

— 総 説 —

海洋学の10年展望2021：大気海洋境界*

岩本 洋子^{1**}・相木 秀則²・磯口 治³・大林 由美子⁴・
近藤 文義⁵・近藤 能子⁶・西岡 純⁷

要 旨

海洋は大気と熱、気体、粒子を交換することで、地球の気候に大きな影響を与える。海洋上の大気境界層における物理・化学・生物過程は、海表面でのCO₂の吸収や雲の生成を介して地球大気の放射収支へ影響する。これはさらに気温・降水・日射の変化を経て海洋にフィードバックをもたらす。気候問題のみならず、台風などの極端現象や波浪の観測・予測を通して、大気海洋境界は人間生活と直接的に関わっている。本稿では、大気と海洋の境「界面」にとどまらず、一次生産の場となる有光層から対流圏までの鉛直的に広い領域とその衛星観測を対象として、次の10年で取り組むべき研究課題を論じた。大気からの栄養塩沈着について、窒素、リン、鉄を含むエアロゾルの沈着は一次生産に寄与するのか？海表面のマイクロレイヤーが大気海洋界面として物質循環に果たす役割とマイクロレイヤーの物性をコントロールする要因は？温室効果気体や海洋生物起源気体の交換量を精緻化するために何が必要か？どのような海洋性エアロゾルが雲形成に寄与し放射収支を変化させ得るのか？波浪に関わるプロセスについて、物質やエネルギーの交換量を左右する時空間分布を把握するために必要なアプローチは何か？これらの問いに答えを出し人類が自然環境と共生するために必要な研究、ならびに日本海洋学会と隣接学会との連携について、次の10年を展望する。

キーワード：栄養塩沈着、海表面マイクロレイヤー、気体交換、エアロゾル生成、波浪

* 2021年7月15日受領；2021年9月7日受理
著作権：日本海洋学会，2021年

1 広島大学 大学院統合生命科学研究科
〒739-8521 広島県東広島市鏡山1-7-1
2 名古屋大学 宇宙地球環境研究所
〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町
3 (一財)リモート・センシング技術センター
〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1 宇宙航空研究開発機構 筑波宇宙センター内
4 愛媛大学 沿岸環境科学研究センター
〒790-8577 愛媛県松山市文京町3
5 海上保安大学校
〒737-8512 広島県呉市若葉町5-1
6 長崎大学 大学院水産・環境科学総合研究科
〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14
7 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター
〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

** 連絡著者：岩本 洋子
〒739-8521 広島県東広島市鏡山1-7-1
TEL：082-424-4568 FAX：082-424-0758
e-mail：y-iwamoto@hiroshima-u.ac.jp

1. はじめに

本稿では、地理的に区別された海域ではなく、大気と海洋の境界で起こる様々な現象を取り扱う。「大気海洋境界」というタイトルには、大気と海洋の境「界面」とどまらず、一次生産の場となる有光層から対流圏までの鉛直的に広い領域を対象にしたいという著者らの思いが込められている。2013年の将来構想(花輪・津田2013; 浜崎ら, 2013; 神田ら, 2013; 岡ら, 2013)を読み返すと、大気海洋境界に関わる研究トピックスとして、温室効果気体の交換や大気からの窒素化合物の沈着が取り上げられていたが、節をなすほどのまとまった記述はなかった。一方で、国際的には、現在の国際協同研究プログラム Future Earth のコアプロジェクトとして、SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study) が2004年から活動しており、海洋学や大気科学を専門とする日本の多くの研究者が SOLAS-Japan (<https://solas.jp/>) として関わり知見を蓄積してきた。本将来構想が見据える10

年後は、SDGs, 国連海洋科学の10年, 自動車の電動化などについて各国が目標を定めた期限に近く, 今後10年の生活様式の変容が大気中の人為起源物質の濃度を変化させることが考えられる。このような大気環境の変化が, 大気海洋境界にどのような影響をもたらすのかを追跡していく必要がある。そこで, 本稿では, 現時点での知見と予想をふまえて, 著者らが特に重要で今後の発展が望まれると考えた以下の5つのトピックスに絞り, 現状と将来構想について論じた (Fig. 1)。

2節では, 大気から海洋への物質輸送として, 大気からの栄養塩沈着を取り上げた。大気経由の栄養塩流入は, 特に外洋域の一次生産を支える上で重要であり, 生物ポンプを介して地球表層の炭素循環に影響を与える可能性がある (岡ら, 2021, 本特集)。3節では, 大気海洋間の物質循環の「場」として古くから注目されながらもその動態について未解明な部分が多い海表面マイクロレイヤー (Sea surface microlayer; SML) に焦点を当てた。界面である SML は, 物理的環境のみならず化学組成・生物組成が下層の水とは異なる。また, 大気と海洋が接

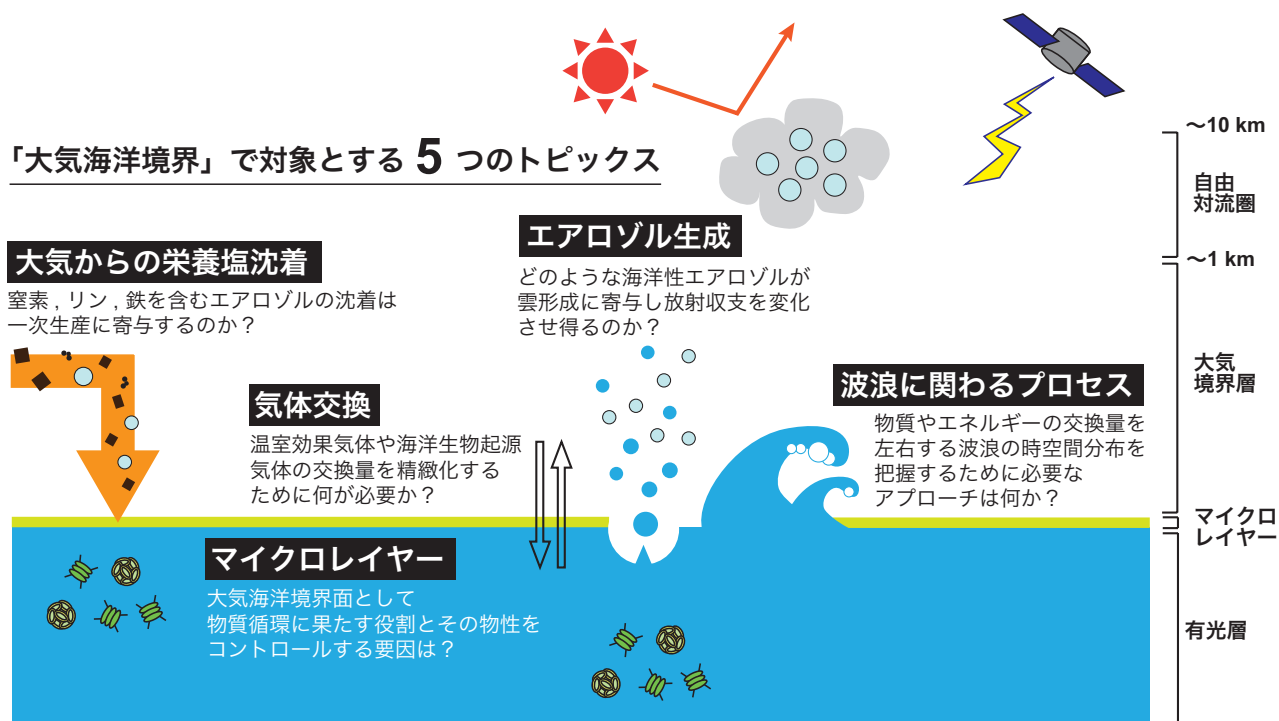


Fig. 1. Five topics covered by this paper on the air-sea boundary.

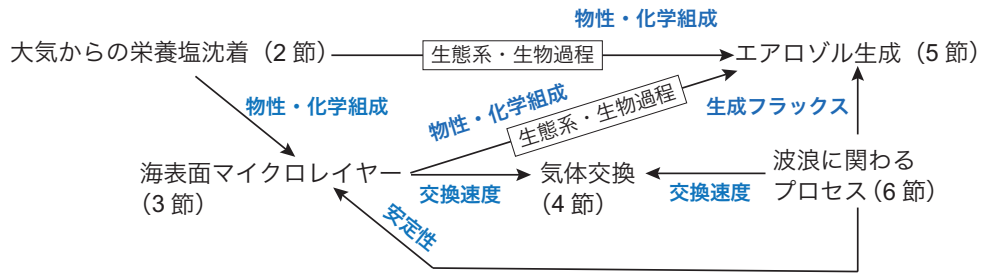


Fig. 2. Relationship between the five topics.

する場であるため、大気からの降水物の海洋への入口として、大気海洋間の気体交換の場として、飛沫によって生成されるエアロゾルにより海洋から大気へと輸送される物質の起源として、注目されている。4節では、大気海洋境界面を介して行われる気体交換について、前回の将来構想から研究が発展したことや、さらに研究が必要なことをまとめた。5節では、海洋から大気への物質輸送としてエアロゾル生成を取り上げ、海洋性エアロゾルの雲形成を通じた気候影響について研究展望をまとめた。大気と海洋の境界面における波浪は、SMLの安定性、気体交換の効率、そしてエアロゾルの生成率に寄与する。6節では、海上風速、砕波、うねりなど波浪に関わるプロセスについての観測、実験、理論の研究の進展をまとめた。2～6節の5つのトピックスは、各々完全に独立したものではなく、相互に影響しあっており、さらに生態系や様々な生物過程とも強く結びついている (Fig. 2)。この5つのトピックスを横断して総合的に理解する上で重要となる研究手法を7節にて提案した。8節ではこれらのトピックスと密接に関わる学会との連携についてまとめた。本稿には人工衛星やセンサーの名前などについて多くの英略語が登場する。視認性をよくするために本文中は英略語あるいはその日本語訳を用いて記述するが、読者は必要に応じて本稿末の一覧を参照し、原語や日本語訳を確認できるようにした。本稿が読者の新しい研究展開の一助になれば幸いに思う。

2. 大気からの栄養塩沈着

外洋の栄養塩律速海域に栄養塩を供給するプロセスとして、大気を経由した栄養塩沈着がある。大気からの沈

着過程は、大気中のガスや大気エアロゾルの乾性沈着と、降水による湿性沈着に大別される。以下では、窒素、リン、鉄のそれぞれについて、大気から海洋への沈着に関する最近の知見と将来構想について記述する。

2.1. 窒素

西部北太平洋は、経済活動が活発な東アジアの風下に位置するため、人為起源窒素の沈着が海洋表層の栄養塩濃度に影響を与えると考えられる (Jickells *et al.*, 2017)。例えば、領域化学輸送モデルと海洋生態系モデルを用いた数値計算では、西部北太平洋亜熱帯域において、乾性沈着による無機態窒素の供給により、水柱積算の一次生産に年平均でおよそ1.7倍の増加があると推算されている (Taketani *et al.*, 2018)。西部北太平洋やその縁辺海では、大気起源窒素の沈着量が増加すると、海洋表層の余剰窒素が増加し、窒素律速海域からリン律速海域に変化する可能性が指摘されてきた (Kim *et al.*, 2011)。しかし、最近は特に中国の大気汚染対策が強化されたため、日本への越境汚染の影響は低減しつつある (Uno *et al.*, 2020)。また、中国から排出されるガス態の大気汚染物質に関しては、SO₂やNO_xは減少傾向にあるものの、NH₃の排出は高止まりしており、これらのガスを前駆体として生成されるエアロゾル (硫酸アンモニウムや硝酸アンモニウム) の存在比や粒径分布に影響を及ぼす (Uno *et al.*, 2020)。したがって、今後の西部北太平洋への大気起源窒素沈着の変化の傾向は、Kim *et al.* (2011) の予想とは異なる可能性があり、注視する必要がある。例えば、東アジアおよび東南アジア域では、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (The acid deposition monitoring network in East Asia; EANET) により、大気からの乾

性沈着および湿性沈着のデータが蓄積されている。このような地上モニタリングサイトのデータベースから外洋域における窒素沈着量を推定することは簡単ではないが、発生源に近い地点での大気起源窒素の動向を探ることは可能である。また、過去に行われた SEAREX (Duce, 1989) や VMAP などの観測プロジェクトを参考に、太平洋の島嶼部に新たなモニタリングサイトを設置することも、西部北太平洋への窒素沈着量を把握する上で有用と考えられる。また、排出インベントリ作成や数値モデル研究との連携を通して、観測値の再現を試み、今後 10 年に起こる変化を統合的に理解することが必要である。

一方で、経済発展の著しい南アジアでは、大気への人為起源窒素放出量が増加している。特に、モンスーンによりインド亜大陸からインド洋への風が卓越する季節には、人為起源窒素の海域への沈着が考えられる。数値モデルによる 2050 年までの予測では、南アジアにおいて特に還元型の窒素 ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) の放出量が増加する事が示唆されている (Jickells *et al.*, 2017)。還元型の窒素の発生源としては施肥や畜産があり、人口増加に伴う食糧生産の増加がさらなる還元型の窒素の放出を招くことが指摘されている。これによって、インド洋への大気沈着窒素の量や地理的パターンが変化し、海洋生態系に影響を与える可能性がある。これは、人類が地質年代的な時間スケールで地球環境を改変している人新世 (Anthropocene; Crutzen, 2002) 特有の課題といえる。大気沈着窒素による一次生産は、新生産にあたるため、炭素の深層への輸送に寄与する。実際は、窒素固定や鉛直拡散に伴う海洋表層への栄養塩流入による新生産も考えられるので、複合的な大気海洋観測により、大気起源窒素の新生産への寄与率を評価する必要がある。

窒素に限った問題ではないが、広範囲に定常的に影響を及ぼす乾性沈着と比べ、局所的な降水による湿性沈着が海洋生態系に与える影響を評価することは困難である。単位時間・単位面積あたりのフラックスで比較すると、湿性沈着フラックスは乾性沈着フラックスの 10 倍かそれ以上の値が報告されている (Jung *et al.*, 2013)。湿性沈着の影響は地理的・時間的な影響に限られる可能性があるものの、降水イベント前後の海水中の栄養塩濃度変化や植物プランクトン応答変化を現場で観測した例は乏しく、さらなる観測の蓄積が必要である。また、海上の降

水履歴の地理的分布、降水量と海面塩分の対応に関する情報は十分でなく、スナップショットの観測結果をスケールアップする上での障壁となっている。現在、GS-MaP のような衛星観測プロダクトでは 0.1 度格子場での降水量分布を 1 時間ごとに提供している (Kubota *et al.*, 2007)。降水量のリモートセンシング結果と現場観測による海面近傍の塩分測定とを対応させた総合的な理解が今後の課題である。これは本稿全体における重要な提案の一つであり、後で詳しく説明する。

2.2. リン

大気中の窒素化合物に比べ、大気中のリン化合物の起源や挙動に関する報告例は乏しい。その理由として、大気圏に存在するリンが、地球表層の他圏に存在するリンと比べて極めて微量であることや、人間活動が大気中のリン化合物に与える影響が、炭素や窒素化合物ほど大きくないことが挙げられる。大気中の全リンに対する発生源とその寄与率の全球平均は、鉱物ダスト 82%、花粉や孢子など生物起源粒子 12%、燃焼起源 5% と推算されており、乾燥地帯から離れた場所では相対的に燃焼起源のリンの重要性が高い (Mahowald *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2015)。したがって、人間活動による土地利用変化や燃料燃焼は、大気中のリン化合物の量や組成を変化させる可能性がある。

