

「日本沿海予測可能性実験」のための海洋モデル大規模計算：並列化シグマ座標海洋循環モデル JCOPE-T

課題責任者

宮澤 泰正 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

著者

Varlamov M. Sergey*¹, 宮澤 泰正*¹

*¹海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

一般化シグマ座標プリンストン海洋モデルを基盤として並列化海洋循環モデル JCOPE-T を開発した。JCOPE-T は、日本沿海予測可能性実験 (JCOPE) で用いる第 3 世代 (Third generation) のモデルである。Message Passing Interface を用いた並列計算を水平方向の 2 次元分割によって行っている。数値計算スキームは、大気強制、潮汐、河川流出を外力として駆動される地衡流および非地衡流を同時にシミュレーションできるように設計されている。今回、潮汐流を含まない海盆規模のシミュレーションを行うためのパラメタリゼーションを導入した。地球シミュレータでのベクトル化率を向上させるために計算コードを修正し、計算経過時間を約 50% 縮減させた。

キーワード：海洋大循環，地衡流，潮汐流，並列・ベクトル計算

1. はじめに

日本沿海予測可能性実験 (JCOPE) は、海流変動の予測可能性を明らかにし、海流シミュレーションを科学的・社会的に応用することを目的としている。シミュレーションに用いる数値モデルは、一般化シグマ座標プリンストン海洋モデル [1] を基盤としている。JCOPE モデルの第 3 世代として、メッセージパッシングインターフェイス (MPI) を用いモデルを再構築した。ここで JCOPE-T の数値計算スキームとコード構造、および第 3 世代地球シミュレータ (ES3) での計算効率の向上について述べる。

2. 数値計算スキーム

モデルは、ナビエ・ストークス方程式にブシネスク近似と静水圧近似を施したプリミティブ方程式である [1]。基本方程式は、運動量方程式、体積保存式、温度と塩分の輸送方程式、および乱流運動エネルギー方程式から成る。座標系は、水平方向は経度-緯度座標で、鉛直方向は一般化シグマ座標で表現している。効率的な計算のために、運動量方程式を順圧モードと傾圧モードに分割している。水平方向の粘性と拡散は、スマゴリンスキー型の係数を持つ倍調和演算子で表現している。急峻な海底地形周辺の温度と塩分の誤差を軽減するため、シグマレベルではなく z レベルに沿った水平拡散を表現できるようにした。鉛直粘性と拡散は、Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino-Furuichi (MYNNF) [2] によって導出された乱流クロージャモデルから得られた係数を持つ調和演算子によって表現している。

時間積分は、時間平滑化のためのアセリンフィルター付きのリープフロッグスキームによって離散化している。運動量の移流と粘性は、2 次差分スキームを使用

して離散化している。トレーサーの水平移流は、ノイズを低減するためのフラックス修正スキーム [3] によって表現している [3]。シグマ座標においては海底地形が急峻な場合に傾圧圧力勾配誤差が発生する可能性があるため、傾圧圧力勾配は、4 次の圧力勾配スキーム [4] を使用して離散化している。垂直方向の粘性と拡散は調和演算子によって表現しており、MYNNF 乱流クロージャモデルによって強い混合が生じた場合に比較的大きな振幅の粘性・拡散係数を許容するために陰的に差分化している。側面境界条件は、開境界の場合、外部モデルから与える (One-way ネスティング)。

一般化シグマ座標 Princeton Ocean Model [1] の Fortran77 コードを、Fortran 90-2003 形式で書き直し、Message Passing Interface (MPI) 関数とモジュールを追加した。MPI 並列計算は、水平方向の 2 次元領域分割によって行う。領域分割の組み合わせは任意に選択できる。入出力 (I/O) 操作は、大きなファイルサイズを可能にするストリーム形式でバイナリファイルを読み書きすることによって実行する。並列計算のための入力/出力ファイルの領域分割は、Fortran-MPI ベースのサブルーチン/関数を使用してコード内に実装している。

3. 沿岸海洋モデリング

JCOPE-T は当初、潮汐流を含んだ領域沿岸海洋シミュレーション用に開発された [5]。潮汐流を表現するために、11 個の潮汐成分の流量フラックスと海面変動を側面境界に与える。また、表面圧力勾配には、25 個の潮汐ポテンシャルを導入している。潮汐外力として、オレゴン州立大学潮汐インバージョンソフトウェア (OTIS) の $1/12^\circ$ 度モデル [6] の出力を用いている。

海底摩擦のパラメタリゼーションは

$$K_m \partial U / \partial z_b = C_b (U_b, V_b) |U_b|, \quad K_m \partial V / \partial z_b = C_b (U_b, V_b) |V_b| \quad (1)$$

と表現している。 K_m , (U_b, V_b) , C_b はそれぞれ、鉛直粘性係数、海底直上の流速、海底摩擦係数である。潮汐流を含む場合は順圧モード流速 (U_e, V_e) の方程式に以下の摩擦項を加えている (C_e は経験値摩擦係数)。

$$C_e (U_e, V_e) |U_e|, \quad C_e (U_e, V_e) |V_e| \quad (2)$$

順圧モード摩擦項(2)は、浅海域での強い潮汐流変動を安定させるために有効である。

潮流を含めると、領域モデルの開境界からの内部潮汐波の反射が頻繁に発生する。波の反射を軽減するために、温度、塩分、および傾圧速度成分の水平平滑化(単純な三点平滑化)を開境界の近くで行っている。

陸岸からの淡水流出は、月平均気候値流出量を河川河口グリッドでの流量フラックスとして与えている。バルク公式の計算に必要な大気データとして、アメリカ国立環境予測センター(NCEP)の全球予報システム(GFS)と気候予報システム(CFS)、気象庁のメソスケールモデル(JMA MSM)を選択できる。大気データプロバイダーから提供されたGRIB形式のデータを直接読みこむようになっている。

4. 潮汐流を含まない外洋モデリング

今年度は、海盆-全球規模シミュレーションを行うにあたり JCOPE-T コードに非潮汐流オプションを追加した。対象とした北西太平洋領域は、JCOPE2M [8]と同じく、 $10.5^\circ - 62^\circ \text{ N}$, $108^\circ - 180^\circ \text{ E}$ の範囲であり、 $1/12^\circ$ の空間グリッドと 47 層のシグマレベルを有する。北西太平洋モデルは、太平洋のほぼ全体 ($30^\circ \text{ S} - 62^\circ \text{ N}$, $100^\circ \text{ E} - 90^\circ \text{ W}$) を対象とする約 $1/4^\circ$ と 21 シグマレベルの空間グリッドを持つ低解像度モデル内にネストした。低解像度モデルの側面境界条件として、速度ゼロ、月平均気候値温度と塩分を与えた。

このバージョンでは潮汐流を表現せず、追加的な海底摩擦項(2)は入れていない。摩擦項(2)を追加的に入れると、潮汐流を含まない条件の場合、海底斜面上の地衡流的な海流の構造が弱くなりすぎることがわかっている。潮汐混合効果を表現するために、東シナ海など潮汐流が強い場所では鉛直粘性・拡散係数の背景値を大きくするようにした[9]。

河川水流出によって生じる淡水フラックスは、基本的に、沿岸から幅 80km 以内の陸地で生じた降水量を沿岸に沿った海洋側での格子点の降水量増加として表現している。これは、小さな河川からの淡水フラックスを表すものである[10]。大陸河川である長江とアムール川からの流量フラックスは、コード内で実装している。NCEP-CFS の毎時大気データは、表面運動量、熱、および仮想塩分フラックスの計算に使っている。熱と仮想塩分フラックスの項には、それぞれ水温と塩分の月平均気候値への緩和を表す補正項を加えている。オホーツク海とベーリング海では、水温と塩分は、黒潮親潮混合水域の水塊特性を改善するために、30 日の時間スケール

で月平均気候値に緩和している。

5. コード最適化のためのテスト計算

低解像度モデルは、1986年1月から2020年12月までの35年間、NCEP-CFS大気外力によって、年平均気候値水温と塩分場の静止状態からスピニングアップした。高解像度モデルは、同じ初期値から、低解像度モデル出力を側面境界条件に与えながら NCEP-CFS 大気外力によってスピニングアップした。

配列サイズ $543 \times 281 \times 21$ の低解像度モデルを、Intel Fortran と Open MPI の組み合わせによりコンパイルし、 4×5 領域分割のもと 20 個の Intel Xeon プロセッサで計算した。外部モードと内部モードの時間ステップは、それぞれ 24 秒と 960 秒とした。1 日の計算に必要な経過時間は 24 秒であった。

配列サイズ $866 \times 620 \times 47$ の高解像度モデルは、FORTRAN90 / SX と MPI / SX の組み合わせによりコンパイルし、ES3 (NEC SX-ACE) の 8 ノードで計算した。SX-ACE の 1 ノード 4 コアアーキテクチャを考慮し、 $4 \times 8 (32 \text{ コア})$ の領域分割を適用した。外部モードと内部モードの時間ステップは、それぞれ 8 秒と 240 秒とした。1 日の計算に必要な経過時間は、計算効率を向上させるためにコードを変更した後(後述)、84 秒となった。

コンパイラオプション「-pi, auto」を追加することによってインライン展開を促進することにより、シミュレーション期間の長さに応じ経過時間で測った計算効率が 18%~33%向上することがわかった。また DO ループの順序を変更し作業配列を追加することにより、ベクトル化率が 94.6%から 96.8%に向上した結果、効率が 44%向上した。

2021年に新たに導入される地球シミュレータ(ES4)においても、コードの計算最適化をさらに進めていく。強化した計算資源は、アンサンブルとダウンスケーリングの二つの方向で活用していく。アンサンブルシミュレーションは、本研究で開発された北西太平洋モデルのような比較的粗い空間格子モデルにより実行し、海洋予測の不確実性の評価[11]、データ同化の改善[12]、および予測感度の検出[13]のために用いる。ダウンスケーリングは、海洋物理における重要な未解決問題である、外洋と沿岸海流の相互作用を解明するために用いる。

謝辞

地球情報科学技術センター(CEIST)の地球シミュレーターのサポートスタッフの皆様のご支援に心より感謝申し上げます。本報告に記載したコード最適化は、サポートスタッフの皆様へ実施していただきました。

文献

1] Mellor, G. L. et al., "A generalization of a sigma coordinate Ocean Model and an

- inter comparison of model vertical grids” ,
in: Ocean Forecasting: Conceptual Basis
and Applications. N. Pinardi, J. Woods
(Eds.), Springer, Berlin, 55-72, (2002)
- [2] Furuichi, N. et al., “Assessment of
turbulence closure models for resonant
inertial response in the oceanic mixed
layer using a large eddy simulation model” ,
J. Oceanography 68, 285-294, (2012)
- [3] Boris, J. P. and Book, D. L.,
“Flux-corrected transport I: SHASTA, a
fluid transport algorithm that works” , J.
Comput. Phys. 11, 38-69, (1973)
- [4] McCalpin, J. D., “A comparison of
second-order and fourth-order pressure
gradient algorithms in a sigma coordinate
ocean model” , Int. J. Num. