
[報告] JAFIC 独自の海洋数値モデルの構築と予測結果の漁業への 貢献可能性

Construction of the JAFIC's original numerical ocean model and its potential contribution for fisheries

日原 勉¹⁾ 藤井 棕子²⁾

Tsutomu Hihara Ryoko Fujii

1) システム企画部 2) 水産情報部

要旨：

2020年度より漁業情報サービスセンター独自の海洋数値モデルの開発を進め、北太平洋全体を計算対象とする海洋数値モデルの社内運用を2021年11月から開始した。このモデルを用いて、毎日5日間の将来予測を行なっている。2021年11月から2022年4月までの半年間の運用で得られた予測値を衛星海面水温と比較することで評価し、5日目の予測値は初期値と比べて0.34°C程度しか精度が低下しないことがわかった。また、予測値と衛星海面水温の相関係数は5日先の予測値でも0.98以上であり、海洋数値モデルの海面水温分布から漁業に有用な情報を得るのに十分役立てられると考えている。さらに、事例解析として、2021年12月14日の石巻におけるマイワシのまとまった漁獲と、三陸沖を南下する栄養塩に富んだ冷水の海況の変化の関係を海洋数値モデルの計算結果と衛星データを用いて検証した。その結果、予測値は現実をよく再現しており、漁業者に有用な情報をもたらす可能性が示された。

キーワード：報告、技術開発、漁海況、マイワシ

1. はじめに

気象及び海洋分野における数値モデルによる将来予測は、流体の運動を記述するナビエ・ストークス方程式等を種々の仮定の元で単純化し、数値解析的に解くことで行われる。¹⁾20世紀初めに始まった地球流体力学における数値モデル研究^{2),3)}は、2021年にノーベル物理学賞を受賞した真鍋淑郎博士による気候モデルの研究^{4),5)}など多くの研究者の貢献により発展し、現在、その研究成果は、気象予報や津波予測などによって実用性のある身近な存在となった。水産業においても、数値モデルによる成果物の利用が進んでおり、水産研究・教育機構が提供するFRA-ROMS II⁶⁾や九州大学が提供するDREAMS⁷⁾などが公開され、実利用が進んでいる。

海洋数値モデルの研究の発展に伴い、2節で説明する様なパッケージ化されたモデルのソースコードが無料で公開されるようになり、手軽に独自のモデ

ルの開発を行えるようになった。また、海洋数値モデルを動かすのに必要な気象や海象のデータを様々な研究機関からインターネットを使って無料かつリアルタイムでダウンロードできるようになった。そのため、海洋研究開発機構のような全てを自前で開発できる研究機関でなくても海洋数値モデルの運用が可能となった。さらに、計算機の全体的な性能向上によって、地球シミュレータや富岳のような特別な計算機でなくても、漁業関係者が必要としている情報を海洋数値モデルで計算し提供するのに十分な性能を持つようになった。そこで、漁業情報サービスセンター（JAFIC）においても、2020年度より独自の海洋数値モデルを使って作成された将来予測結果を用いて、漁業関係者に向けた情報を発信することを目指して海洋数値モデルの開発に取り組み、2021年11月より運用を始めた。

2節では現在運用中の海洋数値モデルの情報を記載し、3節で海洋数値モデルの計算結果を衛星デー

タで評価した結果を示す。4節では2021年12月中旬の金華山沖の定置網における漁獲量を用いた事例解析を示す。

2. 海洋数値モデルの構築と運用

独自の海洋数値モデルを構築するために用いたパッケージは、Regional Ocean Modeling System (ROMS)⁸⁾である。ROMSのソースコードはGitHubで無償公開されており、随時更新されている。開発に用いたパッケージのオリジナルコードは、2020年5月20日にダウンロードしたものであり、バージョン番号は3.8である。

