of temperate coastal waters. *Aquatic Microbial Ecology*, 81(3), 201-211.

Sugai, Y., Tsuchiya, K., Shimode, S., & Toda, T. (2020). Photochemical Production and Biological Consumption of CO in the SML of Temperate Coastal Waters and Their Implications for Air - Sea CO Exchange. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(4), e2019JC015505.

Wong, S. K., Ijichi, M., Kaneko, R., Kogure, K., & Hamasaki, K. (2018). Ammonia oxidizers in the sea-surface microlayer of a coastal marine inlet. *PloS one*, 13(8), e0202636.

ご紹介頂いた国内の研究の文献を全て引用し、関連する内容について追記しました。

江淵直人

本稿は、大気海洋境界における輸送過程・物質循環に関する展望がまとめられています。「将来展望」に関する部分の議論は、若手・中堅の会員の方々にお任せするとして、私が関係する6~7節の「過去」および「現在」に関する記述に関して、気の付いた点についてコメントを記します。確認と必要ならば修正をお願いします。

1. P17, L472: 「全球の海上風速と海面水温は現在...」

海面水温に関しては、気象予報モデルの境界条件として使われていますが、「海上風速」を境界条件として使っているのでしょうか? 「海上風速」は、境界条件としてではなく、同化データと

して使われているように思います。(例えば, "Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency", March 2019, pp.229)

2. P17, L477: 「物理量全般の大気海洋間のフラックスの計算においては…」

“CORE” は “COARE” でしょうか? (P14, L384) COARE のアルゴリズムは, ここで対象としている (?) 台風などの極端な高風速の条件でも有効であるとお考えでしょうか?

3. P17, L481: 「大気海洋境界層中の鉛直プロファイル」

同様の表現がこの後何度か出てきますが, 「何の」プロファイルでしょう? 「風速・流速」ですか? 明示が必要であると思います.

4. P17, L491: 「散乱計は, 台風のような荒天において…」

台風のような極端な高風速条件下による感度低下や強い降雨による散乱・減衰が海上風速観測に影響を与えるのは, マイクロ波散乱計固有の問題ではなく, マイクロ波放射計でも同様に起こります. これらの影響は, 使用する周波数に依存するので, 同じ散乱計でも, Ku-バンドを使用する QSCAT/SWS や Oceansat-2, CFOSAT でより大きく, C-バンドを使う ERS/AMI や ASCAT では, 比較的小さいとされています. 逆に, 低風速域での風速・風向に対する感度は, 高周波の方がよいことも分かっています. また, 放射計でも, 例えば, AMSR-E や AMSR2 の標準プロダクトでは, 36 GHz の輝度温度を主に使って風速を算出していますが, P18, L496 に記述がある通り, 高風速・強降雨の条件では, 空間分解能を犠牲にしても 6.9 GHz や 10.25 GHz の低周波を使用しています (例えば, F.T. Ulaby and D. G. Long, 2014: Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing, University of Michigan Press, pp. 984).

5. P18, L495: 「物理量が自ら発するマイクロ波を…」

「物理量」がマイクロ波を射出する, という表現は正しくないと思います. マイクロ波を射出するのは, 「海面」や「大気」です. 海面や大気から射出されるマイクロ波の放射輝度温度が, 周波数や偏波によって, 各種の「物理量」に依存する性質を利用して「物理量」を算出しています (前出 Ulaby and Long, 2014 など参照).

6. P18, L497: 「雨天にも対応することができた」

全天候型海上風速だけでなく, 標準プロダクトの海上風速もある程度の強度の降雨があっても利用可能です. 「全天候型」が必要になるのは, 台風などの極端な高風速・強降雨の場合だと思えます.

7. P18, L500: 「現業レベルでは放射計による海上風速の見積もりは…」

散乱計に比べて, 放射計のデータの準リアルタイム配信が遅い, と記述は誤りだと思います. 少なくとも半日も遅れることはありません. 現在, AMSR2 では, 受信やデータ転送に大きなトラブルがなければ, 観測後遅くとも 2~3 時間で標準プロダクト, 全天候海上風速プロダクトとも,

気象庁、海上保安庁、JAFICなどの現業ユーザにデータが配信されています。散乱計の配信もほぼ同程度の時間で行われています。この2~3時間の大半は、衛星が地球を周回して（1周100分前後）受信局でデータを受信するまでにかかる時間ですので、センサの違いによる差はほとんどないと思います。

8. P18, L504: 「その一方で、静止軌道衛星ひまわり8号によって…」

確かに、ひまわり8号の高頻度観測により、雲の隙間からでも赤外チャンネルでの海面水温が可能で、雲の影響を低減できるようになりました。しかしながら、本節で対象としている台風通過時に同様の効果を期待するのは難しいのではないのでしょうか？

9. P18, L512: 「放射計を用いた見積もりでは実質的に海面の白波被覆率を計測して…」

マイクロ波放射計は、白波被覆率を計測しているわけではありません。海面から射出されるマイクロ波の信号には、白波の効果も含まれますが、それだけで放射輝度温度が決まるわけではありません。また、放射輝度温度のデータから、白波被覆率を算出したデータセットが最初にあつて、それを風速に変換しているわけでもありません(前出 Ulaby and Long, 2014 など参照)。

10. P18, L515: 「衛星風速と実測値との比較は…」

衛星で観測された海上風データの比較検証として係留ブイの観測データを利用する話がかかれていますが、係留ブイデータは、風速15~20 m/sの低・中風速域では、非常に有効な比較データですが、この節で対象となっている台風付近のような高風速域では、必ずしも信頼できるとは限りません。波浪によるブイの傾斜や同様の影響、高い波浪による気流の剥離の問題などが指摘されています。特に、最近、ブイを運用している各機関の経費節減を受けて、ブイの小型化が進んでおり、以前よりもこれらの問題が重要視されています。台風やハリケーンなどの高風速・強降雨の条件下で、衛星観測データを正しく評価できる基準データが存在しないことが現在大きな課題となっています。ブイには上述の問題があり、船舶や海上の観測塔は、構造物による気流のゆがみの正確な補正が問題です。気象モデルの出力データ（客観解析や再解析データを含む）は、その時空間代表性や大気境界層のパラメータ化の問題が存在します。これらの問題を議論するために、”International Workshop on Measuring High-Wind Speeds over the Ocean” が2016年にUK Met Officeで開催されました。ワークショップのサマリーは、

https://mdc.coaps.fsu.edu/scatterometry/meeting/docs/2017/docs/Wednesday/morning/FirstSession/838_Bourassa_UKMET_2016_IOVWST2017_Summary.pdf

で入手可能です。このワークショップでの結論は、1) 熱帯低気圧周辺の高風速・強降雨域の海上風速の最も信頼できる現場観測データは、ドロップゾンデである。2) ただし、ドロップゾンデは1点での観測であり、衛星観測と直接比較することはできない、2) 航空機搭載の Step Frequency Microwave Radiometer（空間分解能200 m程度）の観測データをドロップゾンデデータで校正し、飛行経路沿いに平滑化したものを衛星観測データとの比較に用いることを推奨

