

海洋酸性化に関する現況予測システムの開発

課題責任者

宮澤 泰正 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

著者

石津 美穂*¹, 宮澤 泰正*¹, 角田 智彦*², 郭 新宇*³

*¹ 海洋研究開発機構アプリケーションラボ, *² 笹川平和財団海洋政策研究所 *³ 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

海洋酸性化は、極域生態系やサンゴ礁といった海洋生態系に相当なリスクをもたらす。すでに海洋酸性化は、地球規模において気候変動とともに早急に対応しなければならない取り組むべき重要課題の1つとなっている。本研究は、海洋酸性化の影響に係る監視情報を集約するとともにその進行予測や社会影響を検討するため、日本周辺を含む北西太平洋域を対象海域として、海洋酸性化に係る予測モデルの開発を実施した。開発されたモデルのモデル結果と観測値と比較することで、日本近海における酸性化の現況予測システムとしての有効性を示した。本システムにより観測データが少ないためこれまで把握できなかった縁辺海での酸性化パラメータ現場 pH , pH_{25} , アラゴナイト飽和度の可能性の高い季節変動を把握することができる。縁辺海の海洋酸性化に関する貴重な情報が提供できると期待される。

キーワード：海洋酸性化, 生態系モデル, NPZDC, 北太平洋, 炭素循環

1. はじめに

海洋酸性化は、極域生態系やサンゴ礁といった海洋生態系に相当なリスクをもたらす (IPCC 2013) [5]。IGBP, IOC, SCOR (2013) の報告書 [4] では、今後の海洋酸性化の進行により、60%の軟体動物の種は石灰化の低下や成長率、生存率に関して影響を受けるとされている。棘皮動物は、30%の種が発育初期において影響を受け、魚類は、70%の種に餌や生息環境の変化に伴う非直接的影響があるとされている。サンゴ類は、40%の種において、石灰化の低下、温暖化との相乗効果による脆弱性があると予想されている。したがって、海洋酸性化は地球規模において、気候変動とともに早急に対応しなければならない取り組むべき重要課題の1つとなっている。

このような将来の影響が懸念されている海洋酸性化について、国際社会でも広く認知され、全世界的な連携体制構築の取り組みが進められている。本研究では、そのような背景のもと、笹川平和財団の助成事業「情報基盤における科学データの収集・整理・解析と予測システムの構築」により日本周辺を含む北西太平洋域を対象として、海洋酸性化の影響に係る監視情報を集約するとともに、その進行予測や社会影響を検討するための海洋酸性化に係る現況予測モデル (JCOPE_EC) の開発を進めている。本報告では、その海洋酸性化に関する現況予測システムの開発に関する内容および開発したモデルの海洋酸性化パラメータの精度検証結果を示す。

2. 予測モデルの設定

2.1. モデル設計

予測モデルは、既存の海洋現況予測システムの物理予

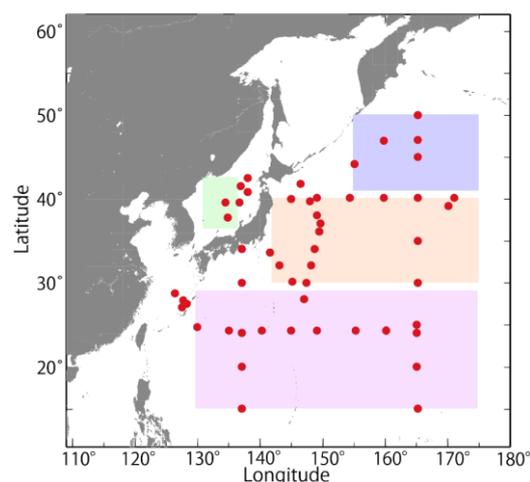


図1 モデルの対象領域と2015年の気象庁観測点(赤)。色のついた領域が、亜寒帯域(青)、黒潮続流域(オレンジ)、亜熱帯域(ピンク)、日本海域(緑)を示し、それらの領域ごとにモデル値と観測値を比較(表1)。

測システム (JCOPE2; Miyazawa et al. 2009 [11]) を基盤とし、日本縁辺海(図1)を対象海域とした炭酸系および生態系パラメータを組み込むオフライン型の仕様となっている。採用した生態系モデル(図2)は、Guo and Yanagi (1998) [3]、Onitsuka and Yanagi (2005) [10] を参考に、基本的な栄養塩過程を表現する。生態系 NPZD モデルの系に Scmittener et al. (2008) [14] が開発した炭素循環モデルを加え、プランクトン、栄養塩変動を表現する N (栄養塩)、P (植物プランクトン)、Z (動物プランクトン、D (有機物粒子) 他、全炭酸、アルカリ度を含む炭酸系パラメータを導入している(図

