

— 解説 —

## 海中天気予報\*

林田 博士<sup>1,†</sup>・宮澤 泰正<sup>1</sup>・美山 透<sup>1</sup>・馬場 雄也<sup>1</sup>・木戸 晶一郎<sup>1</sup>

### 要旨

海洋研究開発機構は、日本近海の水温や流れといった海の中の状態の2か月先までの予測をもとにした「海中天気予報」を2001年から現在まで継続的に提供してきました。本稿では、海中天気予報の仕組み、研究やアウトリーチへの活用、今後の展望についてできるだけ簡素に解説しました。具体的には本稿を入門・応用・展望編に分け、入門編では予測の仕組み、予測精度を向上させる観測データ、用途に応じた多様な予測の方法について紹介しました。応用編では、ブログとYouTubeによる予報の配信、(気象の)天気予報への活用、世界の海の2年先までの予測への展開について解説しました。展望編では、予測の誤差を考慮した技術開発と海洋生態系の予測への取り組みを紹介しました。海中天気予報は、日々の情報配信と技術開発を続けることで、国連海洋科学の10年が目指す「予測できる海」と「万人に開かれた海」へ貢献していきます。

キーワード：海況予測・海洋モデリング・日本沿海予測可能性実験 (JCOPE)

### 1. はじめに

天気予報は、今や日常生活に欠かせない情報の1つです。日本で天気予報が始まったのは、今から141年前の1884年(明治17年)です。当時発表された日本初の天気予報は「*全国一般風ノ向キハ定リナシ天気ハ変リ易シ 但シ雨天勝チ*」(www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index2.html)という、今と比べるとかなり大雑把なものでした。それから長い年月をかけて、現在の天気予報では、科学と技術の進歩とともに、より詳細な情

報が提供されるようになりました。

天気とは一般的に、気象あるいは大気の状態のことを指します。天気予報と似た仕組みで、海の流れや温度といった海の中の状態を予報することを目的とした「海中天気予報」が近年高い精度で行えるようになり、水産業や海運業の効率化、気候変動や海洋生態系の問題の解明などに貢献できるようになりました。日本国内では、海洋研究開発機構(JAMSTEC)の他に複数の大学・研究機関などが独自の海中天気予報を提供しています。JAMSTECで実施している海中天気予報は、23年前(2001年12月)に始まり、今ではほぼ毎日、2か月先までの日本周辺の海の状態を予測した結果を一般公開しています(www.jamstec.go.jp/jcope)。JAMSTECでは特に黒潮など日本近海の海流の予報に精力的に取り組んでいます(図1)。予測が2か月先までと限定される理由は、4.1節で示しますが、今のところ黒潮の精度の

\* 2024年1月31日受領 2024年9月20日受理  
著作権：日本海洋学会, 2024年

1 国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)アプリケーションラボ

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

† 連絡著者：林田 博士

e-mail: hakaseh@jamstec.go.jp

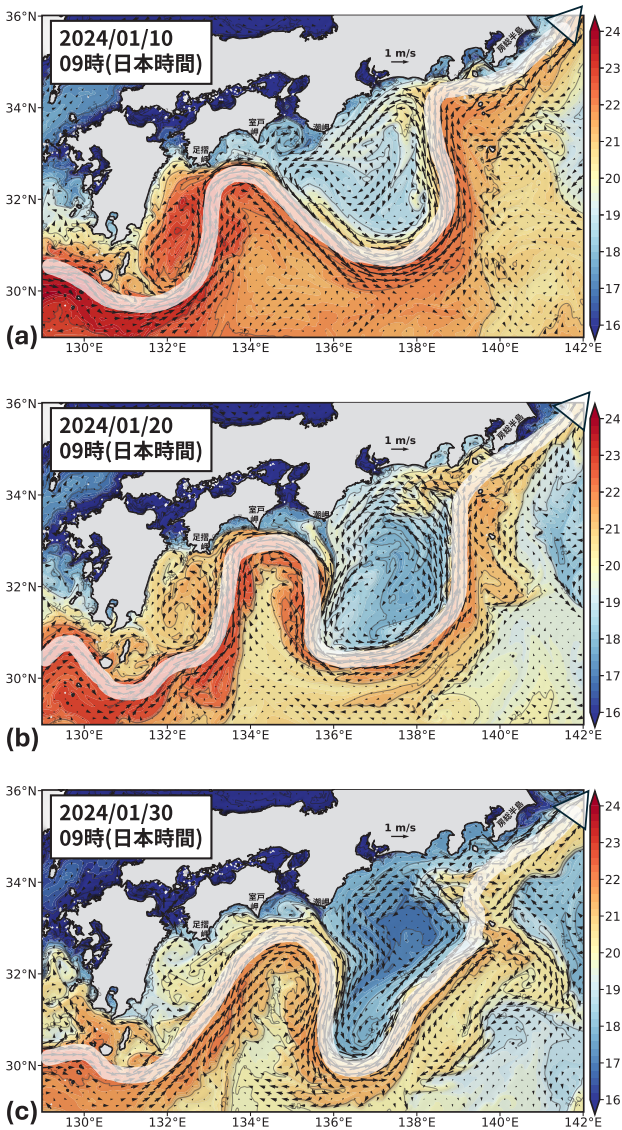


図1 日本近海太平洋側における黒潮流路の予報。(a), (b), (c)はそれぞれ2024年1月10, 20, 30日(全て午前9時現在)における数値モデルJCOPE-T-DA(表1)が予報した海面近くの流れと水温,そしてそれらに基づいた黒潮の予報流路(白線)を表します(予報開始は2024年1月10日午前0時)。海面近くの流れ(メートル毎秒)は矢印(ベクトル)で表され,水温(°C)は色で表されます。参照: [www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/?p=13215](http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/?p=13215)

良い予報が可能であるのが2か月程度であるためです(Miyazawa *et al.*, 2005; Usui *et al.*, 2006)。

なお,本稿では予測と予報という一見よく似た単語が

頻繁に登場します。ここでは,予測とは「数値モデルを利用して解いた天気の状態」,予報とは「予測結果を解釈した情報」と定義します。天気予報を例に挙げると,真夏日は「気温の予測」をもとに決めた「最高気温が30°C以上の日」という予報です。

海中天気予報のもととなる予測を数時間から1日で定期的実施するためには,スーパーコンピュータ(スパコン)と呼ばれる高性能計算機が必要です。今世紀初めから海中天気予報をJAMSTECで開始できるようになったことの一因に,地球シミュレータと呼ばれる世界的に見ても高性能な日本製スパコンの誕生があります([www.jamstec.go.jp/es/jp/system/system.html](http://www.jamstec.go.jp/es/jp/system/system.html))。2002年から運用を開始した地球シミュレータは,いくつもの改良を重ね,現在は1秒間に最高1.95京( $10^{16}$ )回の計算能力を誇る第四世代としてJAMSTECの海中天気予報を支えています。改良によって地球シミュレータの計算速度が上がることで,私たちは海中天気予報をより広く,また,細かい時空間スケールで実施することが可能となりました。