大気エアロゾル中の全リンとリン酸態リン (PO_4) の濃度の観測値を全球モデルによる計算値と比較した研究では、特に生物利用可能とされるリン酸態リンにおいて、観測値の再現性が乏しいことが示されている (Mahowald *et al.*, 2008)。これは、リン酸態リンの発生源の情報が十分でないことが原因の一つと考えられる。また、上記の研究で用いられたリン酸態リンの観測値のほとんどが大西洋に限られており、インド洋、南大洋は観測の空白域となっている。

夏季の北太平洋上における大気エアロゾル観測からは、アジア大陸に近い西部北太平洋において、太平洋中央部に比べて優位に高い濃度のリンが報告されている (Furutani *et al.*, 2010)。また、同時に計測された金属元素をトレーサーとした解析から、人為起源のリンの寄与は西部北太平洋では 4 割、太平洋中央部では 2 割、鉱物ダスト起源のリンの寄与は双方の海域で 1 割以下と見積

もられており、外洋域では人為起源のリンの寄与が相対的に高いことが報告されている。しかしながら、西部北太平洋では5割、太平洋中央部では7割以上のリンの起源が不明とされている。太平洋の外洋域において、リンを含めたエアロゾルの化学組成のマッピングデータは未だ不足している。今後は降水も含めて、様々な季節・海域での観測データを蓄積すること、また発生源に近い陸域におけるモニタリング体制を構築することが、大気からのリン沈着の一次生産に与える影響を評価する上で必須である。

2.3. 鉄

過去30年間の海洋学における最も重要なブレイクスルーの一つは、鉄が微量栄養素として生物生産を制御するという発見であり、海洋学における鉄の重要性の理解は定着した。自然界における鉄の供給過程や生物地球化学的循環に関する研究もこの20年で大きく進展したが、生物生産を制御する鉄の供給過程については未だ課題も多く、定量的な理解を目指した議論が必要な状況である。中でも大気からの鉄の供給過程の定量的な把握は、古くから取り組まれている研究であるが、今でも重要な課題が残っている。

海洋内の鉄の正確な濃度測定が可能となる以前から、大気からの鉄の供給過程の研究は先行して進められてきた。1970年代後半には、大気エアロゾルの海洋への影響を把握するために、国際大型研究プロジェクトが実施されている(SEAREXプロジェクト; Duce, 1989)。1980年代から2000年代中頃に至るまでは、西部北太平洋の生物生産を生み出す鉄は黄砂など鉄物ダスト由来のものが重要と考えられてきており(Uematsu *et al.*, 1983)、現在も引き続き研究が進められている。これまでに北太平洋の研究で、洋上で鉄物ダスト由来の鉄が海洋表面の濃度を高めたことを観測した例(Iwamoto *et al.*, 2011)や、鉄物ダストが西部亜寒帯域にどれだけ鉄を沈着させるのかを、観測とモデルを使って見積もった例(Uematsu *et al.*, 2003)が報告されている。さらに、アジア起源の鉄物ダストや火山起源の鉄がアラスカ湾に沈着し、生物生産を高めたことなどが報告されてきた(Bishop *et al.*, 2002; Hamme *et al.*, 2010)。大気起源の鉄供給については、数値モデルによる研究展開も早くから進められ、

グローバルスケールで多くのモデルが開発されている(例えば, Mahowald *et al.*, 2005)。数値モデルでは、大気エアロゾルを黄砂などの鉄物起源と人為起源エアロゾルに分けて取り扱い、その溶解性の違いから(人為起源エアロゾル鉄の溶解度は鉄物起源鉄に比べて大きい)、海洋の一次生産へのインパクトが定量的に評価されている(Krishnamurthy *et al.*, 2009; Hamilton *et al.*, 2020; Ito *et al.*, 2020)。近年では人為燃焼起源あるいは森林火災など自然燃焼起源鉄について研究が進み、鉄同位体の観測結果より洋上大気や海洋表層に人為燃焼起源鉄が供給されていることが確認され(Kurisu *et al.*, 2016; Pinedo-González *et al.*, 2020)、燃焼起源鉄を組み込んだモデルも開発されている(Ito *et al.*, 2019)。しかし、大気からのインプットについては、モデルで計算された値に対して、観測から得られる検証データが不足しており、モデルを観測から検証した例は稀である(Mahowald *et al.*, 2018; Ito *et al.*, 2021)。さらに、大気由来鉄沈着モデルと海洋内部の鉄循環を数値モデルに組み込んで、海洋中の鉄濃度分布や循環を再現する点では、鉄インプット量や滞留時間がモデル間で全く異なるなど、未だ検討課題が多く残っている(Tagliabue *et al.*, 2016)。

一方で、近年になって飛躍的に進展した衛星観測や精力的な船舶観測によって、実際に西部北太平洋で起こっている生物生産活動の規模・大きさ・季節性(フェノロジー)などが明らかになってきた。これらの生物生産活動の起こる海域やフェノロジーを踏まえて、大気ダストと生物生産イベントのマッチングを精査した結果、過去に報告された生物生産の大部分は大気由来の鉄供給過程では説明できないとも指摘されている(Boyd *et al.*, 2010)。また、2000年代以降、世界の約35カ国からの研究者が参画して、海洋における微量元素・同位体の分布およびその循環機構を調べる国際共同プロジェクトGEOTRACES (<https://www.geotraces.org/>)が展開されたことで、海水中の鉄の分析技術の進展と相互比較研究が飛躍的に進み、海盆スケールで海水中の鉄の分布が明らかになりつつある(Anderson, 2020)。これら海洋内部の鉄の分布や循環に関する知見の蓄積により、外洋の海盆スケールでは生物生産を制御する海洋循環による鉄や栄養塩供給のプロセスが半定量的に把握されるようになってきた(Schlitzer *et al.*, 2018; Misumi *et al.*, 2021)。

しかし、海洋観測で得られる鉄分布のデータについては未だスナップショット的な観測が大部分であることに加え、供給された鉄の海水中での溶解度を制御すると考えられている有機配位子については、大気からの供給量と海洋内部での挙動双方において未解明な点が多いことから、海洋循環を経由した鉄供給の定量的な見積もりにも課題は多い。

このような状況に鑑み、今後は、大気由来鉄の供給と海洋循環による鉄の供給の両方の知見を統合し、衛星観測や船舶観測で把握されている海洋における様々な時空間スケールの生物生産活動（例えば、HNLC 海域における季節変動を伴う生産、鉍物ダスト供給などのイベントにより誘引された突発的な生産、亜熱帯域の窒素固定生物応答、など）を、統一的に説明できるよう、大気-海洋鉄供給システムの統合的理解を目指す必要がある。そのためには、大気由来の鉄供給システムを構築するモデル研究者は、海洋観測研究側の結果から見えてきた最新の知識を組み込む必要があり、逆に海洋内部の鉄循環モデルを構築するモデル研究者は、最新の大気エアロゾル研究から示されるようになった知識を組み込む必要があるだろう。また、前述の SOLAS や GEOTRACES など進められている国際プロジェクトで得られた知見を統合するための議論が重要な鍵となってくる。その中でモデルと観測を融合した大気からの鉄供給の定量的な見積もりは依然として重要な課題である。大気経由鉄のモデルの高度化のためには、天然鉍物由来の鉄、人為起源エアロゾル鉄、燃焼起源鉄のそれぞれを対象として、輸送規模、頻度、沈着量、沈着エリア、表層水中の滞留時間、溶解度および溶解速度などを把握する必要がある。また、供給された鉄の生物生産への寄与を理解するためには、海洋表層に存在する植物プランクトン群集にとって利用（細胞内への取り込みが）可能な鉄の化学形態の把握も必要になる。これらを実現するために、鉄や人為起源トレーサーとなり得る亜鉛などを含めた微量元素の濃度や同位体観測 (Conway and John, 2014; Kurisu *et al.*, 2016; Liao *et al.*, 2020), 湿性沈着と乾性沈着の新たな評価方法の開発 (Kadko *et al.*, 2020), 鉄の化学形態を考慮した観測から検証した鉄循環モデルの精緻化等を根気よく進めていく必要がある。

3. 海表面マイクロレイヤー (SML)

海洋の最表層には、界面活性のある有機物などが濃縮した SML が形成される。SML の厚みは、その調査方法にも依存するが、概ね 1 mm 以下と考えられている。自然環境下での SML の厚みは風速に依存し、風が強いと薄くなる。風波によって SML が物理的に壊されることがあるが、壊れても数分で再び形成されるとみられている (Cunliffe *et al.*, 2013)。海面付近の風が弱い状態が続くと安定した SML が発達し、見た目にもものつべりとした状態の水面 (slick) が形成されることがある。slick が形成されている状態では、slick がいない場合に比べて SML の特異性 (下層の水との違い) が増すこと、大気海洋間の気体交換が抑制されることなどが報告されている。例えば大気海洋間の CO₂ フラックスは、slick が存在することで最大 15% 減少すると見積もられている (Wurl *et al.*, 2016)。この節では、下層の水と比べた SML の特異性、海洋から大気への物質の出口としての SML、大気から海洋への物質の入口としての SML という三つの視点 (Fig. 2) から、最近の知見とさらなる理解のための展望について論じる。気体交換については 4 節で述べる。

3.1. SML の特異性：有機物と微生物を中心に

SML には、粒子態・溶存態の有機物、微生物、栄養塩、微量元素などが下層の水に比べて濃縮している場合が多い (Wurl *et al.*, 2017)。SML への物質や生物の濃縮度合いについては、実際に SML の水とその下層の水を採取して各物質の濃度を測定し、その比をとることで、下層の水に対する SML への濃縮係数 (Enrichment factor) として表現される。SML サンプルの採取には、メンブレン、メッシュスクリーン、ガラスプレート、回転ドラムなどが用いられている (Cunliffe and Wurl, 2014)。サンプリング方法によって採取される水の厚さや採取されやすい・されにくい物質が異なり、また比較対象とする下層の水の採取方法や採取深度 (多くの研究で 0.1 ~ 1 m 程度) も研究者により様々ではないため、異なる研究で見積もられた濃縮係数の比較には注意が必要であるが、SML への物質の濃縮という点では、ある程度共通理解が得られている。例えば、有機物の SML への濃縮は

溶存有機物でも粒子態有機物でも見られるが、溶存態よりも粒子態(ゲル状を含む)でより顕著であることが認識されている(Stolle *et al.*, 2010)。SMLに存在する物質の量や質は下層に届く光の強さや波長特性にも影響する(Stramski *et al.*, 2019)。藻類や細菌などの産生する多糖類を中心とした細胞外ポリマー粒子(Transparent exopolymer particles; TEP)は、その粘性などから界面に集積しやすいと考えられている。TEPおよびいわゆる粒子態有機炭素(POC)のSMLへの濃縮は多くの研究で報告されている(例えば, Cunliffe *et al.*, 2009; Robinson *et al.*, 2019a)。slickのある状態でのSMLでは特に濃縮係数が大きく、TEP、POCともに下層の水の数倍から数十倍になる場合もある(Wurl *et al.*, 2016)。お風呂の水面に垢が浮くようなイメージだろうか。溶存有機物では、SMLへの濃縮係数は有機炭素(DOC)よりも全窒素(TN)のほうが大きい傾向があり、特に含窒有機分子(アミノ酸やアミン類)はSMLへの濃縮が大きく、一方、炭水化物のなかにはSMLと下層の水とであまり濃度が変わらないものもあることが報告されている(van Pinxteren *et al.*, 2012)。溶存態の含窒有機分子は水中の従属栄養細菌にとって恰好の栄養源である。

SML試料は大量に採取することができないため、有機物の分子レベルの分析においては分析可能な化合物に限られるという難しさがある。分析に際し脱塩の必要のない脂溶性有機物について、近年、SMLと下層の海水での網羅的な分析により、SMLに濃縮される化合物種の特性が試みられている(Zabalegui *et al.*, 2020)。SMLに濃縮されている分子種の把握は、海洋からのエアロゾル生成や大気海洋ガス交換の実態を知るためのカギとなる分子種の同定や、それをを用いた実験・観測の発展に繋げられる可能性がある。

SML中では従属栄養細菌の現存量も下層の水に比べてやや多いことが報告されている(Stolle *et al.*, 2010)。また、測定事例が従属栄養細菌ほど多くなく、結果にばらつきもあるが、細菌の捕食者である従属栄養性ナノ鞭毛虫(HNF)もSMLに多いとの報告もある(Sugai *et al.*, 2018)。特にサンゴ礁リーフ上のSMLでは細菌もHNFも濃縮係数が大きく、生物由来の新鮮な有機物がSMLに濃縮し、それに支えられた活発な微生物食物網が形成されている可能性が示されている(Nakajima *et al.*,

2013)。一方で、放射性同位体ラベルしたチミジンやロイシンの取り込みで測定される細菌生産速度は、SMLのほうが下層の水よりも小さいとの報告もある(Stolle *et al.*, 2009)。これは、海表面での光ストレスにより、生産速度が抑えられているためかもしれない。今後、微生物の存在量だけでなく、その代謝活性や生物間相互作用等も含めた観測を広範な海洋のSMLで実施し、データを蓄積することが望まれる。

SML内の微生物群集は、基本的には下層の海水の群集組成に基づくものであるが(Zäncker *et al.*, 2018)、粒子に付着している付着性細菌群集で下層との違いが表れやすい(Stolle *et al.*, 2011)。slickを伴う発達したSMLでは付着性に関わらず従属栄養細菌の群集構造に下層の水との顕著な違いがみられることもある(Wurl *et al.*, 2016; Parks *et al.*, 2020)。最近では特定の機能を持つ微生物や遺伝子の量およびその発現解析も行われるようになり、大気由来の人為起源有機物を分解する機能を持つ細菌群がSMLに多いことや(Martinez-Varela *et al.*, 2020)、SML中に下層の水とは異なる独特なアンモニア酸化古細菌群集が存在している可能性(Wong *et al.*, 2018)などが示されている。また、SMLでは硫化ジメチル(DMS)の前駆体であるDMSP(Dimethylsulfoniopropionate)を産生する細菌が下層の水よりも多く存在し、DMSP産生に関わる機能遺伝子の量およびその発現が有意に高いとの報告もある(Sun *et al.*, 2020)。DMSおよびDMSPは後述する雲核形成やCLAW仮説でも注目されており(Charlson *et al.*, 1987)、大気海洋境界面であるSMLにおいてDMSP産生が盛んであるとの報告は興味深い。他にも、SML中の有機物の光酸化による一酸化炭素(CO)生成速度とSML中の細菌によるCO酸化(消費)速度、それらの温暖化影響を見積もった研究例もあり(Sugai *et al.*, 2020)、SMLの機能と気候変動との関わりに興味もたれる。今後、SML研究においても分子生物学的手法を広く適用し、大気海洋間のガス交換や物質循環に関わる重要な機能に関する遺伝子やそれを保有する微生物をターゲットとした研究を進展させることで、SML中の生物機能による物質動態メカニズムの解明や大気海洋間での物質フラックスの定量化に寄与していくこと、さらには、これらを含めた大気海洋間物質循環モデルの構築・気候への影響のモデル化などへと繋げていく