1)。

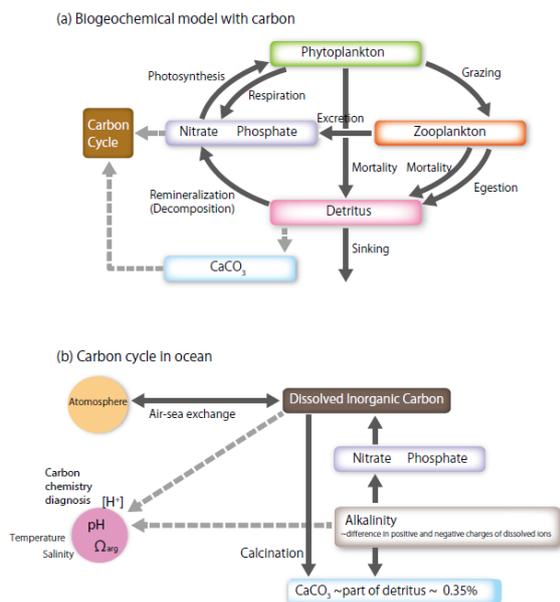


図 2 JCOPE_EC に含まれる炭素循環 (b) を含む生態系 (a) モデルの概念図

炭素循環過程は、Schmitter et al. (2008) [14] にならい、栄養塩 (DIN , DIP) および有機物粒子 (D) の変動によって影響されると仮定している (図 1)。

二酸化炭素が海洋表面で大気・海洋間を移動する過程は、海洋表面での二酸化炭素分圧 (P_{CO_2}) と大気中の二酸化炭素分圧 ($P_{CO_2}^{atm}$) の差によって駆動され、全炭酸 (DIC) の海洋表面フラックス F_{DIC} によって表現した。

$$F_{DIC} = \rho_w V_p K_{OC} (P_{CO_2} - P_{CO_2}^{atm})$$

(ここでは、大気に放出される場合が正)。海洋表面での二酸化炭素分圧 (pCO_2) は、全炭酸 (DIC) とアルカリ度 (ALK) から水素イオン濃度の逆数 $X = [H^+]^{-1}$ (Kantha, 2004) [8] を求め、

$$pCO_2 = [DIC] / K_0 / (1 + K_1 X + K_1 K_2 X^2)$$

として与える。

ここでの K_0 , K_1 , K_2 は水温塩分依存の経験的溶解係数を示す (Weiss, 1974 [19]; Dickson and Goyet, 1991 [1])。 DIC 以外の変数は、海洋表面フラックスはゼロと仮定している。

モデルパラメータのうち、調整可能なプランクトン成長率、致死率、栄養塩お取込みなどに係る係数、プランクトンの光合成に係る最適光度の強度に関するパラメータは、亜熱帯域、亜寒帯域それぞれにおいて最適化計

算 (Miyazawa et al. 2014) [12] を行い、緯度的に変化するパラメータ設定を導入している (石津ら, 2018 [6]; Ishizu et al. 2019 [7])。

3. データとモデルパラメータ

3.1 気候値と強制データ

JCOPE2M 海洋数値モデルは、Princeton Ocean Model for generalized coordinate of sigma を基盤とする水平約 $1/12$ 度格子、鉛直 46 層の渦解像度モデルを入れ子にした一般化シグマ座標の海洋数値モデルである。モデルは、JCOPE2M (Miyazawa et al. 2017) [13] が出力した 1 日毎の水温、塩分、流速、拡散係数を読み込み、各変数 (NPZDC) を計算する。

北太平洋の硝酸塩 (DIN) とリン酸塩 (DIP) の初期値は、World Ocean Atlas 2013 (WOA2013: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>) および Yasunaka et al. (2013) [17] の海表面における年平均 DIN , DIP の気候値をモデルに合うようグリッド化して計算に用いた。

全炭酸 DIC は、Goeyt et al. (2000) [3] と Key et al. (2004) [9] を組み合わせ、冬季の状態 (Yasunaka et al. 2013) [18] を想定してグリッドデータを作成している。また DIC の表層の月平均は、Yasunaka et al. (2013) [18] により補正した。アルカリ度は、Goeyt et al. (2000) [2] と Key et al. (2004) [9] を組み合わせた後、表面では 1 月気候値の水温塩分データ (WOA13) を用いて Takatani et al. (2014) [15] による経験式で海表面アルカリ度を推定し、水深 200 m スケールまでの影響深度を仮定して海面下の値を補正、グリッド化した。さらに、日本海において観測値と大幅な違いが生じていることが明らかとなったため、気象庁観測のアルカリ度データで補正を行った。

海表面での風応力、熱、塩分フラックス場、短波放射量 (I_s) は、6 時間毎の NCEP/NCAR 再解析データから値を計算している。大気中の二酸化炭素分圧 ($P^{atm}CO_2$) は、ハワイ州マヌアロア観測所の観測データから経験式を求め、値を決定している (Ishizu et al. 2019) [7]。

3.2 その他のモデル設定

植物プランクトン (クロロフィル濃度) は、World Ocean Atlas (2001) (https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/pr_woa01.html) から気候値データが入手可能であるが、予備計算において計算当初に望ましくない振動が生じることを確認した。そのため、150 m 以浅では $0.05 \mu\text{mol/l}$ で一様、それ以深ではゼロとした初期値を設定した。動物プランクトンについては、植物プランクトン濃度の 10% であるとし、有機物粒子についてはゼロとしている。

DIN, *DIP*, *DIC*, *ALK* の初期値は、1月の気候値を使用し、月ごとの境界で設定する値はそれぞれの月別気候値を使用した。本モデルは、生物パラメータが現実的かつなだらかに変化するように30日スケールの気候値緩和の条件が付けられた。モデルの物理的な駆動源には、JCOPE2Mの出力値及びNCEP/NCARの大気再解析データを使用した。