する、でした。熱帯低気圧の中心付近では、波浪の影響を指摘する部分など、本稿とも重なる部分があると思います。

1 1. 本稿では P21, L590 に slick を捉える手段として合成開口レーダが紹介されていますが、合成開口レーダは海上風観測でも今後活用が期待されています。現在のマイクロ波散乱計や放射計の空間分解能は 10 km オーダーであり、台風などの高風速・強降雨の条件下を考えると低周波を利用することで、さらに分解能が低下し、台風周辺の微細な構造を捉えられないことが問題となっています。これに対し、日本が打ち上げている ALOS 衛星シリーズに搭載されている L-バンド合成開口レーダは、高風速での飽和や強い降雨での散乱・減衰の影響を受けにくく、数 10 m の空間分解能での海上風観測が可能です。現時点では、観測頻度が最大でも 3 日に 1 回と、時系列観測には不向きですが、NOAA の航空機観測と同期してハリケーンの中心付近での海上風観測を行うなど試みが進められています。本稿で触れられている slick 観測には、より高周波 (C-, X-バンドなど) の合成開口レーダを使う必要があります。

1 2. 本稿だけでなく、「将来構想」の各分野において、衛星観測について触れられている部分がありますが、どのような衛星海洋観測が将来の海洋学に必要なかが具体的に記されている部分はないように思います。これまで存在した衛星が今後も継続する保証はありません。日本だけでなく米国、欧州なども財政的な問題から衛星地球観測を縮小する動きが進んでいます。このような状況の中で、将来の海洋学研究にどのような衛星観測が必要なのか、ぜひ提言をお願いしたいと考えます。また、逆に、海洋学の将来構想・研究展望に立脚した新しいアイディアに基づく衛星・センサの提案ができるとよりよいと考えます。

頂いた修正点についてはほぼ対応するとともに、機材に関しては、衛星 SAR や LiDAR による大気海洋境界の新しい観測についてまとめました。さらに新しいデータ流通や関連ソフトウェアの構想に関する記述も加えました。

宮崎雄三

「大気海洋境界」に関わるサイエンスについて、これまでの知見と国内外の研究の現状、国内研究コミュニティの強みを活かした将来展望など、全体を通して大変よくまとめられていると思います。

(1) なぜ大気海洋境界が重要なのか、Earth Science という広い視点からの重要性、位置づけを要旨や導入部でもっと具体的に強調されると良いと思いました。例えば「気候に大きな影響を与える」(L.15)について、「海表面での二酸化炭素の吸収や雲の生成を介して地球大気の放射収支へ影響」し、さらに「気温・降水・日射の変化が海洋生態系にフィードバックをもたらす」などでしょうか。気候影響以外にも本文で述べられている生物地球化学的な物質循環や防災学的な見地からの重要性も一言加えられてもよいかもしれません。

(2) 5つのトピックが挙げられ、それぞれについて現在の知見の詳細と将来展望がよくまとめられていると思います。一方で、5つは完全に独立したものではなく、それぞれ相互に結びつき、関連があるテーマと考えられます。関連について一部は本文中に述べられていますが、例えばFig.1などにその有機的なリンクが分かるように示されるとよいと思います。例えば、「波浪に関わる物理プロセス」は「エアロゾル生成量」や「気体交換の収支」を決める一つの要因となる、などです。

(3) サイエンスとしては、観測で明らかになるプロセスを数値モデルで定量化し評価・予測することが一つの到達目標かと思いますが、数値モデルから見てどのようなインプット（パラメタリゼーション等）が観測・室内実験研究に要求（必要と）されているかも重要な視点だと考えられます。2節「栄養塩沈着」（特に「鉄」に関する記述）や6節「波浪に関するプロセス」では、この点についても具体的に言及され、観測と数値モデル研究双方の視点からの重要性がよくまとめられていると思います。同様に3節や4節などでも同様の言及がもう少しあると尚良いと思いました。

その他マイナーなコメント

・L.16、L.31 に書かれている「宇宙まで対象」の意味することがよく理解できませんでした。サイエンスの対象は大気-海洋の境界領域を中心に「海洋の有光層から対流圏大気」への影響、とする記述(L.605)との整合性からも違和感を感じました。

ご指摘に従い加筆しました。本稿で取り上げた5つのトピックの相互の関わりについては、新しく図 (Fig. 2) を作成し適宜文章内で引用しました。数値モデルによる定量化にとって必要な観測・実験データについて、3、4節に追記しました。

高垣直尚

将来構想 2021 「大気海洋境界」グループでは、5つのトピックスにて主にフィールド観測などの重要性が述べられておりました。フィールド観測の重要性はもちろんのことですが、同時に室内実験やそれを行うための大型設備や共同設備(全国共同利用)の存在も重要であると思いました。大型設備は一般に基盤研究 S 以上の予算を必要とするほど高価であり、設置場所や維持など色々と難しい点がありますので、学会規模で考えてもよい問題かとも思います。また、理学と工学あるいは外洋と沿岸研究のコミュニティー間での情報の行き来が少ないなど、どのような共同利用施設が国内にあるのかあまり知られていないかもしれません(私自身よく知っているとは言えません)。

将来構想 2021 では、2010 年前後に京都大学にて運用されていた高速風洞水槽について書かれていましたので、20、30代の若手会員のためになればと思い、超高風速域での大気海洋境界の研究

と使用された（されている）大型水槽設備について少し説明させていただきます。

この風洞水槽（風波水槽とも呼ばれます）は、2008年に設置され全長30m、幅0.8m、貯水量10トン、最大風速 $U_{10}=68\text{m/s}$ まで可能な、当時世界最高性能の素晴らしい水槽でした。この水槽を用いる事で、超高風速時の激しい砕波を伴う風波気液水面を通しての運動量輸送量が初めて直接測定されました。また、風速 35m/s 付近から抗力係数の風速依存性が大きく変化する、つまり力学的なレジームシフトが起きることが明らかにされました。これは、風波の波頭のみが強烈に砕波されることにより、水面が相対的にフラットになるのが一因であろうとの結論に至っています。しかし、この『超高風速域における気液間運動量輸送量』に関するトピックスは、私が知っている限りでも歴史的にはそれほど単純ではありませんでした。1960–80年は、より低風速域での風波現象が、海洋学会の著名な先生方の下で解明された時期ですが、同時に高風速を対象とした研究もいくつかなされました。Wilson IV型のフェッチ則(1965年)においても高風速時の波浪データが含まれていますし、台風中での風速測定研究も行われました(1968年)。国内では大型水槽設備を用いて、京都大学・国司先生らが高風速下での抗力係数の測定を行っておられます(1966年)。しかし、この時期の研究では、半世紀後から見るとですが、フィールド観察・実験水槽共に水面にかかる応力の測定精度が悪く、高風速域の抗力係数は低風速域と同様に非常に単純な Charnock モデルに従うという結論に落ち着いておりました。一方で、宇田先生の教科書『海洋気象学』(1972年)を読み直してみると、波浪階級表の第8階級 ($22\text{--}24\text{m/s}$) では「波の山非常に高く、船波間に沈んで見えなくな」るが、より高風速 (30m/s) の第9階級では逆に「海面平になった感」があったようで、そこに面白い Physics が潜んでいる可能性も嗅ぎ取れます。また、将来構想 2021 の海上風速測定のトピックス中でも述べられていますが、レーダーの C バンド反射強度が高風速時にサチる（そのため高風速時には海上風速測定精度が落ちる）という問題点は以前から知られていました。そのため、1960年代頃の研究にもよらず、高風速域での風波と海面にかかる抗力係数は引き続き興味の対象でしたが、高風速域での測定は困難を極めるため、長い間これといったインパクトを与える観察結果は得られませんでした。2003年に、高風速では抗力係数が風速の増加に従って減少するという衝撃的な結果が Powell により発表され、高風速の問題は再度注目を集めました。高風速域での抗力係数の高精度モデルを作ることが、台風予測精度を劇的に向上させる可能性を秘めていたからです。2013年頃からは、NCAR や NHC の WRF・HRRF などでは、米国マイアミ室内水槽で得られた Donelan(2004)の抗力係数モデルがオプションとして追加されました。近年気象研究ではこの抗力係数モデルが時々利用されています。しかし、最近ではデータ再解析により、実は Donelan(2004)モデルは実験誤差を含んでおり、京大モデル (Takagaki, 2012) がより良いのではないかと、という報告も同じマイアミグループからされています (Curcic, 2020)。このように現在でも、国内外で大型室内水槽設備を使用した高風速に関する研究が日夜続けられております。一方で、このような超高風速域での大気海洋境界研究を実施可能な大型水槽設備は、国内外にわずか6、7台しか存在せず、良い研究のできる大型設備の作成と維持の重要性と困難さを再認識させられます。なお、主だった海外の高速風洞水槽はマイアミの SUSTAIN 水槽、ロシア、オーストラリアの水槽でして、特にマイアミ水槽は、2015年に最大風速が 50m/s から 85m/s へとアップグレードされました。

