

— 総 説 —

海洋学の10年展望2021：沿岸域*

木田 新一郎^{1**}・栗原 晴子²・大林 由美子³・
川合 美千代⁴・近藤 能子⁵・西岡 純⁶

要 旨

沿岸域において、今後10年程度の期間で取り組むべき研究の方向性と意義、そしてその遂行に必要な研究基盤について論じた。沿岸域は外洋域と陸域を結びつける、フィルターかつリアクターとしての役割をもつ海域であると同時に、人間社会に身近であり、多様で生産性豊かな海域である。沿岸域の物質循環を理解し、将来にわたってその豊かな生態系を維持していくためには、物理・化学・生物が分野横断的に連結し、組織立ったプロセス研究を進める必要がある。変化の時空間規模が小さい沿岸域の現象を把握するには、観測データが依然として不足している。しかし、これまでの長期モニタリングデータに加えて新たな観測機器の開発、衛星観測の高解像度化、ドローンの登場によって状況は大きく前進しつつある。この現状をふまえて、今後必要と考える研究基盤と数値モデルの展望を議論した。

キーワード：将来構想，陸海結合システム，複合影響，大量データ，沿岸モデル

1. はじめに

この将来構想で議論する沿岸域は、河口域・潮間帯から大陸斜面までの領域とする (Fig. 1)。これがおそらく物理・化学・生物のどの分野でも共通な沿岸域の概念だろう。沿岸域の地形と流れを特徴づける3大要素は、「潮汐・海岸線・浅い水深」であり、その結果、外洋循環に比べて流れの擾乱が大きく、変化が起こる時空間スケールが小さい。また沿岸域は、海面からの日光と海底からの巻き上げの効果が水柱全体に届くことで海洋の生物多様性・生産性の中心を担う海域となっている。

海洋の他の領域と比べて、沿岸域を沿岸域たらしめるのは陸の存在である。上記の沿岸域の3大要素が生み出されるのも陸が存在する故であり、この「壁」のような

* 2021年7月15日受領；2021年9月6日受理
著作権：日本海洋学会，2021年

1 九州大学 応用力学研究所
〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1

2 琉球大学 理学部
〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1

3 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

4 東京海洋大学 学術研究院
〒108-8477 東京都港区港南4-5-7

5 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

6 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：木田 新一郎
e-mail: kida@riam.kyushu-u.ac.jp

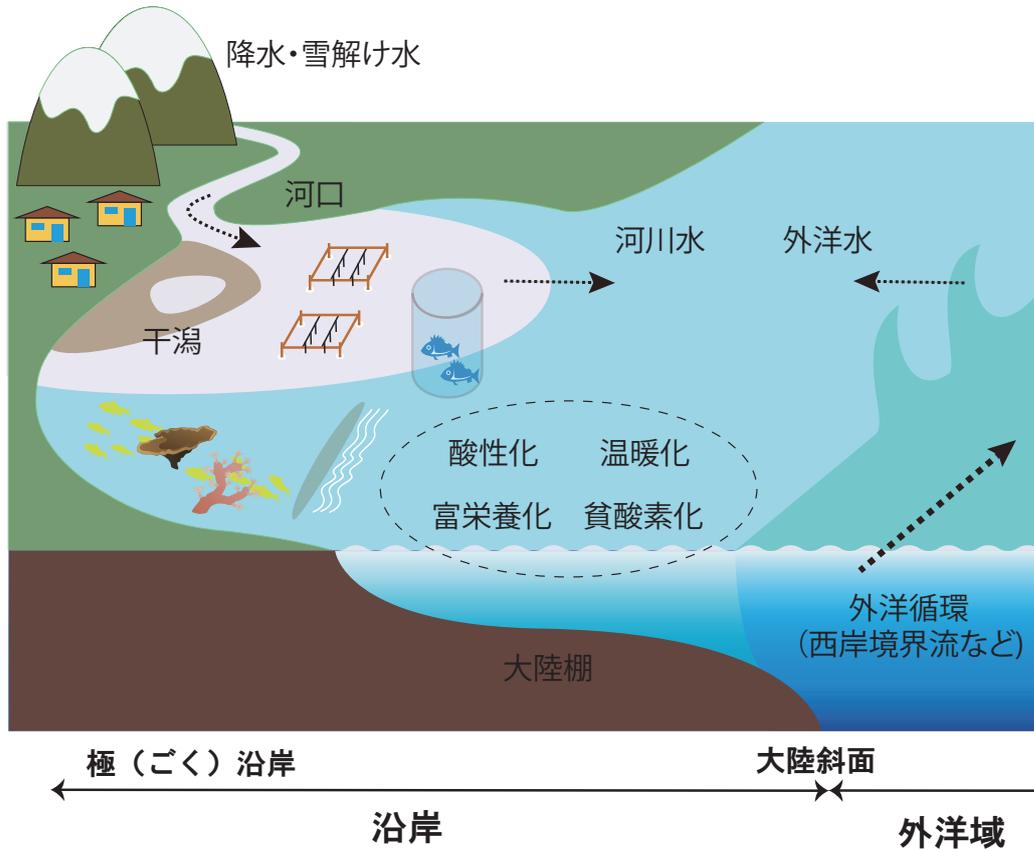


Fig. 1. Schematic of coastal ocean processes.

存在は同じ地球流体である大気を持たない海特有のものである。陸と海の間この壁では波が往来し、干潟・汽水湖のように時刻によって海域とも陸域ともいえるような空間が広がっている。また、壁とはいっても河川を通じて陸域から海域へ物質が流入し、生物の遡上などを通じて海域から陸域へも物質が流出する。沿岸域が外洋域とは異なった特徴を持つ海域として成立するには、海の中に隠れているもう一つの壁である大陸斜面の存在が欠かせない。水深が大きく変化する大陸斜面は物理的に流れを遮る役割を持ち、大陸棚上に外洋の影響から守られた生育環境・空間を作り出している。

擾乱が大きいにもかかわらず守られている生育環境というのは何とも不思議な組み合わせである。そしてこの疑問こそ、沿岸域の重要な研究テーマだろう。沿岸域の観測数は多いものの、1回1回の観測結果の時空間代表

性が把握しづらく、ある沿岸域の定量的理解が進んだとしても、その結果をもとに別の沿岸域の現象を語る事が難しいため、場としての理解は外洋の方が先に進んできた。その結果、沿岸域で起こる変化は、物理学を中心に空間スケールの大きい外洋の変化がより空間スケールの小さい沿岸域へ波及するようなダウンスケーリングの視点、または海域ごとに独立した現象としての視点から研究が進んできた。しかし外洋域の理解が深まるにつれ、近年は沿岸から外洋へという視点も加わり、外洋と陸域を繋ぐフィルターかつリアクター領域としての沿岸域の役割が注目され始めている(2.1節参照)。その結果、日本地球惑星科学連合(JpGU)大会ではこの数年、陸海結合・相互作用といった、陸と海の間での水・物質の動態をキーワードとするセッションが様々な分野から立ちあがるようになった。大気の影響を強く受ける陸域の水・

土砂・物質動態が気候の変化・変動によって変わり、その影響が極域や日本近海で海に波及していることも理由の一つだろう (Carmack *et al.*, 2015; 川合ら, 2021, 本特集)。

沿岸域は、グローバルには河口域・潮間帯から大陸斜面の領域として捉えるのが妥当だが、本稿では日本近海に限っては海岸線から距離的に近い海域も沿岸域として扱う。なぜなら日本の太平洋側には海岸線のすぐ近くに急な大陸斜面が存在し、外洋の現象と呼ぶには身近な存在である黒潮・親潮があるからである。日本の沿岸域を特徴づけるのは、この黒潮・親潮のような西岸境界流の存在であることに異論はないであろう。そしてこの数年間、黒潮大蛇行の発生とその大気への影響 (Nakamura *et al.*, 2012; Sugimoto *et al.*, 2021) や「黒潮・親潮ウォッチ」 (<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/>) が SNS・マスコミの中で注目されたことも、黒潮という存在が日本の社会に身近であることの現れである。

日本の沿岸域を構成するのは、黒潮・親潮が流れる琉球列島から北海道道東までの太平洋側沿岸域、日本海・オホーツク海・東シナ海に接する縁辺海内の沿岸域、瀬戸内海のような大陸棚上の沿岸域、そして東京湾・有明海といった内湾である。アメリカ西海岸のような沿岸湧昇域やアマゾン川のような大陸規模河川の河口域はない。しかし、南北に長く、異なる気候帯をまたぎ、海面上昇・水温上昇・海洋酸性化・貧酸素化のような地球規模で進行中の現象の中で、富栄養化・貧酸素水塊の発生といった局所的な現象が複合的に起きる環境下にある。身近な位置に存在する沿岸域で起こる環境の変化は、科学的な興味を喚起するだけでなく社会的な影響も大きい。気候変化・変動を目の前にして日本各地の湾・海域が直面する環境変化の課題は、流況・物質循環・生態系のどれもが密接に絡み合っている複合的な現象であり、予測・解決するために分野間の研究を横断的に進めていく重要性がますます高まっている。

以上の背景から、本稿では2節で陸と外洋の間のフィルターかつリアクター領域としての役割を持つ沿岸域、そして社会に身近な存在としての役割を持つ沿岸域、という2つの側面を取り上げ、日本の沿岸域を中心に研究の現状と方向性について、今後10年間の研究テーマを論じる。3・4節ではこれらの研究を推進する上で必要

なものは実現したい観測手法・モデル開発について提案する。5節はまとめである。

2. 沿岸域の役割と重要研究課題

2.1. 陸と外洋の間のフィルターかつリアクターとしての役割

2.1.1. 陸海結合システムとしての理解

沿岸域における一次生産は水産資源に直結する。また、沿岸域が生み出す大型藻類も沿岸で固定される炭素 (ブルーカーボン; Fourqurean *et al.*, 2012) 量を左右する重要な要因として人間活動に直結している。沿岸域の物質循環研究は、これまで外洋域の研究とは別に進められ、ある湾、ある河口、ある干潟など、ローカルな場の中で起こる現象の時間的な変化を捉えるための研究が多くなされてきた。そして沿岸から外洋までの空間を跨ぐような観測や研究は少なかった。しかし、沿岸域の生物生産量を規定する栄養塩 (硝酸塩, リン酸塩, ケイ酸) や鉄・ビタミンなどの栄養物質は、陸域から供給されているだけではなく、海側からも様々な時間・空間スケールで供給されており、陸と沖合・外洋を跨いだスケールでの水循環・物質循環システムが存在する。本稿ではこれを「陸海結合システム」と呼ぶ。数値モデル・理論・衛星観測の発展により、沿岸域で陸から外洋へと空間を跨ぐスケールでの水塊の繋がりの理解が物理を中心に進みつつあるが、物質循環の理解には依然として課題が多く残されている。沿岸のもつ生物化学的フィルターかつリアクター機能は陸海結合システムの中で具体的にどのような役割を担っているのだろうか。例えばアムール川・カムチャッカ半島の河川水は陸域から北西太平洋への栄養物質供給・輸送、そして生物生産に重要な役割を担っていることがこの10年ほどで明らかになってきた (Shiraiwa, 2012)。しかしその輸送・変質プロセスについては未だ不明なままである。