本報告では、2015年を対象に予測システムの構築を行い、精度検証をしたものを示す。精度検証のため、クロロフィルに関しては、MODIS衛星クロロフィルデータ、*DIN* (*DIP*), *DIC*, *ALK* に関しては、上述の月別の気候値および気象庁の同年に観測されたボトルデータを使用している。そのほか詳しいモデル設定の説明は、Ishizu et al. (2019) [6] を参照されたい。

4. 結果

4.1 生物パラメータの再現性

図3, 5-7にクロロフィル, *DIN*, *DIC*, *ALK*の気候値およびモデル出力における表層水平分布の結果を示す。クロロフィルのモデル結果では、観測値と同様、全体的な季節変化の傾向は再現に成功していることが分かる。時系列データをみると、観測では春季と秋季にクロロフィル濃度が亜寒帯域では春と秋にブルームがあるが、モデルでは夏季に最も大きい値が再現されるなど、ダブルピークが再現されていない。*DIN*, *DIC*の季節変動は、気候値とよく一致する変動を示している(図3, 5-6)。時系列図(図4)でもその季節変動がうまく再現できていることが確認された。アルカリ度は、気候値はないため観測値を水平的にプロットしモデル値と比較した(図7)。アルカリ度の観測値は通年一定の値を示す一方で、モデルでは亜寒帯域で、夏季に減少傾向がみられた。

クロロフィル, *DIN*, *DIC*, *ALK*の再現性を領域ごとに相関係数で評価すると(表1)、クロロフィルは亜熱帯域の再現性がやや低いことが分かる。アルカリ度の再現性も他のパラメータに比べ低い。*DIN*, *DIC*は概ね0.8以上の相関が見られ再現性は高いことが分かった。その後の解析から、アルカリ度の低い再現性は、夏季に生じてしまうCaCO₃の著しい生成によるものだということが分かった。CaCO₃の生成項を抑えるようさらにCaCO₃

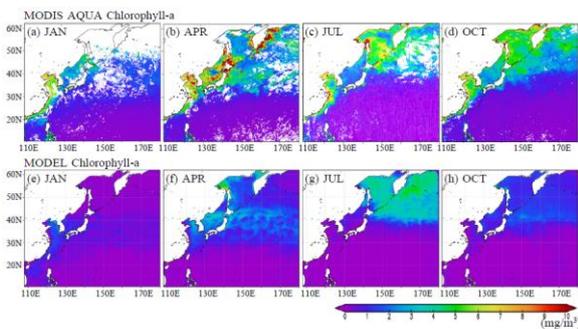


図3 クロロフィルの海表面水平分布(1, 4, 7, 10月)を示す。上段が観測値、下段がモデル値を示す。

の生成パラメータをさらに小さく設定することで夏季の亜寒帯域で見られるアルカリ度の減少が改善された(略図)。

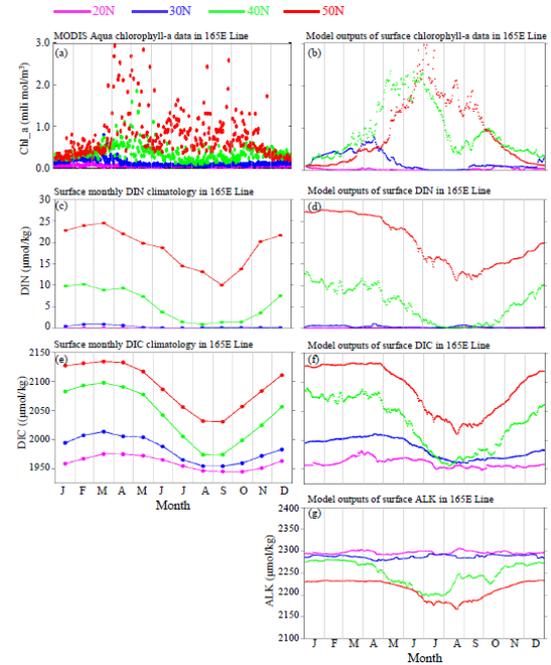


図4 165度E線上における表層でのクロロフィル(a-b), *DIN*(c-d), *DIC*(e-f), *ALK*(g)の時系列図。左が観測値または気候値、右がモデル値。図上のカラーが対象緯度。