ことが期待される。

3.2. バブリングの効果と海洋から大気への出口としての SML

海水中の有機物などが SML へ濃縮するメカニズムについて完全には明らかになっていないが、水中で生じた泡は、生物粒子や有機物を泡の壁面に付着させながら浮上し、水面ではじけることで SML に TEP や POC を運ぶ効果をもつことが、メソコズム (模擬生態系) でのバブリング実験とモデルの両方から示されている (Walls and Bird, 2017; Robinson *et al.*, 2019b)。また、バブリングは溶存有機物を凝集により粒子態化させることもある。特に植物プランクトンブルーム後期など、死滅期の植物プランクトン細胞に由来する多糖類などの細胞外高分子有機物が多い時に、その効果が顕著になることが報告されている (Wada *et al.*, 2020)。こうしてできた TEP のような凝集体粒子も SML に集積すると見込まれる。実際、植物プランクトンブルーム時に TEP の SML への濃縮係数がより大きくなることも観測されている (Sugai *et al.*, 2018)。

水面で泡がはじけるときの波飛沫によって、SML の一部が壊れて、5 節で述べる Sea spray aerosol (SSA) の“もと”となる。つまり、海洋表面から大気中へ飛び出す SSA には SML に濃縮していた有機物や微生物が直接含まれることになる。実際に SSA には海水由来とみられる高分子有機物や微生物が含まれており (Aller *et al.*, 2017)、エアロゾル内部でも微生物による有機物分解活性があることが示されている (Malfatti *et al.*, 2019)。また、炭素安定同位体比や植物色素組成比からも表層海水や SML と SSA の関係が論じられている (Crocker *et al.*, 2020; Miyazaki *et al.*, 2020)。海洋から大気へ出る物質やその動態を知るうえで SML 中の化学・生物学的情報が欠かせない。

3.3. 大気から海洋への入口としての SML

SML は大気から海洋へ供給される物質の入口でもある。2 節で述べたとおり、大気経由の微量金属元素や栄養塩の供給は海洋生態系における生物群集組成やその生産力を左右するファクタともなり得る。SML には大気からの降下物由来と考えられる粒子態のリンや鉄が下層の

水よりも多いことや (Burekul *et al.*, 2014)、SML 中の粒子態金属元素量が大気エアロゾル沈着イベントに連動して変化することが報告されている (Ebling and Landing, 2017)。このことは、大気から海洋へ沈着した粒子態の栄養物質が、速やかに SML を通過して下層の水へ移行していくわけではなく、ある程度の時間、SML 中に滞留すること、その間に SML 中で物理化学的・生物化学的変質を受けることを示唆する。海洋側から見ると SML は大気から供給された物質が海洋内部へ入る際の壁でもある。また、大気から海洋へ沈着する粒子態の金属元素の SML 滞留時間が元素によって異なることも報告されている。例えば鉄では数分なのに対して銅では数時間以上と見積もられ (Tovar-Sánchez *et al.*, 2020)、元素による違いが 100 倍以上ある。元素により SML での滞留時間が異なることは、大気エアロゾルの粒子としての物理的な挙動だけでなく、SML 内の有機物との相互作用による錯体形成などといった各元素の化学的挙動や (Karavoltzos *et al.*, 2015)、SML 内での生物や光による変質も、大気から沈着する微量元素の海洋生態系への影響の制御要因となっていることを示唆している。海洋表層の植物プランクトンにとっては、SML は大気から供給される栄養物質を利用しやすい反面、強い紫外線にさらされて光ストレスによるダメージを受けやすい環境であるだろう。SML において何が一次生産の制限要因となるかは環境条件により異なると考えられ (Mustaffa *et al.*, 2020)、多様な海域での実態把握が必要である。

3.4. SML のさらなる理解に向けて

このように、SML が大気海洋間の物質循環においてさまざまな面で重要な場であることは疑う余地がない。また、大気海洋の接する場として、大気中の CO₂ 濃度の上昇に伴う海洋酸性化や、大気経由の人為起源物質の負荷などの影響が最も早く出る場所とも想定される (Galgani *et al.*, 2014; Martinez-Varela *et al.*, 2020)。SML の実態と SML で起こるプロセスおよび各種フラックスやそれらの変化を多方面から把握するためには物理・化学・生物をあわせた観測・解析が必須であるが、SML に関する手法的な難しさもあって、まだ充分とは言えない。上述したとおり、SML サンプルの採取にはこれまでいくつかの異なる方法が用いられている (Cunliffe and Wurl, 2014)。

採取法による違いの検討はこれまでもある程度行われてきたが、現在のところ SML サンプル採取方法の標準化には至っていない。SML の実態と環境変化に対するその応答の理解のためには、様々な環境条件での SML に関するデータを系統立てて蓄積していく必要がある。そのためには SML サンプル採取方法が標準化されることが望ましい。扱いやすく再現性の良い採取法の開発（あるいは改良）により標準化されることが望まれる。また、現状の採取法についてもそれぞれの特性を明確にしたいうえで、異なる採取法で得られたデータでも互換性を持って解析・議論できるようにする必要がある。

ドイツの研究グループは、複数のガラスディスクを縦にしてその一部が水面下に入るようにして回転させることでガラスディスクに付いてくる SML 海水を連続的に採取しながら、並行して水深 1 m の下層の海水もポンプで連続的に汲み上げるシステムを開発している (Sea Surface Scanner, Ribas-Ribas *et al.*, 2017)。SML と水深 1 m 海水のそれぞれの連続サンプルを汲み上げた流路に塩分、pH、溶存酸素、FDOM (蛍光性溶存有機物) などの各種センサーを取り付けてモニタリングし、風速や日射などの気象条件と合わせて時間的に高分解能の連続観測データを取得することに成功している (Mustaffa *et al.*, 2017, 2018)。このような連続サンプルを用いて、気象条件と SML の動態の解析や FDOM の SML への濃縮機構の解明が試みられているが、系統的なデータや解析はまだ限定的である。地球表面の 7 割が海洋表面であることを考えれば、SML の実態やその動態に関するデータの蓄積と SML で起こる物理・化学・生物プロセスの把握は、気候変動モデルや物質循環モデルにおいても重要な要素のはずである。今後、世界のさまざまな海域、様々な環境条件において気象海象条件と合わせた SML の連続観測が実施され、SML に関する継続的なデータの蓄積・解析と SML で起こる諸プロセスの定量的評価・モデル化が進むことが望まれる。特に日本近海や太平洋については、日本から貢献していきたい。

SML の海水を採取して各種分析を行うのみでなく、現場で海表面から深さ数 mm 程度までの断面を直接測定できる高分解能のマイクロセンサーでいくつかの項目を頻繁に測定できれば、SML のリアルな構造やその動態の理解がさらに進む可能性がある。バイオフィルムの構造理

解に使われるようなマイクロセンサー (Beyenal and Babauta, 2014) を SML にも適用し、SML サンプルの採取と合わせて物理・化学・生物を統合した解析を行うことができれば、SML の実態やその動態の解明に有効かもしれない。

沿岸では、藻類などに由来する有機物が豊富で粘性の高い海水が強い風によって泡立てられ、この泡が波打ち際の岩場などの海岸や海面に大量に集まることがある。このような泡は「波の花」と呼ばれ、冬の日本海沿岸などでは風物詩ともなっている。波の花は、海岸付近に打ち付けられる波の作用などで海表面が攪拌されて空気を含み界面活性物質が泡状になることでできると考えられ、いわば SML の一つの形と捉えることができる。また、風で吹き飛んだ「波の花」の泡は破裂して、SSA と同様の海水起源エアロゾルが生成されるだろう。波の花は、大量に発生すると岸から比較的容易に採取することができる。波の花サンプルを採取し化学・生物学的な分析を行うことも、SML の実態把握や大気海洋間の物質動態の解析に有効なアプローチの一つである。

4. 気体交換

大気海洋間の気体交換、中でも CO₂ の交換を理解することは、温暖化の現状理解、さらには精緻な将来予測に不可欠である。CO₂ 交換量の見積りには、大気と海洋表層間の CO₂ の濃度差 (分圧差と溶解度の積) と気体交換速度 (輸送速度) の積によって推定することのできる 2 層薄膜モデルを理論とするバルク法が用いられている (Liss and Slater, 1974)。

4.1. 大気と海洋表層間の CO₂ の濃度差

CO₂ の濃度差は、大気と海洋間の CO₂ の吸収・放出の地理的な分布を決め、その変動の主な要因は年変動や季節変動が非常に大きい海洋表層の CO₂ 濃度にある (Takahashi *et al.*, 2002)。全海洋の CO₂ 濃度の観測値を収集している SOCAT には、1957 ~ 2020 年までの約 2,820 万個のデータが蓄積されている。データ数に着目すれば膨大な数ではあるが、観測データのある年や季節に、さらには地域的な偏りもあり、時空間的な観測密度は未だ不足している (Takahashi *et al.*, 2009)。また観測プラット

フォームには海洋観測船や民間船舶を活用した VOS があり (Murphy *et al.*, 2001), 最近では係留 (または漂流) ブイや自動航行するグライダーによる CO₂ 観測も試みられており (Gac *et al.*, 2020), 様々なプラットフォームを用いて南太平洋や南大西洋, インド洋といった, いわゆる観測空白域の時空間的な分布を埋める努力がなされている。また海洋表層の CO₂ 濃度の観測データの無い時期や海域を補完する方法として, 水温や塩分, クロロフィル *a* 濃度などの海洋表層の CO₂ 濃度の変動を引き起こす要因を海域毎に異なる重み付けをした変数とし, 海洋表層の CO₂ 濃度を経験的に推定する取り組みも近年多くなされており (例えば, Nakaoka *et al.*, 2013), 全海洋における精確な海洋表層の CO₂ 濃度の時空間分布を推定する手法の確立が観測データの蓄積とともに望まれる。

4.2. 気体交換速度

気体交換速度は, 気体交換係数と高度 10 m の風速値の関数の積で表されている。気体交換速度と風速は, 室内実験では比例関係にあるが (Liss and Merlivat, 1986), 実際の海上では風速の 2 乗や 3 乗に比例する関係を示す観測結果が報告されている (Wanninkhof, 1992; Wanninkhof *et al.*, 2009)。この違いは, 気体交換速度が風速だけでは無く, うねりや砕波などの海面の状態にも影響を受けており, それらの影響を風速の一義的な影響として示した結果と考えられる。これまで気体交換速度は, 核実験前の天然または実験後の人工の放射性炭素 (¹⁴C) の海洋の分布から推定する ¹⁴C 法 (Broecker and Peng, 1974), 海洋中のラジウム (²²⁶Ra) の α 崩壊によって生成される海洋起源の天然放射性核種であるラドン (²²²Rn) の鉛直分布から推定する ²²²Rn 法 (Peng *et al.*, 1979), 六フッ化硫黄 (SF₆) とヘリウム (³He) を人為的に海洋に注入して各濃度や濃度比の分布から推定する ³He/SF₆ 法 (Watson *et al.*, 1991) といった mass balance (物質収支) 法により見積もられてきた。これらによる輸送速度の評価時間は数日から年スケールである。この時間スケールの違いにより気体交換係数が変わることで, また風速以外の気体交換に影響を及ぼす要因と気体交換速度との関係を定量的に明らかにできる可能性への期待から, 1 時間程度の短い時間スケールで気体交換量を評価できる渦相関法をはじめとする微気象学的手法による直接観測

も試みられている (Jones and Smith, 1977)。渦相関法は大気と陸上間の標準的な CO₂ 交換量の評価法であり (Baldocchi, 2003), またバルク法で大気と海洋間の運動量や熱の交換量を見積もるための COARE アルゴリズムのバルク係数の評価に用いられてきた (Fairall *et al.*, 2003)。しかし, 大気と海洋間の CO₂ 交換量は大気と陸上間と比べて極めて小さいため, 渦相関法を気体交換の評価法として確立するためには克服すべき課題がある。この課題は大気と海洋間のみならず大気と雪氷間や, 年間の炭素収支量を評価する場合には大気と陸上間においてもみられ (Butterworth and Else, 2018), 空気密度変動補正の緻密化 (Kondo and Tsukamoto, 2012), また大気中の CO₂ の乱流変動を計測するガス分析計の水蒸気干渉の正確な評価もしくは干渉影響を取り除く手法の検討の必要性が示唆されている (Nilsson *et al.*, 2018)。これらの課題はあるものの渦相関法は, CO₂ のみならず, 雲形成や粒子の成長に寄与する短寿命気体の DMS (Blomquist *et al.*, 2006) や, 極域において大きな放出量が報告されているメタンなどの気体交換量の直接評価手法として応用されることが期待される。

4.3. 気体交換のよりよい理解のために

また全球スケールのみならず, 海域ごとの CO₂ 交換量の評価も喫緊に解決すべき課題である。例えば温暖化による海水融解が顕著な北極海では, 融解による海水の希釈と気体交換による大気からの CO₂ 吸収によって急速に酸性化が進行しており (川合ら, 2021, 本特集), 北極海の生態系を将来予測する上でも CO₂ 吸収量の正確な見積もりが不可欠である (Yasunaka *et al.*, 2018)。また海洋生態系に吸収され固定される炭素の貯蔵庫 (いわゆるブルーカーボン) として着目されている沿岸域は, 海洋生物活動のみならず陸域からの物質流入, 都市化等の影響により広域的な CO₂ 濃度分布推定が難しい領域であり (Kuwaie *et al.*, 2016), 風速データセットにも大きな不確実性が存在することから, 海洋観測と渦相関法による大気観測の両面からのアプローチが引き続き求められている。

また, バルク法で大気海洋間の気体交換量の推定誤差を引き起こす要因として取り組むべき課題に, SML (3 節) が挙げられる (Wurl *et al.*, 2017)。SML の CO₂ 濃度は

水深数 m の表層海水中とは異なる可能性があり、表層海水中の CO₂ 濃度を用いて大気海洋間の気体交換量を算出するバルク法では評価誤差が生じている可能性がある。また SML は海面付近の乱流を抑制するなど気体交換速度に直接かかわることが指摘されており、大気海洋境界における生物地球化学的な影響のみならず物理的な影響についても明らかにしていくべきである。SML が弱風時における気体交換に影響を与える一方で、白波や気泡が生じる強風時の気体交換過程に関する理解も十分とは言えない。気体交換速度の大きい強風下では現場観測が困難であるため風洞水槽による室内実験や数値モデルでの取り組みがなされてきたが、今後は現場観測データに基づく定量性をもった評価が求められる。熱帯における現場観測データに基づいた COARE アルゴリズムは、熱や運動量の交換量モデルとして広く適用されており、放射や降雨といった交換量に及ぼす物理量を緻密にパラメータ化し、低緯度から高緯度また弱風から強風まで対応できるモデルとなるように検討されてきた (Fairall *et al.*, 2003)。一方で気体交換量については、室内実験からモデルへ組み込むべきパラメータを明らかにしてきたが、現場で定量的な理解に至るために必要な観測データが質と量ともに十分とは言えない。2020 年秋に SCOR は、新しい作業部会として OASIS を立ち上げた (<https://airseaobs.org/>)。その目標の一つは、熱、水蒸気、運動量、温室効果気体、生物起源の微量気体、及びこれらの大気海洋気体交換の全球分布に焦点をあて、関連する境界層変数の重複を特定し、順位付けし、明らかな矛盾を解決することで、OceanObs'19 からの提言に応えることである (Cronin *et al.*, 2019)。これらの国際的な動向も踏まえ今後は、様々な海域における品質の高い観測データを充実させるために、観測機会の拡充と観測手法の標準化を SML や波浪の影響も加味して進めていくことを期待する (Fig. 2)。

5. エアロゾル生成

地球表面の約 7 割を占める海洋は大気エアロゾルの重要な発生源である。大気エアロゾル粒子は太陽光を直接散乱したり、雲凝結核 (CCN) または氷晶核粒子といった雲粒子の核として働き雲の放射特性や寿命を変化させ