2015年に国連総会で採択された「持続可能な開発目標(SDGs)」の1つに「海の豊かさを守ろう」があります。この目標達成のために,2021年から「持続可能な開発のための海洋科学の10年(2021年~2030年)」が始まり,世界で様々な取り組みが行われています([www.oceandecade.jp](http://www.oceandecade.jp))。この海洋科学の10年の流れの中で,私達は次の2つの目的を持ち,本解説論文を執筆しました。1つは,多くの人に海中天気予報という研究分野を知ってもらうきっかけをつくることです。そしてもう1つは,海中天気予報を理解してもらい,予測・予報データを活用してもらうことです。

専門用語については本稿ではできるだけ簡潔な説明に留めましたが,詳しいことを知りたい人のために随所で参考文献を引用しています。本論文が読者にとって海中天気予報を知るきっかけ,あるいは海中天気予報に関する有益な情報源となれば幸いです。

本論文の構成は次のとおりです。2節は「入門編」と題し,予測を行う数値モデルの仕組み,予測に取り込む観測データ,予測に用いる様々な方法について紹介します。3節「応用編」では,ブログとYouTubeを使った予報の配信,(気象の)天気予報への応用,地球全体の



2年先までの予測への展開について解説します。4節「展望編」では、予測の誤差を考慮した技術開発と海洋生態系という新たな分野での予測に向けた取り組みを紹介いたします。最後の5節では、本論文のまとめと予測・予報データの入手方法を記述します。

## 2. 入門編

### 2.1. 入門編：予測式は流体力学と微分積分の応用

大気や海の流れの予測は、流体の運動を記述する微分方程式（ナビエ・ストークス方程式）を解くことで行います。ただし、数値モデルを使って微分方程式を解くときは、厳密な解（解析解）を求めずに、近似的な解を得ます。簡単な例として、「 $dy/dt=t+1$ の一般解を求めよ」という問題を考えてみます。鉛筆とノートを使って厳密な解を求める場合には、解は「 $y=t^2/2+t+C$ （ $C$ は任意定数）」となります。これに対して、数値モデルによって近似的な解を計算するときには、この問題をコンピュータが解けるように「 $(y_{(t+Dt)}-y_{(t)})/Dt=t+1$ 」という差分方程式に置き換えます。そして、 $Dt$ をできるだけ小さくして「 $y_{(t+Dt)}=y_{(t)}+(t+1)Dt$ 」を繰り返し計算することで、近似解を得ます。

海中天気予報でも、近似解を求める上記のような数値積分をしていますが、実際には複数の方程式を連立して解いたり、誤差を少なくするために計算方法を工夫したりして、非常に複雑な計算をしています。下記の式は、実際の海洋数値モデルで解かれている方程式の一例です：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right).$$

この式は、東西方向（ $x$ ）の流速（ $u$ ）の変動を表します（Cushman-Roisin & Beckers, 2011）。上記式の各項は左から、時間微分、東西移流、南北移流、鉛直移流、コリオリの力（地球の自転により水平方向の流れが北半球では右にそれる見かけの力）、圧力傾度力、粘性を表します。 $f$ はコリオリパラメータ、 $\nu$ は動粘性係数を表します。これに加えて、南北方向（ $y$ ）の流速（ $v$ ）と鉛直方向（ $z$ ）の流速（ $w$ ）の変動を表した方程式が存在します。

上記の式には海水の密度（ $\rho$ ）と圧力（ $p$ ）も含まれます。したがって、方程式を解くためには流速だけでなく、密度や圧力を決める水温と塩分についても、同様の予報式（移流拡散方程式）を解く必要があります。海水の密度（ $\rho$ ）は、「海水の状態方程式」と圧力・水温・塩分の予測値を用いて診断的に求めます（河野, 2010）。

また、海中天気予報では、質量保存の法則にもとづいた連続方程式や、数値モデルによっては海面変位も解く必要があります。さらに、流れに影響を与える外力（外から加えられる力）の効果も計算しなくてはなりません。代表的な外力は、海上で吹く風による応力や、海水そのものにかかる重力があります。太陽から届く短波放射・大気からの長波放射・海洋と大気との温度差によって生じる熱交換なども、水温の変化を通して、流れを変化させます。一方、蒸発・降水・河川からの淡水流入などは、塩分を変化させます。なお、外力の計算に重要な海上風や海上気温などは、大気モデル（天気予報に用いる数値モデル）で計算された予測値を用いています。

このように、海の天気予報を実現するためには、非常に複雑な方程式を、同時に多数計算する必要があります。これが、地球シミュレータのような高性能な計算機が、海中天気予報で必要となる理由です。なお、流体力学の方程式を数値的に解く方法は様々なものが知られており、それだけでも1冊の本になるほど奥が深いです。興味がある人は、専門の教科書（例：Kämpf, 2009；二宮, 2004；藤井, 1994）をご参照ください。

### 2.2. 入門編：予測向上の鍵は観測データ

微分方程式を使って未来の状態を計算するためには、初期値と境界値と呼ばれる値を数値モデルに入力する必要があります。ここでいう初期値は、予測開始時点の水温、塩分、流速といった海の状態を表したデータです。一方、境界値は、気温、降水量、気圧、風速といった海面に接する大気状態のデータです。両者は予測結果を大きく左右するため（初期値に関しては4.1節、境界値に関しては3.3節参照）、より現実的なデータを与えることが予測精度の向上につながります。ここで鍵を握るのが、地球観測衛星や船舶などからなる海洋観測システムです。海中天気予報では、数値モデルと海洋観測システ

ムから得られたデータを組み合わせた現実的な初期値を作成することによって、予測精度を上げてきました (Miyazawa *et al.*, 2021)。

特に「アルゴ」と呼ばれる水温・塩分・圧力を海面から水深 2,000m まで浮き沈みを繰り返しながら 10 日間隔で計測し、データを衛星経由で準リアルタイムに提供できるフロート（浮き）は、ここ 20 年で飛躍的に数が増加し、海洋の状態をより正確に予測に反映させることを可能としました (図 2; [www.jamstec.go.jp/argo/j](http://www.jamstec.go.jp/argo/j))。また近年は、水温・塩分・圧力を計測できるアルゴ (Core アルゴ) に加え、生態系や化学物質に関するデータも同時に計測できる生物地球化学 (BGC) アルゴ、水深 2,000m を超えた深海の状態を計測できる Deep アルゴを用いた観測が活発に進められています。これら多種多様なフロートによる観測は、今後の海中天気予報の可能性を広げることが期待されています (4.2 節参照)。

### 2.3. 入門編：予測の方法は適材適所

海中天気予報と一括りに言っても、実際には目的と用途に応じて様々な数値モデルを用いて情報を提供します。JAMSTEC では、日本沿海予測可能性実験 (the Japan Coastal Ocean Predictability Experiment; JCOPE) という枠組みのもと、現在は 5 つの数値モデルを運用しています。これらのモデルの主な違いは、予測の対象とする領域 (図 3)、解像度、期間、そして予測を行う頻度です (表 1)。領域は、湾ぐらいの広さのものから北西太平洋を覆う広さのものまで存在します。解像度は、黒潮のような大きな海流や中規模渦 (直径 100–300km で「メソスケール渦」とも呼ばれる; Sasaki *et al.*, 2014) を表すことができる 10km 程度のものから、より細かい流れやサブメソスケール渦 (1–50km) を捉えられる設定が存在します。予測期間は、数日から 2 か月先までの設定があります。これらの設定は、目的と用途の他に、計算資源と実用性のバランスを考慮して決定する必要があります。例えば、北西太平洋という広い海域の予測を行う場合、比較的解像度の粗い数値モデル JCOPE2M を用いて 2 か月先まで予測します。一方、東京・相模・駿河湾のような特定地域の細かい海流を予測するためには、高解像度の数値モデル JCOPE-T-TSS500 を用いますが、計算資源上の理由か