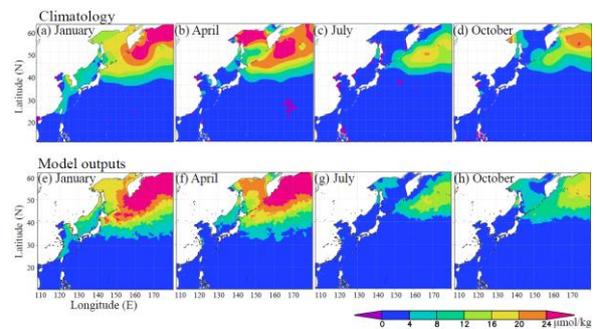


図5 *DIN*の海表面水平分布(1, 4, 7, 10月)を示す。上段が観測値、下段がモデル値を示す。

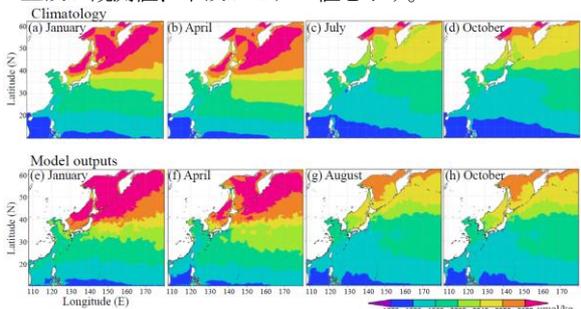


図6 *DIC*の海表面水平分布(1, 4, 7, 10月)を示す。上段が観測値、下段がモデル値を示す。

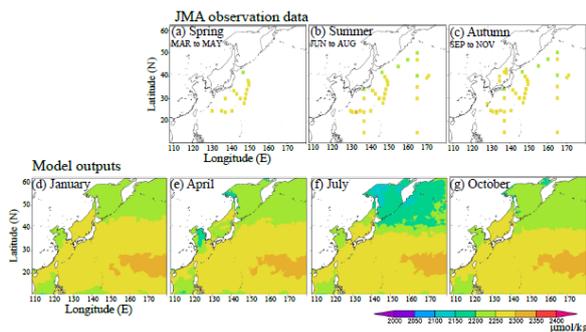


図7 ALKの海表面水平時系列図を示す。上段が観測値、下段がモデル値を示す。

表1 クロロフィル、DIN、DIC、ALK、pH₂₅、アラゴナイト飽和度に関する観測値とモデル値の相関係数。時間と空間に対して合わせた出力で比較。カッコ内の値は、有意水準p値 (<0.05) を示している。図1に亜熱帯域、亜寒帯域、黒潮続流域、日本海の各対象領域を示す。クロロフィルのみ常用対数 (Log10 (Chla))の形で比較。

Parameter	Subtropical region	Subarctic region	Kuroshio extension	Japan Sea
Chlorophyll-a	0.57 (0.07)	0.88 (0.07)	0.86 (0.12)	0.87 (0.15)
DIN	0.72 (0.004)	0.88 (0.12)	0.87 (0.1)	0.95 (0.11)
DIC	0.74 (0.09)	0.87 (0.20)	0.78 (0.17)	0.92 (0.26)
Alkalinity	0.48 (0.09)	0.69 (0.20)	0.48 (0.17)	0.35 (0.26)
pH ₂₅	0.78 (0.09)	0.86 (0.20)	0.81 (0.17)	0.90 (0.26)
Ω _{arg}	0.99 (0.09)	0.98 (0.20)	0.98 (0.17)	0.99 (0.26)

4.2 酸性化パラメータの再現性

モデルでは、水温、塩分、DIC、ALK から酸性化パラメータである現場pH、pH₂₅、アラゴナイト飽和度 (Ω_{arg}) の値が計算され出力される (図2)。水平分布図のpH₂₅およびアラゴナイト飽和度をみると、2つの酸性化パラメータは、熱帯域の方が値は小さく、亜寒帯域の方が値の大きい分布を示した (図7)。これらの値は、冬季が最も小さく、夏季に向かって値が大きくなる季節変動を示す。現場pHは、pH₂₅やアラゴナイト飽和度のような緯度的に特徴があるといった分布はなく、水平分布特性、季節変動も複雑さを示す (図7)。時系列変動は、緯度的にはっきりとした一様性はなく、ギザギザした変動であった。これらの変動は、現場pHの計算時に特に影響するパラメータ、水温、DICの影響であり、水温が上がる (下がる) と現場pHは下がる (上がる) 一方、DICは下がる (上がる) と現場pHは上がる (下がる) ことが要因であることが分かった (Ishizu et al. 2019) [6]。

酸性化パラメータに対しても、観測値との比較から相関係数を計算すると、亜熱帯域のpH₂₅の値以外は、0.8

以上の値を示し、アラゴナイト飽和度に関しては、0.98以上の非常に高い相関係数が得られた。これらの結果から、本モデルの酸性化パラメータに対する再現性はかなり高いといえる。

オホーツク海、東シナ海はデータが入りできないため再現性が高いかどうかは判断できないが、少なくとも日本縁辺海の北西太平洋と日本海においては、本モデルは可能性の高い酸性化パラメータの値を予測することができるといえる。