現在国内で運用されている大型風洞水槽設備は、港湾研、土木研究所、九大などにあります。また、その他の海洋系大型設備(海洋再現水槽・観測船・観測塔・観測栈橋も含む)は京大防災研宇治川オープンラボラトリ(国司先生の水槽のある研究所です)、東大生産技術研究所等にあります。このコメントを書くために、久しぶりに Google Map で宇治川オープンラボラトリの様子を見ていたら、国司先生の高速風洞水槽が屋外むき出しの状態です。コロナ禍が過ぎ去ったら、見学会などで訪問してみたいです。

1. 京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリ (旧宇治川水理実験所) の実験設備一覧, https://rcfcd.dpri.kyoto-u.ac.jp/openlab/experimental_facilities.html
2. 樋口明生, 研究所めぐり その 11 京都大学防災研究所宇治川水理実験所, 沿岸海洋研究ノート, 6(2), 1968.
3. 国立港湾空港技術研究所の実験設備一覧, <https://www.pari.go.jp/about/facilities/>
4. 国立土木研究所の実験設備一覧, <https://www.pwri.go.jp/jpn/about/shisetsu-map/kensaku.html>
5. 国立寒地土木研究所の実験設備一覧, https://www.ceri.go.jp/contents/facilities/con_faci01/index03.html#1
6. 東京大学 生産技術研究所の実験設備一覧, <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/about/facilities/chiba/rheem/>
7. 高垣直尚, 海洋表面を通しての運動量・スカラー輸送機構に関する研究, 日本流体力学会誌『ながれ』竜門賞受賞記念解説, 39(3), 2020.
8. Donelan, M. A., Haus, B. K., Reul, N., Plant, W. J., Stiassnie, M., Graber, H. C., et al. (2004). On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Geophysical Research Letters*, 31, L18306.
9. Curcic, M., & Haus, B. K. (2020). Revised estimates of ocean surface drag in strong winds. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087647.
10. Takagaki, N., Komori, S., Suzuki, N., Iwano, K., Kuramoto, T., Shimada, S., R. Kurose, and K. Takahashi (2012). Strong correlation between the drag coefficient and the shape of the wind sea spectrum over a broad range of wind speeds. *Geophysical Research Letters*, 39, L23604.

強風下の抵抗係数の考察に関する背景と現状がよくまとめられていましたので、6.2 節を中心に加筆しました。

磯口治

将来構想 2021 「大気海洋境界」グループ「波浪に関わるプロセス：砕波、台風など極端現象」の中において、衛星観測、特に、荒天下の海上風速手法の1つとして、マイクロ波の利用が述べ

られておりました。合成開口レーダー（SAR）に関しては、日本における海洋研究の中では比較的馴染みの薄い衛星センサであると思います。一方で、将来構想の中で記述のある、台風の海上風推定や、波浪の計測など、大気海洋境界に関わる現象を高い空間解像度で可視化できるセンサであり、今後の利用が期待されることから、少し、紹介させて頂きたいと思います。あまり知られていないかもしれませんが、衛星 SAR による地球観測は、1978 年打ち上げの SEASAT 衛星から始まりました。SEASAT は約 3 か月の短命の衛星でしたが、後の衛星海洋観測の主要センサとなる、マイクロ波高度計、散乱計が同時搭載された画期的な地球観測衛星でした。

SAR の大きな特徴の 1 つは、レーダー画像でありながら高い空間分解能を有していることです。将来構想でも述べられている、マイクロ波散乱計や放射計等は、マイクロ波の広がりにより、宇宙からの観測では、空間分解能は 10km 以上となります。これに対して、SAR では合成開口処理により、空間解像度 10m 程度の観測が可能です（主に、陸上利用に対しては、1m を切る分解能での観測も可能となっています）。また、従来のマイクロ波センサは 10km 以上のフットプリント内に陸域がかかると、精度の高い計測が行えなくなるため、沿岸域に観測の空白域が生じるという問題がありました。SAR では、沿岸近くまで計測が可能となります。この特性を生かして、SAR による海上風計測は、当初、沿岸域の海上風を計測する研究が多く行われてきました。特に、沿岸域は、地形によって海上風が歪められ、大きな空間非一様性が生じます。これらの海上風の空間分布によって形成される、波浪や海洋循環に関する研究もおこなわれてきました。

SAR は、散乱計の計測と同様に、海面の粗度を計測します。散乱計では、同一地点を複数の方向から観測すること、風速・風向を計測しますが、SAR では、基本的に、1 方向からの計測のみであるため、風速のみが計測されることが多いです。一方で、海面の粗度を高い空間解像度で画像化できるため、海上風の他に、波浪や、内部波に伴う海面での収束・発散の空間パターンも画像化されます。

SAR の特徴の 1 つとして、位相情報が利用可能であることも挙げられます。話が少し脱線しますが、位相情報を利用して同じ場所を観測した 2 枚の SAR 画像を干渉させることで地表面の高さ情報（凹凸）を計測することが可能となります。現在、全球的に整備されている数値地形モデルのいくつかはこの SAR 干渉処理により作成されたものです。この手法を海洋に適用して、面的な海面高度を計測するのが、2022 年に打ち上げが予定されている、NASA と CNES による SWOT です。従来観測線上に沿って計測されていた海面高度を 2 次元に拡張するもので、GEOSAT、TOPEX/POSEIDON 以降 30 年以上振りに新たなタイプの海面高度データが得られることになり、海洋研究にブレークスルーをもたらすことが期待されます。SWOT では、これまで、計測が出来ていなかった、サブメソスケールの海面高度を計測可能なように設計されています。また、内部波に伴う海面高度の空間分布も計測されると考えられており、鉛直循環を含む海洋上層の混合過程等の研究に対する貢献も期待されています。打ち上げ当初は十分な精度のデータが出てこない可能性もあるかと思いますが、その過程も含めて、観測原理等も勉強しながら解析を行っていくのは、若手会員にとっては、非常に良いタイミングなのではないかと思います。

話を SAR による海上風計測に戻しますが、近年、SAR による海上風算出として、台風・ハリケーン等の強風域での計測が精力的に行われています。マイクロ波散乱計では、高風速域での信号の飽和により、また、降雨による減衰により、台風の海上風計測が困難となる制限がありまし