たりすることで、気候を調節する。海洋性エアロゾルの生成量や組成は、波浪などの物理プロセスと海洋生態系の動態に依存する (Fig. 2)。

5.1. DMS を起源とする粒子

いわゆる「磯臭い匂い」の元である海洋藻類起源の DMS は、大気海洋間のガス交換により大気へと放出された後、酸化されて硫黄含有エアロゾルを生成し CCN となり得る。1987 年に発表された CLAW 仮説は、DMS がアルベドの変化を通して地球の温度調節に関わってきた可能性を提唱した (Charlson *et al.*, 1987)。CLAW 仮説以降、DMS に関わる生物地球化学分野の研究は現在までに精力的に行われ、多くの知見が蓄積されてきた。

例えば、大気中でガスが凝縮・酸化してエアロゾル粒子になる過程は、既存粒子の少ない環境で起こりやすいため、海塩粒子が豊富に存在する大気境界層 (海面から概ね上空 1 km まで) 内においては、DMS などのガスの凝縮・酸化によるエアロゾル粒子生成は極めて稀である (Covert *et al.*, 1996)。海洋大気中には、DMS の酸化生成物であるメタンスルホン酸 (Methane sulfonic acid; MSA) によって変質した海塩粒子の存在が確認されており (Yoshizue *et al.*, 2019)、海塩粒子との相互作用は DMS 起源物質の海洋大気中での寿命を決める要因の一つと言える。また、数値モデルを用いた研究では、DMS の気候調節効果は CLAW 仮説として当初述べられたほどには大きく無いことが報告されている (Carslaw *et al.*, 2010; Woodhouse *et al.*, 2010)。一方で、DMS を前駆気体とする粒子生成は、対流性の雲によって DMS が既存粒子の少ない自由対流圏 (概ね上空 1 km から対流圏界面まで) に輸送された後に雲の流出域で起こりやすく、生成した粒子が大気境界層内に取り込まれる過程が対流圏における雲形成に重要であると指摘されてきた (Clarke *et al.*, 1998)。最近の大規模な航空機観測によっても、自由対流圏における持続的な粒子生成や新たに生成された粒子の大気境界層への取り込みが確かめられている。しかし、観測された粒子数濃度を数値モデルで再現するには、DMS 以外の前駆気体の寄与や、雲過程によるエアロゾル粒子の除去効率の解明が必要である (Williamson *et al.*, 2019)。人工衛星では生成して間もない微小なエアロゾル粒子 (粒径 < 100 nm) を観測することは困難であ

るため、自由対流圏における粒子生成が地球規模でどれくらい起きているか、それらが大気境界層内への雲形成にどの程度寄与するかについてはさらなる研究が必要である。特に、エアロゾルをはじめとする大気微量成分の特性については、水平分布に比べ鉛直分布に関する知見が圧倒的に少ない。鉛直的な観測データの充実には、ゾンデや係留気球、ドローンなどを用いた海洋大気の大気鉛直構造、海洋大気中の物質の鉛直分布を計測する装置の開発や観測機会の充実が必要である。

5.2. 海水飛沫粒子

2000年代以降、海洋大気中の雲粒子の核として、DMS起源の生成物に代わり、白波砕波により生成する海洋性エアロゾルの役割が注目されてきた(Quinn and Bates, 2011)。海面上に生じた気泡の破裂により、海水成分が大気へと輸送され、SSAとして浮遊する。SSAの生成は風速とともに増加し、SSAフラックスやその粒径分布は、経験的に海拔10mの風速の関数(Sea spray source function; S3F)として表される。粒径分布はSSAの気候影響を評価する上で重要な因子であり、例えば、ミー散乱による太陽光の光散乱強度には粒径依存性がある。また、エアロゾル粒子がCCNとして働くとき、曲率効果(ケルビン効果)により粒径が大きいほどCCNとして活性化しやすい。Source functionは文献によるばらつきが大きく(猿渡, 2020)、この不確実性を低減させるためには、波飛沫の数濃度や粒子フラックスを計測する新たな観測手法や、白波被覆率のような風速以外の新規パラメータの導入が不可欠である。

3節で述べたとおり、SSAには無機の海水成分だけでなく有機物が含まれる。海水中の有機物は、個々の粒子のCCN能を決める吸湿性や表面張力に影響を及ぼすだけでなく、気泡のでき方を変えることでSSAの生成フラックス、粒径分布を変化させる。SSAに含まれる有機物の量や種類を把握するために、これまでに室内(例えば、Fuentes *et al.*, 2011)や現場(例えば、Bates *et al.*, 2012)におけるSSA生成実験が実施されており、SSAに含まれる有機物として、吸湿性の低い炭化水素やコロイド状のものゝ寄与が大きいことがわかってきた。しかしながら、SSAに含まれる有機物と藻類・微生物の種や成長段階との関連については未だ不明な点が多いため、海

域・季節毎に海洋と大気の同時計測を行うことが必要である。近年では、大型水槽を用いたメソコズム実験として、人工的に波浪を再現し自然により近い状況でSSAを生成する研究も推進されており(Prather *et al.*, 2013)、室内実験と現場をつなぐ研究として注目されている。また、SSAの気候影響を地球規模で理解するために、CCNとして機能するSSAの数濃度を海洋生物活動の指標であり衛星観測で全球データが得やすいクロロフィル a と関連づける試みがなされてきたが、良好な関係は見出せておらず、クロロフィル a に代わる指標を引き続き模索していく必要がある(Sellegri *et al.*, 2021)。マクロスケールの観測・実験を推進する一方で、エアロゾル粒子のCCN能や氷晶核能を決定する粒子の熱力学的なふるまいが、SSAに含まれる有機物の量や種類によってどのように変化するかという、マイクロスケールの物理化学的現象についても突き詰める必要があるだろう。

6. 波浪に関わるプロセス：砕波、台風などの極端現象

運動量や熱などさまざまな物理量の海面フラックスは、主に海上風速と海面水温と深く関係している。全球の海上風速と海面水温の分布は現在、複数の極軌道衛星による観測を統合して海洋上1/4度の格子点毎に1日に1回程度の頻度で見積もられ、日々の天気予報モデルの同化データや境界値として使われている(岡本, 2016)。大気モデル分野では全球再解析プロダクトの構築や領域アンサンブルモデルによる予報技術の開発が進み、例えば気象庁による55年間分(1958年から3時間ごと)の再解析風速場は海洋大循環モデルを長期積分する際の外力として国際的によく使われている(Tsujino *et al.*, 2018)。物理量全般の大気海洋間フラックスの計算においてはLarge and Yeager (2009)やCOAREのアルゴリズムが、海洋大循環モデルや一般的な解析でよく使われる。台風条件下におけるフラックス計算のアルゴリズムについては後述する。全球大気再解析の水平解像度は1度程度であるため、台風通過時の海上風速を得るには代わりに領域大気予測モデルの結果などを用いる。下記に説明する通り、これまで強風下あるいは海面波浪の伝播方向と風向がずれる場合について詳細な研究が行われてきた。波

浪はSMLの安定性、気体交換の効率、そしてエアロゾルの生成率に寄与する (Fig. 2)。今後は白波被覆率など海上風速以外の物理量、大気境界層中のエアロゾルの鉛直プロファイル、海洋有光層中の塩分や生態系関連パラメータの鉛直プロファイルにも着目し、大気海洋相互作用の生物地球化学的側面の理解にも繋げていくことが期待される (de Leeuw *et al.*, 2011)。

本節に関連する地球観測衛星とセンサーは Table 1 のとおりである。これまで海面過程の観測変数として、風速と海面水温に続いて利用頻度が高かった物理量が、波浪の有義波高や代表的周期であった。衛星の軌道直下に限っては海面高度計を用いて有義波高の観測ができるので、波浪モデルとの比較研究がなされている (Ichikawa *et al.*, 2020)。今後の衛星観測においては、合成開口レーダー (SAR) などによって風波とうねりの違いまで区別し、非線形相互作用の時空間分布の考察に結びつけることが重要である。

6.1. 海上風と波浪

SAR 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ーである。一方で、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ーであり、今後の利用が期待される。SAR はマイクロ波散乱計と同様に能動型センサーで、海面からの反射・散乱波を受信して海上風速を推定する。一般的には、1方向からの観測値のみが得られるので、散乱計と違い、風速・風向を同時に推定することは出来ないが、高い空間解像度 (O(10 m)) での観測が可能であり、台風・熱帯低気圧等の目の構造も詳細に捉えることが可能となる。また、散乱計では通常同一偏波のみの観測であるが、SAR では交差偏波の観測も同時に行っている。この交差偏波の受信信号が強風域に対しても感度を有しているため、台風等の荒天下での海上風推定に用いられている。

SAR に限らず、衛星観測における荒天下での海上風計測に対しては、強風域の検証データに限られることが大きな課題の一つとなっている。米国では、NOAA と米空軍の航空機により、ハリケーンの観測がオペレーショナルに実施されており、航空機搭載 C-band 多周波マイクロ波放射計 (SFMR) により、海上風速、降雨強度が計

測されている。SFMR の海上風は、同時観測が行われているドロップゾンデにより、校正・検証が行われ、10 ~ 60 m/s の風速レンジで RMSE が 3.3 m/s であると報告されており、衛星データによる高風速域での海上風検出に対する校正・検証データとして利用が可能である。実際、C-band SAR では、SFMR との比較により、75 m/s 程度の風速まで感度があることが確認され (Mouche *et al.*, 2019)、台風・ハリケーンの海上風推定が定期的に行われている。日本においても、JAXA が運用している L-band SAR (ALOS-2 衛星/PALSAR-2 センサー) による台風の風速推定の検討が始まっている。SFMR の計測値との比較で、現状、風速 55 m/s 程度までの対応関係が確認されている。L-band は C-band に対して波長が長いので、より高風速域までの風速推定が可能となること、また、降雨減衰の影響を受けずに風速推定が可能となることが期待されている (Isoguchi *et al.*, 2021)。従来のマイクロ波センサーは 10 km 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った。一方、SAR ではパルス圧縮、および、合成開口処理により、空間解像度 10 m 程度の観測が可能であり、沿岸近くまでの計測に適している。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る。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た。また、一方で、Sentinel-1 衛星の SAR では、小さい海域 (20 km × 20 km) を 100 km 間隔で観測することで、全球の波浪スペクトルを計測する Wave mode と呼ばれる観測モードも運用されている。これらのデータは波浪モデルへの同化データとして、現業利用されている他、大量の画像データを利用した大気境界層に関するパラメータの統計的解析にも利用されている。

現在の運用において、外洋の海上風速を推定するために元となる情報は衛星マイクロ波センサーによって計測されている。このセンサーには能動型と受動型の2種類がある。能動型のセンサーは散乱計と呼ばれ、衛星から地球に向けてマイクロ波を送信し、海面で反射・散乱した信号を衛星のアンテナで受信する。散乱計は風速と風

Table 1. List of satellites and sensors covered by this paper.

衛星名 / センサー名	本稿に関連する観測項目	運用開始年-運用終了年
GEOSAT/GRA	海面高度, 海上風速, 有義波高	1985年-1990年
ERS-1/AMI	海上風 (風速・風向)	1991年-2000年
TOPEX/Poseidon/ALT	海面高度, 海上風速, 有義波高	1992年-2006年
QuikSCAT/SeaWinds	海上風 (風速・風向)	1999年-2009年
Aqua/AMSR-E	海上風速, 海面水温, 海氷密接度, 水蒸気量, 積算雲水量, 降水量	2002年-2011年
Metop/ASCAT	海上風 (風速・風向)	2006年-運用中
Oceansat-2/OSCAT	海上風 (風速・風向)	2009年-運用中
GCOM-W/AMSR2	海上風速, 海面水温, 海氷密接度, 水蒸気量, 積算雲水量, 降水量	2012年-運用中
Sentinel-1/C-SAR	海上風速, 波浪 (うねりのスペクトル)	2014年-運用中
ALOS-2/PALSAR-2	海上風速, 波浪情報	2014年-運用中
ひまわり 8号/AHI	光合成有効放射, 海面水温, 海色	2014年-運用中
ひまわり 9号/AHI	光合成有効放射, 海面水温, 海色	2016年から待機運用中 2022年-2028年 (予定)
CYGNSS	海上風速	2016年-運用中
GCOM-C/SGLI	光合成有効放射, 海面水温, 海色	2017年-運用中
CFOSAT/RFSCAT, SWIM	海上風 (風速・風向), 波浪スペクトル	2018年-運用中
ADM-Aeolus/ALADIN	風プロファイル	2018年-運用中
SWOT/KaRIn	海面高度	2022年 (予定)
ALOS-4/PALSAR-3	海上風速, 波浪情報	2022年度 (予定)
GOSAT-GW/AMSR3	海上風速, 海面水温, 海氷密接度, 水蒸気量, 積算雲水量, 降水量	2023年度 (予定)
SKIM	表層流, 波浪スペクトル	提案中
SEASTAR	表層流, 波浪スペクトル, 海上風 (風速・風向)	提案中
WaCM	表層流, 海上風 (風速・風向)	提案中

向の両方を推定できるという特色がある。散乱計による海上風速観測は1991年にERS-1衛星/AMIセンサーが運用を開始し、QuikSCAT衛星/SeaWindsセンサーなどを経て、Metop-B衛星/ASCATセンサーに引き継がれ、最近ではインドのOceansat-2衛星や中国・フランス共同のCFOSAT衛星が登場している(Ebuchi *et al.*, 2002; Tomita *et al.*, 2019)。受動型のセンサーは放射計と呼ばれ、降水、雲、水蒸気、氷、海面の白波などが自ら発するマイクロ波を衛星のアンテナで受信し、いくつかの周波数の情報を組み合わせることにより水に関する諸物理量を抽出することができる(Atlas *et al.*, 1996; Ulaby and Long, 2014)。地球観測衛星Aquaに搭載されたマイクロ波放射計AMSR-Eの6.925 GHz帯と10.65 GHz帯水平偏波輝度温度から算出された全天候型海上風速は、高風速・強降雨の状況にも対応することができた。AMSR-Eは宇宙開発事業団(現JAXA)が開発し、その改良版であるAMSR2センサーがGCOM-W(しずく)衛星に搭載され、荒天において優れた特性を示しており、気象庁の台風解析でも利用されている(Shibata, 2006)。2023年度打ち上げ予定のGOSAT-GW衛星(GCOM-Wと温室効果ガスミッションGOSAT-2の後継)にAMSR3センサーが搭載されることになり、開発が正式に始まっている。AMSR2では研究プロダクトだった全天候海上風速が、AMSR3では標準プロダクトに格上げされる。荒天下の海上風速を衛星から観測する手法について、SARやマイクロ波センサー以外の手法として、GPS信号の利用が提案されている。NASAのCYGNSSは、海面で反射したGPS信号の強度を8機の超小型衛星で計測し海面の勾配を求め風速を推定する。

AMSR2センサーは海上風速だけでなく降水量分布および(雲に覆われた海域の)海面水温や水蒸気量の観測において海洋と密接に関係がある。海面水温の観測においても極軌道衛星同士で比較した場合、マイクロ波放射計センサーは赤外線センサーにくらべて雲の被覆の影響を受けないという利点がある。その一方で、静止軌道衛星ひまわり8号によって実現された10分間隔の海面水温測定は、1日ごとにデータを蓄積することで赤外線センサーによる雲の被覆をかなり取り除けることがわかった(Kurihara *et al.*, 2016)。台風の痕跡の解析などにおいて、ひまわり8号による海面水温は、雲の被覆による