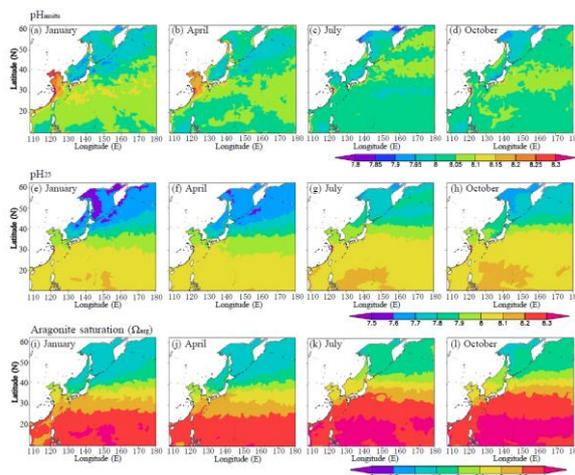


図8 モデルで再現された現場pH (a-d)、pH₂₅ (e-h)、アラゴナイト飽和度 (i-l) の海表面水平分布図 (1, 4, 7, 10 月) を示す。

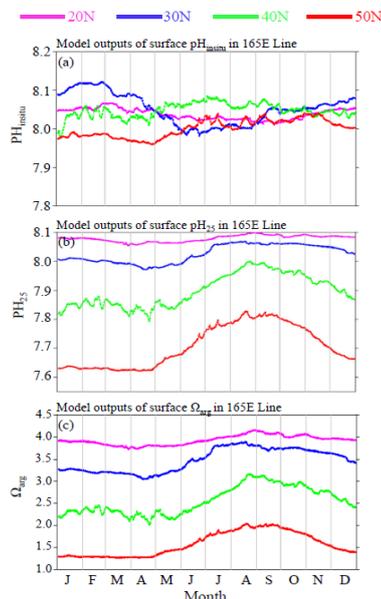


図9 165度E線における現場pH (a)、pH₂₅ (b)、アラゴナイト飽和度 (c) の海表面における時系列を示す。図上のカラーが対象緯度。

5. まとめと今後の課題

地球シミュレータを用いて、海洋酸性化に係る現況予測システムの開発を実施した。現実的なモデル開発の初期の段階として、炭素パラメータを含む生態系モデルを使用し、気候値緩和のあるモデル (JCOPE_EC) 開発を行った。観測値とモデル値の比較から本システムが可能性の高い酸性化パラメータの予測ができることを示した。

開発した現況予測システムは、観測データが少ないため縁辺海での酸性化パラメータ、現場 pH, pH₂₅, アラゴナイト飽和度の季節変動が不明であった領域でも、本モデルの結果から可能性の高い季節変動を把握することができることが分かった。本システムより、縁辺海の海洋酸性化に関する貴重な情報が提供できると期待される。

JCOPE2M の結果は、2 か月先までの現況予測も実施されている。JCOPE_EC では、JCOPE2M の 1 か月先までの物理プロダクトを使い、酸性化パラメータの予測実験も開始した。これらのモデルプロダクトは、笹川平和財団海洋政策研究所が運営する「海洋危機ウォッチ」 (<https://www.marinecrisiswatch.jp/mcwatch/>) に提供している。

本モデルは気候値緩和の効果が入っているため、生態系や炭素循環のメカニズムを把握することが難しい。今後は現況予測実験を継続しつつ、気候値緩和の効果を外したモデル開発を進め、季節変動を含めた変動メカニズムの解明に取り組む。

謝辞

本研究におけるモデル開発は、笹川平和財団海洋政策研究所の「温暖化・海洋酸性化の研究と対策」事業に係わる「情報基盤における予測システムの運用と科学データを用いた解析」の委託研究の一環として実施されました。

データ取得元

World Ocean Atlas 2013 (WOA13)の DIN (DIP), DIC データは National NODC のサイトから取得：
https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/pr_woa01.html
<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>

DIN, DIP, DIC の月別表層気候値データ (Yasunaka et al., 2013, 2014) は SOOP サイト：<http://soop.jp/index.html> から取得。

気象庁観測データは気象庁サイトから取得 (ボトルデータ、綾里観測所における pCO₂ 大気データ)：
https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/vessel_obs/data-report/html/ship/ship.php
https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2_monthly_ryo.html

MODIS Aqua 海色データは PODAAC の ftp サイトから取得：
<ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/modis/L3/aqua/4um/v20>

[14.0/4km/daily/2015/](https://doi.org/10.1029/2015GL064444)

文献

- [1] Dickson A G, Goyet C (Eds.) (1994) : Handbook of Methods of the Analysis of the Various Parameters of Carbon Dioxide System in Sea Water, Version 1, DOE CO₂ Science Team Report. US Department of Energy, Washington, DC.
- [2] Goyet C, Healy R, Ryan J (2000) : Global distribution of total inorganic carbon and total alkalinity below the deepest winter mixed layer depths, ORNL/CDIAC-127, NDP-076. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 40 pp. doi:10.3334/CDIAC/otg.ndp076.
- [3] Guo X; Yanagi, T (1998) : The role of the Taiwan Strait in an ecological model in the east china sea. Acta Oceanogr. Taiwanica, 38, 129 – 162.
- [4] IGBP, IOC, SCOR (2013) : Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third symposium on the Ocean in a High-CO₂ World International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm, Sweden.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. Stocker T F, Qin D, Plattner Gian-Kasper, Tignor M M B, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Zia Yu, Bex, Midgley P M, 1–1535 pp. Cambridge, UK: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [6] 石津美穂, 宮澤泰正, 角田智彦, 郭新宇 (2018) : 海洋酸性化に係る現況予測モデルの開発, 月刊海洋 Vol. 50, No. 5, 2018.
- [7] Ishizu, M; Miyazawa, T; Tsunoda, T; Guo, X (2019) : Development of a biogeochemical and carbon model related to ocean acidification indices with an operational ocean model product in the North Western Pacific, Sustainability, 11(9), 2677, <https://doi.org/10.3390/su11092677>.
- [8] Kantha L H (2004) : A general ecosystem model for applications to primary productivity and carbon cycle studies in the global oceans, Ocean Modeling, 6, 285 – 334.
- [9] Key M R, Kozyer A, Sabine L C, Lee K, Wanninkhof R, Bullister L J, Feely A R, Millero J F, Mordy C, Peng T H (2004) : A global ocean carbon climatology : results from global data analysis project (GLODAP), Global Biogeochemical Cycles, 18, GB4031, doi: 10.1029/2004GB002247.
- [10] Onitsuka G, Yanagi T (2005) : Difference in ecosystem