日本列島周辺に存在する陸海結合システムとして、例えば、河川を通じた雪解け水と北海道沖の親潮 (Nakada *et al.*, 2012)、地下水を通じた雪解け水と富山湾の対馬海流 (Zhang and Satake, 2003)、河川を通じた降雨と日本南岸の黒潮や瀬戸内海の流れ場 (Tanaka *et al.*, 2011; Ya-

mamoto, 2003)などが考えられる。これらの領域に関するこれまでの多くの研究では、陸域・沿岸・沖合(黒潮・親潮域)と複数のスケール別に研究が進められており、またそれらは特定の対象エリア毎に独立して実施されてきた。このスケール別・エリア別の成果を持ち寄る議論では、各対象スケールやエリアの特異性を理解することはできたが、より広範囲で起こる陸海結合システムの全体像を統合的に理解するには至らなかった。今後、海洋における沿岸域の役割としての陸海結合システムを理解するためには、陸と海を跨ぐより大きな空間スケールで日本周辺の沿岸海洋システムを捉えて理解する必要がある。そのためには日本周辺の海洋システムにおいて鍵となる陸域-海岸線に近い極(ごく)沿岸、極沿岸-沿岸、沿岸-沖合(黒潮・親潮域)、沖合-縁辺海などの各スケール間の作用を連携させ、物理過程を含めた水循環と物質循環研究をマルチスケールで進めることで、統合されたシステムを定量的に理解することが欠かせない。

これまで陸域、極沿岸、沿岸、沖合とスケール別に焦点を当てた研究が有効だったのはこれらの領域を区別する水深が、流れ場を規定しているためである。沿岸域の流れは潮流成分が大きい、地形勾配の大きい大陸斜面に近づくほど、また外力や擾乱が弱いほど、等深線に沿うような流れ(地衡流)となる。そのため、海岸線から大陸斜面まで徐々に水深が深くなっている大陸棚上では等深線を跨ぐような、つまり領域を跨ぐような海水交換が起きにくい。しかし、物質循環を考えたとき、沿岸域で消費・生産される物質の供給・輸送を担うのはこの領域を跨ぐ流れである。これまで西岸境界流の水塊が大陸棚上へ進入する経路として、風や海底摩擦と流れの不安定性が作る擾乱や渦の役割が注目されてきた(Isobe and Beardsley, 2006)。そして近年は黒潮の流路が房総半島に近づくことで生じる海面変動が日本南岸や対馬海流の流れを変化させる、といった波の伝搬を通じた遠隔作用の役割も注目されつつある(Kida *et al.*, 2021; Usui *et al.*, 2021)。これらの結果は、日本周辺の海峡・沿岸域で長年運営されてきた海洋短波レーダーによる海面流速、フェリーに搭載した流速計、潮位観測といったモニタリングデータが20年以上蓄積されてきたことによる成果である。遠隔作用で鍵を握る存在が、海峡に加えて所々大陸斜面に切れ目のように存在する急斜面であり、例えば

房総半島・紀伊半島や富山トラフ(Igeta *et al.*, 2017)がこれに相当する。大陸斜面上に切れ目のように存在する急斜面は擾乱や海底摩擦が効果的に等深線を跨ぐ流れを作り出す箇所のため、沿岸域と外洋の間で海水交換が起こる「換気口」としての役割を持っている。そして換気口と換気口の間は力学的に繋がっている沿岸区域として捉えることができる。つまり急斜面は日本の沿岸の複数の湾を含むような領域内もしくは領域間でのエネルギーや物質循環のコンネクティビティを考える際の要所であり、このようなポイントを領域スケールで結合させていく作業が沿岸域の一体的な解釈に繋がるだろう。また沿岸域由来の渦や擾乱が沖合へ波及することによる沖合の流れの誘発、全球スケールあるいは西岸境界流が引き起こす海面上昇シグナルの日本の沿岸域への伝搬など、沿岸域と沖合の結合過程に関しても、急斜面で起こる変化を捉えることが重要である。

陸海結合システムにおける物質循環の定量的理解のためには、極沿岸から沖合までマルチなスケールを跨いで連続的に物理過程(水塊移送、混合など)を把握しながら、化学・生物プロセスによる物質の変化・変質を定量的に把握することが重要となる。例として、一次生産者への栄養物質の供給を考える。沿岸水の栄養物質の量と濃度比からなる化学的特性は、一次生産の量だけでなく、生産者の種類も左右し、生態系を変化させ得る重要な要素である。沿岸域の海水は、陸域河川水と沖合の海水の両方の化学的特性の影響を強く受けることになる。陸域河川水は、降水と地下水を起源とし、陸面の表層地質・土壌に応じた化学的特性を持った陸水として河川を通じて輸送され、海水と出会う河口域で塩析などによって物質が除去される物理化学的フィルターにかけられる(Boyle *et al.*, 1974; Dai and Martin, 1995)。また陸水ならびに沿岸に流入する沖合の海水は、陸棚や湾内および干潟や藻場の生物や堆積物、あるいは養殖施設等と作用し、酸化還元反応や生物活動によって物質濃度や質が変化する化学的・生物的リアクターにかけられる(Hutchins *et al.*, 2009; Voss *et al.*, 2013; 多田ら, 2018)。この大きな変化を受けた陸水および沖合海水の両者がさらに混じり合うことで、最終的に沿岸域の海水がもつ化学的特性が決まることになる。また、沿岸に沿って分布する沿岸水が沖合に運ばれると、沖合の水と混合し変質しながら沖

合の生物生産量や生物種組成に影響を与える (Kuroda *et al.*, 2019)。しかし、このような陸海結合システムに内在する一連の化学的特性の変質過程は十分に把握されているとは言えず、その理解には混合など物理過程を連続的に把握しながら水塊を追跡したうえで、化学的特性変質プロセスや生物応答を観察することが重要である。

2.1.2. 陸海結合システムに内在する重要な物質動態プロセス

ここまでは沿岸域を「陸海結合システム」として捉えていくことの重要性について述べたが、次にこのシステムに内在する物質動態について述べる。陸海結合システムの理解には、システム内に存在する水塊の移流・混合の速度と化学・生物プロセスの反応速度の兼ね合いが重要な要素となる (Frischknecht *et al.*, 2018)。例えば、陸起源有機物が沖側のどこまで到達するかには、有機物分解・変質の速度と水塊の移動速度の兼ね合いが関係する。すなわち、物質を変化させるプロセスの把握のみでなくその反応速度 (活性) やフラックスの見積もりが必要である。さらに、擾乱の大きい沿岸域では、プロセスの反応場そのものが時空間的に変化・変動することを考えなければならない。反応場が変化すれば、物質を変化させる化学的・生物学的プロセスの反応速度も変化する。

沿岸域に流れ込む河川水は、大陸規模河川の場合、海岸線から数百 km 沖合まで広がる。河口域で時間変化する海面塩分の空間分布は近年、SMAP (Meissner *et al.*, 2018) などの衛星観測によって把握できるようになったことで、急速に研究が進んでいる。一方で、中小規模河川が多い日本のような沿岸域における河川水の観測は、塩分場としては依然難しいが、海色衛星からは台風の通過直後に土砂を含む河川水が外洋域まで届いている様子 (<https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2019/tp191028.html>) や、水質センサーや人工衛星で観測可能な陸起源有色溶存有機物 CDOM などをトレーサーにして河川水の水塊パッチを追いかけて船舶観測する方法などの試みがさらに進み (Sasaki *et al.*, 2008; Nakada *et al.*, 2018; Hooker *et al.*, 2020), ドローン観測などとも合わせ、ようやくその瞬間的な空間像が見え始めている。これは前回の将来構想 (岡ら, 2013; 神田ら, 2013; 浜崎ら, 2013) に降に沿沿岸域研究で起きた大きな前進だろう。

河川水に行く末を把握することが難しい理由の一つが、

河口域から離れるほど塩分変化が河川水起源なのか海洋中の空間変動なのか、区別が難しくなることにある。そのため河川水で濃度が高く、海中には微量しか存在しない物質を水塊のトレーサーとして利用できることよ。例えば最近、海水中の溶存有機物の化学形の網羅的解析とデータベース化が進められ、農薬、クリーニング剤、人工樹脂添加剤などの難分解性人為起源有機分子の分布パターンが陸起源水の新たなトレーサーとなり得る可能性が示されている (Petras *et al.*, 2021)。また、一つのトレーサーだけでなく複数利用し、データ同化による最適解を見つける形も考えられる。流れ場として擾乱が大きい沿岸域では観測と解析のアプローチとして、擾乱そのものを時々刻々と追跡する気象学のようなアプローチの方が適しているのかもしれない。ただ、その実現には大気のように莫大な観測データを収集する必要がある。

物質を変化させるプロセスの中で、物理場の変化に応じた反応速度の変化が即座に物質量に反映されるプロセスについては、水塊の物理化学パラメータと物質量を精緻に観測することで、物理場に対応した物質動態の定量的理解につなげられる。また、場の変化への応答が明確な物質、あるいは明確でなくても水塊の移動速度に比べてはるかに長い反応時間スケールをもつ物質は、水塊のトレーサーとして扱うことが可能である。複数の物質・パラメータを組み合わせて解析することで、トレーサーのような役割が見出される場合もある。少ないサンプル量で海水中の溶存有機物の質と量を評価できる蛍光分析を活用した腐植様蛍光性溶存有機物 (FDOM_H; humic-like Fluorescent Dissolved Organic Matter) と見かけの酸素消費量 (AOU) の組み合わせによる水塊の起源・移動・混合の解析はその好適例と言えるだろう (Tanaka *et al.*, 2014; Yamashita *et al.*, 2021)。

一方で、物質を変化させるプロセスの中でも特に生物活動によるものは、場の変化によるプロセスの反応速度 (活性) の変化を、物質量の変化から見積もることが難しい。例えば、溶存酸素濃度が変化すると生物の代謝機能やその活性が変化すると考えられるが、影響する濃度や変化の現れ方、変化の現れる時間スケールは生物種によって異なり多様である。生態系では、多種多様な生物による時間スケールの異なる複数のプロセスが並行し、かつ相互作用もあるため、物質動態は複雑である。した