データ欠損に関してAMSR2より不利であるが、時空間解像度においてはひまわりのほうが高いため、この二つの衛星による海面水温の利用価値は双補完的な関係にある。AMSR3センサーでは固体降水や水蒸気に感度のある高周波チャンネル(166 GHz, 183 GHz)のほか、海洋関係では、海面水温に感度のある10 GHz帯に、帯域幅が広い(温度分解能が良く、ランダムノイズが少ない)チャンネルを新規の一つ追加することで、6 GHzよりも解像度の良い海面水温を安定的に、かつ、複数チャンネルによって人工電波干渉の影響を低減して観測できるようになる。

6.2. 表層流と波浪

SARによる海上風速や波浪関連以外の検出物理量として、表層流の検出が研究されてきた。SARでは地表面との相対速度によるドップラー周波数を計測して画像化に使用する。この特性を利用することで、表層流に関する情報が検出可能となることが明らかとなった。また、衛星進行方向の画像を干渉させることで2画像間でのドップラーシフトを計測し表層流の観測が行われている。現在、打ち上げが確定したものはないが、これらの技術を散乱計と同様に2次元方向に拡張することで、表層流を計測するミッションが、欧州、米国から複数提案されている。ESA(欧州宇宙機構)に提案されたSKIM衛星はKa-bandのドップラーレーダー型高度計で、表層流に加え、CFOSAT衛星の技術を発展させ高い波長分解能での2次元波浪スペクトルを計測する。同じくESAに提案されたSEASTAR衛星はKu-bandのアロングトラック干渉SARで、SARの高い空間解像度を活かして、1 km解像度での表層流・海上風ベクトル、波浪スペクトルの計測が計画されている。NASAに提案されているWaCM衛星では、Ka-/Ku-bandの(ドップラー型)散乱計による表層流と海上風ベクトルの計測が計画されている。これらのミッションは、これまで衛星観測では実現していなかった、非地衡流成分を含む表層流ベクトルを計測するものであり、かつ、同時に海上風速、波浪等の取得が可能となる。一方で、NASAとCNESはSWOT衛星を2022年に打ち上げる予定である。これは、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衛星以降、30年以上ぶ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、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る(橋濱ら, 2021, 本特集; 木田ら, 2021, 本特集)。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る。時空間的にシームレスな観測は、上述した大気海洋間の運動量輸送や表層流と海洋波の相互作用の理解において有効なデータとなる。また、近年研究が進められているマイクロプラスチックの輸送に重要な要素となる、垂直混合と水平移流に関する理解に対しても重要なデータとなる可能性がある。一方で、2020年度の衛星設計コンテスト(<http://www.satcon.jp/>)では、光学センサーを搭載した海洋プラスチック観測衛星の提案が注目を集めた。このような小型衛星を設計するグループを海洋学会からも支援し、人材育成と学際融合を進めることが望まれる。

6.3. 現場観測

海面から射出されるマイクロ波の信号には白波の効果が含まれている。白波被覆率は、これまで衛星観測プロダクトとして一般的でなかったが、推定アルゴリズムの発展により海塩粒子の生成率の見積りに寄与していくことが予想される。そのためには波浪モデルや現場観測によるアプローチとの連携が重要である。白波被覆率の推定方法はPhillips(1985)の Λ 分布を基礎として理論的枠組みが確立され、その後は精力的な観測研究が進められ、現在では第三世代波浪モデルの出力変数の一つとして提供されるに至っている(Romero, 2019)。国内の現場観測については、CCDカメラ撮影による白波被覆率の計測アルゴリズム開発が行われ(Sugihara *et al.*, 2007)、最近ではステレオカメラを用いた波浪観測や、時間的に高解像度の光学式粒子数計による波飛沫の観測が行われるようになった(相木ら, 2020)。カメラやGPSなど近年小型化された汎用電子機器の技術を積極的に利用して、新しい波浪関連の観測機器を開発していくことが期待される。

白波被覆率と比較して海上風速は、広く利用価値のある物理変数であり、ドロップゾンデやSFMR、そして世界各地の係留ブイによる実測値との比較検証が継続して行われている。係留ブイによる風速の実測は、熱帯のTAO/TRITONブイ、アメリカ近海のNODCブイが主

で、日本周辺の外洋にはKEO/J-KEOブイ以外は安定した観測基地がなかったが、台湾が台風観測を主目的としたNTUブイを2015年に設置し運用を開始した。日本では高知県が管理している黒潮牧場ブイで測定された水温と衛星海面水温の比較検証が近年行われるなど、地方自治体や水産業界と海洋学会との連携が始まった。これにはGTSPやiQuamのような国際的な現場データ登録システムが役に立っている。今後、黒潮牧場のようなブイに海面関連センサーを追加する際には、データ流通を鍵として自治体・大学・国研が連携すべきである。日本沿岸の係留ブイに関しては、津波や高潮災害の監視を主目的として国土交通省によるGPS波浪計18基の設置が進み、これに海岸近くの海底設置式波浪計を合わせた波浪観測網NOWPHASが整備されている。海洋学会は工学コミュニティと連携してこれらのデータの利用価値を高めていくべきである。

6.4. 水面の砕波の影響

超高風速域における気液間運動量輸送量に関する考察は、歴史的にはそれほど単純ではなかった(高垣, 2020)。高風速下の運動量輸送の理解において、米国マイアミ大学の風洞水槽から得られた結果に基づきDonelan(2004)の抵抗係数アルゴリズムが提案された。このアルゴリズムは、2013年頃からNCARのWRFやNHCのHurricane WRFなどにオプションとして追加され、ハリケーンや台風の数値シミュレーション研究において時々利用されている。2010年前後に京都大学の工学部において運用されていた大型の風洞水槽を用いて、Takagaki *et al.* (2012)は、抵抗係数の風速依存性が風速35 m/s付近からの大きな変化する理由が、力学的なレジームシフトによることを明らかにした。これは、風波の波頭が強く破碎されることにより、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る。最近ではデータの再検証により、Donelan(2004)モデルは実験誤差を含んでいる可能性があり、京大アルゴリズムの方が優れているのではないかという報告がある(Curcic and Haus, 2020)。大気海洋間の運動量輸送の見積もり方法については、対数プロファイル法や渦相関法だけでなく乱流運動エネルギー法や慣性散逸法も検証されている(Inoue *et al.*, 2011)。近年は洋上風力発電や洋上空

港施設の運用にむけて大気海洋境界に関わる新しい観測機器 (LiDAR による洋上の風速やエアロゾル分布の観測など) の試験が気象や海岸工学など近隣コミュニティで行われており, それと並行した大気海洋波浪結合モデルや位相解像波浪モデルなどの開発が海洋学会に新しい潮流をもたらしている (Kanada *et al.*, 2017; Houtani *et al.*, 2018)。大循環モデルおよび領域モデルにおいては SPRINTERS のような大気エアロゾルモデルと海洋・波浪モデルを結合したシステム開発が今後 10 年間に進められることが予想される (Saruwatari and Abe, 2014)。その基礎モデルとして大気海洋境界層を連続した LES モデル研究の拡充が求められる。海洋学会においては海洋混合層内の乱流と波浪過程あるいは生態過程を同時に解くモデル研究がこれまで活発に行われ, そのなかで粒子追跡アルゴリズムによる新たな展開があった (Furuichi *et al.*, 2012; Fujiwara *et al.*, 2020)。このような研究のなかで海面水温や風速のような変数だけでなく, 例えば海面の白波被覆率や海面近傍における乱流散逸率や同じく海面近傍における塩分 (降水・河川起源) のような新しい物理変数を核として, 観測研究とモデル研究の両輪を進めるべきである。

水面の碎波は数値シミュレーションで再現するのが難しく, 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続けられている。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, 海洋関連および風工学のコミュニティ全体で理解していく必要がある。主だった海外の高速風洞水槽はマイアミ大学の SUSTAIN 水槽, ロシア, オーストラリアの水槽である。特にマイアミ水槽は, 2015 年に最大風速が 50 m/s から 85 m/s へとアップグレードされた。国内の海洋・土木工学・船舶工学学会においては, 例えば, 国内の大学や研究所の風洞水槽や観測施設を見学するツアーを若手向けに開催する (候補地の一覧は高垣 直尚会員のパブリックコメントを参照 https://kaiyo-gakkai.jp/jos/archives/jos_announce/8499) などして, 横のつながりや世代交代の素地を作り, さらに洋上風力発電など海上構造物に関連する民間企業と連携して, 大型設備による実測研究の未来を開拓していくことが期待される。

6.5. 非線形相互作用

大気海洋間の運動量輸送において海上風速 (絶対風速) ではなく海上風速と海洋の表層流速との差 (相対風速) が海洋の渦の維持に密接に関係していることがわかってきている (Tsujino *et al.*, 2013)。波浪モデルについても海上風速によって駆動するのが従来のやり方であったが, 海洋の表層流と波の位相速度との相互関係の理解が重要である。台風や爆弾低気圧の通過時のように短時間で風速が変化する場合には波向と風向がいつも同じではないことが一つのポイントであり, 海面のうねりの相乗効果によって船舶の遭難に至るような巨大波が現れることがある (Tamura *et al.*, 2009)。波々間相互作用モデルの開発によってこのような現象の一部が再現できるようになった (Komatsu and Masuda, 1996)。その検証には漂流型波浪ブイシステムや衛星観測による検証が欠かせない。波々間相互作用は波動乱流理論によって力学的解釈が行われてきた。その普遍的性質を理解した上で, 観測と理論を組み合わせることが有効である。

波々間相互作用理論の開発は, 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る。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た (Masuda, 1980)。Hasselmann の波々間相互作用理論は, 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る。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た。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る。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, 世界的なホットトピックである。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 (Ijichi *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がある (Barkan *et al.*, 2017; Takahashi *et al.*, 2021)。

表面波と内部波の理論的共通性にも見られるように、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横糸として伝統的に重んじられてきた。その存在意義は現代においてもまったく失われていない。海洋学会の発表大会においては、2016年度からセッション提案制が導入された。これによって従来の海洋力学・波浪に大気力学を加えた三分野が一つにまとまった情報交換の場が生まれた。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られる。例えばHasselmann (1962)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あったが、近年では、より突発的な風強制への応答や海水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る(Liu *et al.*, 2021)。海水-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、人工衛星による海水観測と連動した波浪研究の発展が望まれる。

7. 総合的な研究手法

これまで説明した5つのトピックス(大気からの栄養塩沈着, SML, 気体交換, エアロゾル形成, 波浪に関わるプロセス)のそれぞれの枠を超えた総合的な研究手法について本節で提案する。米国では航空機によるハリケーン観測を継続的に実施し、ドロップゾンデとSFMRによる海上風速データの検証を行っている。米国における航空機観測(Hurricane Hunters)では、強風下の低空を低速で飛行しても推進力を失わないようにするために敢えてプロペラ機を使用している。空中から投下可能な海洋測器としてAXBTやAXCTDの他に、Argoフロートと同じように自動浮上可能な鉛直プロファイラーもある(Hsu *et al.*, 2018)。国内でも航空機による台風観測を行い、ドロップゾンデを用いて上空から海面までの気温、湿度、風速の鉛直分布を測定している(Ito *et al.*, 2018)。日本気象学会では、気候・地球システム科学研究を推進するために、大気観測専用の航空機を導入することをマスタープラン2017・2020で提案している。これ

に海洋学会が連携していくにあたり、情報通信研究機構が開発した航空機搭載SARの利用が、候補の一つとして挙げられる。また、空気中と水中ではセンサーの特性や測定可能な項目が異なるなどの難しさはあるが、海面直上の大気から海表面を経て海洋表層まで鉛直的に連続したデータが取得できる機器を導入した、組織的な大気海洋境界観測の実現が望まれる。例えばHostetler *et al.* (2018)は、航空機搭載のLiDARを用いて、自由対流圏から大気境界層にかけてのエアロゾル後方散乱の鉛直分布(解像度20 m程度)と、海洋有光層における光拡散減衰係数の鉛直分布(解像度2 m程度)を連続して計測し、飛行経路に沿う詳細な構造を示している。衛星観測や現場観測の結果から、海洋中の光拡散減衰係数の鉛直分布をある程度仮定することができるようになれば、ひまわり衛星やGCOM-C(しきさい)衛星のようなイメージで光合成有効放射(PAR)波長積算の有光層深や波長毎の有光層深(光消散係数)を推定することが期待できる。衛星搭載のLiDARについては、ESAが2018年8月にAeolus衛星を打ち上げ、エアロゾルや雲粒の流れを捉えることにより、風速の鉛直分布を解像度500 m ~ 2 kmで推定したデータを2020年4月から一般公開している。Aeolus衛星は2021年8月に設計寿命を迎えるため、後継ミッションにむけてJAXAと気象研究所を中心に調査が進められている。前述したマイクロ波・赤外線・光学センサー、そしてSARについてもあてはまることであるが、気象や陸域分野で計画されている衛星ミッションに、海洋や大気境界層に関する要望やアイデアを早い段階から積極的に伝えることが望ましい。打ち上げ後には宇宙から計測されたデータから海洋や大気境界層に関する情報を積極的に抽出することができるように、海洋学会とリモートセンシング関連コミュニティとの連携を、センサーの違いの垣根なく、高めていくことが重要である。今後は、例えば、気象分野で使われている衛星シミュレーターのコンセプトを海洋に応用し、海上風速のリモートセンシングで直接計測している物理量を、波浪モデルの出力変数を工夫することで、時空間的に隙間なく再現することが挙げられる。同様に、海色のリモートセンシングで直接計測している物理量を、生態系モデルの出力変数を工夫することで、時空間的に隙間なく再現することが挙げられる。これらを海洋環境監視という

キーワードをもとに運用体制まで発展させるなかで、海洋の時空間構造についての新しい発見が、観測と理論を両輪として生まれることが期待される。

海面近傍の組織的な観測として、Argoフロート、漂流波浪ブイ、そして近年ではWaveグライダーや海鳥へのバイオロギングの活用が注目されている (Sato *et al.*, 2008)。全球を観測するArgoフロートでは、5 m以浅は計測しないという方法がとられていた。これはポンプで水を吸い込んでセンサーの電極で電気伝導度を計測する際に、海面付近の汚濁物によりセンサーが汚染されるのを防ぐためである。この問題は払拭されつつあり、最近では国際アルゴ運営委員会でも海面1, 2 m深までの計測を推奨している。一方、電磁誘導式のセンサーはポンプが不要なため海面近く1 m以浅の塩分・水温が計測可能であり、Argoフロートへの搭載が見込まれている (<https://rbr-global.com/products/oem/argo>)。海面付近の塩分・水温を測定可能なセンサーはこれまでも存在し10 cmの鉛直解像度で降水痕跡を観測した例がある (Anderson and Riser, 2014)。これらに基づき降水イベントにもなって海面上の雨水がどのように分布、拡散していくのか、それが大気から沈着したダストとどのように相互作用していくのかなどを明らかにしていくことが期待される (Hosoda *et al.*, 2009)。

水面ごく近傍であるSMLの詳細な観測のためには、3節で述べたマイクロセンサーの適用も検討が望まれる。船舶を用いた現場での直接観測に加えて、例えば、Argoフロート上部にマイクロセンサーを装着して、Argoフロート本体を水面直下で停止させた状態でマイクロセンサーを稼働させ、海表面付近の数cmについては微細スケールの詳細な鉛直データを取得するというオプションの検討も有効と考えられる。あるいは、波浪で壊れない堅牢なセンサーを工夫し、漂流波浪ブイに取り付けることができれば、海表面付近の連続データを取得できる可能性がある。