- dynamics between the northern and southern parts of the Japan Sea : analyses with two ecosystem models, *J Oceanogr.* 61, 415–433.
- [11] Miyazawa Y, Zhang R, Guo X, Tamura H, Ambe D, Lee J S, Yoshinari H, Setou T (2009) : Water mass variability in the western north Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, 65, 737 – 756.
- [12] Miyazawa Y, Yamashita N, Taniyasu S, Yamazaki E, Guo X, Varlamov M S; Miyama T. (2014) : Ocean dispersion simulation of perfluoroalkyl substances in the Western North Pacific associated with the Great East Japan Earthquake of 2011. *J. Oceanogr.* 70, 535 – 547.
- [13] Miyazawa Y, Valamov M S, Miyama T, Guo X, Hihara T, Kiyomatsu K, Kachi M, Kurihara Y, Murakami Y (2017) : Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme. *Ocean Dynamics.* 67, 713 – 728.
- [14] Schmittner A, Oschiles A, Matthews H D, Galbraith E D (2008) : Future changes in climate, ocean circulation, ecosystems, and biogeochemical cycling simulated for a business-as-usual CO₂ emission scenario until year 4000 AD, 22, 1 – 21, GB1013 doi: 10.1029/2007GB002953.
- [15] Takatani Y, Enyo K, Iida, Kojima A, Sasano D, Kosugi N, Midorikawa, Suzuki T, Ishii M (2014) : Relationships between total alkalinity in surface water and seas surface dynamic height in the Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 119, 2806 – 2814, doi:10.1002/2013JC009739.
- [16] Takahashi T, Sutherland C S, Chipman W D, Goddard G J, H Cheng, Newberger T, Sweeney C, Munro R D (2014) : Climatological distributions of pH, pCO₂, total CO₂, alkalinity, and CaCO₃ saturation in the global surface ocean, and temporal changes at selected locations. *Marine Chemistry* 164, 95 – 125.
- [17] Yasunaka S, Nojiri Y, Nakaoka S, Ono T, Mukai H, Usui N (2013) : Monthly maps of sea surface dissolved inorganic carbon in the North Pacific : Basin-wide distribution and seasonal variation, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 118, 3843 – 3850, doi:10.1002/jgrc.20279, 2013.
- [18] Yasunaka S, Nojiri Y, Nakaoka S, Ono T, Whitney F, Telszewski M (2014) : Mapping of sea surface nutrients in the North Pacific: Basinwide distribution and seasonal to interannual variability, 7756 – 7771, doi: 10.1002/2014JC010318.
- [19] Weiss R [1974] : The Provisions of Social Relationships. In *Doing unto Others*; Rubin, Z., Ed.; Prentice Hall: Englewood Cliffs, UK; pp.17 – 26.

Development of Nowcast/Forecast System Related to Ocean Acidification Indices with an Operational Ocean Model Product

Project Representative

Yasumasa Miyazawa Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Miho Ishizu ^{*1}, Yasumasa Miyazawa ^{*1}, Tomohiko Tsunoda ^{*2}, Xinyu Guo ^{*3}

^{*1}Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*2} Ocean Policy

Research Institute, Sasakawa Peace Foundation, ^{*3} Center for Marine Environmental Studies, Ehime University

We developed a biogeochemical and Carbon model (JCOPE_EC) coupled with an operational ocean model for the North Western Pacific. JCOPE_EC represents ocean acidification indices on the background of the risks due to ocean acidification and our model experiences. It is an off-line tracer model driven by a high-resolution regional ocean general model (JCOPE2M). The results showed that the model adequately reproduced the general patterns in the observed data, including the seasonal variability of chlorophyll-a, dissolved inorganic nitrogen/phosphorus, dissolved inorganic carbon, and total alkalinity. We provide an overview of this system and the results of the model validation based on the available observed data. Our conclusion is that even in the area that the observational data is less available, by using our operational system (JCOPE_EC), we can provide the useful information related to ocean acidification indices, *pH*, *pH₂₅* and aragonite saturation in the North Western Pacific around Japan.

Keywords : biogeochemical model, carbon, NPZDC, North Western Pacific, ocean acidification

1. Introduction

Ocean acidification poses a serious risk to marine organisms and ecosystems, including finfish and coral reefs in subtropical regions, and species or groups of organisms in polar regions (IPCC 2013) [2]. The effects of ocean acidity have previously been reported and the effects of acidification are predicted to increase, with great risks to marine organisms (IGBP, IOC, SCOR, 2013) [1]. The global economic loss of organisms from ocean acidification has been estimated at \$24 billion, \$0.7 billion, \$37 billion, \$65 billion, and \$30–375 billion for molluscs, echinoderms, crustaceans, finfish, and corals, respectively. All organisms except echinoderms could be seriously affected, and substantial economic losses are likely (IGBP, IOC, SCOR, 2013) [1]. These issues therefore can no longer be ignored, and urgent action is necessary. International society has been deeply concerned for such future impacts from ocean acidification, and try to make a construction of international collaboration system for future concerns.