ら長期間の予測を実施することは難しく、予測期間は 5 日先までに限定されています。

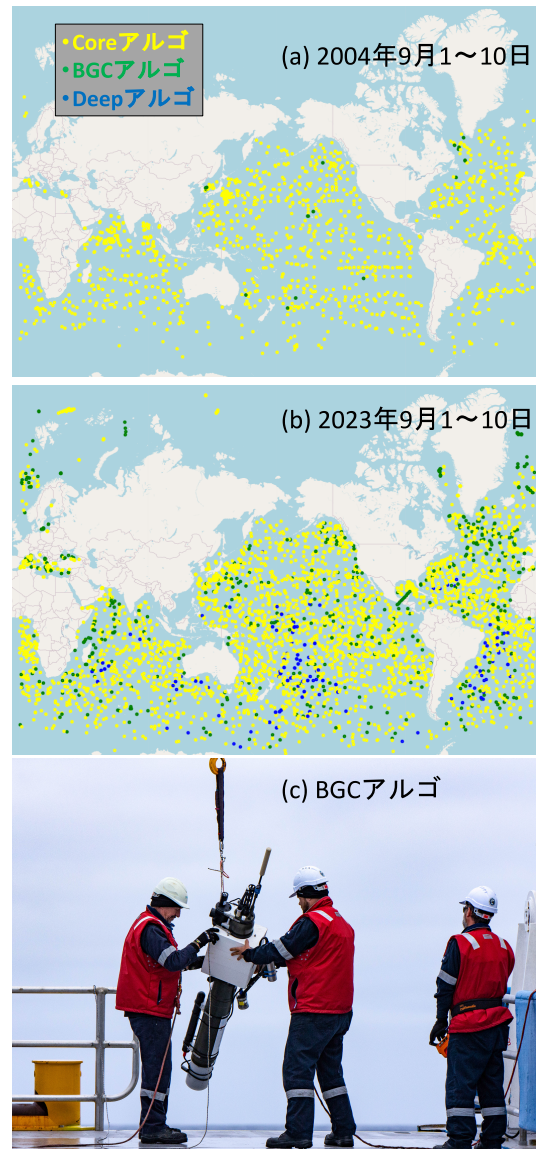


図 2 アルゴ観測網の過去 20 年における進展。(a) 2004 年 9 月 1～10 日と (b) 2023 年 9 月 1～10 日に Core アルゴ (黄), BGC アルゴ (緑), Deep アルゴ (青) により海の鉛直プロファイルが観測された地点 (Tucker *et al.*, 2020)。(c) オーストラリアのアルゴチームにより投入された BGC アルゴ (タスマニア大学海洋南極学研究所 Jakob Weis 提供)。

### 3. 応用編

#### 3.1. 応用編：黒潮親潮ウォッチ

海中天気予報は、様々な形で一般公開されています。ここではその例として、毎週水曜日に更新されるブログ「黒潮親潮ウォッチ」(www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch) について紹介します。黒潮親潮ウォッチは、海中天気予報を「長期予測」と「短期予測」に分けて、それぞれの予測結果と予報から分かる海洋現象について取り上げます。ここでの「長期予測」は2か月先までの予測(JCOPE2Mを使用)、「短期予測」は20日先までの予測(JCOPE-T-DAを使用)にもとづいています(図3;表1)。両予測結果は、

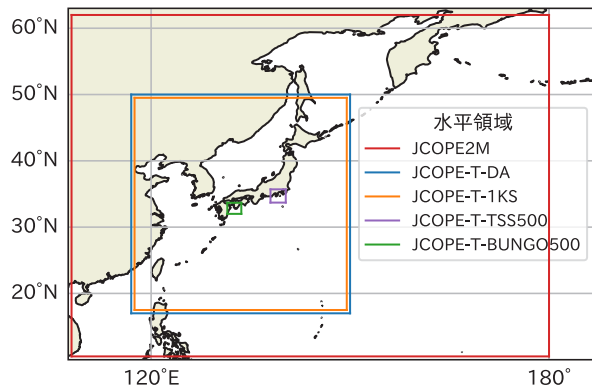


図3 海中天気予報で用いる数値モデル JCOPE の設定領域。

動画として可視化し、専用の YouTube チャンネルで公開しています(www.youtube.com/@APLJAMSTEC)。

黒潮と親潮は、日本近海太平洋側の海洋環境を支配する海流です。両海流の動向を監視することで、日本の水産業や海運業を支援する情報を提供することができます。近年、黒潮の流路が本州南で大きく南下した「黒潮大蛇行」という現象が数年間続いており注目を浴びています。本稿を執筆している2024年7月現在は、これまで観測がある1965年以降、最も長期間(7年)続いている大蛇行の真っ只中であり、これまでに漁業や気象など多方面に及ぶ影響が示唆され、メディアでも大きく報じられています(www.tokyo-np.co.jp/article/271406)。現在の黒潮大蛇行が発生した2017年以降、黒潮親潮ウォッチでは、長期予測をもとにした大蛇行の見通しと、短期予測をもとにした急潮(沿岸域で生じる突発的な速い流れ)について継続的に解説してきました。今後も、大蛇行と急潮の予測技術を向上させながら、有益な情報を提供していきます。

黒潮親潮ウォッチでは、地球温暖化の影響で世界中の海域において近年増加傾向にある海洋熱波についても再解析に基づき解説しています。再解析とは、予測を行った時よりもより多くの観測データ(準リアルタイムでは得られなかった船で観測したデータなど)を数値モデルに取り込むことで、より現実的な海洋の過去の状態を再現する手法です。

海洋熱波は、異常な高水温の状態が続く現象のことを

表1 海中天気予報で用いる数値モデル JCOPE の設定比較。

数値モデル (設定)	解像度	予測期間	予測の実施頻度
JCOPE2M (2 <sup>nd</sup> generation Modified)	9km (1/12°)	60日先	4日毎
JCOPE-T-DA (Third generation-Data Assimilation)	3km (1/36°)	20日先	週5日(月～金)
JCOPE-T-1KS (1 Kilometer Scale)	1km (1/120°)	10日先	週5日(月～金)
JCOPE-T-TSS500 (Tokyo-Sagami-Suruga bay at 1/500°)	200m (1/500°)	5日先	週5日(月～金)
JCOPE-T-BUNGO500 (BUNGO channel at 1/500°)	200m (1/500°)	5日先	週5日(月～金)



指します（統計的に10%以下の確率でしか起こらない高温が5日以上続いた状態と定義, Hobday *et al.*, 2016）。一方で, 異常な低温状態が続く現象は海洋寒波と呼ばれます（10%以下の確率でしか起こらない低温が5日以上続いた状態と定義）。海洋生物の多くはそれぞれが適した水温環境に生息するため, このような水温の極端現象は, 生物多様性や生態系を脅かします (Smale *et al.*, 2019)。例えば, 2016年にオーストラリア・グレートバリアリーフで起きた海洋熱波は, 記録的なサンゴの白化現象および大量死を引き起こしました (www.doi.org/10.1038/ndigest.2018.180707)。