海面の状態を実際に確認・記録しながらSMLサンプルや海表面近傍データを取得するために、レーダーの活用も有効である。海面に油膜を伴うslickが形成されている場合、人工衛星に搭載したSARでもその様子が捕らえられており、こうしたレーダー画像解析と現地での測器による観測ならびにSMLサンプル採取をあわせて、

油膜 slickを追跡したSML中の微生物群集解析が実施されている (Parks *et al.*, 2020)。ここで使用されているSARは、C-bandおよびX-bandであり、一般的に波長の短いSARがslickの観測には適していると考えられている。一方で、JAXAのL-band SARにおいても、オイル流出によるslickが検出されており、slick観測への利用、および、波長依存性が明らかになることが期待される。人工衛星のみでなく、近年発展の目覚ましいドローンによる空撮を活用すれば、より広い条件で海面情報とSMLサンプルの同時採取が可能となるだろう (木田ら, 2021, 本特集)。ドローン自体のおこす風がSMLを乱さないよう注意する必要があるが、工夫すれば現実的に考えられるのではないだろうか。さらに、採取量は制限されるであろうが軽量のSML採取装置を開発してドローンに取り付け、海面状況を確認しながらドローンからSMLサンプルを採取することも検討していきたい。

SARの利用の新しい例として、海上風速の推定を前節で紹介した。SARの利用がこれまで進みにくかった主要な要因として、観測頻度とデータ購入費の問題がある。観測頻度に関しては、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ーに比べて狭くなり (最大500 km程度)、その影響で頻度が低くなる。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日程度を要する。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る。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、多数個の人工衛星を協調動作させるシステム (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る。2022年度打ち上げ予定のALOS-4衛星/PALSAR-3センサーでは、観測幅がこれまでよりもかなり広がるので (最大700 km)、観測頻度が増えることが期待されている。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る。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る。データ購入費に対しては、衛星データのオープンエンド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る。実際に、ヨーロッパの Sentinel-1 SAR 衛星に関しては、上述した Wave mode データも含めて Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>) からダウンロード可能である。また、JAXA に関しても、JERS-1 衛星の SAR データは、G-portal (<https://gportal.jaxa.jp/>) より無償で入手可能となっている。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ことが予想される。これらの光学画像も含めた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、大気海洋境界のプロセス研究にどう生かすかについては、新たな視点やアイデアが必要となる。

今後、既存の手法の改良・標準化と、新たな手法や新たなアプローチの組み合わせにより、地球表面の7割を覆う海表面のさまざまな海域でのデータが蓄積され、様々な環境条件における大気海洋境界の実態やその動態、生物地球化学的物質循環と気象海象等の物理的現象の関係、地球環境変化・変動に対するそれらの応答などに関する解析が進むことが望まれる。

8. 今後に向けて

本稿では、海洋の有光層から大気の大気圏まで含めた空間を対象として、大気海洋境界付近での生物地球化学的な連鎖と物理場の相互作用の研究展望について説明した。特に水深 10 m から海表面を経て上空数百 m までの範囲は、観測とモデル両方において従来の鉛直解像度では動態把握に不十分であった。この大気海洋境界層の研究は国内では海洋学、気象学、大気化学、土木工学、船舶工学、リモートセンシングそれぞれの分野において独自の発展を遂げてきた。本稿で述べたようなコミュニティ連携は中堅以上の研究者にとっては醍醐味があるが、学生や若手にとっては現状や将来像が見えづらいという課題がある。その中でよく組織されているのが生物地球化学分野を中心とする SOLAS-Japan であり、全球のみならず西部北太平洋やベンガル湾などにおいて領域地球システム研究プロジェクトを推進してきた。今後 10 年間において物理系の研究者が合流した大気海洋境界アライアンス (多様なコミュニティ間の連絡網) を形成することにより、新たな共通目標や観測・モデル化における標準

比較項目 (白波被覆率や海面近傍におけるエアロゾルの鉛直分布) を整備することが求められる。これまで海洋学の分野は長期的な地球システムの変化に関する理学的な理解を目標とする場合が多かった。一方で気象学や土木工学の分野においては豪雨や暴風災害など社会に関連する短期的なイベント研究に目標を据える傾向がある。この違いを積極的に利用して、例えば化学天気予報システム (Uno *et al.*, 2003) でイベント解析を行いながら SSA 生成や栄養塩沈着のモデル化における現状を見極めデータ同化に有効な観測項目を発掘したり、近年のマイクロプラスチックに関する技術開発に連動して SML や降水痕跡の観測とそのモデル化を推進したりするといったことが期待される。

謝 辞

本稿の作成にあたり、以下の方々 (敬称略) ならびに 3 名の匿名の査読者から貴重なご助言をいただきました: 江淵直人, 大貫陽平, 岡英太郎, 可知美佐子, 高垣直尚, 田村仁, 富田裕之, 中岡慎一郎, 濱崎恒二, 細田滋毅, 本多牧生, 宮崎雄三, 村上浩。深く感謝申し上げます。

略語説明 (プロジェクト名と衛星・センサー・測器名は日本語省略)

AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth observing system

ASGAMAGE: the Air-Sea Gas Exchange/MAGE Experiment

ASGASEX: for Air Sea GAS Exchange

AXB T: Airborne eXpendable BathyThermograph probe

AXCTD: Airborne eXpendable Conductivity, Temperature, and Depth probe

CCD: Charge-Coupled Device

CCN: Cloud Condensation Nuclei 雲凝結核

CFOSAT: China-France Oceanography Satellite

CLAW: Charlson Lovelock Andreae Warren (著者名の頭文字)

- CNES: Le site du Centre national d'études spatiales
- COARE: Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment
- CYGNSS: Cyclone Global Navigation Satellite System
- DMS: Dimethyl Sulfide 硫化ジメチル
- DMSF: Dimethylsulfoniopropionate ジメチルスルフォニオプロピオネイト
- DOC: Dissolved Organic Carbon 溶存態有機炭素
- EANET: the acid deposition monitoring Network in East Asia 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク
- ERS-1/AMI: European Remote Sensing satellite-1 / Active Microwave Instrument
- ESA: European Space Agency
- FDOM: Fluorescent Dissolved Organic Matter 蛍光性溶存有機物
- GasEx: Gas Exchange Experiment
- GEOSAT: Geodetic Satellite
- GEOTRACES: An International Study of the Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Their Isotopes
- GPS: Global Positioning Satellite
- GCOM-C: Global Change Observation Mission Climate
- GCOM-W: Global Change Observation Mission Water
- GOSAT-GW: Greenhouse Gases Observing Satellite Greenhouse gases and Water cycle
- GSMaP: the Global Satellite Mapping of Precipitation
- GTSP: Global Temperature and Salinity Profile Programme
- HNF: Heterotrophic Nanoflagellates 従属栄養性ナノ鞭毛虫
- HNLC: High-Nutrient, Low-Chlorophyll
- iQuam: in situ SST Quality Monitor
- JERS: Japanese Earth Resources Satellite
- KEO: Kuroshio Extension Observatory
- LES: Large Eddy Simulation
- LiDAR: Light Detection and Ranging
- Metop-B/ASCAT: The Meteorological Operational satellite program-B/Advanced Scatterometer
- NASA: National Aeronautics and Space Administration
- NCAR: National Center for Atmospheric Research
- NHC: National Hurricane Center
- NOWPHAS: National Ocean Wave information network for Ports and Harbours
- NODC: National Oceanographic Data Center
- NTU: National Taiwan University
- OASIS: Observing Air-Sea Interaction Strategy
- PALSAR: Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
- PAR: Photosynthetically Active Radiation 光合成有効放射
- POC: Particulate Organic Carbon 粒子態有機炭素
- SAR: Synthetic-Aperture Radar 合成開口レーダー
- SCOR: Science Committee on Oceanographic Research 海洋研究科学委員会
- SEAREX: The Sea-Air Exchange program
- SFMR: Stepped Frequency Microwave Radiometer
- SKIM: Sea Surface KINematics Multiscale monitoring
- SML: Sea surface Microlayer
- SSA: Sea Spray Aerosol
- SUSTAIN: Surge Structure Atmosphere Interaction
- S3F: Sea Spray Source Function
- SOCAT: Surface Ocean CO₂ Atlas 表層海洋 CO₂ データベース
- SOLAS: Surface Ocean Lower Atmosphere Study 海洋大気間の物質相互作用研究計画
- SPRINTERS: Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species
- SWOT: The Surface Water and Ocean Topography
- TEP: Transparent Exopolymer Particles 透明細胞外ポリマー粒子
- TAO: Tropical Atmosphere Ocean
- TRITON: Triangle Trans-Ocean buoy Network
- TN: Total Nitrogen 全窒素
- VMAP: the Variability of Maritime Aerosol Properties
- VOS: Voluntary Observing Ship 篤志観測船
- WaCM: Winds and Currents Mission
- WRF: Weather Research and Forecast system

References

- 相木秀則・近藤文義・根田昌典・田中潔・藤田敏男 (2020): 10 Hz測定光学粒子計による海上波浪境界層観測. エアロゾル研究, **35**, 160-169.
- Aller, J. Y., J. C. Radway, W. P. Kilhau, D. W. Bothe, T. W. Wilson, R. D. Vaillancourt, P. K. Quinn, D. J. Coffman, B. J. Murray, and D. A. Knopf (2017): Size-resolved characterization of the polysaccharidic and proteinaceous components of sea spray aerosol. *Atmos. Environ.*, **154**, 331-347.
- Anderson, J. E., and S. C. Riser (2014): Near-surface variability of temperature and salinity in the near-tropical ocean: Observations from profiling floats. *J. Geophys. Res. Oce.*, **119**, 7433-7448.
- Anderson, R. F. (2020): GEOTRACES: Accelerating research on the marine biogeochemical cycles of trace elements and their isotopes. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **12**, 49-85.
- Atlas, R., R. N. Hoffman, S. C. Bloom, J. C. Jusem, and J. Ardizzone (1996): A multilayer global surface wind velocity dataset using SSM/I wind observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 869-882.
- Baldocchi, D. D. (2003): Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Glob. Change Biol.*, **9**, 479-492.
- Barkan, R., K. B. Winters, and J. C. McWilliams (2017): Stimulated imbalance and the enhancement of eddy kinetic energy dissipation by internal waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **47**, 181-198.
- Bates, T. S., P. K. Quinn, A. A. Frossard, L. M. Russell, J. Hakala, T. Petäjä, M. Kulmala, D. S. Covert, C. D. Cappa, S.-M. Li, K. L. Hayden, I. Nuaaman, R. McLaren, P. Massoli, M. R. Canagaratna, T. B. Onasch, D. Sueper, D. R. Worsnop, and W. C. Keene (2012): Measurements of ocean derived aerosol off the coast of California. *J. Geophys. Res. Oce.*, **117**, D00V15.
- Beyenal, H., and J. Babauta (2013): Microsensors and microscale gradients in biofilms, p. 235-256. In *Productive Biofilms, Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, Vol. 146, edited by K. Muffler and R. Ulbe, Springer, Cham, Switzerland.
- Bishop, J. K. B., R. E. Davis, and J. T. Sherman (2002): Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific. *Science*, **298**, 817-821.
- Blomquist, B. W., C. W. Fairall, B. J. Huebert, D. J. Kieber, and G. R. Westby (2006): DMS sea-air transfer velocity: Direct measurements by eddy covariance and parameterization based on the NOAA/COARE gas transfer model. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L07601.
- Boyd, P. W., D. S. Mackie, and K. A. Hunter (2010): Aerosol iron deposition to the surface ocean - Modes of iron supply and biological responses. *Mar. Chem.*, **120**, 128-143.
- Broecker, W., and T. Peng (1974): Gas exchange rates between air and sea. *Tellus*, **26**, 21-35.
- Bureekul, S., Y. Murashima, H. Furutani, and M. Uematsu (2014): Enrichment of particulate phosphorus in a sea-surface microlayer over the Eastern Equatorial Pacific Ocean. *Geochem. J.*, **48**, e1-e7.
- Butterworth, B. J., and B. G. T. Else (2018): Dried, closed-path eddy covariance method for measuring carbon dioxide flux over sea ice. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 6075-6090.
- Carlslaw, K. S., O. Boucher, D. V. Spracklen, G. W. Mann, J. G. L. Rae, S. Woodward, and M. Kulmala (2010): A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the Earth system. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 1701-1737.
- Charlson, R., J. Lovelock, M. Andreae, and S. G. Warren (1987): Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, **326**, 655-661.
- Clarke, A. D., J. L. Varner, F. Eisele, R. L. Mauldin, D. Tanner, and M. Litichy (1998): Particle production in the remote marine atmosphere: Cloud outflow and subsidence during ACE 1. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **103**, 16397-16409.
- Conway, T. M., and S. G. John (2014): Quantification of dissolved iron sources to the North Atlantic Ocean. *Nature*, **511**, 212-215.
- Covert, D. S., V. N. Kapustin, T. S. Bates, and P. K. Quinn (1996): Physical properties of marine boundary layer aerosol particles of the mid-Pacific in relation to sources and meteorological transport. *J. Geophys. Res. Oce.*, **101**, 6919-6930.
- Crocker, D. R., R. E. Hernandez, H. D. Huang, M. A. Pendergraft, R. Cao, J. Dai, C. K. Morris, G. B. Deane, K. A. Prather, and M. H. Thiemens (2020): Biological influence on $\delta^{13}\text{C}$ and organic composition of nascent sea spray aerosol. *ACS Earth Space Chem.*, **4**, 1686-1699.
- Cronin, M. F. *et al.* (2019): Air-sea fluxes with a focus on heat and momentum. *Front. Mar. Sci.*, **6**, 430.
- Crutzen, P. J. (2002): Geology of mankind. *Nature*, **415**, 23.
- Cunliffe, M., M. Salter, P. J. Mann, A. S. Whiteley, R. C. Upstill-Goddard, and J. C. Murrell (2009): Dissolved organic carbon and bacterial populations in the gelatinous surface microlayer of a Norwegian fjord mesocosm. *FEMS Microbiol. Lett.*, **299**, 248-254.
- Cunliffe, M., A. Engel, S. Frka, B. Gašparović, C. Guitart, J. C. Murrell, M. Salter, C. Stolle, R. Upstill-Goddard, and O. Wurl (2013): Sea surface microlayers: A unified physicochemical and biological perspective of the air-ocean interface. *Prog. Oceanogr.*, **109**, 104-116.
- Cunliffe, M., and O. Wurl (2014): *Guide to Best Practices to Study the Ocean's Surface*. Occasional Publications of the Marine Biological Association of the United Kingdom, Plymouth, UK, 118 pp.
- Curcic, M., and B. K. Haus (2020): Revised estimates of ocean surface drag in strong winds. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL087647.
- de Leeuw, G., E. L. Andreas, M. D. Anguelova, C. W. Fairall, E. R. Lewis, C. O'Dowd, M. Schulz, and S. E. Schwartz (2011): Production flux of sea spray aerosol. *Rev. Geophys.*, **49**, RG2001.
- Donelan, M. A., B. K. Haus, N. Reul, W. J. Plant, M. Stiassnie, H. C. Graber, O. B. Brawn, and E. S. Saltzman (2004): On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L18306.
- Duce, R. A. (1989): *SEAREX: The Sea/Air Exchange Program*. Chemical Oceanography, Vol. 10, Academic Press, London, UK, 404 pp.
- Ebling, A. M., and W. M. Landing (2017): Trace elements in the sea surface microlayer: Rapid responses to changes in aerosol deposition. *Elem. Sci. Anth.*, **5**, 42.
- Ebuchi, N., H. C. Graber, and M. J. Caruso (2002): Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **19**, 2049-2062.
- Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev, and J. B. Edson (2003): Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *J. Climate*, **16**, 571-591.
- Fuentes, E., H. Coe, D. Green, and G. McFiggans (2011): On the impacts of phytoplankton-derived organic matter on the properties of the pri-