がって、場の変化に対する生態系の応答や物質動態における生物機能の理解のためには、水塊の物理化学生物パラメータの観測のみでなく、実験的手法を用いたプロセス解析も必要となる。実験系での解析と観測研究のいずれにおいても、近年の分子生物学的手法の発展と普及は、生物群集の応答に関する解析の幅とその時間・空間分解度の向上に大きく貢献している (Teeling *et al.*, 2016; Cui *et al.*, 2020)。遺伝子を用いた系統解析や生物群集構造解析 (メタバーコーディング法; 平井ら, 2021, 本特集) に加えて、特定の機能遺伝子の定量解析や RNA を用いた転写発現解析が普及してきたことで、分子生物学的手法から生物群集の機能レベルの解析も行われるようになってきた (Alonso-Sáez *et al.*, 2020)。特に、環境中での物質変化の主たる担い手である微生物群集の代謝機能に関する解析が発展してきている。完全な定量化にはまだ課題があるものの、炭素固定や窒素固定、脱窒、有機物分解などの関連遺伝子の発現量を群集レベルで解析することで、異なる物理場を含む広い空間スケールでの微生物の多様な代謝能や、場の変化に対する代謝機能の応答 (プロセスや活性の変化) が、ある程度定量的に示されるようになってきた (Fortunato and Crump, 2015; Salazar *et al.*, 2019)。場の変化に対する生態系応答解析の定量化とその時間・空間分解能の向上は生物地球化学的プロセスの理解において重要な要素である。今後、沿岸域における水循環・物質循環を理解するうえでも、場の変化と生物活動の変化を関連付ける解析がますます拡大することが期待される。もっとも、生物活動に関する活性分析や発現解析は手間がかかることが多く、物理化学パラメータの解像度に匹敵させる観測は容易ではない。光合成速度のプロキシとしてクロロフィル蛍光や海色が広く用いられるように、今後、物質動態に関わる他の生物プロセスについても、現場での反応速度のプロキシとなり、かつ簡単に測定できる (できればセンサーで連続観測できる) パラメータや観測手法を見出せば、擾乱の大きな沿岸域を含む陸海結合システムの統合的理解のためのブレイクスルーとなるだろう。このようなパラメータや手法の探索・検討は、前回の将来構想 (神田ら, 2013) から続く重要な研究課題である。

この10年、震災後の東北マリンサイエンス (<http://www.jamstec.go.jp/i-teams>) や放射性物質の動態の研究

(平井ら, 2021, 本特集) などに見られる通り、沿岸研究における物理・化学・生物の組織的・学際的な研究展開は進んだ。震災関連の沿岸研究は沿岸域内外で起こる物質循環の評価だけでなく、本節で挙げられている課題解決のための糸口にもなっている。今後は、陸域や外洋域の研究者との連携をより進展させたプロセス研究を進めることが、外洋の西岸境界流に直接面している日本の沿岸システムの理解に欠かせず、沿岸境界流の観測網に向けた国際的な枠組みも構築されつつある (Todd *et al.*, 2019)。また、陸海結合システムから得られる科学的知見を、科学者だけのものにとどめず、漁業者を含めたエンドユーザーの利益につながる形で発信することが (3.1節参照)、UN Decade で目指す「持続可能な沿岸の海」(SDG14) を実現させるために重要な鍵となるであろう。

2.2. 社会に身近な海域としての役割

2.2.1. 沿岸環境の持続性と複合的課題

沿岸海域環境は、陸域と外洋域を繋ぐ境界領域であり、陸域から供給される様々な物質の影響を受けると同時に、外洋域さらには大気との相互作用による影響も受けるため、常に時空間的に大きく変動する複雑系である。この複雑な環境がゆえに、沿岸域は生物多様性と生産性が最も豊かな海域であり、人は沿岸域がもたらす水産資源や防災、観光の場としての生態系サービスを楽しんできた。しかしそれと同時に、我々人間社会は沿岸海域の物理的・化学的環境を長期にわたって大きく改変し、その生態系を破壊してきた。陸域開発に伴う土砂の流入、護岸工事、埋め立てに伴う物理的環境の改変、過剰な栄養塩や有機物の負荷や様々な重金属の流入に伴う化学環境の改変、さらには過剰な漁獲や物理的・化学的環境の変化に伴う生物・生態系の急速な攪乱が引き起こされた。そこにさらに地球規模での気候変動による環境変動が複合的に加わることによって、現在沿岸域は世界各地でその持続性が最も危ぶまれている (Harley *et al.*, 2006; Halpern *et al.*, 2008)。このような中で今後、沿岸生態系をどのように維持管理していき、人間社会がこれまで得てきた多くの生態系サービスをこの先どのように持続させるのが、今我々に突きつけられている最大の課題である (Halpern *et al.*, 2012)。

1960-80年代の高度経済成長期に伴って日本の沿岸域

では、様々な環境汚染問題が生じた。これらの問題をきっかけに、水質汚濁防止法や環境基本法により水質基準の設定や排出規制、水質環境のモニタリングが行われるようになった。その結果、近年は東京湾 (Kubo *et al.*, 2019) や瀬戸内海 (Nishikawa *et al.*, 2010) での栄養塩環境、さらには沖縄などのサンゴ礁海域での赤土流出量の低下 (Omori, 2010) などの環境改善が進みつつある。

しかしながら今もなお、日本沿岸の各地域で赤潮や貧酸素水塊は頻発しており、水産資源量の減少に加え、サンゴ礁生態系や海草藻場生態系なども減少し続けている (Grech *et al.*, 2012; 水産庁, 2021)。それには様々な原因が考えられるが、例えば多くの都市部湾岸域や水産養殖が盛んな湾の海底に蓄積された有機物など、過去の環境履歴が原因の一つとして指摘されている (Kodama and Horiguchi, 2011)。沿岸開発による干潟や藻場の消失によって、陸域から流入する栄養塩の吸収や有機物を分解する能力が失われ、その多くが海底へと沈降し堆積を続けてきた。また護岸工事や防波堤の建設により、沿岸の環境は画一化され、生物・生態系の多様性が失われてきた。その中でさらに温暖化や酸性化、貧酸素化などの地球規模での環境問題が急速に進行しているが (Gruber, 2011; Breitburg *et al.*, 2018), 2.1 節で議論したような複数の湾を含むような領域規模で沿岸域が受けるこれら環境ストレスの共通性・違いの解明は実現していない。地球規模での環境変動が海洋生態系に与える影響の予測評価の重要性が指摘されて以来、外洋域ではこの20-30年で全球的な観測フレームワークの構築やデータの蓄積 (例えば Argo, GO-SHIP, GEOTRACES, GOA-ON, World Ocean Database など) が盛んに実施されてきた。一方、沿岸域では、各地域の研究者による個別の観測や各県の水産研究機関による定点観測は多く行われているものの、日本国内沿岸全域をカバーした戦略的な環境モニタリング観測はあまり実施されてこなかった。その要因として、沿岸域の環境は外洋域と比較して時空間的に劇的に変動する複雑系であり、観測やデータ同化など沿岸特有の難しさがある。例えば沿岸域での炭酸化学環境は、その場の海水の流動場や潮汐、淡水の流入量による塩分やアルカリ度 ($TA \approx [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}]$) の変化、さらには水温や栄養塩、光量などの変化に伴う生物の生産・分解等の代謝活動量や速度の影響を大きく受けるため、外洋

域と比較して劇的な日変動や季節変動を示す (Hofmann *et al.*, 2011; Yamamoto-Kawai *et al.*, 2021)。しかもその変動の仕方は各湾や、地形、その場の生物量や生物組成、緯度帯や黒潮・親潮などの海流の影響の受け方などによって大きく異なるため、国内沿岸での実態を把握するためには、各海域で複数の環境要因を同時にかつ極めて高い時空間的解像度で観測する必要がある。近年、沿岸環境の重要性への認識は徐々に高まりつつあり、Future Earth Coast (<https://www.futureearthcoasts.org>) など国際的な枠組み、そして国内では Future Earth Coast Japan 等の活動が始まっている。沿岸域から沖合への物質フラックスの定量的な評価を含め (2.1 節参照)、気候変動下における沿岸環境の複合的な理解にむけて多分野の研究者がさらに連携していくことが期待される。

環境の変化は個々の事象が独立して起きるのではなく、互いに作用しあいながら起きている。例えば沿岸域では温暖化は躍層を強化するほか、海底で起こる有機物分解を促進させることによって貧酸素水塊をより発生させやすくなると考えられる。そのような状況は特に海水輸送による熱や物質の交換が少なく、成層が発達しやすい閉鎖性の高い湾域の底層付近で生じやすい (Rabalais *et al.*, 2010)。貧酸素水塊が形成されるときには酸素消費と同時に海水中の二酸化炭素分圧 (pCO_2) が高くなるため、これがさらなる酸性化にもつながる。貧酸素環境下では堆積物から主要栄養塩であるリンだけでなく、微量金属元素も溶出しやすくなる。特に、鉄やマンガン、コバルトなど一部の金属元素は好氣的条件下では凝集、粒子による吸着除去 (スキャベンジング) の影響を受けやすいが、貧酸素環境においては還元され溶解しやすくなる性質を持つため、溶存態濃度の上昇を引き起こしうる (Noble *et al.*, 2012)。一方で、これらの金属元素は底層直上でも酸素が供給されれば酸化され迅速に除去されるため (Warnken *et al.*, 2001)、貧酸素水塊の発達状況によりその分布は変化するだろう (Lohan and Bruland, 2008)。窒素栄養塩に関しては、硝化・脱窒・嫌気性アンモニア酸化 (アナモックス)・硝酸の異化的還元 (dissimilatory nitrate reduction to ammonium; DNRA) など様々なプロセスが関わっているおり、底層水の酸素濃度の低下の程度やその持続期間などによって、堆積物から海水への窒素栄養塩フラックスの量や形態がどう変わるかについ

ての定量的理解は不十分である (Song *et al.*, 2020)。さらに、これら環境の変動による影響を受けた生物の変化が、環境へとフィードバックする可能性も考えられる。例えば、底層での酸性化と貧酸素水塊の発生はそこに生息するベントス群集に影響し、底層の濾過食者を減少させるが、同時に溶出した鉄や栄養塩などを含んだ水塊が潮汐や台風によって混合し、有光層へと輸送されれば、植物プランクトンの増殖を促すかもしれない。さらに、河川水経由の人為起源物質、特に栄養塩の元となる物質の供給 (富栄養化) は、赤潮など有害藻類ブルーム (Harmful Algal Bloom) を形成する種を含めた植物プランクトンの生産量や種組成に影響し、その結果、沿岸域での酸性化・貧酸素水塊形成をより加速させる要因となりうる (Griffith *et al.*, 2020)。このような海洋環境変化に伴う主要栄養塩や微量金属元素の挙動の応答や沿岸域・陸棚域からの物質輸送過程を調べるためのプロセス研究は GEOTRACES (<https://www.geotraces.org>) など国内外の研究者による共同研究でも重要視されており、今後、日本周辺の多様な環境での研究は重要な知見を与えると期待される。