To improve our insights into the drivers of ocean acidification, we aimed to develop the JCOPE further to incorporate a new marine ecosystem and carbon cycle model (hereafter JCOPE_EC), driven by the physical processes represented by the JCOPE2M model outputs (Ishizu et al. 2018 [3]; Ishizu et al. 2019 [4]). In this report, we report on the quality of the model outputs by comparing them with available observed data. The present version of the JCOPE_EC includes damping terms for the climatological states of dissolved inorganic nitrate (*DIN*), dissolved inorganic phosphate (*DIP*), dissolved inorganic carbon (*DIC*) and total alkalinity (*ALK*) and so can be used to determine the distributions of ocean acidification indices in the North Western Pacific, with a constraint to the climatological information.

2. Results

2.1. Ocean Acidification Indices *pH* and Ω_{arg}

Figure 1 shows the surface pH_{insitu} (pH_{25}) and Ω_{arg} values calculated from the model outputs for temperature, salinity, DIC and ALK (Figure 1a–d). The pH_{insitu} ranged from 7.85 to 8.10 in the northwestern Pacific area (Figure 9a–d), except in winter and spring (January and April) for the East China Sea near the coast of China (Figure 1a–b). The values in the side of Pacific basically ranged from 8.00 to 8.05. The values were lower (7.85–7.90) in the Okhotsk Sea and the Japan Sea throughout the year, and on the Pacific Ocean side along the Kamchatka Peninsula and Kuril Islands from winter to spring (Figure 1a–b). In the Kuroshio Extension region (140°–180°E, 30°N), the pH values were low during July (summer). The values were highest (8.10–8.15) in winter (January) and spring (April) (Figure 1a) between the subtropical and subarctic regions in the area corresponding to the Kuroshio extension. The values varied with latitude along the 165°E line (Figure 2a). The highest and lowest values occurred in February or March and June or August, respectively, in lower latitude regions around 20°N

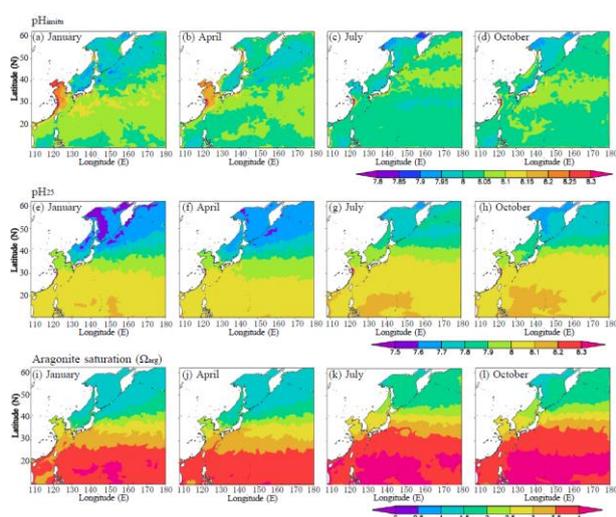


Figure 1 Horizontal surface distributions of pH_{insitu} (a–d), pH_{25} (e–h), and aragonite saturation (Ω_{arg} ; i–l) in January, April, July, and October from the model outputs.

and 30°N, but the opposite occurred at around 40°N and 50°N (Figure 10a).

The pH_{25} values were lower in the northern region and higher in the southern region (Figure 1e–h). The lowest values (7.5–7.6) occurred in the Okhotsk Sea and along the Kamchatka Peninsula on the Pacific Ocean side in winter (January) and spring (April) (Figure 1e–f). The highest values (8.10–8.15) were found in the subtropical region at latitudes below 20°N. The pH_{25} values increased in summer (Figure 1e–h, 2b). The amplitudes were larger in the northern region than in the southern region. The lowest and highest values at each latitude occurred in April and August, respectively.

The surface Ω_{arg} values (>3.5) were high in the subtropical region, and low (2.0–3.0) in the subarctic region (Figure 1i–l). The values were lowest (1.0–1.5) in the Okhotsk Sea and along the Kamchatka Peninsula and the Kuril Islands on the Pacific Ocean side in winter (January) and spring (April). The values increased in summer (July), with similar spatial variability in autumn (October). The time-series at longitude 165°E showed that the Ω_{arg} values were highest in August–September and lowest in April (Figure 2c), and the seasonal variation was similar to that for pH_{25} (Figure 2b).

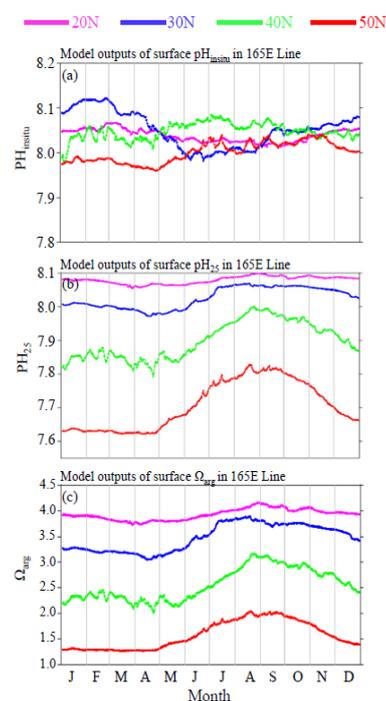


Figure 2 Time series of surface pH_{insitu} (a), pH_{25} (b), and Ω_{arg} (c) at latitude 165°E from the model outputs. The purple, blue, green and red colors show the data for 20°N, 30°N, 40°N and 50°N, respectively.