た。また、放射計では、低周波バンドを利用することで、高風速域を算出するプロダクトも出されていますが、空間解像度がさらに低下するという問題があります。散乱計では、従来同一偏波のみの観測を行っていますが、SAR では同一偏波に加えて、交差偏波も同時に計測しています。近年の研究によりこの交差偏波が、同一偏波と比較して飽和が少なく、高風速域の検出に適していることが明らかとなりました (Zhang and Perrie, 2012)。高風速域の検出における大きな問題は、衛星データと比較する実測データがほとんどないことが挙げられます。米国では、NOAA と空軍により、航空機搭載マイクロ波放射計(Stepped Frequency Microwave Radiometer: SFMR) による、主要なハリケーンの航空機観測が定期的に行われています。このマイクロ波放射計データは、ドロップゾンデによる実測値により校正され、航空機観測線に沿った海上風速や降雨強度が計測されています。SFMR と同期観測された C-band SAR により、75m/s 程度の風速まで、飽和なく計測可能であることが報告されています (Mouche et al., 2019)。SAR による台風・ハリケーン計測からは、眼の形状および、その風速分布が詳細に画像化されます。これらのデータの蓄積により、眼の構造や、レインバンド、アーククラウド等の形態学的な研究 (Li et al., 2013)、熱帯低気圧の予報に対する SAR 海上風同化のインパクト評価(Duong et al., 2021)、また、台風・ハリケーンにより生成される波浪に対する研究 (Zhang et al., 2018) 等も行われています。

SAR による台風・ハリケーンの海上風計測は、上述したように C-band SAR を用いて先行して行われて来ました。現在では、発生した台風・ハリケーンを狙って観測が行われ、算出風速が準リアルタイムで提供されています(<https://eoda.cls.fr/client/oceano/>)。日本においても、日本の SAR 衛星を用いた台風の海上風計測の取り組みが始まっています。JAXA が運用している SAR 衛星は、L-band です。C-band より波長が長く、より高風速域まで計測可能となると期待されています。また、C-band では降雨減衰の影響が報告されていますが、L-band では降雨の影響も低減されることが期待されます。実際、JAXA の L-band SAR (PALSAR-2) と SFMR の同期観測データを用いた海上風算出が実施され、現状、55m/s 程度までの対応関係が確認されています (Isoguchi et al., 2021)。今後、高風速域の同期観測が得られれば L-band の検出能力が明らかになると考えられます。

SAR の利用の一例を紹介してきましたが、これまで、それほど、利用が進んでいない主要な要因として、観測頻度とデータ購入費の問題があると考えています。前者に関しては、高い空間解像度のトレードオフとして、観測幅が全球観測のセンサに比べて狭くなり(最大 500km 程度)、その影響で観測頻度が低くなります。散乱計、放射計等が 2~3 日の繰り返し周期で全球を観測できるのに対して、PALSAR-2 では、同じ地点を観測するのに、平均 7 日程度を要します。また、データ量等の制限により、全球を連続して観測することができず、スナップショットでの観測となります。ただし、近年は、多くの国の宇宙機関で複数の SAR 衛星によるコンステレーションが運用、または、計画されていて SAR 衛星の数が増えています。また、民間による小型 SAR 衛星の打ち上げが、欧米、日本を中心に活発化しています。これらの小型 SAR 衛星は、いずれも 20 機程度以上のコンステレーションが計画されており、原理的には数時間以内間隔での観測が可能となります。

後者に対しては、衛星データのオープン&フリー化の流れにより、これまで、購入が必要だった SAR データに関しても、無償でデータの利用が可能となりつつあります。実際に、ヨーロッパ

の Snetinel-1 SAR 衛星に関しては、Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>) からダウンロード可能です。このように、今後は、SAR の海洋観測データが爆発的に増加し、目に触れる機会も多くなるのではないかと思います。これらの、高い空間解像度のデータを、従来の観測データや数値モデル等と組み合わせて、大気海洋境界のプロセス研究にどう生かすかは、新たな、視点やアイデアが必要となると考えています。

参考文献

- Zhang, B., and Perrie, W. (2012). Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential technique for hurricanes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 531–541.
- Mouche, A., Chapron, B., Knaff, J., Zhao, Y., Zhang, B. and Combot, C. (2019). Copolarized and Cross - Polarized SAR Measurements for High - Resolution Description of Major Hurricane Wind Structures: Application to Irma Category 5 Hurricane, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI: 10.1029/2019JC015056.
- Li, X., Zhang, J.A., Yang, X., Pichel, W. G., DeMaria, M., Long, D., and Li, Z. (2013), Tropical Cyclone Morphology from Spaceborne Synthetic Aperture Radar, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 215–230.
- Duong, Q.P., Langlade, S., Payan, C., Husson, R., Mouche, A. and Malardel, S. (2021), C-Band SAR Winds for Tropical Cyclone Monitoring and Forecast in the South-West Indian Ocean, *Atmosphere*, DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12050576>.
- Zhang, L., Liu, G., Perrie, W., He, Y., and Zhang, G. (2018), Typhoon/Hurricane-Generated Wind Waves Inferred from SAR Imagery, *Remote Sens.* 10, 1605; doi:10.3390/rs10101605.
- Isoguchi, O., Tadono, T., Ohki, M., Shimada, U., Yamaguchi, M., Hayashi, M., and Tanase W. (2021), HURRICANE OCEAN SURFACE WIND RETRIEVAL FROM ALOS-2 PALSAR-2 CROSS-POLARIZED MEASUREMENTS, 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (in press).

海洋学会にとっての新しいリモートセンシングとして、SAR による風速や波浪推定の情報と展望がよくまとめられていましたので、著者に加わっていただくとともに、6.1 節、6.3 節、7 節の加筆に協力頂きました。

富田裕之

本原稿では、境界層研究の枠組みに栄養塩沈着や気体交換などの視点が入り入れられてとても有意義なものと感じました。一方で、衛星をはじめとする観測に基づく海面フラックスの推定については、6 節で触れられていますが、もう少し加筆の必要がある様に思いました。

一つの理由は、OceanObs や UN Ocean Decade といった国際的な動向との関わりです。OceanObs' 19 でも海面フラックスの観測は重要な課題として WP を出版し、その後のアクションとして、実はつい先週のことですが、Observing Air-Sea Interactions Strategy (OASIS) が

UN Ocean Decade Programme に採択がされています。これらは、私も関わっております SCOR Working Group #162 とその他のメンバーによって国際的な活動がなされています。これらの活動に対する日本からの貢献は、海洋学会として視野に入れるべき課題だと思いますので、その点で原稿が改善されたとても良いと考えています。

OASIS に関する記述を 4 節に加えました。

6. 中緯度

本多牧生

3.2 節： 亜熱帯海域における栄養塩の供給メカニズムとして中規模渦、台風など物理イベントによる亜表層からの栄養塩の突発的な供給についても言及してはどうか？

亜熱帯循環内では渦や台風により下層から供給される栄養塩はほぼレッドフィールド比で DIC (全炭酸) も一緒に運んできます (Johnson et al., 2010, Nature; Hashihama et al., 2021, Nat. Commun.). 亜熱帯では大気から海洋への生物的 CO₂ 吸収が大きいので、純群集生産を支える窒素・リン供給は、「下層からくる栄養塩」では結局十分説明できないこととなります。本稿では「下層からの栄養塩供給 (中規模渦や台風による供給を含む)」と注意書きする程度としました。

永野憲

これまでの研究を振り返り、今後 10 年の進むべき方向性を探る試みは重要であり、大変素晴らしい取り組みであると思います。少しでも参考になればと思い、以下に、コメントを述べたいと思います。

まず、全体を通して黒潮についての記述が大変薄いことが気になりました。これは、Fig.1 にも端的に現れていて、混乱水域については詳細に描かれていますが、黒潮周辺は大変簡素です。黒潮についての記述は、第 2 節にみられますが、乱流、モード水、大気海洋相互作用が主役であり黒潮は脇役といった感があります。黒潮は、北太平洋西部でもっとも顕著な海流であり、生態系や気候変動に果たす役割も大きいものです。また、2017 年より黒潮大蛇行が発生しています。その以前の大蛇行は、2004 年～2005 年に発生していました。これらの大蛇行は、衛星観測等の現代的な観測が充実した時期のイベントであり、今こそ黒潮についての知見をまとめるのには良い機会かと思えます。加えて、下に述べますが、CSK-2 と呼ばれる黒潮とその周辺海域の国際観測プロジェクトも計画されています。以上の理由により、黒潮についての項目を追加すべきかと思えます。以下に、具体的に述べます。

1. 2017年に発生した大蛇行については、引用されている Usui (2019)以外に、すでにいくつかの研究があります（モデルを用いた研究は、他のどなたかが指摘されると思うので、ここでは観測ベースの研究に絞ってます）. Kawabe (1995)等によって調べられた過去の大蛇行との比較もされており、現在発生している大蛇行は 1981-1984 年の大蛇行との類似性が指摘されています。さらに、大蛇行にも安定タイプと不安定タイプがあることを以下の論文で指摘しています (Nagano et al., 2019, 2021). また、現代的な観測手法で観測された大蛇行である 2004-2005 年の大蛇行の観測的知見も得られてます (Ambe et al., 2009; Nagano et al., 2018).

Ambe D., T. Endoh, T. Hibiya, and S. Imawaki (2009) Transition to the Large Meander Path of the Kuroshio as Observed by Satellite Altimetry, *La mer* 47, 19-29

Nagano A, Hasegawa T, Matsumoto H, Ariyoshi K (2018) Bottom pressure change associated with the 2004–2005 large meander of the Kuroshio south of Japan. *Ocean Dyn* 68(7):847–865, doi:10.1007/s10236-018-1169-1

Nagano A., Y. Yamashita, T. Hasegawa, K. Ariyoshi, H. Matsumoto, M. Shinohara (2019) Characteristics of an atypical large - meander path of the Kuroshio current south of Japan formed in September 2017, *Mar. Geophys. Res.* 40:525-539

Nagano A, Yamashita Y, Ariyoshi K, Hasegawa T, Matsumoto H and Shinohara M (2021) Seafloor Pressure Change Excited at the Northwest Corner of the Shikoku Basin by the Formation of the Kuroshio Large- Meander in September 2017. *Front. Earth Sci.* 8:583481. doi: 10.3389/feart.2020.583481

また、これらの研究で気づかれると思いますが、幾つかは地震学の研究者との共同研究です。近年、黒潮の流れる海域は、漁業活動が活発であるため、長期の係留観測が難しい海域となっています。そのため、海底に設置するタイプの測器を用いる必要があります、地震計と一緒に設置されることの多い海底圧力計のデータを（衛星データと組み合わせ）解析することでこのような成果が得られています。地震分野に限らず、他分野との協力を行うことも今後の10年で行う必要があると感じます。

2. 黒潮の流量についての研究もこれまでの10年間ぐらいと今後も継続すべき観測項目であると思います。本論文でも取り上げられている栄養塩の輸送、気候変動への影響についても、黒潮の流量とその変動の把握が基礎になると考えます。流量の研究については、Nagano et al. (2013)に引用した論文を参考にいただければと思います。

Nagano A, Ichikawa K, Ichikawa H, Konda M, Murakami K (2013) Volume transports proceeding to the Kuroshio extension region and recirculating in the Shikoku Basin. *J Oceanogr* 69(3), 285-293, doi: 10.1007/s10872-013-0173-9

3. 黒潮の流量にも関係しますが、琉球列島の東を北向きに流れる琉球海流系についても、これま

での 10 年ぐらいで解明が進んでいます。琉球海流系起源の流量が日本南岸の黒潮に占める流量のかなりの部分を占めていることが水塊解析からわかってます (Nagano et al., 2009). また、琉球海流系が黒潮と合流することで、流量平均水温を顕著に低下させるので、正味の熱輸送量に果たす役割も小さくありません。「Kuroshio」の Nitani (1972)等の研究で古くからその存在は知られていた流れですが、琉球海流系の起源については明らかとなっておりません。「系」とついた用語が示すように、複雑であり、未だ解明すべき点のある海流であり、いまのところ沖縄本島よりも北の海域でのみ循環の様子が十分に調べられています。今後 10 年で取り組むべき研究課題の一つでもあります。この説明については、Nagano et al. (2012) の Introduction を参照していただくと分かりやすいかと思います。琉球海流系についても記述を追加していただくとありがたいです。参考文献は、以下の論文とその中に引用されている論文を追加していただければと思います。

Nagano,A., Ichikawa,K., Ichikawa, H., Konda, M., and Murakami, K. (2009) Synoptic flow structures in the confluence region of the Kuroshio and the Ryukyu Current, 119, C06007, doi:10.1029/2008JC005213

Nagano A., K. Ichikawa, H. Ichikawa, Y. Yoshikawa, M. Konda, and Murakami (2012) Subsurface current structures east of the Amami-Oshima Island based on LADCP observation, J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci. (海洋理工学会誌), 18, 2, 19-26, doi: 10.14928/amstec.18.2_19

4. 本論文を通して、黒潮について以下のレビューも参考になるとと思います。

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, doi:10.1016/j.pocean.2021.102513

5. 将来の観測ファシリティを整えることにも注目する必要もあると思います。現在の海洋学の知見があるのは、過去に観測環境の整備があったからであることも注目すべきです。1960年代から1970年代にかけて行われた Cooperative Study of the Kuroshio and adjacent regions (CSK) より始まる黒潮とその周辺海域での観測環境の整備は、137°E 線等の観測となって現在まで続いています。そのころから我々をとりまく状況 (EEZ の存在や日本以外のアジアの国々の台頭) も変化し、新たな観測ファシリティについても考えて行く必要が生まれていると思います。そうした状況の中で、現在、2nd Cooperative Study of the Kuroshio and adjacent regions (CSK-2) として、Intergovernmental Session of the IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC)に flagship project として Science Action Plan が提出されています。CSK-2 だけではなく、他にも予定されている観測ファシリティに関するプロジェクトがあると思われるので、主だったプロジェクトは把握して盛り込むべきかと思います。

また、CSK-2 は、国際的な観測プロジェクトである点も強調したいです。黒潮は、東アジアの

国々の周辺を流れており、日本の EEZ 内と公海のみでの観測で十分とは言えず、他国との共同で観測を進める必要があることも認識すべきであると考えてます。また、長周期の変化について明らかにするためには、一時的な観測に終わることなく、モニタリングシステムとして構築する必要もあります。このような広域で、しかも長期に渡る観測を成功させるためには沿岸国との共同研究を行う必要性があり、この辺りの認識も必要です。本論文で議論されている将来的に取り組むべき課題は、このような国際的な観測システムの充実なしには実現しないと思います。2019 年秋の海洋学会秋季大会にてシンポジウム「今後の黒潮と周辺海域の国際共同観測を考える」を開催し（月刊海洋, Vol.2, No.7, 2020）し、国内の主だった観測プロジェクトについて議論を行いました。それをもとに、Ando et al. (2021)では将来の国際観測プロジェクト CSK-2 の必要性を議論しています。