北太平洋を計算対象域とし、無料で利用できる海底地形データSRTM15+v2⁹⁾を使って、東経105度～西経75度、南緯15度～北緯70度の範囲の空間解像度1/6度格子海底地形データ(図1)を作成している。海底地形が急峻すぎると、海洋数値モデルが再現できないほど速い流れが発生し、計算が発散する危険性が高まるため、本来の地形データに対して3度×3度の空間的な移動平均をかけて平滑化している。また、東南アジアの水深が浅く、狭い海峡で囲まれたジャワ海は、JAFICが主な情報提供の対象としている日本付近の計算結果に対して大きな影響は無いと考え、陸として扱っている。鉛直方向の座標は、海底の深度に依存して各層の厚さが変化するシグマ座標であり、全格子点が鉛直25層に設定されている。

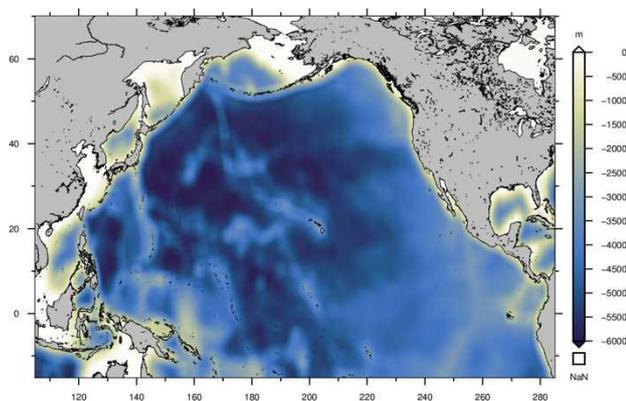


図1 海洋数値モデルの計算領域と海底地形

数値モデルの計算を行う際に、最初の状態をインプットする必要がある。この最初の状態を「初期値」という。数値モデルは、初期値から運動方程式によって表現される物理法則に則って将来が予測される。数値モデルによって予測された将来が、現実に近いものかどうかは、初期値が現実に近いかどうか強く依存している。¹⁰⁾ただし、初期値は数値モデルの全格子にデータがある必要があるため、欠損がある事が一般的である観測値はそのままでは初期値に使えない。そこで、多くの研究機関ではより現実に近い初期値を作成するために、数値モデルの計算結果と現実の観測値を融合するデータ同化技術の研究が行われている。このデータ同化を使ってより現実に近づけたデータの事を「解析値」と呼んでいる。本海洋数値モデルでは、Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies (COAPS)が作成しているHybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)¹¹⁾の解析値を使って初期値を作成している。

海洋は海面で大気と接しており、大気から海洋を駆動するエネルギー(力)が入ってくる。¹²⁾そのため、海洋数値モデルを計算するためには、海面における大気の情報が必要になる。この情報は、海洋の外側から入ってくるため「外力データ」と呼ばれている。外力データは、予測する全期間で必要であり、短期間予測の場合は、天気予報に用いられる気象数値モデルの計算結果が用いられ、長期間予測の場合は、気候値が用いられることが多い。本海洋数値モデルでは、アメリカ大気海洋局(NOAA)が公開している気象予測モデルGlobal Forecast System (GFS)¹³⁾の1時間ごとに出力される5日先までの気象予測結果を利用している。用いている物理量は、海面上での気温、東西風速、南北風速、比湿(大気中の水分量)、気圧、降水量、長波放射、短波放射、淡水フラックスである。

図2に運用スケジュールの概略を示す。HYCOMとGFSのデータはそれぞれ、ダウンロードされたのち、前処理で空間的にモデルの格子点上にデータが内挿される処理が行われる事で、海洋数値モデルに

インプットできる形式として初期値と外力データに変換される。初期値と外力データの両方が揃ったら、海洋数値モデルの計算が実行される。2時間弱で5日間の予測計算が終了し、出力結果は後処理によ

て可視化しやすい形式に変換され、人工衛星データによる評価が行われる。この一連の流れは全て完全自動化されており、海洋数値モデル専用の計算機サーバによって毎日行われている。