日本近海においては, 2010年代に北海道・東北沖で海洋熱波がたびたび発生したこと, そしてその要因は, 黒潮由来の暖かい渦の北上により, 同海域における冷たい海水を運ぶ親潮の勢力が弱まったことであるということが明らかになりました (www.jamstec.go.jp/j/about/press\_release/20210114; Miyama *et al.*, 2021)。海洋熱波・寒波の発生状況の解析結果からも, 黒潮と親潮の位置関係が熱波発生に関係していることが見て取れます (図4)。

また, この事例では近畿地方の南側で極端な海洋寒波が発生していますが, これは大蛇行によって発生した冷水渦によるものであるということが, 寒波と黒潮の位置関係から推測されます。このように, 日本近海太平洋側における海洋熱波・寒波の発生は, 海流のふるまいと強く結びついており, 海中天気予報が海洋熱波・寒波の発生予測に有効であると考えられます。

### 3.2. 応用編：天気予報に役立つ

日本では, しばしば夏季に豪雨が発生します。地球温暖化によって地球の気温は上昇し続けていますが, この温暖化が原因で, 日本で発生する豪雨は昔よりも激しくなり, 被害も大きくなってきています (www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html)。

豪雨のもととなっているのは雲であり, さらに言えば雲のもととなる水蒸気です。海が暖かいと多くの水蒸気が, 冷たいと少しの水蒸気が海から発生します。そしてこの水蒸気は, 日本近海のみならず, 遠く離れた海からも日本に運ばれてきます。したがって, 豪雨をもたらす雲や水蒸気のもととなりうる海の状態を海中天気予報か

ら正しく検知することができれば, 早期に正確な豪雨の予測が可能になります。これまでは, 海の状態が天気予報 (以下, 「天気予報」は通常天気予報のことを指し, 海中天気予報とは区別します) に与える影響は小さいと

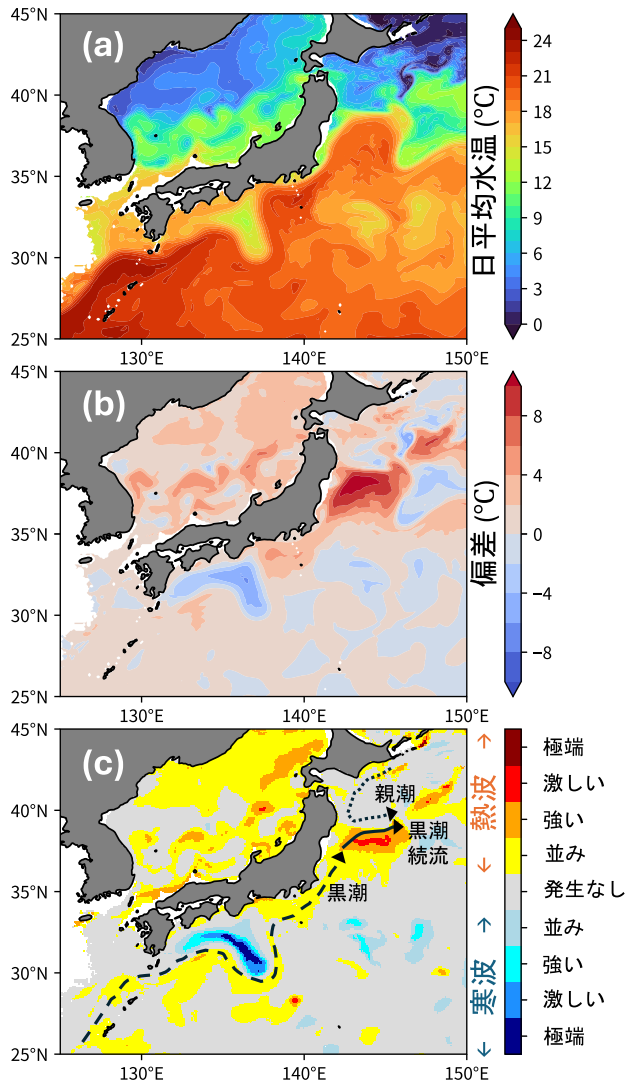


図4 再解析にもとづいた2023年4月19日の水深100mにおける (a) 日平均水温, (b) 水温の平年値からの偏差, (c) 海洋熱波・寒波の分布。色は海洋熱波 (赤系) と寒波 (青系) の発生場所と強度を表します。強度は, 偏差が平年値と海洋熱波の基準値の差の2倍未満 (並み), 2倍以上3倍未満 (強い), 3倍以上4倍未満 (激しい), 4倍以上 (極端) とカテゴリー化しています (Hobday *et al.*, 2018)。再解析には JCOPE2M を使用。参照: www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/?p=12469

考えられてきたため、海中天気予報は天気予報には活用されてきませんでした。JAMSTECでは、海中天気予報を天気予報に活かすべく、新たな試みを始めています。

例えば2020年に西日本で起こった豪雨だと、日本の南西から流れ込んだ「大気の流れ」と呼ばれる水蒸気の流れが豪雨を引き起こす直接的な原因となっていました。この大気の流れの流れる方は、海面水温と海上の気圧配置（梅雨の時期には日本南部では暖かい高気圧、日本北部では冷たい高気圧が現れるパターン）によって決まっています。通常天気予報だと、予報開始時の海面水温が予報期間中に平年並みの変化をすると仮定して天気予報を行います。この海面水温は平年値からのずれ（偏差）を予報開始時の値で固定して計算をするということで、偏差固定の海面水温と呼ばれます。しかし、このやり方だと本当の（例えば2020年の）海面水温を正しく予測できないので、海面水温に影響を受ける気圧配置と大気の流れの動きを正しく予測できず、結果として豪雨をうまく

く予測できません。

実際に2020年の事例（図5a）を対象に、天気予報だけを行った場合（図5b）と、海中天気予報を組み合わせると天気予報を行った場合（図5c）を比較しました。予報開始日は6月30日で、短い期間であれば差は大きくありませんが、時間が経つと、前者（通常天気予報の方法）では豪雨発生をうまく予測できなくなります。しかし、海中天気予報を加えるとうまく予測できることが分かりました（Baba, 2022）。これは、夏の気圧配置パターンのときに豪雨が発生する事例の1つで、他の同様の事例でも海中天気予報を組み合わせることで豪雨をうまく予測できることが分かっています（Baba, 2023）。さらに、豪雨のみならず、台風などの予測についても、海中天気予報が役立つ可能性があります。このようにして、より正確な天気予報を行い、人々の命や財産を守る情報が提供できるように、私達は国内外の研究所とも連携して気象・気候予測技術の開発を続けています。