観測システムの構築と同時に、データ公開システムの構築もデータ交換やデータシェアを通して研究を促進するためにも必要だと思います。CSK-2 では、このデータ公開システムの構築がプロジェクトの鍵と位置付けており、IOC/International Oceanographic Data and Information Exchange (IODE) のデータ公開ポリシー (https://www.iode.org/index.php?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=95) に沿ったデータ公開を行うことを提案しています。現場データを用いたデータ解析だけでなく、このようなデータ公開を通じて、近年有力な研究手段となったデータ同化プロダクトの再現性の向上を期待することができると考えています。このような観測ファシリティの充実があつてこそ、論文中にある今後の必要とされる研究課題に取り組むことができると期待されます。

以下、ついでですが、いくつかの研究を紹介したいと思います。論文中にお加えいただければ幸いです。

a. Line 159-160: 「例えば近年、北海道南東沖の暖水渦が親潮の沿岸での南下を妨げたことで北海道太平洋側におけるブリの漁獲量が増加したことが指摘された (Miyama et al., 2021)。」データ解析からも暖水渦が親潮の沿岸での南下を妨げたことはすでに示唆されています。Hasegawa et al. (2019)を引用していただけると幸いです。Hasegawa et al.でも引用していますが、Itoh and Sugimoto (2002) でこのメカニズムは指摘されています。

Itoh S., and Sugimoto T. (2002) Behavior of warm-core rings in a double-gyre wind-driven ocean circulation model. *J Oceanogr* 58:651-660

Hasegawa, T., Nagano, A., Matsumoto, H., Ariyoshi, K., and Wakita, M. (2019). El Niño-related sea surface elevation and ocean bottom pressure enhancement associated with the retreat of the Oyashio southeast of Hokkaido, Japan. *Mar. Geophys. Res.* 40, 505 - 512. doi: 10.1007/s11001-019-09392-8

b. 「また、磯口ジェット(J1, J2, Fig. 1; Isoguchi et al., 2006; Miyama et al., 2018; Mitsudera et al., 2018) により亜熱帯循環から混合水域 (MWR, Fig. 1) を経由して亜寒帯循環へ運ばれる高塩

分水が、冬季混合層深度に影響し…」この文は、もう少し引用を正確にすべきかと思います。Miyama et al. と Mitsudera et al. は、磯口ジェットの海底地形による制御を調べてたと思います。この二つの論文は、別の文にして引用すべきです。また、Nagano and Wakita (2019)でも、海底地形に因らずとも風による応答でも似た流れができることを指摘しています。

Nagano A., and M. Wakita (2019) Wind-driven decadal sea surface height and main pycnocline depth changes in the western subarctic North Pacific, Prog. Earth Planet. Sci., 6, 39, doi:10.1186/s40645-019-0303-0

黒潮の大蛇行や流量変動、大気海洋相互作用に関する最近の知見を加えました。海底観測網とのつながりや、琉球海流系に関して課題が多く残っていることも述べました。Fig. 1 は黒潮の大蛇行流路や琉球海流系を含めるなどし、大幅に改訂しました。CSK-2 については Fig. 2 に含めると共に、Ando et al. (2021) を参照して本文中にも追記しました。海洋熱波についても論文を追加し、磯口ジェットについては、その形成に与える影響に着目した形で記述するようにしました。

安藤健太郎

L1、“中緯度”： 熱帯域の10年展望では、エルニーニョ現象が中心に記載され、ここでは、東シナ海から北の海域です。フィリピン沖から台湾沖までの記載がありません。台風の発生海域であるし、黒潮の源流域でもあって、案外空白です。追記したほうがよいかと。

Fig. 2、“BGC アルゴフロート”： アルゴは、BGC だけではない。また、観測システムは他にもある。GOOS としてまとめてよいかと。

L304-305、“世界気候研究計画 (WCRP) のコアプログラム 304 の一つである CLIVAR (Fig. 2) でも、中緯度の大気海洋相互作用は重要なトピックである。”： IOC/WESTPAC の CSK-2 でも重要課題としています。よろしければ、加筆頂ければと思います。

L633、“国内外の大型プロジェクト”： IOC/WESTPAC では、CSK-2 の開始が政府間会合で承認されたところです。次に向けて、国連海洋科学の10年への貢献を考えています。海外との大型プロジェクトとして、幾つか並べて記載する場合は、第2回黒潮の国際共同研究を入れてください。

L639、“一層社会にアピールする”： Decade への貢献を考えるのであれば、アピールのみならず、社会との協働を行うと記載すると良いです。

Ando et al. (2021) を参考に、CSK-2 に関する記述を追加しました。フィリピン沖から台湾沖

までの記載も加えました。Fig. 2 の BGC Argo は、「本稿で記載している中緯度海洋学研究に関わるもの」として挙げているため、より広い視点の GOOS などを入れることはしませんでした。Decade への貢献について「社会との協働を行う」旨、追記しました。

遠藤寿

481-483 行目：「原核生物で 1,000 万を超える種の遺伝子配列情報が検出された」とありますが、原核生物の種多様性が 1,000 万種を超えるように見受けられ、誤解を招きかねないと思いました。同文で引用されている文献では、種多様性の指標になりうる mitags の OTU 数は 35,650 と記載されております。それらの種由来の遺伝子配列が 1,000 万以上あったということを意図されたのかもしれませんが、その場合も表現を変更されるのが良いかと思いました。

「原核生物も難培養性種の多様性評価が可能となり、多くの種は未発見とされるが、地球規模の海洋漂泳区で 3 万 5 千を超える種、またそれらの種に由来すると考えられる 1,000 万を超える遺伝子配列が検出された (Sunagawa et al., 2015)」と修正しました。また、原核生物の多様性が真核生物に比べて低いと誤解が生じぬよう、「海洋は生物多様性の宝庫であり、正確な見積もりは困難であるが、真核生物では約 220 万、原核生物では約 100 億にも及ぶ種が海洋には存在すると予想され、その多くは未記載、未発見種である (Mora et al., 2011; Locey and Lennon, 2016)」と追記しました。

須賀利雄

真に物理・化学・生物分野が融合された素晴らしい総説論文だと思います。最近の研究を俯瞰し、これから取り組むべき課題を把握する上で、幅広い読書にとって大変有益な内容だと思います。2つほどコメントがあります。

(1) 「アルゴフロート」は、国際プログラム Argo (アルゴ) の下で展開されているプロファイリングフロートを指します。観測装置の名称としては「プロファイリングフロート」(あるいは略して「フロート」と呼ぶのが正しいです。Argoの一環として投入されていないプロファイリングフロートをアルゴフロートと呼ぶのは誤りです。このことを念頭に置き、特に以下の表現について検討してください。

Fig.2 : プロジェクト (またはプログラム) の名称として、「BGCアルゴフロート」を用いるのは不適切だと思います。「BGCアルゴ」あるいは「生物地球化学アルゴ (BGC Argo)」などと表記すべきだと思います。

218行目：「アルゴフロート」にはArgoプログラムの下で展開されているフロートという意味がありますが、「水中グライダー」は観測装置の名称です。水中グライダーによる観測網構築を目指

すプログラムとしてOceanGlidersがあります。厳密にいうと、「水中グライダー」と並列にするなら「プロファイリングフロート」のほうが適切です。これらの観測装置への硝酸塩センサーの搭載は既に実用化されています。一方、観測網としてのArgoやOceanGlidersに栄養塩センサーや乱流微細構造測定センサーを導入することを意図しているなら、そのように明確に記述したほうがいいと思います。なお、BGCアルゴ（プログラム）には硝酸塩センサーによる計測がすでに導入されています。

622行目：「BGCアルゴフロート...への乱流計，生元素センサー，ビデオプランクトンレコーダー等の搭載」は、文字通りに解釈すると、BGCアルゴ（プログラム）にそれらのセンサー等を導入するという意味になります。ここでは、それを意図していますか？もしそうなら、そこには技術的な問題だけでなく、Argoプログラムの性格の変更、（国連海洋法の下での）国際的ルールの変更など、多くの課題が生じることになります。一方、もし、（観測装置としての）プロファイリングフロートに、それらのセンサー等を搭載することを意図しているのなら、そのように記載するほうがいいと思います。

（2）BGCアルゴは、1000台のBGCフロート（酸素、クロロフィル a、硝酸塩、pH、懸濁粒子、照度のセンサーを搭載）の継続的な全球展開を目指すプログラムですが、予算的な裏付けがあるわけではありません。今年から始まった米国 NSF の GO-BGC プロジェクトはこれから 4～5 年ほどで 500 台の BGC フロートの投入を目指していますが一度限りの投入であり、持続的な展開を保証するわけではありません。米国の SOCCOM プロジェクトや EU のプロジェクトで、南大洋や大西洋への投入が進んでいるのに対して、BGC フロートを投入する大型研究プロジェクトが存在しない北太平洋における BGC フロートの展開は進んでいません。将来的には、BGC アルゴを持続的な観測網として維持していくこと目指すにしても、まずは、ある程度明確な科学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用（科学研究そのもの）を北太平洋で進めないと、（北太平洋における）BGC アルゴの早期実現は困難かもしれません。そのような視点に立って、特に北西太平洋域における BGC フロートによる学際的な科学研究プロジェクト立ち上げの必要性に言及してくれることを期待します。

（BGC）Argo フロートの名称の適切な使い方および水中グライダーや他のフロートとの区別化について、本稿を通して誤解のないよう修正しました。BGC Argo フロートによる学際的な研究プロジェクト立ち上げの必要性についても、5 節に記述を加えました。

7. 新たな手法と問題

渡部裕美

現在、議論されている海洋の様々な問題について取り上げられていましたが、海洋の「音汚染（noise pollution）」あるいはサウンドスケープなどの音に関連する手法や問題についても触れてい

ただけると面白いかと思いました。空中と比較して、海中では音は広く早く伝わるため、海洋の状況を広く効率的に調べるための手法を提供することが期待されますし、また生物が音でコミュニケーションをとったり、環境の認識に利用している可能性も示唆されています。

原稿では、eDNA では検出された生物がどのような状態にあるのか分からないという課題が示されていましたが、生物が自発的に音を発する場合は繁殖などの行動に付随することがほとんどです。サウンドスケープも eDNA 同様、リファレンスが非常に限られているという問題がありますが、相補的な手法を組み合わせることにより、より効率的で正確な生態系の把握が可能になるかもしれません。また、AI などを用いた画像解析技術の発達も、eDNA による生物相の把握を補う手法として検討の余地があるかもしれません。(参考になりそうな論文を添付いたしました。)

4 節にサウンドスケープ、AI による画像解析の将来性について追記しました。

依田憲

L308、「(Aoki et al., 2007)」: 2007 年時点で加速度やカメラも使われてますので、この文献はおかしいです。ここは引用無くて良いかもしれません。

L311-312、「・・・海上と海洋表面の環境観測ができるようになっている。」: 次の文(ウミガメ・鯨類)では論文引用しているので、ここも鳥の論文を引用してはどうでしょう。

L317、「直接観察が難しいバイオリギング」: 「直接観察が難しいバイオリギング」はおかしいです。「海洋動物は直接観察することが難しいので、ビデオカメラによる……」など?

L388、「現在、岩手県で実施されている」: 他の地域でも調査を実施していますし、これに関してはだいたい似た傾向ですので、この部分は消去してはどうでしょうか。

L389-390: 「9 月上旬の 2 週間程度の子育て期」 → 「8 月中旬から 9 月の子育て期」

L390、「準リアルタイム観測ができない」: いまは衛星発信機も装着できるので、日に数点のデータであれば準リアルタイムでデータが手に入ります。ただし、加速度などの高速サンプリングデータは衛星では無理です(書き方を変えていただければ)

L393-395、「現状ではこのような長期観測データは照度計と着水時の海面水温で 1 日毎の位置を推定するジオロケーターと呼ばれるロガーを繁殖地で装着し、一年後に繁殖地に戻ってきた際に回収するまで入手できない。」: 同上。論旨が変わってしまうので手を入れません。現在でも衛星発信機を用いてデータ取得は可能です。一年間のデータではないですが、例えば Yoda et al. (Current Biology2017; Ecology2021)は、衛星発信機をオオミズナギドリに装着した研究です。

L397-398、「既に大型の鳥類では GPS, 太陽光発電, アルゴシステムによる衛星通信を用いた

リアルタイム観測が実現している。」： 要はこれとほぼ同じことがオオミズナギドリサイズの鳥でも可能ですので、L389-398 あたりは消しても良いかもしれません

ご指摘に従い修正しました。また、引用文献の削除および追加を行いました。

平澤享

L183-185、「BGC Argo の重要性については、本特集の熱帯域（土井ら, 2021）, 中緯度域（橋濱ら, 2021）, 深層（岡ら, 2021）の将来構想でも繰り返し強調されているので参照されたい。」： 極域は入っていないでしょうか？

L214、「照度」： 下方向放射照度または光量子では？

<https://biogeochemical-argo.org/measured-variables-downwelling-irradiance.php>

L261、「衛星リモートセンシング」： 海色リモートセンシング？ BGC Argo のデータを逆に海色リモセンの検証や補間に利用する方法もされていると思います。

L673： 観測衛星 → 地球観測衛星

ご指摘に従い修正しました。必要な文献の追加も行いました。

佐藤克文

L294-295： Devries and Wohlshlag, 1964 → DeVries and Wohlshlag, 1964

L303： 「ロガーにのみデータが」→「ロガーにデータが」、 「ロガーを回収することでデータを」→「ロガーを回収することでのみデータを」

L310、「圧力」： これは深度を測定する為に最初に用いられているため、2行上の文章と重複するのではないのでしょうか。

L310、「加速度、角速度」： この2つを入れるならば、当然速度（対水速度）も入れるべきでは？

L312： 「ウミガメやアザラシ・クジラ類などの」→「ウミガメ類といった爬虫類やアザラシ類・クジラ類などの」

L342： 「アザラシ類のいない熱帯・中緯度域においては、ウミガメがその役割を担う。」→「熱帯・中緯度域 においては、ウミガメが極域におけるアザラシ類の役割を担う。」（実際には熱帯や

中緯度域にもアザラシ類はいるので、このように変えてみました。)

L350-351、「また、ウミガメは Argo フロートで観測困難な沿岸域や西岸境界流域表層の高頻度観測に適している。」： ここはもう少し詳しく説明しないと、読者には伝わらないのでは。まず、アルゴは 2000m まで潜るため、それより浅い海域に投入するのは難しいが、ウミガメの場合はそこを考慮する必要はない。アルゴは 10 日に 1 度の頻度でしか観測できないが、ウミガメではほぼ毎日データが得られる。この 2 点を説明してはいかがでしょうか。

L370： 「プロペラ型の流速計」→「プロペラ型の対水速度計」

L380、「海上海洋観測」： 言葉だけみると、海面より上と読めてしまいます。海洋観測もしくは、気象海洋観測で良いのでは。

ご指摘に従い修正し、必要に応じて説明の追加をしました。

須賀利雄

今後10年の海洋学の発展に関わる新たな手法として取り上げられた環境DNA、BGC Argo、バイオロギングは、いずれも極めて重要なものであり、また、人間活動が海洋に与える影響を象徴する海洋放射能と海洋プラスチック問題を取り上げたこともタイムリーであって、それらに関する最新の情報と課題がまとめられた本総説論文は幅広い読者にとって大変有益なものだと思います。