沿岸域はまた、温暖化に伴う海面上昇の影響を特に大きく受けると考えられる。日本近海の海面高度は地球規模で起こる海面上昇に加え、黒潮・黒潮統流の振る舞いによって海面の上昇速度に南北差が生じる複雑な応答感度を持つ海域となっている (Sasaki *et al.*, 2014)。長期トレンドの実態解明には衛星による海面高度と各地の検潮所で続く潮位の観測を続けていく必要がある (寄高・花輪, 2020)。海面上昇は土砂輸送や底層で起こる混合の強さにも影響する。さらに例えばサンゴ礁域では、海面の上昇速度に対して、温暖化や酸性化によるサンゴへの負の影響によりサンゴ礁の上方向への成長速度が間に合わず、サンゴ礁が台風や高波などに呈して担っている防波堤効果を減少させるなど (Perry *et al.*, 2018)、沿岸防災としての生態系機能の低下が危ぶまれている。

沿岸生物は複数の環境変動による影響を同時に受けるため、今後は複数のストレスによる生物への複合影響の評価が欠かせない (Boyd *et al.*, 2018)。例えば、海洋酸性化による植物プランクトンによる鉄の取り込み速度への影響は正と負、双方の結果が報告されている (Shi *et al.*, 2010; 杉江, 2018)。この原因は、海水中で鉄と錯

体を形成している溶存有機物 (有機配位子) の種類によって酸性化の影響の程度と効果が異なるためと考えられている。同様に多くのベントス、幼生期の魚類、カイアシ類などの動物プランクトンも、酸性化、温暖化や貧酸素などの影響を相乗的に受ける可能性が指摘されている (Sampaio *et al.*, 2021)。さらにこれらの環境変化に対する応答は生物種によって異なる。例えば植物プランクトンの群集組成およびそれに伴う動物プランクトン、あるいは高次捕食者の群集が、食物連鎖を通して生物間相互作用にも影響を与えると考えられる。これら個々あるいは複数の環境要因が複合的に各生物種に与える影響について、その閾値やその分子生物学的機構や生理的機構との関係を解明するには、実験室レベルでの影響評価実験が極めて有効である。例えばイワガキでは水温、pH、溶存酸素など複数のストレスに晒された場合、遺伝子発現に対する影響の仕方が非線形に変化することが示された (Chapman *et al.*, 2011)。しかし、このように単独ストレス下と複合ストレス下とでは機能遺伝子発現がどのように変化するかを評価した研究はまだ数少ない。また酸性化環境下では植物プランクトンによる栄養素や微量金属元素の利用能が種ごとに变化する可能性があるが、微量金属元素の利用能については、培養系内での緻密な濃度制御を必要とするクリーン培養が技術的に難しいため、現時点ではデータが不足している (Flynn *et al.*, 2018)。また複数の要因や生物間相互作用の評価を室内研究で明らかにすることには技術的な限界もある。このため、実験系をスケールアップする試みとしてメソコズム実験や野外実験 (Kline *et al.*, 2012; Riebesell *et al.*, 2013)、また CO₂ 湧出や湧昇域など野外で観察される環境勾配を利用した研究などが実施されてきた (Hall-Spencer *et al.*, 2008; Marshall *et al.*, 2017)。これらの研究成果から、これまで評価が難しかった生物の群集あるいは生態系レベルでの環境への応答が少しずつ明らかにされてきている。しかし前回の将来構想 (浜崎ら, 2013) から引き続き、現在もなお、野外での環境や生物の観測結果と、環境と生物応答との因果関係や機構の理解の間には大きなギャップがある。今後このギャップを埋めるには、一つ一つの機構を解明するための地道な実験的なプロセス研究を行うとともに、これらの研究から得られた結果をモデルに反映し、さらに野外で得られた環境や生

物の詳細な観測データを利用し、スケールアップしたモデルを構築する必要がある。同時に、モデルから得られた結果を野外での操作実験や異なる海域間や環境での比較研究などにダウンスケーリングして仮説検証を行うことで、両方向から得られた結果を融合させる作業も重要である。

2.2.2. 沿岸環境の変化とその予測の重要性

複数の環境要因や生物が互いに関連し合いながら平衡状態を保っている沿岸システムにおいては、生態系は環境の変化に対して非線形的に変化すると考えられている。このため複数の環境要因が同時にかつ急速に変化すると、生物多様性の低下などに伴って生態系のもつ回復機能が加速度的に消失され、その閾値を超えると、生態系全体が全く異なる定常状態へと変化(レジームシフト)することが知られている(Folke *et al.*, 2004)。例えばサンゴ礁生態系では気候変動に伴うサンゴ被度の低下や藻食魚類の乱獲によりサンゴから藻場への生態系シフトが多く報告されている(Hughes *et al.*, 2007; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007)。このようなシフトが人間にとって都合の悪い方向へと変わってしまった場合、そしてヒステリシス(履歴効果)があった場合、たとえ特定の環境要因が前の状態に戻ったとしても生態系は元の状態に戻らず(Schaffer *et al.*, 2001)、以前の状態に再生するには莫大な労力と時間とコストがかかる。

従って、現在残された生態系の機能を保全・維持するためにも、そして国内沿岸の物理的・化学的・生物学的状態を把握しその変化をいち早く捉えるためにも、時空間的に高解像度のモニタリング観測が欠かせない。今後気候変動と共に海洋熱波、台風、集中豪雨等に伴う突発的な環境の変動が増加することが予測されている中では、長期的な観測に加えて、連続的な時系列観測も重要である。近年では生態系モデルの開発などが進められ、将来の生態系予測評価が行われているが、一方でモデルの根幹となる現場での環境と生物をセットにした観測は十分では無い。さらには例えば酸素やpHの低下が海水中の化学成分の存在形態や溶解度をどのように変化させるのか、それらを利用する場の生物が具体的にどのような影響を受けるのか、影響を受ける閾値はどの程度なのか、さらには各生物群集の存在量・種組成の変化が違いにどのようにどの程度影響し合うのかなど、モデルの高度化

にはプロセス研究の発展が重要になる。今後沿岸生態系の保全・再生を考える上で沿岸生態系が有する適応力・回復力がどのようなメカニズムで維持されているのか、例えば機能的多様性や遺伝的多様性、生物間・群集間・生態系間のコネクティビティの強さ、過去の環境履歴、さらには生物が環境の変動に対してどの程度適応あるいは進化するのか、それはどのような機構によるのかなどを解明することが重要である。

観測から得られたデータを元に多角的かつ包括的に評価し、生態系の維持機構を定量的に理解していくには数値モデルを活用する必要がある。特にレジームシフトの可能性と現状の把握には予測・同化システムが欠かせない。日本周辺海域の代表的な予測・同化システムとして海洋研究開発機構のJCOPE(Miyazawa *et al.*, 2008)、気象庁気象研究所のMOVE/MRLCOM-JPN(Hirose *et al.*, 2019)、九州大学応用力学研究所のDREAMS(Hirose *et al.*, 2013)、水産研究・教育機構のFRA-ROMS(Kuroda *et al.*, 2017)が運用されており、沖合を流れる黒潮・親潮・対馬暖流の役割の理解や、より小さい空間解像度をもつモデルへのダウンスケーリングに広く活用されている。この10年、これらの出力結果が気象分野のようにほぼ観測データとして認識されるようになったことはブレイクスルーだったといえるだろう。そして、気象庁の日本沿岸モデル(Sakamoto *et al.*, 2019)などは、10 km から数 km スケールへとさらに高解像度化している。今後10年は100 m 以下の解像度をもつモデルへのダウンスケールが全国的に進み、水産・災害・海上輸送・環境アセスメント・観光への情報提供がより身近な空間スケールで実現するだろう。沿岸予測システムの実装は世界的な流れでもあり、UN Decadeのもとで始まるCoastPredict(<https://www.coastpredict.org>)に日本もJapan CoastPredictとして参画予定である。JCOPEの「黒潮・親潮ウォッチ」(<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/>)のように、解説を加えた予測情報のtwitter等を利用したタイムリーな発信は多くのアクセスを集めており、「海の天気予報」をまさに実現している。気象のように1週間ごとに科学的情報を加えたような事例の積み重ねは、海洋にはこれまでになかった試みではないだろうか。

3. 大量データの取得と利用への挑戦

3.1. データの取得

沿岸域の観測の多くは湾内で多くても数か所で実施される場合が多いが、沿岸域の擾乱を捉えるためには時空間的に高解像度のデータを取得する必要がある。データ不足は前回の将来構想でも述べられているように沿岸域において長年の課題である(岡ら, 2013; 神田ら, 2013; 浜崎ら, 2013)。ただ沿岸域は陸に近く、実験所があり、水産業者も多い。多少精密性が欠けても単価が安い、管理・清掃が容易、修理が容易、丈夫、ユーザーフレンドリーなセンサー(塩分, pH, 栄養塩など)の開発ができれば、より多くの点に投入することが可能になる。ネットワーク化された海底観測網、もしくは漁業者の網に入っても網を破らず再び海に投入してもらえるような小型フロート付センサーを作って撒くことができれば、岸から離れた場所でも連続的なデータを取得できるだろう。こうした大量のセンサーデータから様々なパラメータの空間分布が獲得できれば、現象の1次元的な解釈から脱却し、2節で述べてきた沿岸域における化学的特性・反応速度の変遷過程、そして海洋生物と環境場の空間分布がどのように相互に干渉しながら生態系として成り立っているのかなどの理解を進めることができる。多点での継続的センサー観測は、貧酸素化や酸性化が進む中での沿岸域の機能変化を検出するためにも重要である。またそのためには、海水だけでなく、大気と堆積物も含めた総合観測が望ましく、これらの観測用センサーの開発・利用を進める必要がある。

予測技術の向上にも観測データが欠かせない。データ数と箇所を増やす方法として例えば水産業者の利益との協働という形を目指したスマート漁業・水産業がある。九州北西岸で数年前から始まった取り組みでは、漁船から海に投入すると自動的に観測し始める観測機器を開発し、帰港時に観測データを自動的にデータサーバへ送信する仕組みを構築することで、データ同化システムに必要な観測データを獲得している(広瀬, 2020)。大量にデータを獲得できるような簡便さと効率化を進め、業者の負担を減らすことで観測網を増やすことに成功してお

り、世界的にも新しい取り組みである。また、愛媛県では豊後水道(宇和海)に面した沿岸15か所ほどで多深度にセンサーを入れ、水温・クロロフィル量・溶存酸素量などのセンサー観測結果をほぼリアルタイムで公開している(小林, 2019; 宇和海海況情報サービス You see U-Sea, <http://akashio.jp/>)。JAMSTEC むつ研究所や宮崎県では沿岸に沿って短波レーダー網を構築し、30分や1時間ごとに海況情報を配信している(佐々木ら, 2016; 渡慶次ら, 2017)。これらはいずれもスマホから海況や水質の情報に簡単にアクセスでき、出港・漁業位置の判断材料や赤潮発生情報などを得られる。これらのプロジェクトに共通するのは研究だけでなく水産業者の利益につながるという点である。データ取得をどう双方向へのメリットにできるか、海域ごとに丁寧に抽出していく作業が必要である。

一方で、現在の精度の良い海洋観測技術を用いた船舶観測を日本各地の沿岸において実施することも重要である。日本全体の沿岸海況のスナップショットを高精度で得ることができ、将来の変化の検出や、モデルシミュレーションの検証、沿岸域ごとの比較などが可能になると同時に、上記のセンサー観測や自治体による定期的水質調査データとの比較を行うことで、その品質保証を行うことができる。また、各地で進められている藻場の再生活動などによる周辺の沿岸域の水質変化も検出可能となるだろう。このことは、水質調査の維持や精度向上、活動支援にもつながり、自治体、漁業者、住民と海洋学者による沿岸モニタリングの相互的発展が期待できる。

岩本ら(2021, 本特集)でも述べられているように、衛星観測も陸域周辺で1 km以下の解像度をもつデータが取得できるようになり、沿岸域研究に欠かせない存在である。2018年から開始された「しきさい」は空間解像度250 mで海色と海面水温を2日に1回取得しており、内湾域での環境変化も把握可能となってきた(https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/skli_nrt/index.cgi)。韓国のGeostationary Ocean Color Imager (GOCI)は2010年から静止軌道で日本周辺を含めた海色データを500 m解像度で1時間ごとに取得しており、2020年にはGOCI-IIが打ち上げられている(石坂ら, 2016)。「ひまわり8号」もカラー化され、2015年からは精度は良くないながらも空間解像度1 kmでクロロフィル *a* を1時間ご

とに取得している (https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html)。さらに、最近ではクロロフィル *a* だけではなく、植物プランクトンの種類や一次生産の推定も可能になってきており、今後沿岸域での精度向上が期待される。

海色衛星観測の時空間解像度は上がりつつあるものの、可視域の観測においては、雲が存在する限りは海面の情報を取得することができない。新たなデータの取得方法としてこの数年間で急速に身近になったのがドローンによる低高度リモートセンシングである。ドローンに搭載したカメラにより、これまで海洋観測において取得しづらかった沿岸域の海面情報を動画・静止画の形で大量に獲得でき、数 m ～数百 m の空間内で秒～時間単位で変動する現象が観測できる。ドローン観測を実施する際には、目視の必要性、赤外線観測に有効な夜間や都市に近い海域での飛行制限などの法律上の壁もあるものの、船舶を必ずしも使用することなく海洋上の狙った現象を追跡できる機動性と、数 cm ～数 m ほどの解像度は魅力的である。バルーン (Miyao and Isobe, 2016) や航空機観測と比べて、手軽さ・操作性・価格の点でも優位である。ドローン観測は現状ではまだ観測できる時間がバッテリーの能力に左右され、直線距離で数キロ程度の観測が多いが、開発のスピードは目覚ましく、10 km 以上にわたる沿岸域を観測できるようになるのも時間の問題だろう。飛行高度の制限によって1台で取得できる観測範囲には限界があるため、複数台のドローンを同時に利用することも考える必要がある。また海面高度のように1台で1点しか観測できない情報も複数台利用することで空間変化を見積もることが可能になるだろう (Ichikawa *et al.*, 2019)。海水が透明である利点を生かすことで特にサンゴ礁域では上空からサンゴや海草、海藻の被度推定等が最近盛んに実施されている。さらにマングローブ域などアプローチが大変な海域では、画像の AI 分析による種判別およびその面積より炭素固定量の推定などにも利用されている。観測経路・時間を自動化することで沿岸域を高頻度でモニタリングできる新たな手法になりえる。

ドローンは、画像取得の他に直接観測を行うツールとして活用することも考えられる。例えば空撮と同時にドローンから CTD を用いた高解像度の曳航観測 (Masunaga and Yamazaki, 2014) を実施できれば大気と海面情報に加えて高解像度の海中データが同時に手に入る。海中

に降ろした観測機器を持ち上げるためには相当の荷重がドローンにかかるため、まだ現実的な手法ではないかもしれないが、実現できれば船舶では月1回ほど行っている湾の横断観測もより高頻度で可能になるだろう。ペットボトルを用いた採水は既にも実施され始めており (Koparan *et al.*, 2018)、ロゼット採水のような形で複数地点での着水・採水も試みられている。

3.2. データの利用及び共有

新たなデータの利用と同時に、既存のデータの有効利用や、データ共有を進めることも重要である。日本では1971年に施行された水質汚濁防止法により、全国沿岸海域ならびに河川における定期的な水質調査が実施されており、数十年にわたる水質データが蓄積されてきた。例えば、栄養塩、溶存酸素、pH、重金属、底生生物などのデータである (<https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/>)。また、水産研究所や試験場による沿岸定点観測データも蓄積されている (<http://nrifs.fra.affrc.go.jp/lime/kaiyodb.html>)。このようなデータは沿岸環境の長期変化の検出に有用である (Ishizu *et al.*, 2019)。一方で、環境指標として長年測定されてきた項目の中には、BOD (Biological Oxygen Demand) や COD (Chemical Oxygen Demand) のような測定の簡便さなどを理由に国内だけで流通している指標もある。しかし、新たな知見や分析機器の普及により、より学術的に有用で国際基準に合った指標への改善が求められている (福島ら, 1997)。これらの指標については、継続性を担保するために AI など新たな技術を利用した新旧の指標の関連式の作成などを検討することで、今後思い切った見直しが可能になるだろう。さらに、前項で提案した新たな安価なセンサー観測の展開によって得られる高時空間分解能のデータと併せて解析することで、沿岸域の物質循環や水の持つ化学的特性がどのような要因によって決定され、変化しているのかを定量的に解明することが期待できる。そのためには、要因として考えられる気象、流域の土地利用、下水処理状況などのデータと併せた総合的数値解析が必要となるが、このような解析にも、海洋学に近年導入されつつある AI 分析が有用であろう。南北に細長い日本は、小さな面積にもかかわらず亜寒帯から亜熱帯までの様々な沿岸域を有している。さらに、人間活動の影

響や下水処理の程度はそれぞれの沿岸域において大きく異なっている。このことは、これまでは「日本の沿岸域」に関する統一的理解を得ることを困難にする原因であった。しかし、AI分析などの新たな手法を用いることでこの多様な日本の沿岸プロセスの定量的理解が進めば、世界の様々な沿岸域における物質循環や、温暖化や都市化などに対する応答の理解にもつながるものと期待できる。また、国内でも赤潮・青潮予測モデルなどの精緻化や沿岸域の生態系サービスおよび資源量の将来予測に資することにより、2節に述べている社会に身近な海域としての沿岸域の役割を海洋学的視点で明らかにし、社会に提供できるのではないだろうか。

国内沿岸に存在する大学附属の臨海実験所や水産実験所の多くは古くから地元との交流を続けながら周辺環境や生物の観測を長年継続的に実施してきた歴史があり、国内の沿岸研究の発展に大きく貢献してきた。近年これらの実験所は共同利用・共同研究拠点として拠点化されつつある。また、自治体(都道府県)の水産試験場・研究所による定点・定線観測でも、長年にわたりセンサー観測のみでなく生物採取調査などが行われている。どちらも予算・人員・規模の確保が厳しい状況にあるが、センサー観測と人の手による生物試料採取観測の両方の継続的な実施は、社会に直結している沿岸環境の長期的な変遷の把握においても予測においても欠かすことができない。例えば京都大学の白浜実験所では45年間に渡って継続的に実施された環境観測とウニの個体群調査より、赤潮および気候変動による冬季の水温上昇がウニの個体群動態および種の多様性に影響している可能性が示された(Ohgaki *et al.*, 2019)。このような研究は地道な長期観測の重要性を示す良い実例であり、各地の大学や官庁、水産実験場などによって継続的に行われてきた沿岸観測と人材育成の重要性を示している。またビッグデータの解析が可能になった今、今後はこれら施設をベースに周辺海域の観測データをオンライン化・オープンソース化していくことによって地元住民へ情報を還元することや蓄積されてきた貴重なデータを有効に利用する研究を展開し、沿岸観測のさらなる発展につなげていくべきである。

この数年間で過去のデータ数を上回る数でドローンによる空撮画像の蓄積も進んでいる。これらのデータは定

性的な解釈や説明に用いられることも多いが、例えば可視カメラを用いたサンゴのモニタリング(Burns *et al.*, 2020)、分光スペクトルカメラを用いた赤潮の検知(Becker *et al.*, 2019)、赤外線カメラを用いた海面乱流場の解析(Horner-Devine *et al.*, 2017)のように観測データとしての応用が多岐に渡り始めている。スマホのアプリを利用した市民参加型の海色モニタリングの試みも始まっている(<https://www.eyeonwater.org>)。海域毎に水深の深さ・透明度が大きく異なり、日々天候も変わるため、通常のカメラ画像を容易に比較できる汎用性の高いデータへ変換することは難しいが、スマホにせよ、ドローンにせよ、大量にデータが得られる利点を生かし、海底の映り込みや懸濁物質の違いなどをAI解析から解決できる期待も大きい。大量データをコミュニティとして活用するためには、データの公開ポリシーが重要になるだろう。海洋関係の諸機関が集めたデータ・漁業者・コミュニティから得られたデータを一般社会へ還元する際、人間生活により直結する沿岸域では空撮画像に映り込む情報や漁船の位置情報は利益や個人情報を含む場合がある。数多くの試行錯誤が可能な研究環境、予測モデルの高精度化を実現するためにも、将来的にはガイドラインを整備していく必要があるだろう。