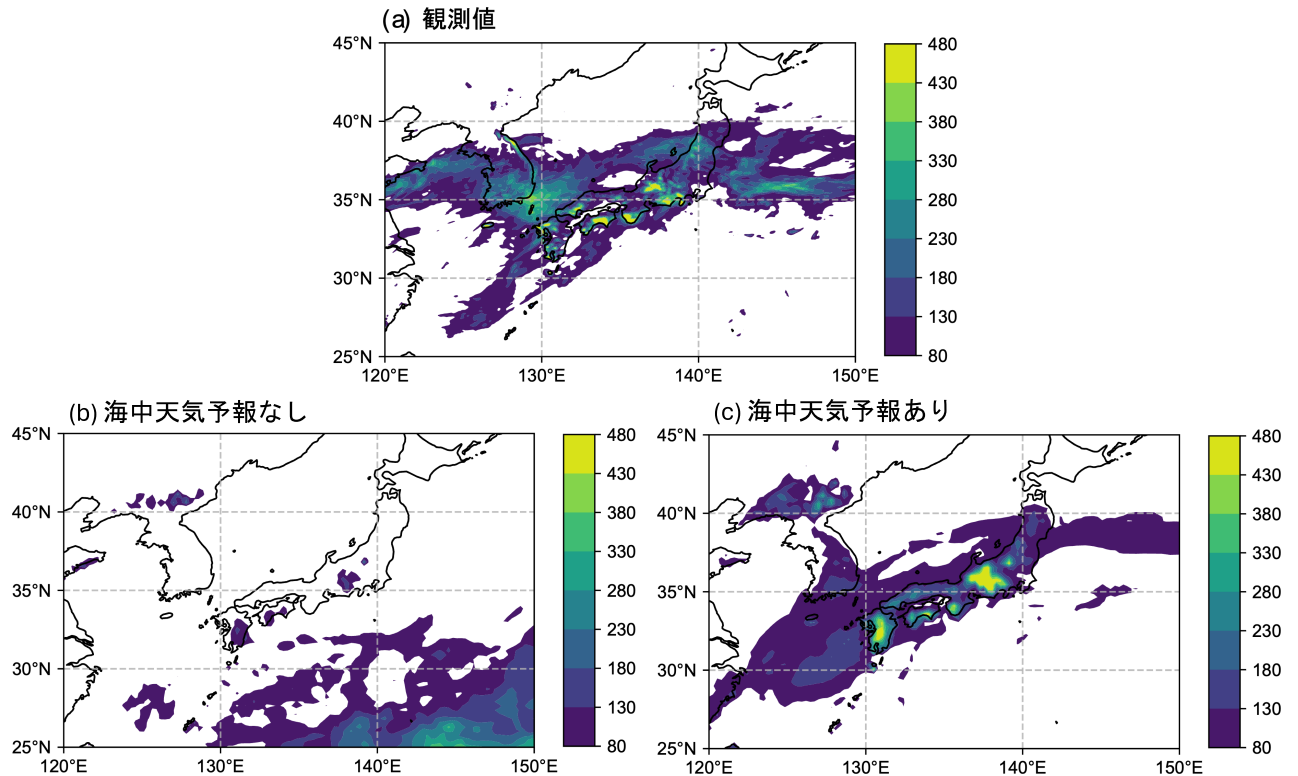


図5 2020年7月20日から31日にかけて降った総雨量（mm）の比較。(a) 観測値，(b) 偏差固定の海面水温を与えた場合の予測値，(c) 海中天気予報にもとづいた海面水温を与えた場合の予測値。なお、予報開始日は6月30日です。参照：[www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20220517/index.html](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20220517/index.html)

### 3.3. 応用編：日本周辺海域の2か月予測から世界の海の2年予測へ

2.3節でも述べたように、予測の対象となる現象の時間的な長さや空間的な広さは多岐に渡ります。これまで紹介してきたJAMSTECの海中天気予報では、時間的には2か月先、空間的には北西太平洋までに限定されています(図3;表1)。

近年、全世界の海洋の2年先までの予測を対象とした数値モデルが開発されました(Kido *et al.*, 2022)。このモデルは、世界の様々な海域に存在する強い流れや渦のふるまいを観測と合うように再現することができるほか、黒潮の流れや渦の強さが平年より強くなるのか、あるいは弱くなるのかを2年先まで予測できるようになりました(Kido *et al.*, 2023)。2年先までの黒潮のふるまいには、黒潮から遠く離れた東方の海域での海流の蛇行や渦を伴った水温と塩分の分布が時間をかけて伝わってくるのが重要な役割を果たしていることが明らかになりました(Kido *et al.*, 2023)。また、境界値(大気の状態や河川流量等)の年ごとの変化も予測に大きく影響を与えます。したがって、長期的な海洋予測は、初期値と境界値の両方の精度が求められる非常に挑戦的な課題です(Boer *et al.*, 2016)。JAMSTECでは今後、このモデルも他のモデル(表1)のように定期的に予測を実施することを視野に入れた開発を続けていきます。

## 4. 展望編

### 4.1. 展望編：予測の誤差を考慮した技術開発

予測は必ず誤差を伴います。原因は大きく分けて2つあります。1つは、予測に使う数値モデルは解像度以下の小さな現象(例えばサブメソスケール渦;2.3節)の影響を正しく表現できないためです。

そしてもう1つは、数値モデルに与える初期値や境界値に誤差が含まれていることです。こうした誤差は、最初は小さくても時間と共に大きくなる場合があります。2.1節で述べた通り、海洋の時間変化を記述する方程式は非常に複雑であることから、初期値の誤差がほんのわずかであっても、時間が経つにつれてどんどん誤差

は拡大していくことが知られています(いわゆる「バタフライ効果」)。したがって、予測結果を公表するときは、予測の誤差を考慮した不確実性もあわせて伝えることが重要です。

不確実性とは、降水確率(予報を100回行った場合に1mm以上の雨が降る回数;www.jma.go.jp/jma/kishou/ know/kisetsu\_riyou/explain/prob\_precip.html)や台風の子報円(台風の中心が通過する確率が70%と予測される地域;www.jma.go.jp/jma/kishou/ know/typhoon/7-1.html)のような、予報が当たる確率を具体的に数値で表したもの(定量化したもの)のことです。不確実性を定量化するために、天気予報では次に述べるアンサンブル予測という手法が用いられます。一方、現在の海中天気予報では、計算資源と技術的な問題からアンサンブル予報は実施されておらず、予報の不確実性を提供することができていません。そこで、JAMSTECでは現在、海中天気予報のアンサンブル化を図っています。

アンサンブル予測とは、複数の予測を実施することで得られた結果のばらつきをもとに、統計的に予測の誤差を定量化する手法です。現在開発中のアンサンブル予測を例に、もう少し具体的にその手法を説明します(Miyazawa *et al.*, 2024)。通常の海中天気予報では、最適化された初期値を用いて予測を実行します。しかし、最適化するために使う観測データには誤差が含まれています。そこで、これらの誤差を考慮した上で初期値を複数作成し、それぞれの初期値を使って複数の予測を実行します。各個別の予測は、アンサンブルメンバーと呼ばれ、全ての予測結果を平均した値をアンサンブル平均と呼びます。例として、初期値の異なる23のアンサンブルメンバーによる黒潮流路の2か月先までの予報結果を図6に示します。予測開始時の黒潮流路は、アンサンブルメンバー間で大きな違いはみられません(青線のばらつきが小さい;図6a)。しかし、予測開始から1か月(図6b)、2か月(図6c)と経過すると共に、明らかにメンバー間の相違は増大します(青線のばらつきが大きくなる)。したがって、1つのアンサンブルメンバーによる現在の海中天気予報では、初期値の誤差が時間と共に予測に大幅な不確実性をもたらすため、高い精度で黒潮流路の予報を行えるのは2か月先程度が限界となっています。



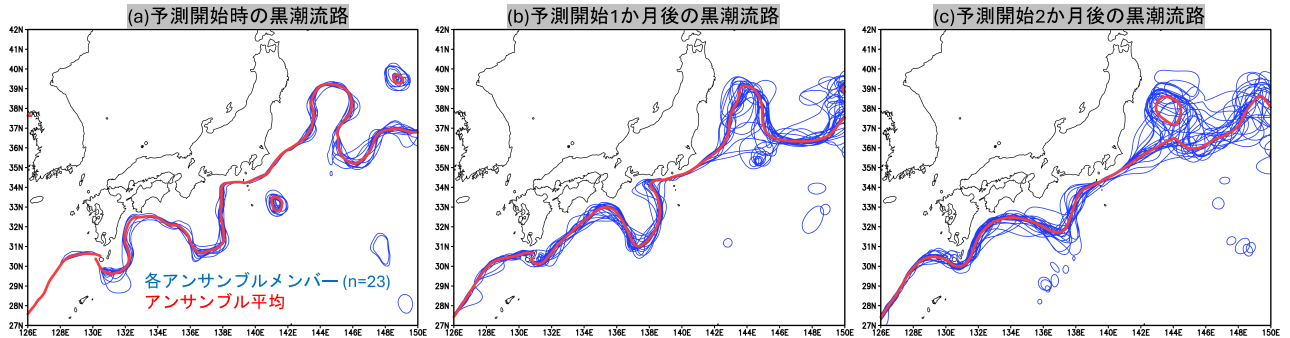


図6 黒潮流路のアンサンブル予報。現在開発中のアンサンブル予測による (a) 予測開始時 (2023年8月29日), (b) 1か月後, (c) 2か月後の黒潮流路。黒潮流路は海面高度0.15mの等高線で表し, 各アンサンブルメンバーによる予報流路 (青) と全アンサンブルメンバーを平均した予報流路 (赤) を示します。時間の経過とともに黒潮流路は変化しますが, 1か月, 2か月後に予測された流路はアンサンブルメンバー間で大きなばらつきを示しています。参照: Miyazawa *et al.* (2024)

天気予報の使い方については, 私たちは既に身につけています。例えば, 明日の降水確率が30%だとしたら傘を持って外出するかどうかという問いに対して, 私たちは自分なりの経験をもとに, 天気予報の不確実性 (降水確率) を活用するでしょう。海中天気予報の活用にあたっては, 予測結果をどのように加工して役立つ予報にしていくなかについてはまだ検討段階です。利用者の皆さんと協力して有益な不確実性の情報を作り上げていく必要があります。

#### 4.2. 展望編: 海の開花・満開予報

「春と言えば何を連想しますか?」と聞かれれば, 「桜」と答える人が多いでしょう。桜は年に一度, 春先に開花する日本を代表する広葉樹です。桜の開花・満開情報は, ニュースでも取り上げられるほど, 日本人にとって大変関心深いものです。桜の開花予報は, 天気予報による気温の変動にもとづいて行われています ([www.weathernews.jp/s/topics/201902/130235](http://www.weathernews.jp/s/topics/201902/130235))。

海には桜は存在しませんが, 植物プランクトンが海の中を浮遊し, 光合成によって増殖することで海を緑色に染める「ブルーム」という現象が発生します。ブルームは多くの海域では桜と同じ春先と秋頃に, 年に1~2回ほど発生します。

ブルームの発生は, 光合成を左右する日射量と栄養塩濃度によって決められます。栄養塩とは, 植物プランクトンの成長に必要な海水中の塩類のことを指します。こ

の2つの要素が十分に足りた時, ブルームが始まり (開花), どちらか一方が足りなくなった時, ブルームはピーク (満開) に達し, 終わりを迎えます。春先のブルームは通常, 冬から春にかけて日射量と日照時間が増えることにより始まり, 光合成によって消費された栄養塩濃度がある程度減るとピークに達し, 終了します。

海の世界連鎖は植物プランクトンから始まります (図7)。そのため, ブルームにより植物プランクトンが増えれば, 他の海洋生物も増えるため, 魚介類をはじめとした海産物の収穫量が増えることが見込めます。そこで私たちは, ブルームの開花・満開予報を新たな情報として加えた海中天気予報の開発を進めています。

植物プランクトンブルームの開花・満開予報を実施するためには, まず, ブルームを取り巻く栄養塩, 植物プランクトン, 動物プランクトン, デトリタス (プランクトンの死骸や排泄物) といった海洋生態系における食物連鎖 (特に食物連鎖の始めの方にあたる低次生態系; 図7) を表した方程式を, 海中天気予報の数値モデルに加える必要があります。また精度の高い開花・満開予報を実現するためには, 生態系変数の初期値を最適化する方法を開発する必要があります。生態系の観測データは, 水温や塩分などのデータと比べ, 桁違いにデータ量が少ないため (例えば図2bのCoreアルゴとBGCアルゴのプロファイル数の比較), 従来の最適化手法だけでなく, 新たな手法を模索する必要があります (Fennel *et al.*, 2019)。

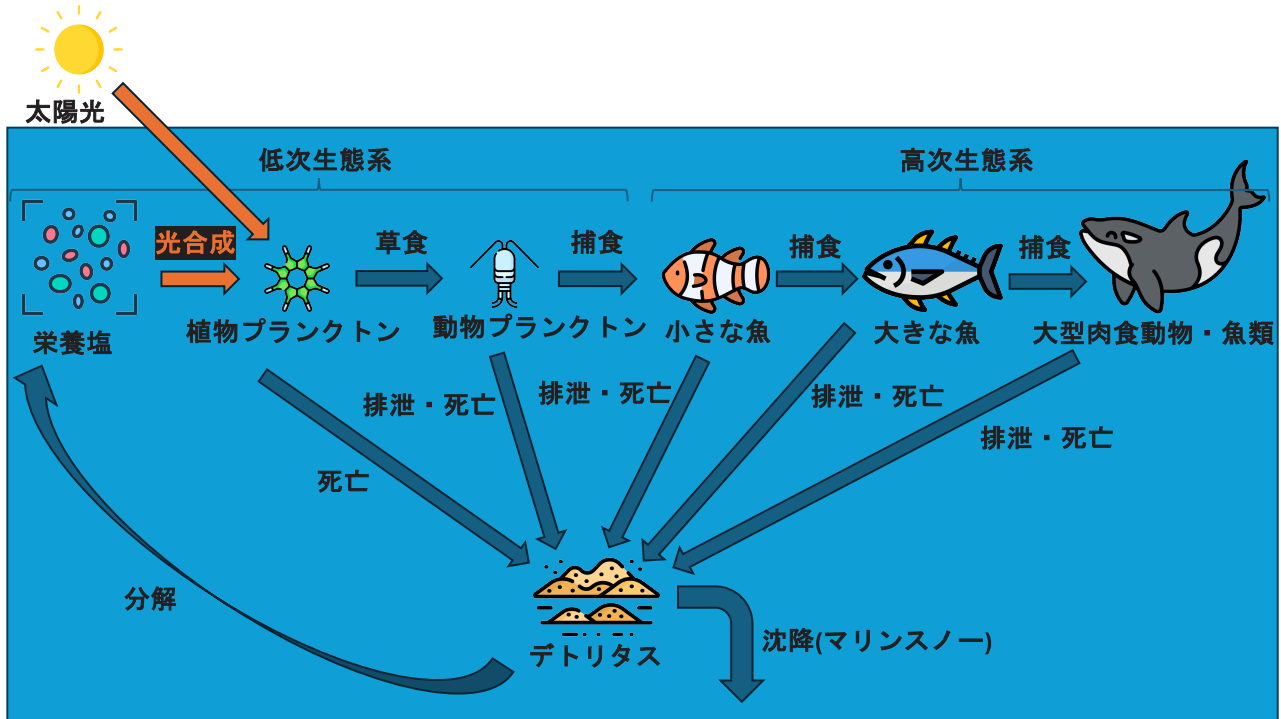


図7 海洋生態系の概要。矢印は、海中での食物連鎖過程を表します。オレンジの矢印は、海洋生態系の始まりを担う植物プランクトンによる光合成を示します。

### 5. おわりに

2か月先までの予測をもとにした海中天気予報は、2001年の運用開始から今日まで、様々な形で海洋研究の発展や海洋事業の支援に貢献してきました。2023年までに海中天気予報のデータを活用して112本の論文が出版されています(図8)。海中天気予報のデータは、平均して毎年約55件(2017-2023年)、すなわち週1件以上の頻度で研究のために提供されてきました。しかしながら「海中天気予報の認知度はまだまだ薄く、もっと多くの人に海中天気予報を知ってほしい、使ってほしい」という想いのもと、本稿では、海中天気予報をできるだけ簡素に解説しました。このような取り組みは、2021年から始まった「持続可能な開発のための国連海洋科学の10年」で掲げられた「7つの海(目標)」のうちの2つ「予測できる海」と「万人に開かれた海」へ貢献するものであると考えています。

入門編では、流体力学の概念と微分積分の応用が海中天気予報の基盤となっていることを紹介しました。しか

し実際には、物理と数学だけではなく、計算科学や統計学も活用されていて、さらにこれからは生物と化学も活用されていくこととなります。

応用編では、海中天気予報の多方面に渡る貢献を3つの事例をもとに解説しました。海中天気予報は、定期的な情報提供だけにとどまらず、一般向けに解説した情報サービスの提供や他分野への展開を実施してきました。他にも、海底火山から噴出した軽石([www.jamstec.go.jp/j/pr/topics/sakulab-01/3](http://www.jamstec.go.jp/j/pr/topics/sakulab-01/3)), プラスチック([www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20220113](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20220113)), 放射性物質([www.radioactivity.nra.go.jp/ja/docs/rel-info/various-simulations/simulate](http://www.radioactivity.nra.go.jp/ja/docs/rel-info/various-simulations/simulate))の追跡などにも応用されてきました。今後も海中天気予報が活用される場は拡大する可能性があります。

展望編では、海中天気予報の不確実性の定量化と精度向上に繋がる「アンサンブル化」と、海洋生態系予測の導入の2つを紹介し、新たな海中天気予報の方向性について述べました。次世代の海中天気予報は、漁業や養殖業の効率化と持続可能性を高めることで、我が国の水

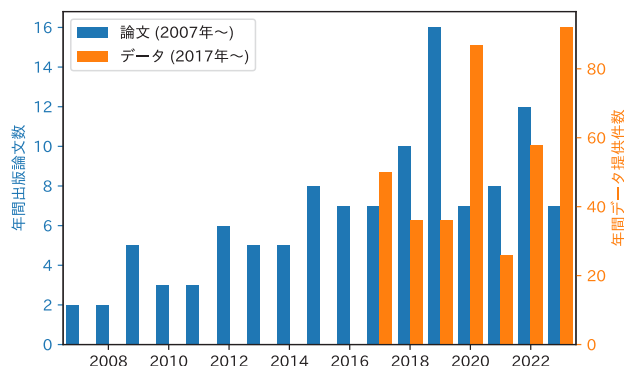


図8 海中天気予報のもととなる日本沿海予測可能性実験 (JCOPE) のデータを使った査読付き学術論文の年間出版数 (青) とデータ提供件数 (オレンジ)。

産業や魚食文化維持へ貢献することが期待されます。このような長期的な目標達成のためには、数値予測モデルの開発メンバーが代わっても開発が続けられる、よく整理されたモデル開発環境の構築が必要です (坂本ら, 2018)。私達は、数値予測モデルのソースコードの開発を git と呼ばれるバージョン管理システムを用いて進めることによって、ソースコードの共有・並行開発を円滑にし、開発を行っています。

最後に、海中天気予報の可視化サイトおよびデータの入手方法を紹介します。JCOPE-T-DA (図3;表1) を用いた20日先までの海中天気予報は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が提供している「JAXA ひまわりモニタ」から見る事ができます ([www.eorc.jaxa.jp/ptree/ocean\\_model/index\\_j.html](http://www.eorc.jaxa.jp/ptree/ocean_model/index_j.html))。他の予測設定 (図3) を用いた海中天気予報は、JAMSTEC の公式ホームページで公開されています ([www.jamstec.go.jp/jcope](http://www.jamstec.go.jp/jcope))。海中天気予報のデータは、非営利・学術利用の目的であれば、誰でも無償で入手できます (営利目的の場合はフォーキャストオーシャンプラスにて入手可能です; [www.forecastocean.com](http://www.forecastocean.com))。入手できるデータは、予測データのみならず、3.1節で述べた再解析データも存在します (実際に研究で利用されているのは、再解析データが主です)。入手できるデータの期間・領域・変数などの詳細は、上記 JAMSTEC のホームページに記載されています。今後は、予測データの解析方法を紹介したチュートリアルなどを作成していく予定です。近い将来、海中天気予報のデータが夏休みの

自由研究や大学の授業課題等でも活用されることを期待しつつ、これからも海中天気予報の活動を展開していきます。

## 謝辞

本稿執筆のきっかけは、日本海洋学会将来構想ワーキンググループの「一般向けの記事を書こう」という取り組みでした。図7は Flaticon のアイコンを使い作成しました ([www.flaticon.com](http://www.flaticon.com))。海中天気予報のデータ提供数 (図8) は、章若潮氏によって集計されました。本稿の作成にあたっては、2名の匿名査読者と、以下7名の若手研究者の皆様から貴重な助言を頂きました (敬称略: 白井健人, 永井光洋, 田中瞳, 田村 (安井) 沙織, 藤島遼人, 横田百音, 渡部陽大)。深く感謝申し上げます。本研究は JSPS 科研費 (JP24H02226, JP20H01968, JP19H05697, JP24H02227, JP21H01444) および中島記念国際交流財団の助成を受けたものです。

## References

- Baba, Y. (2022): Importance of ocean prediction for heavy rainfall prediction over Japan in July 2020. *Atmos. Sci. Lett.*, 23, e1099. doi:10.1002/asl.1099
- Baba, Y. (2023): The Merits of Ocean Prediction for the Prediction of 2010, 2016, and 2021 Summer Heavy Rainfall Events in Japan. *Tellus A*, 75, 50-68. doi:10.16993/tellusa.1147
- Boer, G.J., D.M. Smith, C. Cassou, F. Doblas-Reyes, G. Danabasoglu, B. Kirtman, Y. Kushnir, M. Kimoto, G.A. Meehl, R. Msadek, W.A. Mueller, K.E. Taylor, F. Zwiers, M. Rixen, Y. Ruprich-Robert, and R. Eade (2016): The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 3751-3777. doi:10.5194/gmd-9-3751-2016
- Cushman-Roisin, B., and J.-M. Beckers (2011): *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects*. Academic Press. Cambridge, 875pp.
- Fennel, K., M. Gehlen, P. Brasseur, C.W. Brown, S. Ciavatta, G. Cosarini, A. Crise, C.A. Edwards, D. Ford, M.A.M. Friedrichs, M. Gregoire, E. Jones, H.-C. Kim, J. Lamouroux, R. Murtugudde, C. Perruche, and the GODAE OceanView Marine Ecosystem Analysis and Prediction Task Team (2019): Advancing Marine Biogeochemical and Ecosystem Reanalyses and Forecasts as Tools for Monitoring and Managing Ecosystem Health. *Front. Mar. Sci.*, 6, 89. doi:10.3389/fmars.2019.00089
- 藤井孝蔵 (1994): 流体力学の数値計算法. 東京大学出版会. 東京, 248pp.
- Hobday, A.J., L.V. Alexander, S.E. Perkins, D.A. Smale, S.C. Straub, E.C.J. Oliver, J.A. Benthuisen, M.T. Burrows, M.G. Donat, M. Feng, N.J. Holbrook, P.J. Moore, H.A. Scannell, A. Sen Gupta,



- and T. Wernberg (2016): A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog. Oceanogr.*, **141**, 227–238. doi:10.1016/j.pocean.2015.12.014
- Hobday, A.J., E.C. Oliver, A.S. Gupta, J.A. Benthuisen, M.T. Burrows, M.G. Donat, N.J. Holbrook, P.J. Moore, M.S. Thomsen, T. Wernberg, and D.A. Smale (2018): Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography*, **31**, 162–173.
- 河野健 (2010) : 新しい海水の状態方程式と新しい塩分 (Reference Composition Salinity) の定義について. *海の研究*, **19**, 127–137. doi:10.5928/kaiyou.19.2\_127
- Kämpf, J. (2009): *Ocean modelling for beginners: using open-source software*. Springer Berlin. Heidelberg, 175pp.
- Kido, S., M. Nonaka, and Y. Miyazawa (2022): JCOPE-FGO: An eddy-resolving quasi-global ocean reanalysis product. *Ocean Dyn.*, **72**, 599–619. doi:10.1007/s10236-022-01521-z
- Kido, S., M. Nonaka, and Y. Miyazawa (2023): Skillful Multiyear Prediction of the Kuroshio and Gulf Stream Jets and Eddy Activity. *Geophys. Res. Lett.*, **50**, e2023GL103705. doi:10.1029/2023GL103705
- Miyama, T., S. Minobe, and H. Goto (2021): Marine Heatwave of Sea Surface Temperature of the Oyashio Region in Summer in 2010–2016. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 576240. doi:10.3389/fmars.2020.576240
- Miyazawa, Y., S.M. Varlamov, T. Miyama, Y. Kurihara, H. Murakami, and M. Kachi (2021): A Nowcast/Forecast System for Japan's Coasts Using Daily Assimilation of Remote Sensing and In Situ Data. *Remote Sens.*, **13**, 2431. doi:10.3390/rs13132431
- Miyazawa, Y., S. Yamane, X. Guo, and T. Yamagata (2005): Ensemble forecast of the Kuroshio meandering. *J. Geophys. Res. Oce.*, **110**, C10026. doi:10.1029/2004JC002426
- Miyazawa, Y., M. Yaremchuk, S.M. Varlamov, T. Miyama, Y.-L.K. Chang, and H. Hayashida (2024): An ensemble-based data assimilation system for forecasting variability of the Northwestern Pacific ocean. *Ocean Dyn.*, **74**, 471–493. doi:10.1007/s10236-024-01614-x
- 二宮洸三 (2004) : 数値予報の基礎知識. オーム社. 東京, 230pp.
- 坂本圭・辻野博之・中野英之・浦川昇吾・山中吾郎 (2018) : Git と Redmine を用いた気象研究所共用海洋モデル「MRI.COM」の開発管理. *海の研究*, **27**, 175–188. doi:10.5928/kaiyou.27.5\_175
- Sasaki, H., P. Klein, B. Qiu, and Y. Sasai (2014): Impact of oceanic-scale interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere. *Nat. Commun.*, **5**, 5636. doi:10.1038/ncomms5636
- Smale, D.A., T. Wernberg, E.C.J. Oliver, M. Thomsen, B.P. Harvey, S.C. Straub, M.T. Burrows, L.V. Alexander, J.A. Benthuisen, M.G. Donat, M. Feng, A.J. Hobday, N.J. Holbrook, S.E. Perkins-Kirkpatrick, H.A. Scannell, A. Sen Gupta, B.L. Payne, and P.J. Moore (2019): Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nat. Clim. Chang.*, **9**, 306–312. doi:10.1038/s41558-019-0412-1
- Tucker, T., D. Giglio, M. Scanderbeg, and S.S.P. Shen (2020): Argovis: A Web Application for Fast Delivery, Visualization, and Analysis of Argo Data. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **37**, 401–416. doi:10.1175/JTECH-D-19-0041.1
- Usui, N., H. Tsujino, Y. Fujii, and M. Kamachi (2006): Short-range prediction experiments of the Kuroshio path variabilities south of Japan. *Ocean Dyn.*, **56**, 607–623. doi:10.1007/s10236-006-0084-z

## Ocean weather forecasts

Hakase Hayashida<sup>1,†</sup>, Yasumasa Miyazawa<sup>1</sup>, Toru Miyama<sup>1</sup>,  
Yuya Baba<sup>1</sup> and Shoichiro Kido<sup>1</sup>

### Abstract

Since 2001, the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology has been providing routine two-month ocean weather forecasts around Japan. This tutorial paper presents an overview of ocean weather forecasting, its application to research and public outreach, and prospects for further advancements. The paper is structured into three sections: introduction, application, and prospects. In the introduction, we outline the process of generating predictions, the use of observational data to enhance prediction accuracy, and prediction methods tailored to specific needs. The application section discusses the dissemination of forecasts through blogs and YouTube, their integration into atmospheric weather forecasting, and the extension of forecasts to a global scale, reaching up to two years ahead. The prospective section highlights technological advancements aimed at addressing forecast errors and initiatives to predict marine ecosystem health. By continuously providing forecast information and advancing forecasting technology, we will contribute to the United Nations' Ocean Decade goals of creating "a predicted ocean" and "an accessible ocean."

**Key words:** ocean prediction, ocean modeling, the Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE)

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

(Received 31 January 2024; accepted 20 September 2024)

(doi: 10.5928/kaiyou.33.5-6\_89)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2024)

---

<sup>1</sup> Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa, Japan, 236-0001

<sup>†</sup> Corresponding author: Hakase Hayashida  
e-mail: hakaseh@jamstec.go.jp