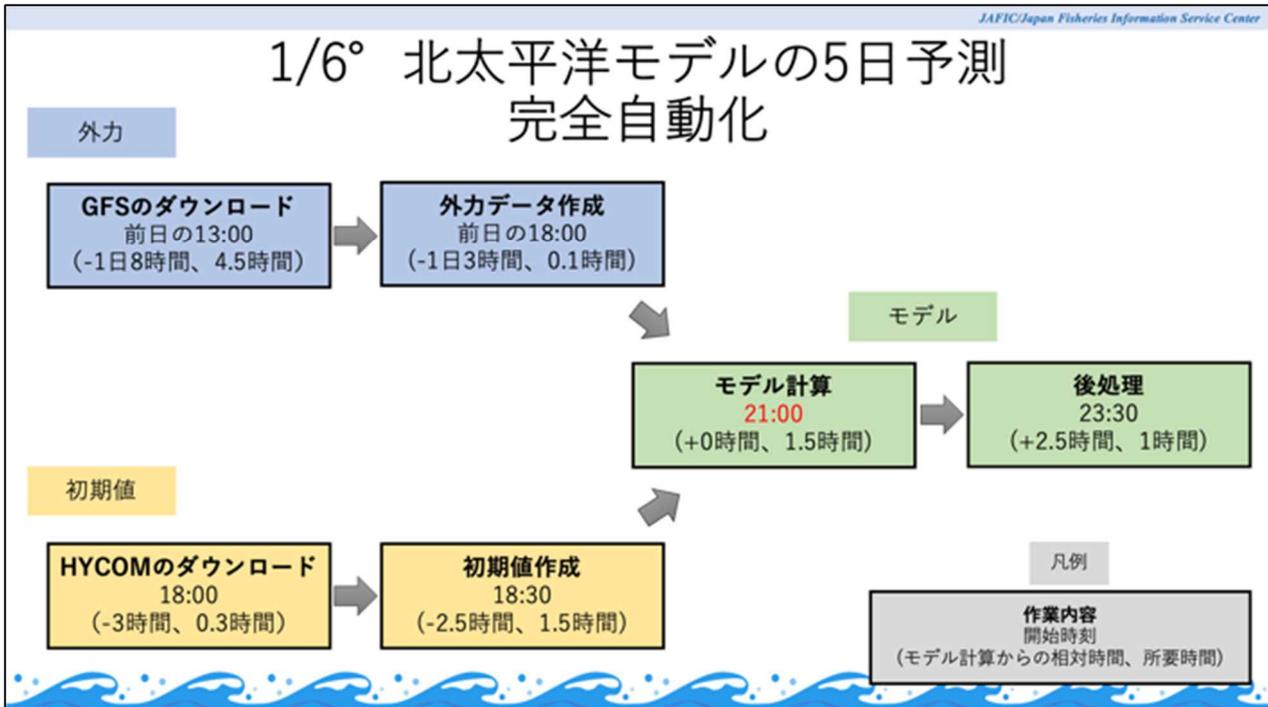


図2 海洋数値モデルの運用スケジュール

3. 海洋数値モデルの評価

この節では、日本周辺海域(東経 120 度～東経 160 度、北緯 23 度～北緯 47 度)において、初期値および海洋数値モデルの予測値を JAXA が提供するひまわり 8 号¹⁴⁾、しずく (GCOM-W/AMSR2)¹⁵⁾、しきさい (GCOM-C/SGLI)¹⁶⁾の海面水温データと日平均値で比較し、平均差 (初期値あるいは予測値－衛星データ)、標準誤差 (平均差を除いた RMS 誤差、バラツキの度合いであり、ここではこの値を精度とする)、相関係数で評価した結果を表 1、表 2 に示す。衛星データの空間解像度はそれぞれ 0.02 度、0.125 度、0.005 度である。

図 3 は、2022 年 2 月 25 日 0 時を初期値として 5 日間予測をした計算結果の日本周辺の海面水温の日平均値であり、図 4 は同期間のひまわり 8 号が観測した海面水温の分布図である。この期間は概ね日本

周辺に雲が少ない期間であったが、それでもひまわり 8 号のデータに欠損 (灰色の領域) が存在する。海洋数値モデルの計算結果は、人工衛星でも観測が難しいところも、運動方程式によって計算される数学的・物理学的な根拠を持って空間分布を示すことができ、さらに海面のみならず鉛直方向の情報も得ることができる点において非常に有用である。