4. 沿岸モデルの発展

日本の沿岸域のような複雑な海岸線と湾を詳細に解像するには1 km以下の解像度を持つ数値モデルが望ましい。この空間スケールになると見え始めるのが河川・干潟などの陸域との境界で起こる現象である。最新の沿岸モデルの多くは、フレキシブルな水平解像度を使用することで細長い河川の上流域や潮の満ち引きに伴う海岸線の変化を再現し(例えば、アメリカで開発されているROMSやFVCOM)、物理と生物地球化学コンポーネントの両方を持ち、波の効果や土砂輸送を含んだマルチプロセス数値モデルである(Hoshiba *et al.*, 2019)。これらは複数の物質動態(Sohma *et al.*, 2018)やサンゴ礁・藻場(Monismith *et al.*, 2019)を組み込みながら、ますます現実的で複雑な海洋モデルへと進化している。一方、底層・碎波・大気海洋相互作用・地形変化に対するモデルの再現性の検証は不足している(Fringer *et al.*, 2018)。

この10年間の特筆すべき点は、粒子追跡モデルの目覚ましい発展だろう。粒子追跡モデルは水塊の移流・拡散だけでなく、海洋生物が卵のステージから自らが遊泳するような成長過程に合わせた行動の変化を再現できるため、複数の湾・海域を跨ぐ領域スケールで成り立つ生態系への理解に有効な手段となっている (Uchiyama *et al.*, 2018)。

長期的な沿岸モデルの発展を考えると、このまま海に特化した数値モデルとして開発していくことには限界があるようにも思える。海洋モデルは流体としての水を基本的には扱うが、この視点は陸との境界線、つまり水としての境界線、をどこまで精緻に陸域へと拡張できるのかという思考がベースになる。しかし、陸と海の境界線は曖昧であり、細かくすればするほど、河川の支流毎の流量、湧水量、土壌の成分・浸透量、と不明瞭な境界条件が増えてしまう。モデルに与える外部条件はなるべく減らしたいにもかかわらず、かえって不確定要素が増えてしまうジレンマに陥るのである。そこで沿岸域のモデルを海・河川だけでなく陸面過程を含めた水循環を再現できる地球システムモデルのような陸海結合モデルとして発展させてはどうだろうか。本特集の大気海洋境界 (岩本ら, 2021) や中緯度 (橋濱ら, 2021) の将来構想にも述べられている SWOT 衛星ミッションでは陸水・海水面を同時に観測する計画であり (<https://swot.jpl.nasa.gov/science/overview/>)、今後陸海間の水循環に関するデータが多く集まることも期待される。現在のところ陸面から河川・地下水・海洋の水の流れを現実的かつシームレスに再現したモデルは実現できていないが、陸域と海域を結合する手法として陸面モデル・河川モデル・干潟モデル・海洋モデルと複数のモデルを接続していく現在の地球システムモデルのような手法 (Nakada *et al.*, 2012; Ikeuchi *et al.*, 2017) や全プロセスをひとつのモデル内で一体的に解く手法 (Kida and Yamashiki, 2015; Ward *et al.*, 2020) が考えられるだろう。もし河川・海洋の水だけでなく、地下水の水温・塩分・物質濃度を同じモデル内で解くことができれば、沿岸域の届く水が陸域のどこからきたのか、いつ降った雨水なのか、と陸海間の水循環の実態を解明できるだけでなく、気候変化や農業による塩害のような社会的に重要な陸域沿岸域の水・物質動態の予測にも大きく貢献できるだろう。

5. まとめ

沿岸域において研究を行い、成果を得るためには、現在のように個々の研究者がそれぞれの海域での研究を個別に実施していくことに加えて、物理・化学・生物といった分野を超えて分野横断的に、さらに沿岸と沖合の繋がりを意識してより広域的に、組織立った研究を実施していくことが必要である。また持続的にモニタリングしていく上で市民による参加が可能なのも沿岸域の強みである。これらの活動に専門家が関与することは、取得したデータの精度向上や科学的価値を高めることで活用の幅を広げることにつながるだろう。日本は国土の面積は小さいが、南北に長く亜寒帯から亜熱帯に広がり、北からは親潮、南は黒潮・対馬海流が流れていると同時に、険しい山から直接流れ込む多くの河川を有している。陸域からの影響を強く受けるため、世界的に見ても極めて多様で生産性豊かな沿岸環境を有している。このようなコンパクトな範囲の中に多様な環境と生物が存在する状況は、環境と生物の関係性やその機能や多様性機構を研究し包括的に捉える上では大きな強みであり、日本がそのような研究をリードすることができる立場にあることを示している。さらには、この立地条件は、温暖化などに伴う生物の北上化など、今後モニタリングの必要性が一層高まる気候変動による影響をいち早く捉え、その影響を予測する上でも有利である。長い歴史の中で水産資源などの海の恵みを様々な形で受けてきた我々には、これら恩恵を次世代へと残し維持していく責任がある。

謝辞

Fig. 1の一部に Integration and Application Network, University of Maryland Center for Environmental Science (ian.umces.edu/symbols/) を使用しました。本稿の作成にあたり、以下の方々 (敬称略) ならびに4名の匿名の査読者から貴重な助言をいただきました：井桁庸介、大石俊、乙坂重嘉、田中潔、角田智彦、広瀬直毅、森本昭彦、吉江直樹。深く感謝申し上げます。

References

- Alonso-Sáez, L., X. A. G. Morán, and J. M. González (2020): Transcriptional patterns of biogeochemically relevant marker genes by temperate marine bacteria. *Front. Microbiol.*, **11**, 465, doi:10.3389/fmicb.2020.00465.
- Becker, R. H., M. Sayers, D. Dehm, R. Shuchman, K. Quintero, K. Bosse, and R. Sawtell (2019): Unmanned aerial system based spectroradiometer for monitoring harmful algal blooms: A new paradigm in water quality monitoring. *J. Great Lakes Res.*, **45**, 444–453.
- Boyd, P. W. *et al.* (2018): Experimental strategies to assess the biological ramifications of multiple drivers of global ocean change—A review. *Glob. Chang. Biol.*, **24**, 2239–2261.
- Boyle, E., R. Collier, A. T. Dengler, J. M. Edmond, A. C. Ng, and R. F. Stallard (1974): On the chemical mass-balance in estuaries. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **38**, 1719–1728.
- Breitburg, D. *et al.* (2018): Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, **359**, eaam7240.
- Burns, J. H., G. Weyenberg, T. Mandel, S. B. Ferreira, D. Gotshalk, C. K. Kinoshita, M. J. Marshall, N. A. Del Moral, S. J. Murphy, K. H. Pascoe, A. Runyan, A. J. Spengler, B. D. Wells, D. K. Wilde, and R. Pelayo (2020): A comparison of the diagnostic accuracy of in-situ and digital image-based assessments of coral health and disease. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 304, doi:10.3389/fmars.2020.00304.
- Carmack, E., P. Winsor, and W. Williams (2015): The contiguous panarctic Riverine Coastal Domain: A unifying concept. *Prog. Oceanogr.*, **139**, 13–23.
- Chapman, R. W., A. Mancia, M. Beal, A. Veloso, C. Rathburn, A. Blair, A. F. Holland, G. W. Warr, G. Didinato, I. M. Sokolova, E. F. Wirth, E. Duffy, and D. Sanger (2011): The transcriptomic responses of the eastern oyster, *Crassostrea virginica*, to environmental conditions. *Molecular. Ecol.*, **20**, 1431–1449.
- Cui Y., S.-K. Wong, R. Kaneko, A. Mouri, Y. Tada, I. Nagao, S.-J. Chun, H.-G. Lee, C.-Y. Ahn, H.-M. Oh, Y. Sato-Takabe, K. Suzuki, H. Fukuda, T. Nagata, K. Kogure, and K. Hamasaki (2020): Distribution of dimethylsulfoniopropionate degradation genes reflects strong water current dependencies in the Sanriku coastal region in Japan: From mesocosm to field study. *Front. Microbiol.*, **11**, 1372, doi:10.3389/fmicb.2020.01372.
- Dai, M. H., and J. M. Martin (1995): First data in trace metal level and behavior in two major Arctic river-estuarine system (Ob and Yenisey) and in the adjacent Kara Sea, Russia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **131**, 127–141.
- Flynn, K. J., A. Mitra, P. M. Glibert, and J. M. Burkholder (2018): Chapter 7, Mixotrophy in Harmful Algal Blooms: By Whom, on Whom, When, Why, and What Next, p. 113–132. In *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, Ecological Studies 232*, edited by P. M. Glibert *et al.*, Springer, Cham, Switzerland.
- Folke, C., S. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Elmqvist, L. Gunderson, and C. S. Holling (2004): Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **35**, 557–581.
- Fortunato C. S., and B. C. Crump (2015): Microbial gene abundance and expression patterns across a river to ocean salinity gradient. *PLoS ONE*, **10**, e0140578.
- Fourqurean, J. W., C. M. Duarte, H. Kennedy, N. Marbà, M. Holmer, M. A. Mateo, E. T. Apostolaki, G. A. Kendrick, D. Krause-Jensen, K. J. McGlathery, and O. Serrano (2012): Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nat. Geosci.*, **5**, 505–509.
- Fringer, O. B., C. N. Dawson, R. He, D. K. Ralston, and Y. J. Zhang (2019): The future of coastal and estuarine modeling: Findings from a workshop. *Ocean Modell.*, **143**, 101458, doi:10.1016/j.ocemod.2019.101458.
- Frischknecht, M., M. Münnich, and N. Gruber (2018): Origin, transformation, and fate: The three-dimensional biological pump in the California Current System. *J. Geophys. Res. Océ.*, **123**, 7939–7962.
- 福島武彦・相崎守弘・松重一夫・今井章雄 (1997): 湖沼の有機物指標. 水環境学会誌, **20**, 238–245.
- Grech, A., K. Chartrand-Miller, P. Erftemeijer, M. Fonseca, L. McKenzie, M. Rasheed, H. Taylor, and R. Coles (2012): A comparison of threats, vulnerability and management approaches in global seagrass bioregions. *Environ. Res. Lett.*, **7**, 024006.
- Griffith, A. W., and C. J. Gobler (2020): Harmful algal blooms: A climate change co-stressor in marine and freshwater ecosystems. *Harmful Algae*, **91**, 101590.
- Gruber, N. (2011): Warming up, turning sour, losing breath: ocean biogeochemistry under global change. *Philos. Trans. Royal Soc. A*, **369**, 1980–1996.
- Hall-Spencer, J. M., R. Rodolfo-Metalpa, S. Martin, E. Ransome, M. Fine, S. M. Tuner, S. J. Rowly, D. Tedesco, and M.-C. Buia (2008): Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, **454**, 96–99.
- Halpern, B. S., S. Walbridge, K. A. Seikoe, C. V. Kappel, F. Micheli, C. D'Agrosa, J. F. Bruno, K. S. Casey, C. Ebert, H. E. Fox, R. Fujita, D. Heinemann, H. S. Lenihan, E. M. P. Madin, M. T. Perry, E. R. Selig, M. Spalding, R. Steneck, and R. Watson (2008): A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, **319**, 948–952.
- Halpern, B. S. *et al.* (2012): An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, **488**, 615–620.
- 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) ー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ー. 海の研究, **22**, 253–272.
- Harley, C. D. G., A. R. Hughes, K. M. Hultgren, B. G. Miner, C. J. B. Sorte, C. S. Thornber, L. F. Rodriguez, L. Tomanek, and S. L. Williams (2006): The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecol. Lett.*, **9**, 228–241.
- 橋濱史典・額綱慎也・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.
- 平井惇也・宮正樹・藤木徹一・吉田聡・乙坂重嘉・埴山秀樹・加古真一郎・片岡智哉・松岡大祐・日高弥子・杉山大祐・小嶋不二夫 (2021): 海洋学の10年展望2021: 新たな手法と問題. 海の研究, **30**, 227–253.
- 広瀬直毅 (2020): 人, 環境にやさしい「海からの情報づくり」～ICT, IoT技術と地域の水産業・海洋環境～ 2. 漁船観測データ同化による海況予報の精度向上. 水産海洋研究, **84**, 208–209.
- Hirose, N., K. Takayama, and J. H. Moon (2013): Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas. 海と空 = *Sea and sky*, **89**, 1–9.
- Hirose, N., N. Usui, K. Sakamoto, H. Tsujino, G. Yamanaka, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, Y. Fujii, and N. Kohno (2019): Development of a new operational system for monitoring and forecasting coastal and open-ocean states around Japan. *Ocean Dyn.*, **69**, 1333–1357.

- Hoegh-Guldberg, O., P. J. Munby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Cladeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi, and M. E. Hatzioles (2007): Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, **318**, 1737-1742.
- Hofmann, G. E., J. E. Smith, K. S. Johnson, U. Send, L. A. Levin, F. Micheli, A. Paytan, N. N. Price, B. Peterson, Y. Takeshita, P. G. Matson, E. D. Crook, K. J. Kroeker, M. C. Gambi, E. B. Riverst, C. A. Frieder, P. C. Yu, and T. R. Martz (2011): High-frequency dynamics of ocean pH: A multi-ecosystem comparison. *PLoS ONE*, **6**, e28983.
- Hooker, S. B., A. Matsuoka, R. M. Kudela, Y. Yamashita, K. Suzuki, and H. F. Houskeeper (2020): A global end-member approach to derive aCDOM(440) from near-surface optical measurements. *Biogeosciences*, **17**, 475-497.
- Horner-Devine, A. R., and C. C. Chickadel (2017): Lobe-cleft instability in the buoyant gravity current generated by estuarine outflow. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 5001-5007.
- Hoshiya, Y., Y. Matsumura, H. Hasumi, S. Itoh, S. Nakada, and K. W. Suzuki (2019): A simulation study on effects of suspended sediment through high riverine discharge on surface river plume and vertical water exchange. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **228**, 106352.
- Hughes, T. P., M. J. Rodrigues, D. R. Bellwood, D. Ceccarelli, O. Hoegh-Guldberg, L. McCook, N. Moltschanivskyj, M. S. Pratchett, R. S. Steneck, and B. Willis (2007): Phase shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. *Curr. Biol.*, **17**, 360-365.
- Hutchins, D. A., R. M. Margaret, and F. Fu (2009): Nutrient Cycles and Marine Microbes in a CO₂-Enriched Ocean. *Oceanogr.*, **22**, 128-145.
- Ichikawa, K., T. Ebinuma, M. Konda, and K. Yufu (2019): Low-cost GNSS-R altimetry on a UAV for water-level measurements at arbitrary times and locations. *Sensors*, **19**, 998.
- Igeta, Y., A. Yankovsky, K. I. Fukudome, S. Ikeda, N. Okei, K. Ayukawa, A. Kaneda, and T. Watanabe (2017): Transition of the Tsushima Warm Current Path Observed over Toyama Trough, Japan. *J. Phys. Oceanogr.*, **47**, 2721-2739.
- Ikeuchi, H., Y. Hirabayashi, D. Yamazaki, S. Muis, P. J. Ward, H. C. Winsemius, M. Verlaan, and S. Kanae (2017): Compound simulation of fluvial floods and storm surges in a global coupled river-coast flood model: Model development and its application to 2007 Cyclone Sidr in Bangladesh. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, 1847-1862.
- 石坂丞二・楠高幸・Park Youngje (2016): 静止海色ミッション(GOCI-II). 沿岸海洋研究, **54**, 23-28.
- Ishizu, M., Y. Miyazawa, T. Tsunoda, and T. Ono (2019): Long-term trends in pH in Japanese coastal seawater. *Biogeosciences*, **16**, 4747-4763.
- Isobe, A., and R. C. Beardsley (2006): An estimate of the cross-frontal transport at the shelf break of the East China Sea with the Finite Volume Coastal Ocean Model. *J. Geophys. Res. Oce.*, **111**, doi:10.1029/2005JC003290.
- 岩本洋子・相木秀則・磯口治・大林由美子・近藤文義・近藤能子・西岡純 (2021): 海洋学の10年展望2021: 大気海洋境界. 海の研究, **30**, 199-225.
- 神田穰太・石井雅男・小川浩史・小埜恒夫・小畑元・川合美千代・鈴木昌弘・本多牧生・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.
- 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.
- Kida, S., and Y. A. Yamashiki (2015): A layered model approach for simulating high river discharge events from land to the ocean. *J. Oceanogr.*, **71**, 125-132.
- Kida, S., K. Takayama, Y. N. Sasaki, H. Matsuura, and N. Hirose (2021): Increasing trend in Japan Sea Throughflow transport. *J. Oceanogr.*, **77**, 145-153.
- Kline, D. I. et al. (2012): A short-term in situ CO₂ enrichment experiment on Heron Island (GBR). *Sci. Rep.*, **2**, 413.
- 小林真也 (2019): 社会を変えるIoT: 3. 水産業を支援するIoTサービス構築 — 宇和南海況情報サービス You see U-Sea —. 情報処理, **60**, 121-126.
- Kodama, K., and T. Horiguchi (2011): Effects of hypoxia on benthic organisms in Tokyo Bay, Japan: A review. *Mar. Pollut. Bull.*, **63**, 215-220.
- Koparan, C., A. B. Koc, C. V. Privette, and C. B. Sawyer (2018): In situ water quality measurements using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. *Water*, **10**, 264.
- Kubo, A., F. Hashihama, J. Kanda, N. Horimoto-Miyazaki, and T. Ishimaru (2019): Long-term variability of nutrient and dissolved organic matter concentrations in Tokyo Bay between 1989 and 2015. *Limnol. Oceanogr.*, **64**, S209-S222.
- Kuroda, H., T. Setou, S. Kakehi, S. I. Ito, T. Taneda, T. Azumaya, D. Inagake, Y. Hiroe, K. Morinaga, M. Okazaki, T. Yokota, T. Okunishi, K. Aoki, Y. Shimizu, D. Hasegawa, and T. Watanabe (2017): Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open J. Mar. Sci.*, **7**, 62, doi:10.4236/ojms.2017.71006.
- Kuroda, H., Y. Toya, T. Watanabe, J. Nishioka, D. Hasegawa, Y. Taniuchi, and A. Kuwata (2019): Influence of coastal Oyashio water on massive spring diatom blooms in the Oyashio area of the North Pacific Ocean. *Prog. Oceanogr.*, **175**, 328-344.
- Lohan, M. C., and K. W. Bruland (2008): Elevated Fe(II) and Dissolved Fe in Hypoxic Shelf Waters off Oregon and Washington: An Enhanced Source of Iron to Coastal Upwelling Regimes. *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 6462-6468.
- Marshall, K. N., I. C. Kaplan, E. E. Hodgson, A. Hermann, D. S. Busch, P. McElhany, T. E. Essington, C. J. Harvey, and E. A. Fulton (2017): Risks of ocean acidification in the California Current food web and fisheries: ecosystem model projections. *Glob. Chang. Biol.*, **23**, 1525-1539.
- Masunaga, E., and H. Yamazaki (2014): A new tow-yo instrument to observe high-resolution coastal phenomena. *J. Mar. Syst.*, **129**, 425-436.
- Meissner, T., F. J. Wentz, and D. M. Le Vine (2018): The salinity retrieval algorithms for the NASA Aquarius version 5 and SMAP version 3 releases. *Remote Sens.*, **10**, 1121, doi:10.3390/rs10071121.
- Miyao, Y., and A. Isobe (2016): A combined balloon photography and buoy-tracking experiment for mapping surface currents in coastal waters. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **33**, 1237-1250.
- Miyazawa, Y., T. Kagimoto, X. Guo, and H. Sakuma (2008): The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system. *J. Geophys. Res. Oce.*, **113**, doi:10.1029/2007JC004226.
- Monismith, S. G., H. Hirsh, N. Batista, H. Francis, G. Egan, and R. B. Dunbar (2019): Flow and drag in a seagrass bed. *J. Geophys. Res. Oce.*, **124**,