- mary marine aerosol - Part 2: Composition, hygroscopicity and cloud condensation activity. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 2585-2602.
- Fujiwara, Y., Y. Yoshikawa, and Y. Matsumura (2020): Wave-resolving simulations of viscous wave attenuation effects on Langmuir circulation. *Ocean Modell.*, **154**, 101679.
- Furuichi, N., T. Hibiya, and Y. Niwa (2012): Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using a large eddy simulation model. *J. Oceanogr.*, **68**, 285-294.
- Furutani, H., A. Meguro, H. Iguchi, and M. Uematsu (2010): Geographical distribution and sources of phosphorus in atmospheric aerosol over the North Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L03805.
- Gac, J.-P., T. Cariou, É. Macé, M. Vernet, and Y. Bozec (2020): Statistical analysis of high-frequency pCO₂ data acquired with the ASTAN buoy (South-Western English Channel, off Roscoff), p. 67-82. In *Evolution of Marine Coastal Ecosystems under the Pressure of Global Changes*, edited by H. J. Ceccaldi, Y. Hénocque, T. Komatsu, P. Prouzet, B. Sautour, and J. Yoshida, Springer, Cham, Switzerland.
- Galgani, L., C. Stolle, S. Endres, K. G. Schulz, and A. Engel (2014): Effects of ocean acidification on the biogenic composition of the sea-surface microlayer: Results from a mesocosm study. *J. Geophys. Res. Océ.*, **119**, 7911-7924.
- 浜崎恒二・石坂丞二・齊藤宏明・杉崎宏哉・鈴木光次・高橋一生・千葉早苗 (2013): 海洋学の10年展望(III) —日本海洋学会将来構想委員会生物サブグループの議論から—, *海の研究*, **22**, 253-272.
- Hamilton, D. S., R. A. Scanza, S. D. Rathod, T. C. Bond, J. F. Kok, L. Li, H. Matsui, and N. M. Mahowald (2020): Recent (1980 to 2015) trends and variability in daily-to-interannual soluble iron deposition from dust, fire, and anthropogenic sources. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL089688.
- Hamme, R. C., P. W. Webley, W. R. Crawford, F. A. Whitney, M. D. DeGrandpre, S. R. Emerson, C. C. Eriksen, K. E. Giesbrecht, J. F. R. Gower, M. T. Kavanaugh, M. A. Pena, C. L. Sabine, S. D. Batten, L. A. Coogan, D. S. Grundle, and D. Lockwood (2010): Volcanic ash fuels anomalous plankton bloom in subarctic northeast Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L19604.
- 花輪公雄・津田敦 (2013): 「海洋学の10年展望」 発刊に寄せて, *海の研究*, **22**, 187-189.
- 橋濱史典・額顯慎也・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.
- Hasselmann, K. (1962): On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part I. General theory. *J. Fluid Mech.*, **12**, 481-500.
- Hosoda, S., T. Suga, N. Shikama, and K. Mizuno (2009): Global surface layer salinity change detected by Argo and its implication for hydrological cycle intensification. *J. Oceanogr.*, **65**, 579-586.
- Hostetler, C. A., M. J. Behrenfeld, Y. Hu, J. W. Hair, and J. A. Schullien (2018): Spaceborne lidar in the study of marine systems. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **10**, 121-147.
- Houtani, H., T. Waseda, W. Fujimoto, K. Kiyomatsu, and K. Tanizawa (2018): Generation of a spatially periodic directional wave field in a rectangular wave basin based on higher-order spectral simulation. *Ocean Eng.*, **169**, 428-441.
- Hsu, J., R. Lien, E. A. D'Asaro, and T. B. Sanford (2018): Estimates of surface waves using subsurface EM-APEX floats under Typhoon Fani-pi 2010. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **35**, 1053-1075.
- Ichikawa, K., X.-F. Wang, and H. Tamura (2020): Capability of Jason-2 subwaveform retracker for significant wave height in the calm semi-enclosed Celebes Sea. *Remote Sens.*, **12**, 3367.
- Ijichi, T., L. St. Laurent, K. L. Polzin, and J. M. Toole (2020): How variable is mixing efficiency in the abyss? *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2019GL086813.
- Isoguchi, O., T. Tadono, M. Ohki, U. Shimada, M. Yamaguchi, M. Hayashi, and W. Tanase (2021): Hurricane ocean surface wind retrieval from ALOS-2 PALSAR-2 cross-polarized measurements. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (in press).
- Ito, A. et al. (2019): Pyrogenic iron: The missing link to high iron solubility in aerosols. *Sci. Adv.*, **5**, eaau7661.
- Ito, A., Y. Ye, A. Yamamoto, M. Watanabe, and M. N. Aita (2020): Responses of ocean biogeochemistry to atmospheric supply of lithogenic and pyrogenic iron-containing aerosols. *Geol. Mag.*, **157**, 741-756.
- Ito, A., Y. Ye, C. Baldo, and Z. Shi (2021): Ocean fertilization by pyrogenic aerosol iron. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **4**, 30.
- Ito, K., H. Yamada, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, T. Shinoda, and K. Tsuboki (2018): Analysis and forecast using dropsonde data from the inner-core region of Tropical Cyclone Lan (2017) obtained during the first aircraft missions of T-PARCII. *SOLA*, **14**, 105-110.
- Inoue, T., R. N. Glud, H. Stahl, and A. Hume (2011): Comparison of three different methods for assessing in situ friction velocity: A case study from Loch Etive, Scotland. *Limnol. Oceanogr. Methods*, **9**, 275-287.
- Iwamoto, Y., K. Yumimoto, M. Toratani, A. Tsuda, K. Miura, I. Uno, and M. Uematsu (2011): Biogeochemical implications of increased mineral particle concentrations in surface waters of the northwestern North Pacific during an Asia dust event. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L01604.
- Jickells, T. D. et al. (2017): A reevaluation of the magnitude and impacts of anthropogenic atmospheric nitrogen inputs on the ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, **31**, 289-305.
- Jones, E. P., and S. D. Smith (1977): A first measurement of sea-air CO₂ flux by eddy correlation. *J. Geophys. Res.*, **82**, 5990-5992.
- Jung, J., H. Furutani, M. Uematsu, S. Kim, and S. Yoon (2013): Atmospheric inorganic nitrogen input via dry, wet, and sea fog deposition to the subarctic western North Pacific Ocean. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 411-428.
- Kadko, D., W. M. Landing, and C. S. Buck (2020): Quantifying atmospheric trace element deposition over the ocean on a global scale with satellite rainfall products. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2019GL086357.
- Kanada, S., S. Tsujino, H. Aiki, M. K. Yoshioka, Y. Miyazawa, K. Tsuboki, and I. Takayabu (2017): Impacts of SST patterns on rapid intensification of Typhoon Megi (2010). *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 13245-13262.
- 神田稯太・石井雅男・小川浩史・小基恒夫・小畑元・川合美千代・鈴木昌弘・本多牧生・山下洋平・渡邊豊 (2013): 海洋学の10年展望(II) —日本海洋学会将来構想委員会化学サブグループの議論から—, *海の研究*, **22**, 219-251.
- Karavoltzos, S., E. Kalambokis, A. Sakellari, M. Plavšić, E. Dotsika, P. Karalis, L. Leondiadis, M. Dassenakis, and M. Scoullou (2015): Organic matter characterization and copper complexing capacity in the sea surface microlayer of coastal areas of the Eastern Mediterranean. *Mar. Chem.*, **173**, 234-243.
- 川合美千代・田村岳史・渡邊英嗣・西岡純・野村大樹・真壁竜介・溝端浩平・安中さやか (2021): 海洋学の10年展望2021: 極域, *海の研究*, **30**, 159-178.
- 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.

- Kim, T., W., K. Lee, R. G. Najjar, H. D. Jeong, and H. J. Jeong (2011): Nitrogen deposition from the atmosphere has altered the nitrate:phosphorus ratio in the marginal seas of the northwestern Pacific Ocean. *Science*, **334**, 505-509.
- Komatsu, K., and A. Masuda (1996): A new scheme of nonlinear energy transfer among wind waves: RIAM method -algorithm and performance-. *J. Oceanogr.*, **52**, 509-537.
- Kondo, F., and O. Tsukamoto (2012): Experimental validation of WPL correction for CO₂ flux by eddy covariance technique over the asphalt surface. *J. Agric. Meteorol.*, **68**, 183-194.
- Krishnamurthy, A., J. K. Moor, N. Mahowald, C. Luo, S. C. Doney, K. Lindsay, and C. S. Zender (2009): Impacts of increasing anthropogenic soluble iron and nitrogen deposition on ocean biogeochemistry. *Global Biogeochem. Cycles*, **23**, GB3016.
- Kubota, T., S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, M. Hirose, Y. N. Takayabu, T. Ushio, K. Nakagawa, K. Iwanami, M. Kachi, and K. Okamoto (2007): Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation. *IEEE T. Geosci. Remote.*, **45**, 2259-2275.
- Kurihara, Y., H. Murakami, and M. Kachi (2016): Sea surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari-8 satellite. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 1234-1240.
- Kurusu, M., Y. Takahashi, T. Iizuka, and M. Uematsu (2016): Very low isotope ratio of iron in fine aerosols related to its contribution to the surface ocean. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 11119-11136.
- Kuwae, T., J. Kanda, A. Kubo, F. Nakajima, H. Ogawa, A. Sohma, and M. Suzumura (2016): Blue carbon in human-dominated estuarine and shallow coastal systems. *Ambio*, **45**, 290-301.
- Large, W. G., and S. G. Yeager (2009): The global climatology of an inter-annually varying air-sea flux data set. *Clim. Dyn.*, **33**, 341-364.
- Liao, W., S. Takano, S. Yang, K. Huang, Y. Sohrin, and T. Ho (2020): Zn isotope composition in the water column of the Northwestern Pacific Ocean: The importance of external sources. *Global Biogeochem. Cycles*, **34**, e2019GB006379.
- Liss, P. S., and P. G. Slater (1974): Flux of gases across the air-sea interface. *Nature*, **247**, 181-184.
- Liss, P. S., and L. Merlivat (1986): Air-sea gas exchange rates: Introduction and synthesis, p. 113-129. In *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*, edited by P. Buat-Menard, Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Liu, Q., O. Gramstad, and A. Babanin (2021): Kinetic equations in a third-generation spectral wave model. *J. Fluid Mech.*, **910**, A50.
- Mahowald, N. M., A. R. Baker, G. Bergametti, N. Brooks, A. Duce, T. D. Jickells, N. Kubliay, J. M. Prospero, and I. Tegen (2005): Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, **19**, GB4025.
- Mahowald, N., T. D. Jickells, A. R. Baker, P. Artaxo, C. R. Benitez-Nelson, G. Bergametti, T. C. Bond, Y. Chen, D. D. Cohen, B. Herut, N. Kubilay, R. Losno, C. Luo, W. Maenhaut, K. A. McGee, G. S. Okin, R. L. Siefert, and S. Tsukuda (2008): Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts. *Global Biogeochem. Cycles*, **22**, GB4026.
- Mahowald, N. M., D. S. Hamilton, K. R. M. Mackey, J. K. Moore, A. R. Baker, R. A. Scanza, and Y. Zhang (2018): Aerosol trace metal leaching and impacts on marine microorganisms. *Nat. Commun.*, **9**, 2614.
- Malfatti, F., C. Lee, T. Tinta, M. A. Pendergraft, M. Celussi, Y. Zhou, C. M. Sultana, A. Rotter, J. L. Axson, D. B. Collins, M. V. Santander, A. L. A. Morales, L. I. Aluwihare, N. Riemer, V. H. Grassian, F. Azam, and K. A. Prather (2019): Detection of active microbial enzymes in nascent sea spray aerosol: Implications for atmospheric chemistry and climate. *Environ. Sci. Tech. Lett.*, **6**, 171-177.
- Martinez-Varela, A., G. Casas, B. Piña, J. Dachs, and M. Vila-Costa (2020): Large enrichment of anthropogenic organic matter degrading bacteria in the sea-surface microlayer at coastal Livingston Island (Antarctica). *Front. Microbiol.*, **11**, 571983.
- Masuda, A. (1980): Nonlinear energy transfer between wind waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 2082-2093.
- Misumi, K., J. Nishioka, H. Obata, D. Tsumune, T. Tsubono, M. C. Long, K. Lindsay, and J. K. Moore (2021): Slowly sinking particles underlie dissolved iron transport across the Pacific Ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, **35**, e2020GB006823.
- Miyazaki, Y., K. Suzuki, E. Tachibana, Y. Yamashita, A. Müller, K. Kawana, and J. Nishioka (2020): New index of organic mass enrichment in sea spray aerosols linked with senescent status in marine phytoplankton. *Sci. Rep.*, **10**, 17042.
- Mouche, A., B. Chapron, J. Knaff, Y. Zhao, B. Zhang, and C. Combot (2019): Copolarized and cross-polarized SAR measurements for high-resolution description of major hurricane wind structures: Application to Irma category 5 hurricane. *J. Geophys. Res. Océ.*, **124**, 3905-3922.
- Murphy, P. P., Y. Nojiri, Y. Fujinuma, C. S. Wong, J. Zeng, T. Kimoto, and H. Kimoto (2001): Measurements of surface seawater fCO₂ from volunteer commercial ships: Techniques and experiences from Skau-gran. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **18**, 1719-1734.
- Mustafa, N. I. H., M. Ribas-Ribas, and O. Wurl (2017): High-resolution variability of the enrichment of fluorescence dissolved organic matter in the sea surface microlayer of an upwelling region. *Elem. Sci. Anth.*, **5**, 52.
- Mustafa, N. I. H., T. H. Badewien, M. Ribas-Ribas, and O. Wurl (2018): High-resolution observations on enrichment processes in the sea-surface microlayer. *Sci. Rep.*, **8**, 13122.
- Mustafa, N. I. H., L. Kallajoki, H. Hillebrand, O. Wurl, and M. Striebel (2020): Sea surface phytoplankton community response to nutrient and light changes. *Mar. Biol.*, **167**, 123.
- Nakajima, R., K. Tsuchiya, N. Nakatomi, T. Yoshida, Y. Tada, F. Konno, T. Toda, V. S. Kuwahara, K. Hamasaki, B. H. R. Othman, T. C. Segaran, and A. W. M. Effendy (2013): Enrichment of microbial abundance in the sea-surface microlayer over a coral reef: implications for biogeochemical cycles in reef ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **490**, 11-22.
- 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.
- Nilsson, E., H. Bergström, A. Rutgersson, E. Podgrajsek, M. B. Wallin, G. Bergström, E. Dellwik, S. Landwehr, and B. Ward (2018): Evaluating humidity and sea salt disturbances on CO₂ flux measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **35**, 859-875.
- 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(1) — 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一、海の研究, **22**, 191-218.
- 岡本幸三 (2014): 数値予報における衛星データの利用、計測と制御, **53**, 1006-1012.
- Onuki, Y., S. Joubaud, and T. Dauxois (2021): Simulating turbulent mixing caused by local instability of internal gravity waves. *J. Fluid Mech.*, **915**, A77.
- Parks, G., C. W. Dean, J. A. Kluge, A. V. Soloviev, M. Shivji, A. Tartar, K. L. Howe, S. Lehner, E. Schwarz, H. Shen, W. Perrie, and P. Schuler (2020): Analysis of surfactant-associated bacteria in the sea surface microlayer using deoxyribonucleic acid sequencing and synthetic aperture radar. *Int. J. Remote Sens.*, **41**, 3886-3901.
- Peng, T.-H., W. S. Broecker, G. G. Mathieu, Y. H. Li, and A. E. Bainbridge (1979): Radon evasion rates in the Atlantic and Pacific Oceans as determined during the GEOSECS program. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **84**, 2471-2486.
- Phillips, O. M. (1985): Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. *J. Fluid Mech.*, **156**, 505-531.
- Pinedo-González, P., N. J. Hawco, R. M. Bundy, E. V. Armburst, M. J. Follows, B. B. Cael, A. E. White, S. Ferron, D. M. Karl, and S. G. John (2020): Anthropogenic Asian aerosols provide Fe to the North Pacific Ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **117**, 27862-27868.
- Prather, K. A. et al. (2013): Bringing the ocean into the laboratory. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, 7550-7555.
- Quinn, P. K., and T. S. Bates (2011): The case against climate regulation via oceanic phytoplankton sulphur emissions. *Nature*, **480**, 51-56.
- Ribas-Ribas, M., N. I. H. Mustaffa, J. Rahlff, C. Stolle, and O. Wurl (2017): Sea Surface Scanner (S3): A catamaran for high-resolution measurements of biogeochemical properties of the sea surface microlayer. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **34**, 1433-1448.
- Robinson, T.-B., C. Stolle, and O. Wurl (2019a): Depth is relative: the importance of depth for transparent exopolymer particles in the near-surface environment. *Ocean Sci.*, **15**, 1653-1666.
- Robinson, T.-B., O. Wurl, E. Bahlmann, K. Jürgens, and C. Stolle (2019b): Rising bubbles enhance the gelatinous nature of the air-sea interface. *Limnol. Oceanogr.*, **64**, 2358-2372.
- Romero, L. (2019): Distribution of surface wave breaking fronts. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 10463-10474.
- 猿渡亜由未 (2020): 白波砕波と波飛沫、エアロゾル研究, **35**, 155-159.
- Saruwatari, A., and N. Abe (2014): Relationship between latent heat of sea spray and uncertainty of a meteorological field. *Appl. Ocean Res.*, **44**, 102-111.
- Sato, K., F. Daunt, Y. Watanuki, A. Takahashi, and S. Wanless (2008): A new method to quantify prey acquisition in diving seabirds using wing stroke frequency. *J. Exp. Bio.*, **211**, 56-65.
- Schlitzer, R. et al. (2018): The GEOTRACES Intermediate Data Product 2017. *Chem. Geol.*, **493**, 210-223.
- Sellegrí, K., A. Nicosia, and E. Freney (2021): Surface ocean microbiota determine cloud precursors. *Sci. Rep.*, **11**, 281.
- Shibata, A. (2006): A wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer: Wind speed inside hurricanes. *J. Oceanogr.*, **62**, 351-359.
- Stolle, C., K. Nagel, M. Labrenz, and K. Jürgens (2009): Bacterial activity in the sea-surface microlayer: in situ investigations in the Baltic Sea and the influence of sampling devices. *Aquat. Microb. Ecol.*, **58**, 67-78.
- Stolle, C., K. Nagel, M. Labrenz, and K. Jürgens (2010): Succession of the sea-surface microlayer in the coastal Baltic Sea under natural and experimentally induced low-wind conditions. *Biogeosciences*, **7**, 2975-2988.
- Stolle, C., M. Labrenz, C. Meeske, and K. Jürgens (2011): Bacterioneuston community structure in the southern Baltic Sea and its dependence on meteorological conditions. *Appl. Environ. Microb.*, **77**, 3726-3733.
- Stramski, D., R. A. Reynolds, P. Gernez, R. Röttgers, and O. Wurl (2019): Inherent optical properties and particle characteristics of the sea-surface microlayer. *Progr. Oceanogr.*, **176**, 102117.
- Sugai, Y., K. Tsuchiya, S. Shimode, and T. Toda (2018): Seasonal variations in microbial abundance and transparent exopolymer particle concentration in the sea surface microlayer of temperate coastal waters. *Aquat. Microb. Ecol.*, **81**, 201-211.
- Sugai, Y., K. Tsuchiya, S. Shimode, and T. Toda (2020): Photochemical production and biological consumption of CO in the SML of temperate coastal waters and their implications for air-sea CO exchange. *J. Geophys. Res. Oce.*, **125**, e2019JC015505.
- Sugihara, Y., H. Tsumori, T. Ohga, H. Yoshioka, and S. Serizawa (2007): Variation of whitecap coverage with wave field conditions. *J. Mar. Syst.*, **66**, 47-60.
- Sun, H., Y. Zhang, S. Tan, Y. Zheng, S. Zhou, Q.-Y. Ma, G.-P. Yang, J. D. Todd, and X.-H. Zhang (2020): DMSP-producing bacteria are more abundant in the surface microlayer than subsurface seawater of the East China Sea. *Microb. Ecol.*, **80**, 350-365.
- Tagliabue, A., O. Aumont, R. Death, J. P. Dunne, S. Dutkiewicz, E. Galbraith, K. Misumi, J. K. Moore, A. Ridgwell, E. Sherman, C. Stock, M. Vichi, C. Völker, and A. Yool (2016): How well do global ocean biogeochemistry models simulate dissolved iron distributions? *Global Biogeochem. Cycles*, **30**, 149-174.
- 高垣直尚 (2020): 海洋表面を通しての運動量・スカラ輸送機構に関する研究、ながれ, **39**, 130-135.
- Takagaki, N., S. Komori, N. Suzuki, K. Iwano, T. Kuramoto, S. Shimada, 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. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L23604.
- Takahashi, A., T. Hibiya, and A. C. Naveira Garabato (2021): Influence of the distortion of vertical wavenumber spectra on estimates of turbulent dissipation using the finescale parameterization: Eikonal calculations. *J. Phys. Oceanogr.*, **51**, 1723-1733.
- Takahashi, T., S. G. Sutherland, C. Sweeney, A. P. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. R. Bates, R. Wanninkhof, R. A. Feely, C. L. Sabine, J. Olafsson, and Y. Nojiri (2002): Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂ and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Res. Part II*, **49**, 1601-1622.
- Takahashi, T. et al. (2009): Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂ and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Res. Part II*, **56**, 554-577.
- Taketani, F., M. N. Aita, K. Yamaji, T. Sekiya, K. Ikeda, K. Sasaoka, T. Hashioka, M. C. Honda, K. Matsumoto, and Y. Kanaya (2018): Seasonal response of North Western Pacific marine ecosystems to deposition of atmospheric inorganic nitrogen compounds from East Asia. *Sci. Rep.*, **8**, 9324.
- Tamura, H., T. Waseda, and Y. Miyazawa (2009): Freakish sea state and