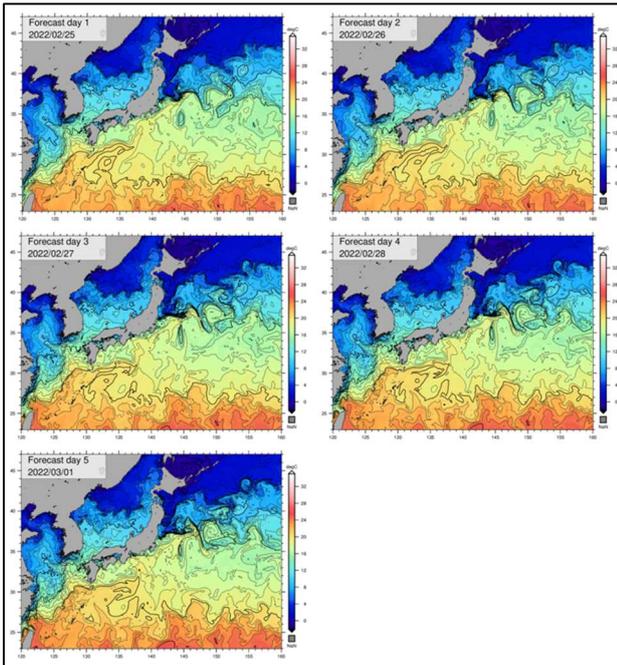


図3 2022年2月25日0時を初期値とした5日間の予測結果

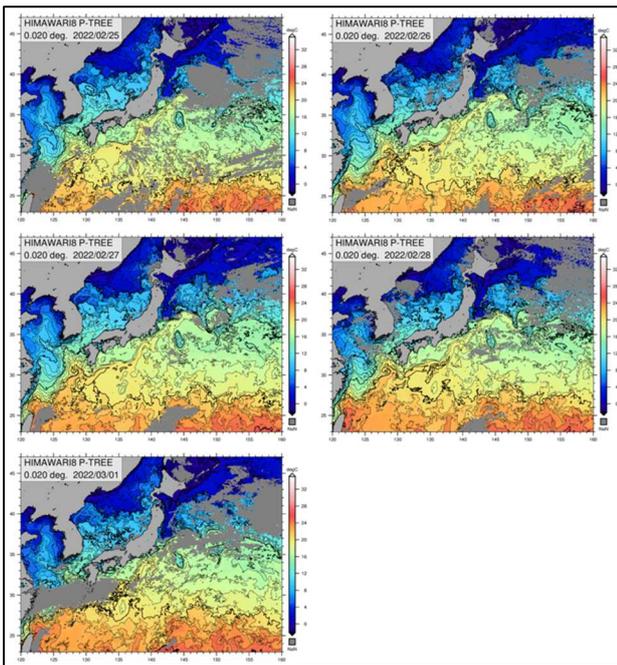


図4 ひまわり8号が観測した海面水温分布（2022年2月25日～3月1日）

図5は2022年2月25日の初期値とひまわり8号の海面水温の散布図であり、図中に平均差、標準誤差、相関係数を記載している。

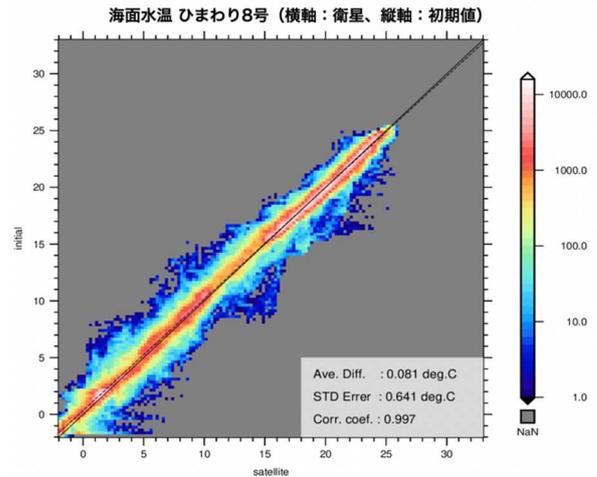


図5 2022年2月25日における初期値とひまわり8号の海面水温データの散布図（カラーバーはデータ密度を示している）

同様の比較を2021年11月1日から2022年4月30日までの半年間で毎日行い、その統計値の平均値を表1に示す。平均差は、しずくとの比較結果はほぼゼロだが、ひまわり8号としきさいの比較結果は0.3°C以上である。標準誤差は0.6~1.1°C程度であり、相関係数はいずれも0.98より大きい値を示す。この結果は、HYCOMから作成された初期値が、しずくが観測した海面水温とよく似ていることを示している。

海洋数値モデルの標準誤差が、初期値の標準誤差よりも改善していくことは通常あり得ず、予測期間が長いほど標準誤差は大きくなる。初期値の標準誤差からどの程度の精度悪化が生じるかが、海洋数値モデルの予測値の良し悪しを判断する目安となる。

表1 衛星海面水温データを用いた初期値の評価

	平均差[°C]	標準誤差[°C]	相関係数
ひまわり8号	0.387	1.150	0.986
しずく	-0.044	0.615	0.996
しきさい	0.307	1.118	0.988

表2に、表1に示した初期値の評価と同様に計算した、海洋数値モデルによる予測値の日平均値を

衛星海面水温データで評価した結果を示す。平均差、標準誤差、相関係数のいずれにおいても、予測期間が長くなるほど悪化していることが確認できる。特に予測期間が長くなるほど、衛星データよりも高い海面水温を示す点は、予測結果を利用する上で最も注意する点の一つである。初期値の統計値からの変化量を見ると、平均差は0.41°C程度（1日目）から0.28°C程度（5日目）、標準誤差は0.04°C程度（1日目）から0.34°C程度（5日目）、相関係数は-0.001程度（1日目）から-0.007程度（5日目）変化している。この変化量は、どの衛星データにおいても同程度である。

表2 衛星海面水温データを用いた予測値の評価

予測1日目	平均差[°C]	標準誤差[°C]	相関係数
ひまわり8号	0.435	1.205	0.985
しずく	-0.015	0.646	0.996
しきさい	0.352	1.153	0.987
予測2日目	平均差[°C]	標準誤差[°C]	相関係数
ひまわり8号	0.476	1.301	0.983
しずく	0.045	0.767	0.994
しきさい	0.399	1.268	0.985
予測3日目	平均差[°C]	標準誤差[°C]	相関係数
ひまわり8号	0.536	1.367	0.981
しずく	0.104	0.850	0.993
しきさい	0.464	1.350	0.983
予測4日目	平均差[°C]	標準誤差[°C]	相関係数
ひまわり8号	0.598	1.417	0.980
しずく	0.161	0.922	0.992
しきさい	0.537	1.418	0.982
予測5日目	平均差[°C]	標準誤差[°C]	相関係数
ひまわり8号	0.657	1.464	0.979
しずく	0.212	0.981	0.990
しきさい	0.615	1.465	0.980

相関係数は、どの統計量においても0.98（小数点3桁目を四捨五入）以上の値を示しており、概ね現実的な空間分布が数値予測の計算によって得ら

れていると言える。標準誤差は、衛星海面水温を管理された現場観測値と比較した際の標準誤差の最低限の目標値は0.5~0.8°C程度であり¹⁷⁾、それよりも幾分高い値を示している。この目標値は、人工衛星データと海洋数値モデルの計算結果を比較した今回の統計量と直接比較できる目安ではないが、海洋数値モデルの予測結果が全く使い物にならないのかという観点での評価としては、人工衛星データと比較して1.5°C以下の標準誤差は許容の範囲と考える。

4. 予測結果と石巻沖定置網の漁獲

図6は、2021年12月1日から31日までの金華山沖の定置網で漁獲されたマイワシの石巻での水揚量である。12月上旬は時化により操業できる日が少なく、12月12日、13日も操業されていない

(JAFIC調べ)。翌12月14日に80トン以上のまとまった水揚げがあり、しばらくマイワシの水揚げが続いた。このことから、12月14日以前に三陸沖南端の金華山沖にマイワシの来遊があったと推測される。図7は、12月14日に獲れたマイワシの体長と体重の組成であり、12~13cm、10~29gの小羽が主体であった。この魚群は、冬から春に生まれた0歳魚の後期発生群と考えられ、初冬に12cm前後で親潮の勢力拡大とともに南下することが知られている（未成魚期南下群）¹⁸⁾この漁獲の要因を海洋数値モデルの予測値から得られる情報から確認できるか調べた。

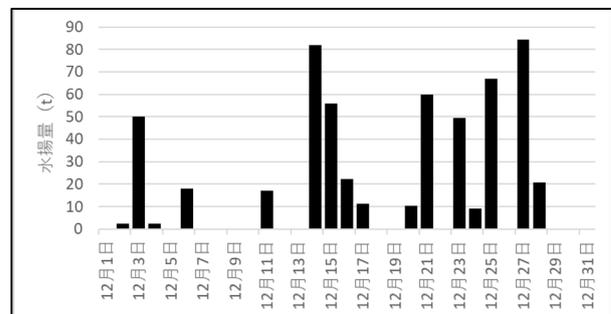


図6 2021年12月に金華山沖の定置網で漁獲された生マイワシの石巻への水揚量

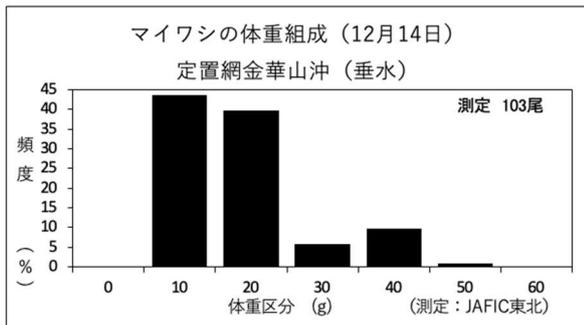
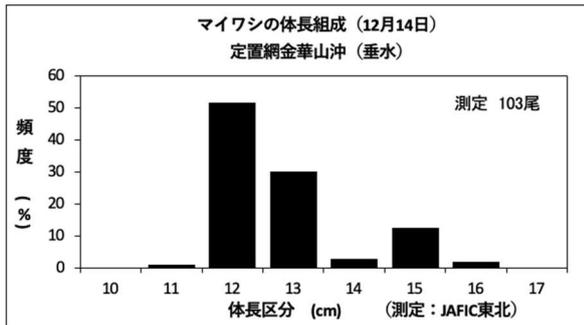


図7 金華山沖の定置網で漁獲されたマイワシの体長と体重の組成

図8は、11月30日、12月3日、12月10日、12月14日のひまわり8号の海面水温分布である。11月下旬から12月上旬にかけて、親潮域の冷水の一部が切り離されて南下して三陸南端まで到達し、12月10日に冷水の西端が金華山に近づいているのがわかる。その後、この冷水（10°Cから12°C）は黒潮に沿って東へと流されている。この時期の南下群のマイワシは、親潮系水の影響を受けた9°Cから11°Cの水帯に集まるとされる。¹⁹⁾また、図9に示す人工衛星しきさいによって観測された11月30日のクロロフィルaの濃度分布を見ると、この冷水が周囲の海水と比べて値が高く、植物プランクトンが多いことがわかる。マイワシは5~6cmの幼魚になると植物プランクトンを食べるできるようになり、成長するほど雑食性となる¹⁸⁾ことから、この冷水はマイワシにとって好環境であると言える。したがって、マイワシはこの冷水と共に南下し、金華山沖の定置網での漁獲に繋がったと推定される。

図10は、12月8日を初期値とした海洋数値モデルの予測値である。予測1日目（12月8日）に三

陸沖に見られる冷水は、計算が進むにつれて南下し、予測3日目（12月10日）には、ひまわり8号の観測値ほど明確ではないが、冷水の西端が金華山沖に近づいていることがわかる。そして、その後、この冷水が東進していく。この様に、海洋数値モデルは、金華山沖の定置網にマイワシの漁獲をもたらしたと考えられる2021年初冬の冷水の南下を予測することに成功している。

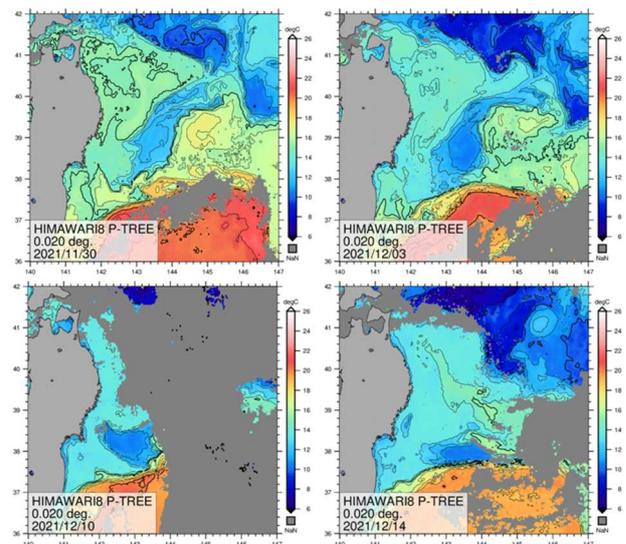


図8 ひまわり8号が観測した2021年11月下旬から12月中旬にかけての三陸沖の海面水温分布の変化

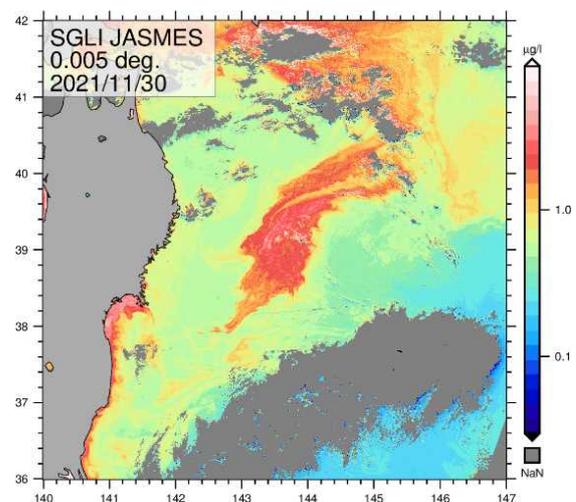


図9 しきさいが観測した2021年11月30日の三陸沖におけるクロロフィルa濃度の空間分布

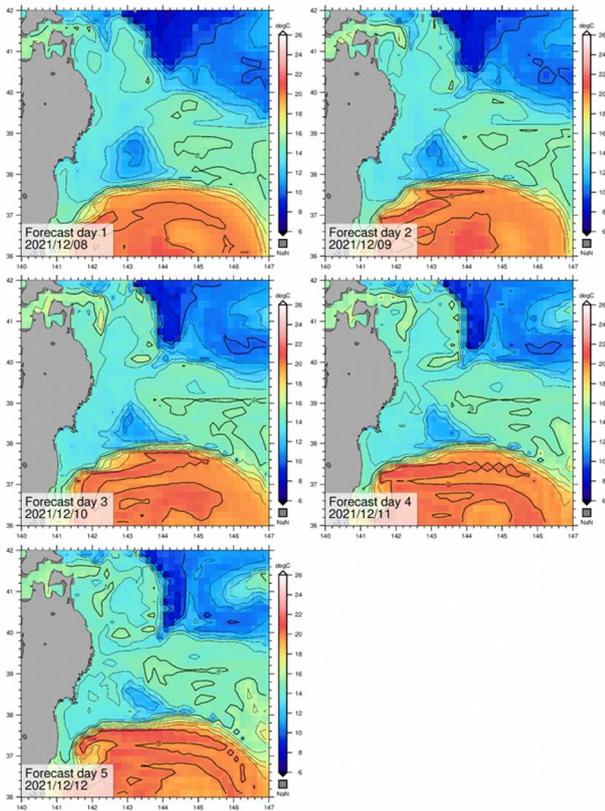


図 10 12 月 8 日を初期値とした三陸沖の海面水温分布の予測結果

5. まとめと今後の課題

本テクニカルレビューでは、2020 年度より開発を進め、2021 年 11 月より社内運用を始めた海洋数値モデルの紹介をし、2021 年 11 月 1 日から 2022 年 4 月 30 日までの計算結果を用いて、衛星海面水温データと比較することで精度評価を行った。また、事例解析として、2021 年 12 月中旬の金華山沖定置網でのマイワシの漁獲をもたらしたと考えられる 2021 年初冬の三陸沖を南下する冷水の数値予測結果を示した。海洋数値モデルの予測値の精度の低下は、1 日目の予測計算で 0.04°C 程度、5 日目の予測計算で 0.34°C 程度であり、数日間の予測値から得られた情報を漁業関係者に提供するのに十分であると考えられる。海洋数値モデルは時空間的に欠測のないデータを作成することができる点においても非常に有用である。さらに、本テクニカルレビューでは示さなかったが、深さ方向にも連続した情報を得ら

れ、また、空間的な観測が難しい流速や塩分のデータも利用できることから新たなサービスの提供に寄与する可能性を秘めている。

今後の予定として、日本付近の数値予測をより高解像度で行うために、東経 120 度～東経 160 度、北緯 23 度～北緯 47 度の範囲を対象にした $1/15$ 度格子入れ子モデルの開発を進めることを考えている。また、よりオリジナリティのある海洋数値モデルの運用のために、JAFIC が提供している現場観測データと衛星海面水温データを用いて作成した欠損のない水温図を活用した初期値の作成を検討している。その際には、実測値と数値予測結果を融合させるデータ同化技術を導入する予定である。

謝辞

JAFIC 独自の海洋数値モデルを開発する上で、国立研究開発法人水産研究・教育機構の瀬藤聡様から多くの助言をいただきました。本テクニカルレビューでは、国立研究開発法人宇宙航空研究開発法人が作成し、P-TREE、JASMES、GHRSSST の各サイトで無償提供されている人工衛星データを使用しました。

参考文献

- 1) 山田道夫: 平成 15 年度(第 25 回)数学入門公開講座テキスト 大気と海の流体力学, 2022/06/02. <https://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kenkyubu/kokai-koza/H15-yamada.pdf>
- 2) Bjerknes, V.: Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. Meteor. Z., 21, 1–7, 1904.
- 3) Richardson, L. F.: Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge University Press, xii + 236 pp, 1922.
- 4) Manabe, S.: Climate and the Ocean Circulation. Part I: The atmospheric circulation and the

- hydrology of earth's surface, Mon. Yea. Rev., 97(11) 739-774, 1962. doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0739:CATOC>2.3.CO;2.
- 5) Manabe, S.: Climate and the Ocean Circulation. Part II: The atmospheric circulation and the effect of heat transfer by ocean currents, Mon. Yea. Rev., 97(11), 775-805, 1962. doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0775:CATOC>2.3.CO;2.
- 6) 水産研究・教育機構：FRA-ROMS II, 2022/5/27. <https://fra-roms.fra.go.jp/fra-roms/>
- 7) 九州大学：DREAMS, 2022/5/27. <https://dreams-cl.rim.kyushu-u.ac.jp/vwp/>
- 8) ROMS/TOMS Group: ROMS, 2022/5/27. <https://www.myroms.org/>
- 9) Tozer, B. *et al.*: Global bathymetry and topography at 15 arc seconds: SRTM15+, Accepted Earth and Space Science, 6(10), 1847-1864, 2019. doi.org/10.1029/2019EA000658.
- 10) 気象庁気象研究所：地球システム・海洋モデリングに関する研究, 2022/6/1. https://www.mri-jma.go.jp/Research/project/M/M_2019-2023_2.html
- 11) COAPS: HYCOM, 2022/5/27. <https://www.hycom.org/>
- 12) 宇野木早苗, 久保田雅久: 海洋の波と流れの科学, 東海大学出版, 1996.
- 13) NOAA: GFS, 2022/5/27. https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php
- 14) JAXA: GCOM-W 研究プロダクト提供サービス, 2022/06/04. https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/research/prdintro_j.html
- 15) JAXA: JAXA ひまわりモニタ 分野横断型プロダクト提供システム (P-Tree) , 2022/06/09. https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html
- 16) JAXA: GHRSSST Server @ JAXA EORC, 2022/06/09. <https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GHRSSST/>
- 17) JAXA: JASMES, 2022/06/09. https://www.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_j.html
- 18) 平本紀久雄: イワシの自然誌, 中公新書, 1996.
- 19) 平本紀久雄: 私はイワシの予報官, 草思社, 1991.
- (2022年6月24日受理、Ser. No. 6)