- 2153-2163.
- Nakada, S., S. Kobayashi, M. Hayashi, J. Ishizaka, S. Akiyama, M. Fuchi, and M. Nakajima (2018): High-resolution surface salinity maps in coastal oceans based on geostationary ocean color images: quantitative analysis of river plume dynamics. *J. Oceanogr.*, **74**, 287-304.
- Nakada, S., Y. Ishikawa, T. Awaji, T. In, S. Shima, T. Nakayama, T. Isada, and S. I. Saitoh (2012): Modeling runoff into a region of freshwater influence for improved ocean prediction: Application to Funka Bay. *Hydrolog. Res. Lett.*, **6**, 47-52.
- Nakamura, H., A. Nishina, and S. Minobe (2012): Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan. *J. Climate*, **25**, 7772-7779.
- Nishikawa, T., Y. Hori, S. Nagai, K. Miyahara, Y. Nakamura, K. Harada, M. Tanda, T. Manabe, and K. Tada (2010): Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan during a 35-year period from 1973 to 2007. *Estuaries Coasts*, **33**, 417-427.
- Noble, A. E., C. H. Lamborg, D. C. Ohnemus, P. J. Lam, T. J. Goepfert, C. I. Measures, C. H. Frame, K. L. Casciotti, G. R. DiTullio, J. Jennings, and M. A. Saito (2012): Basin-scale inputs of cobalt, iron, and manganese from the Benguela-Angola front to the South Atlantic Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **57**, 989-1010.
- Ohgaki, S.-I., T. Kato, N. Kobayashi, H. Tanase, N. H. Kumagai, S. Ishida, T. Nakano, Y. Wada, and Y. Yusa (2019): Effects of temperature and red tides on sea urchin abundance and species richness over 45 years in southern Japan. *Ecol. Indicators*, **96**, 684-693.
- 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 - 海の研究, **22**, 191-218.
- Omori, M. (2010): Degradation and restoration of coral reefs: Experience in Okinawa, Japan. *Mar. Biol. Res.*, **7**, 3-12.
- Perry, C. T. *et al.* (2018): Loss of coral reef growth capacity to track future increases in sea level. *Nature*, **558**, 396-400.
- Petras, D., J. J. Minich, L. B. Cancelada, R. R. Torres, E. Kunselman, M. Wang, M. E. White, E. E. Allen, K. A. Prather, L. I. Aluwihare, and P. C. Dorrestein (2021): Non-targeted tandem mass spectrometry enables the visualization of organic matter chemotype shifts in coastal seawater. *Chemosphere*, **271**, 129450, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129450.
- Rabalais, N. N., R. J. Diaz, L. A. Levin, R. E. Turner, D. Gilbert, and J. Zhang (2010): Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia. *Biogeosciences*, **7**, 585-619.
- Riebesell, U., J. Czerny, K. von Brockel, T. Boxharmmer, J. Budenbender, M. Deckelnick, M. Fisher, D. Hoffmann, S. A. Krug, U. Lentz, A. Ludwig, R. Mucche, and K. G. Schulz (2013): Technical note: A mobile sea-going mesocosm system - new opportunities for ocean change research. *Biogeosciences*, **10**, 1835-1847.
- Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, N. Hirose, N. Usui, and G. Yamanaka (2019): Development of a 2-km resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application. *Ocean Dyn.*, **69**, 1181-1202.
- Salazar, G. *et al.* (2019): Gene expression changes and community turnover differentially shape the global ocean metatranscriptome. *Cell*, **179**, 1068-1083.e21.
- Sampaio, E., C. Santos, I. C. Rosa, V. Ferreira, H.-O. Pörtner, C. M. Duarte, L. A. Levin, and R. Rosa (2021): Impacts of hypoxic events surpass those of future ocean warming and acidification. *Nat. Ecol. Evol.*, **5**, 311-321.
- Sasaki, H., E. Siswanto, K. Nishiuchi, K. Tanaka, T. Hasegawa, and J. Ishizaka (2008): Mapping the low salinity Changjiang Diluted Water using satellite-retrieved colored dissolved organic matter (CDOM) in the East China Sea during high river flow season. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L04604, doi: 10.1029/2007GL032637.
- Sasaki, Y. N., S. Minobe, and Y. Miura (2014): Decadal sea-level variability along the coast of Japan in response to ocean circulation changes. *J. Geophys. Res. Océ.*, **119**, 266-275.
- 佐々木健一・渡邊修一・山本秀樹・脇田昌英・田中義幸 (2016): 津軽海峡東部海洋短波レーダー観測について～データの公開と検証の試み～, 東北海区海洋調査技術連絡会報, **65**, 47-52.
- Scheffer, M., S. Carpenter, J. A. Foley, C. Folke, and B. Walker (2001): Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, **413**, 591-596.
- Shi, D., Y. Xu, B. M. Hopkinson, and F. M. M. Morel (2010): Effect of ocean acidification on iron availability to marine phytoplankton. *Science*, **327**, 676-679.
- Shiraiwa, T. (2012): "Giant Fish-Breeding Forest": A new environmental system linking continental watershed with open water, p. 73-85. In *The Dilemma of Boundaries*, edited by M. Taniguchi, and T. Shiraiwa, *Global Environmental Studies book series*, Springer, Tokyo, Japan.
- Song, G., S. Liu, J. Zhang, Z. Zhu, G. Zhang, H. K. Marchant, M. M. M. Kuypers, and G. Lavik (2020): Response of benthic nitrogen cycling to estuarine hypoxia. *Limnol. Oceanogr.*, **66**, 652-666.
- Sohma, A., H. Shibuki, F. Nakajima, A. Kubo, and T. Kuwae (2018): Modeling a coastal ecosystem to estimate climate change mitigation and a model demonstration in Tokyo Bay. *Ecol. Modell.*, **384**, 261-289.
- 杉江恒二 (2018): 植物プランクトン動態および生元素循環に対する海洋酸性化の影響評価, 海の研究, **27**, 125-140.
- Sugimoto, S., B. Qiu, and N. Schneider (2021): Local atmospheric response to the Kuroshio large meander path in summer and its remote influence on the climate of Japan. *J. Climate*, **34**, 3571-3589.
- 水産庁 (2021): 令和2年度水産白書 第1部令和2年度水産の動向, 1-235. https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/r02_h/index.html (参照2021年9月1日).
- 多田邦尚・中嶋昌紀・山口一岩・朝日俊雅・一見和彦 (2018): 沿岸海域における栄養塩濃度決定要因と堆積物, 沿岸海洋研究, **55**, 113-124.
- Tanaka, K., T. Komatsu, Y. Michida, and S. I. Saitoh (2011): A numerical study on the transport of eggs and larvae of *Sergia lucens* in Suruga Bay, Japan. *Fish. Oceanogr.*, **20**, 206-218.
- Tanaka, K., K. Kuma, K. Hamasaki, and Y. Yamashita (2014): Accumulation of humic-like fluorescent dissolved organic matter in the Japan Sea. *Sci. Rep.*, **4**, 5292, doi:10.1038/srep05292.
- Teeling, H., B. M. Fuchs, C. M. Bennke, K. Krüger, M. Chafee, L. Kappelmann, G. Reintjes, J. Waldmann, C. Quast, F. O. Glöckner, J. Lucas, A. Wichels, G. Gerdts, K. H. Wiltshire, and R. I. Amann (2016): Recurring patterns in bacterioplankton dynamics during coastal spring algae blooms. *eLife*, 2016:5e11888, doi:10.7554/eLife.11888.001.
- Todd, R. E. *et al.* (2019): Global Perspectives on Observing Ocean Boundary Current Systems. *Front. Mar. Sci.*, **6**, 423, doi: 10.3389/fmars.2019.00423.
- 渡慶次力・西口政治・棧敷孝浩 (2017): 宮崎県海況情報の漁業者への経済

- 効果. 水産海洋研究, **81**, 43-49.
- Uchiyama, Y., S. Odani, M. Kashima, Y. Kamidaira, and S. Mitarai (2018): Influences of the Kuroshio on interisland remote connectivity of corals across the Nansei Archipelago in the East China Sea. *J. Geophys. Res. Oce.*, **123**, 9245-9265.
- Usui, N., K. Ogawa, K. Sakamoto, H. Tsujino, G. Yamanaka, T. Kuragano, and M. Kamachi (2021): Unusually high sea level at the south coast of Japan in September 2011 induced by the Kuroshio. *J. Oceanogr.*, **77**, 447-461.
- Voss, M., H. W. Bange, J. W. Dippner, J. J. Middelburg, J. P. Montoya, and B. Ward (2013): The marine nitrogen cycle: recent discoveries, uncertainties and the potential relevance of climate change. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **368**, 20130121, doi:10.1098/rstb.2013.0121.
- Ward, N. D. *et al.* (2020): Representing the function and sensitivity of coastal interfaces in Earth system models. *Nat. Commun.*, **11**, 2458, doi:10.1038/s41467-020-16236-2.
- Warnken, K. W., G. A. Gill, L. L. Griffin, and P. H. Santschi (2001): Sediment-water exchange of Mn, Fe, Ni and Zn in Galveston Bay, Texas. *Mar. Chem.*, **73**, 215-231.
- Yamamoto, T. (2003): The Seto Inland Sea--eutrophic or oligotrophic? *Mar. Pollut. Bull.*, **47**, 37-42.
- Yamamoto-Kawai, M., S. Ito, H. Kurihara, and J. Kanda (2021): Ocean acidification state in the highly eutrophic Tokyo Bay, Japan: controls on seasonal and interannual variability. *Front. Mar. Sci.*, **8**, 289, doi:10.3389/fmars.2021.642041.
- Yamashita, Y., T. Tosaka, R. Bamba, R. Kamezaki, S. Goto, J. Nishioka, I. Yasuda, T. Hirawake, J. Oida, H. Obata, and H. Ogawa (2021): Widespread distribution of allochthonous fluorescent dissolved organic matter in the intermediate water of the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **191**, 102510, doi:10.1016/j.pocean.2020.102510.
- 寄高博行・花輪公雄 (2020): 東京湾平均海面基準の日本沿岸平均水位分布とその季節・経年変動. 海の研究, **29**, 107-128.
- Zhang, J., and H. Satake (2003): The chemical characteristics of submarine groundwater seepage in Toyama Bay, Central Japan, p. 45-60. In *Land and Marine Hydrogeology* edited by M. Taniguchi, K. Wang, and T. Gamo, Elsevier, Amsterdam, Netherland.

Decadal vision in oceanography 2021: Coastal oceans

Shinichiro Kida^{1*}, Haruko Kurihara², Yumiko Obayashi³,
Michiyo Yamamoto-Kawai⁴, Yoshiko Kondo⁵, and Jun Nishioka⁶

Abstract

The future direction of Japanese oceanographic research in the next decade is discussed, mainly from a coastal oceanographic perspective. Coastal oceans serve two functions: (1) as a filter-reactor region connecting the open ocean and land, and (2) as a biologically rich and diverse region where environmental changes have a direct impact on society. Therefore, understanding the material cycle within the coastal region is important not only scientifically but also to preserve and maintain the ocean. Process studies are needed, with close collaboration between physical, chemical, and biological science communities. Coastal oceans continue to lack observations to understand and resolve the small spatial and time-scale events that govern the region. However, advances in observational instruments/techniques, satellite measurements, and unmanned aerial vehicles are starting to provide high temporal-spatial data than ever before. In addition to long-term monitoring, we discuss the research infrastructure and numerical models needed for future studies.

Key words: future planning, land-sea connectivity, multiple stressors, large data, coastal ocean modelling

(Corresponding author's e-mail address: kida@riam.kyushu-u.ac.jp)

(Received 15 July 2021; accepted 6 September 2021)

(doi: 10.5928/kaiyou.30.5_87)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2021)

-
- 1 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan
 - 2 Faculty of Science, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan
 - 3 Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan
 - 4 Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan
 - 5 Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki, Nagasaki 852-8521, Japan
 - 6 Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 19N8W, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0819, Japan
- * Corresponding author: Shinichiro Kida
e-mail: kida@riam.kyushu-u.ac.jp