- swell-windsea coupling: Numerical study of the Suwa-Marui incident. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L01607.
- Tomita, H., T. Hihara, S. Kako, M. Kubota, and K. Kutsuwada (2019): An introduction to J-OFURO3, a third-generation Japanese ocean flux data set using remote-sensing observations. *J. Oceanogr.*, **75**, 171-194.
- Tovar-Sánchez, A., A. Rodríguez-Romero, A. Engel, B. Zäncker, F. Fu, E. Marañón, M. Pérez-Lorenzo, M. Bressac, T. Wagener, S. Triquet, G. Siour, K. Desboeufs, and C. Guieu (2020): Characterizing the surface microlayer in the Mediterranean Sea: Trace metal concentrations and microbial plankton abundance. *Biogeosciences*, **17**, 2349-2364.
- Tsujino, H., S. Nishikawa, K. Sakamoto, N. Usui, H. Nakano, and G. Yamana (2013): Effects of large-scale wind on the Kuroshio path south of Japan in a 60-year historical OGCM simulation. *Clim. Dyn.*, **41**, 2287-2318.
- Tsujino, H. *et al.* (2018): JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Modell.*, **130**, 79-139.
- Uematsu, M., R. A. Duce, J. M. Prospero, L. Chen, J. T. Merrill, and R. L. McDonald (1983): Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean. *J. Geophys. Res. Oce.*, **88**, 5343-5352.
- Uematsu, M., Z. Wand, and I. Uno (2003): Atmospheric input of mineral dust to the western North Pacific region based on direct measurement and regional chemical transport model. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1342.
- Ulaby, F. T., and D. G. Long (2014): *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. University of Michigan Press, Michigan, USA, 984 pp.
- Uno, I., G. R. Carmichael, D. G. Streets, Y. Tang, J. J. Yienger, S. Satake, Z. Wang, J. H. Woo, S. Guttikunda, M. Uematsu, K. Matsumoto, H. Tanimoto, K. Yoshioka, and T. Iida (2003): Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **108**, 8668.
- Uno, I., Z. Wang, S. Itahashi, K. Yumimoto, Y. Yamamura, A. Yoshino, A. Takami, M. Hayasaki, and B. G. Kim (2020): Paradigm shift in aerosol chemical composition over regions downwind of China. *Sci. Rep.*, **10**, 6450.
- van Pinxteren, M., C. Müller, Y. Iinuma, C. Stolle, and H. Herrmann (2012): Chemical characterization of dissolved organic compounds from coastal sea surface microlayers (Baltic Sea, Germany). *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 10455-10462.
- Wada, S., Y. Omori, S. Yamashita, Y. Hayashi, T. Hama, and Y. Adachi (2020): Aggregation of marine organic matter by bubbling. *J. Oceanogr.*, **76**, 317-326.
- Walls, P. L. L., and J. C. Bird (2017): Enriching particles on a bubble through drainage: Measuring and modeling the concentration of microbial particles in a bubble film at rupture. *Elem. Sci. Anth.*, **5**, 34.
- Wang, R., Y. Balkanski, O. Boucher, P. Ciais, J. Peñuelas, and S. Tao (2015): Significant contribution of combustion-related emissions to the atmospheric phosphorus budget. *Nat. Geosci.*, **8**, 48-54.
- Wanninkhof, R. (1992): Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *J. Geophys. Res. Oce.*, **97**, 7373-7382.
- Wanninkhof, R., W. E. Asher, D. T. Ho, C. S. Sweeney, and W. R. McGillis (2009): Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **1**, 213-244.
- Watson, A. J., R. C. Upstill-Goddard, and P. S. Liss (1991): Air-sea gas exchange in rough and stormy seas measured by a dual tracer technique. *Nature*, **349**, 145-147.
- Williamson, C. J. *et al.* (2019): A large source of cloud condensation nuclei from new particle formation in the tropics. *Nature*, **574**, 399-403.
- Wong, S. K., M. Ijichi, R. Kaneko, K. Kogure, and K. Hamasaki (2018): Ammonia oxidizers in the sea-surface microlayer of a coastal marine inlet. *PLoS ONE*, **13**, e0202636.
- Woodhouse, M. T., K. S. Carslaw, G. W. Mann, S. M. Vallina, M. Vogt, P. R. Halloran, and O. Boucher (2010): Low sensitivity of cloud condensation nuclei to changes in the sea-air flux of dimethyl-sulphide. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 7545-7559.
- Wurl, O., C. Stolle, C. V. Thuoc, P. T. Thu, and X. Mari (2016): Biofilm-like properties of the sea surface and predicted effects on air-sea CO₂ exchange. *Progr. Oceanogr.*, **144**, 15-24.
- Wurl, O., W. Ekau, W. M. Landing, and C. J. Zappa (2017): Sea surface microlayer in a changing ocean - A perspective. *Elem. Sci. Anth.*, **5**, 31.
- Yasunaka, S., E. Siswanto, A. Olsen, M. Hoppema, E. Watanabe, A. Fransson, M. Chierici, A. Murata, S. K. Lauvset, R. Wanninkhof, T. Takahashi, N. Kosugi, A. M. Omar, S. van Heuven, and J. T. Mathis (2018): Arctic ocean CO₂ uptake: An improved multiyear estimate of the air-sea CO₂ flux incorporating chlorophyll *a* concentrations. *Biogeosciences*, **15**, 1643-1661.
- Yoshizue, M., Y. Iwamoto, K. Adachi, S. Kato, S. Sun, K. Miura, and M. Uematsu (2019): Individual particle analysis of marine aerosols collected during the north-south transect cruise in the Pacific Ocean and its marginal seas. *J. Oceanogr.*, **75**, 513-524.
- Zabalegui, N., M. Manzi, A. Depoorter, N. Hayeck, M. Roveretto, C. Li, M. van Pinxteren, H. Herrmann, C. George, and M. E. Monge (2020): Seawater analysis by ambient mass-spectrometry-based seaomics. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 6243-6257.
- Zäncker, B., M. Cunliffe, and A. Engel (2018): Bacterial community composition in the sea surface microlayer off the Peruvian coast. *Front. Microbiol.*, **9**, 2699.

Decadal vision in oceanography 2021: Air–sea boundary

Yoko Iwamoto^{1*}, Hidenori Aiki², Osamu Isoguchi³, Yumiko Obayashi⁴,
Fumiyo Kondo⁵, Yoshiko Kondo⁶, and Jun Nishioka⁷

Abstract

The ocean significantly influences the Earth's climate by exchanging heat, gas, and particles with the atmosphere. The radiation budget of the Earth's atmosphere is affected by physical, chemical, and biological processes in the atmospheric boundary layer over the ocean via cloud formation and CO₂ absorption at the sea surface. This in turn influences the ocean through changes in temperature, precipitation, and solar radiation. The air–sea boundary has a direct interaction with human life through the observation and prediction of extreme occurrences, such as typhoons and rogue surface waves, in addition to climate issues. Herein, this paper focuses on “the air–sea boundary,” not limiting as “the air–sea interface.” The air–sea boundary encompasses a large vertical region, extending from the euphotic layer, where primary production occurs, to the troposphere. This paper also focuses on satellite observations relating to air–sea boundary phenomena. Does the deposition of aerosols containing nitrogen, phosphorus, and iron contribute to primary production in terms of nutrient deposition from the atmosphere? What role does the sea surface microlayer play as an air–sea interface, and what factors influence its physical properties? What information is required to calculate the amount of greenhouse gas and marine biogenic gas exchange? What types of marine aerosols influence cloud formation and the radiation budget? What approaches are required to comprehend the spatiotemporal distributions that affect the amount of matter and energy exchanged during wave processes? To answer these questions and help humans live in harmony with the natural environment, this paper presents a 10-year vision for necessary research and collaboration between the Oceanographic Society of Japan and neighboring societies.

Key words: nutrient deposition, sea surface microlayer, gas exchange, aerosol production, surface waves

(Corresponding author's e-mail address: y-iwamoto@hiroshima-u.ac.jp)

(Received 15 July 2021; accepted 7 September 2021)

(doi: 10.5928/kaiyou.30.5_199)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2021)

1 Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University, 1-7-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8521, Japan

2 Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

3 Remote Sensing Technology Center of Japan, JAXA Tsukuba Space Center, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

4 Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan

5 Japan Coast Guard Academy, 5-1 Wakaba-cho, Kure, Hiroshima 737-8512, Japan

6 Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki, Nagasaki 852-8521, Japan

7 Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 19N8W, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0819, Japan

* Corresponding author: Yoko Iwamoto
e-mail: y-iwamoto@hiroshima-u.ac.jp