バイオロギングに関してコメントがあります。337-341行目で、データが(おそらくGTSを経由して)現業の海洋同化システムに入力される体制について述べています。また、410-412行目でGOOSでの議論について言及しています。データがGTSを通して現業の海洋同化システムに入力されるような観測ネットワークは、GOOS OCG(Observation Coordination Group)ネットワークと位置づけられ、GOOS OCGによって種々の課題の解決やネットワーク間の調整が図られています(https://www.goosocan.org/index.php?option=com_content&view=article&id=32&Itemid=130)。それらの観測ネットワークは、OCG Networks、OCG Partner Networks、OCG Emerging Networksに分類され、ArgoはOCG Partner Networkに位置づけられています。バイオロギングは、Animal Borne Ocean Sensors (AniBOS)として、OCG Emerging Networkに位置づけられています。各OCGネットワークのSpecification Sheetが

https://www.goosocan.org/index.php?option=com_content&view=article&id=247

にあります。日本におけるバイオロギングのデータを GOOS の中に位置づけ、気象庁とも連携して、現業の海洋同化システムに入力される体制を構築していくためには、この AniBOS に積極的に参画していくことが重要だと思います。以上の点について、何らかの形で言及してくれることを期待します。

バイオリギングデータの GOOS における位置づけ、国際観測ネットワークへの積極的な参画の必要性について追記しました。

8. 複数グループに対するコメント

角田智彦【沿岸域、新たな手法と問題】

細かい点ですが、1 点だけコメントをさせて下さい。対象は「沿岸」あるいは「新たな手法と問題」となります。

「沿岸」では 402 行目「多少精密度が書けても・・・」にて、「新たな手法と問題」では 680 行目「市民が参加・・・」にて、それぞれ、市民参加の視点が書かれております。まさに、海洋科学 10 年が開始される今、必要な視点と思いました。コメントは、これらへの専門家の関与となります。

専門家が必ずしも関与しないモニタリングが、最近、少しずつ見られるようになりました。今後とも、増えてくると思いますが、この種の沿岸モニタリングのシステムデザインの際に専門家が関わるかどうかで、使えるシステムになるかどうかが決まると感じています。使えないシステムになることは市民にとっても本意ではなく、こういったシステムデザインの際の、我々の関与の必要性についての言及追加を提案させていただきます。まさに海洋科学 10 年が目指す「Co-Design」で、最低限の校正などへの関与で、専門家と市民の、より良いフィードバックループが出来ると感じました。

沿岸域： 沿岸のモニタリングにおける専門家と市民との関係性についての記述を加えました。
新たな手法と問題： 4 節に市民科学への関与の重要性について追記しました。

大貫陽平【深層、大気海洋境界】

「大気海洋境界 6. 波浪」で言及されていますように、波々間非線形相互作用モデルの開発は、波浪予測の精度を高めるための中核となる取り組みであります。この分野では、伝統的に、Hasselmann (1962) によって定式化されたエネルギースペクトルの時間発展方程式を効率よく計算する手法が求められてきました (例: Masuda 1980)。原典の理論は、自由表面におけるエネルギースペクトルのゆっくりとした変動を記述するものでしたが、近年では、より突発的な風強制への応答や海氷による減衰効果等も考慮して予測できるよう、計算式を拡張する試みがあります (Liu et al. 2021)。海氷-波浪相互作用については「極域」においても重要課題として位置づけられており、分野を縦断する波浪研究の将来性について一層深く論じてよいかもしれません。

ところで、Hasselmann の波々間非線形相互作用理論は、表面波だけでなく、回転成層流体中の内部波にも適用することができます。古くは中緯度海洋において普遍的に存在するとされる

Garrett-Munk スペクトルを伝えるエネルギーフラックスの計算に利用されてきました (Müller et al. 1986)。近年では、中深層における乱流混合の定量化を目的として、全球におけるエネルギースペクトルの時間発展を計算する実際的なモデル開発も試みられています (Pollmann et al. 2017)。これらを一例とし、潮汐や風によってつくられた内部波の散逸がもたらす深層混合の推定は、まさに世界的なホットトピックです (Whalen et al. 2020)。近年の観測やシミュレーション研究では、乱流混合のエネルギー効率が内部波の性質に依存して変動するとの報告がなされているほか (Iijchi et al. 2020; Onuki et al. 2021)、内部波に加えてサブメソスケール渦や地衡流の存在を考慮し、エネルギー散逸率の推定式を検証しなおす動きもあります (Barkan et al. 2017; Takahashi et al. 2021)。OMIX や Climate Process Team といった国内外の動向を踏まえ、「深層」において、内部波研究についても何らかの言及をされることが望ましいと感じました。

表面波と内部波の理論的共通性にも見られますように、波動・渦・乱流等に関する力学研究は、海洋学の諸分野をつなぐ言わば縦糸として伝統的に重んじられてきました。その存在意義は現代においてもまったく失われておりません。今後、気象学会や流体力学会といった近隣組織との連携を深めながら、数理物理学や計算科学の手法に根ざし、物理素過程における新たな発見を目指す野心的な取り組みを地道に続けることで、長い目で見たときの海洋学諸分野への貢献がなされるものと考えます。

参考文献:

- Hasselmann, K. (1962). On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part 1. General theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 12(4), 481-500.
- Masuda, A. (1980). Nonlinear energy transfer between wind waves. *Journal of Physical Oceanography*, 10(12), 2082-2093.
- Liu, Q., Gramstad, O., & Babanin, A. (2021). Kinetic equations in a third-generation spectral wave model. *Journal of Fluid Mechanics*, 910.
- Müller, P., Holloway, G., Henyey, F., & Pomphrey, N. (1986). Nonlinear interactions among internal gravity waves. *Reviews of Geophysics*, 24(3), 493-536.
- Pollmann, F., Eden, C., & Olbers, D. (2017). Evaluating the global internal wave model IDEMIX using finestructure methods. *Journal of Physical Oceanography*, 47(9), 2267-2289.
- Whalen, C. B., de Lavergne, C., Garabato, A. C. N., Klymak, J. M., Mackinnon, J. A., & Sheen, K. L. (2020). Internal wave-driven mixing: governing processes and consequences for climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 606-621.
- Iijchi, T., St. Laurent, L., Polzin, K. L., & Toole, J. M. (2020). How variable is mixing efficiency in the abyss?. *Geophysical Research Letters*, 47(7), e2019GL086813.
- Onuki, Y., Joubaud, S., & Dauxois, T. (2021). Simulating turbulent mixing caused by local instability of internal gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 915.
- Barkan, R., Winters, K. B., & McWilliams, J. C. (2017). Stimulated imbalance and the enhancement of eddy kinetic energy dissipation by internal waves. *Journal of Physical*

Oceanography, 47(1), 181-198.

Takahashi, A., Hibiya, T., & Naveira Garabato, A. C. (2021). Influence of the Distortion of Vertical Wavenumber Spectra on Estimates of Turbulent Dissipation Using the Finescale Parameterization: Eikonal Calculations. *Journal of Physical Oceanography*, 51(5), 1723-1733.

深層： 提案頂いた内部波研究についての参考文献のいくつかを、原稿に追記しました。

大気海洋境界： 波々相互作用の背景と展望がよくまとめられていましたので、6.3節を中心に加筆しました。