2.2. Reproducibility for the Biogeochemical Variables

The correlation coefficients between the JMA observed data and the model outputs for each region for 2015 were calculated for chlorophyll-a, DIN , DIC , pH_{25} and ALK (Table 1). The observed data and model outputs could be compared as they overlapped in time and location. The natural logarithm values of chlorophyll-a were calculated, as the plankton concentrations were not normally distributed but followed a lognormal distribution [6].

The correlation values were 0.57, 0.88, 0.86 and 0.87 for chlorophyll-a; 0.72, 0.88, 0.87 and 0.95 for DIN ; 0.74, 0.87, 0.78 and 0.92 for DIC ; 0.48, 0.69, 0.48 and 0.35 for ALK ;

0.74, 0.86, 0.81 and 0.90 for pH_{25} ; and 0.99, 0.98, 0.98 and 0.99 for Ω_{arg} , in the subtropical region, the subarctic region, the Kuroshio Extension and the Japan Sea, respectively (Table 1). Scatter plots (not shown) showed that the parameters were highly correlated with each other (not shown for *DIP*, *DIC* and *ALK*).

Table 1 Correlation coefficients for chlorophyll-a (Chl-a), DIN, DIC, *ALK*, pH_{25} and Ω_{arg} between JMA observed data and the model outputs for each region in 2015 (Figure 1). The observed data and model outputs that matched in time and place were compared. Values in brackets indicate *p*-values the significance level of 0.05 and the significant level of $p < 0.05$. Only for *Chl-a*, \log_{10} (*Chl-a*) values were evaluated.

Parameter	Subtropical region	Subarctic region	Kuroshio extension	Japan Sea
Chlorophyll-a	0.57 (0.07)	0.88 (0.07)	0.86 (0.12)	0.87 (0.15)
DIN	0.72 (0.004)	0.88 (0.12)	0.87 (0.1)	0.95 (0.11)
DIC	0.74 (0.09)	0.87 (0.20)	0.78 (0.17)	0.92 (0.26)
Alkalinity	0.48 (0.09)	0.69 (0.20)	0.48 (0.17)	0.35 (0.26)
pH_{25}	0.78 (0.09)	0.86 (0.20)	0.81 (0.17)	0.90 (0.26)
Ω_{arg}	0.99 (0.09)	0.98 (0.20)	0.98 (0.17)	0.99 (0.26)

3. Conclusion

We developed a nowcast/forecast system related to ocean acidification indices, by using new biogeochemical model (JCOPE_EC) for carbon processes, based on the physical background of a numerical model product, JCOPE2M, which is a three-dimensional operational eddy-resolving model product. Comparison with observed data for 2015 showed that the JCOPE_EC model adequately reproduced the basic features of chlorophyll-a, *DIN* (*DIP*), *DIC* and *ALK*. The seasonal variability in these biogeochemical variables was similar to the observed (climatological) variability, although the modelled seasonal variability in chlorophyll-a and *ALK* deviated somewhat from the observed.

The JCOPE_EC also represented the ocean acidification indices pH and Ω_{arg} , based on the model outputs for temperature, salinity, *DIC* and *ALK*. The simulated values were consistent with observed data, although the $\text{pH}_{\text{in situ}}$ and Ω_{arg} values in some parts in the Okhotsk Sea and the Japan Sea from winter to spring were lower than expected (Figure 1a–d, i–l). This is probably a consequence of the uncertainty in the climatology data for these parameters, and should be investigated more fully.

The current version of the JCOPE_EC system includes climatology damping conditions for some biogeochemical variables, which highlights that the present model is diagnostic. To investigate the mechanisms that drive the modeled ecosystem and the carbon cycle, we will develop a

more prognostic model without climatology damping in future studies, based on the present model. We also note that there is an extreme lack of publicly available observed biogeochemical data for the Okhotsk Sea and the East China Sea. We hope that the availability of observed data will improve, as, with more data, we can reduce the uncertainty in future model outputs for these regions.

Acknowledgement

We acknowledge the consistent support from the Sasakawa Peace Foundation of the Ocean Policy Research Institute (OPRI-SPF).

References

- [1] IGBP, IOC, SCOR (2013) : Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third symposium on the Ocean in a High-CO₂ World International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm, Sweden.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. Stocker T F, Qin D, Plattner Gian-Kasper, Tignor M M B, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Zia Yu, Bex, Midgley P M, 1–1535 pp. Cambridge, UK: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] Ishizu M; Miyazawa T; Tsunoda T; Guo X (2018) : Development of a nowcast/forecast system of ocean acidification, Gekkan Kaiyo, Vol. 50, No. 5, 2018 (in Japanese).
- [4] Ishizu M; Miyazawa T; Tsunoda T; Guo X (2019) : Development of a biogeochemical and carbon model related to ocean acidification indices with an operational ocean model product in the North Western Pacific, Sustainability, 11(9), 2677, <https://doi.org/10.3390/su11092677>.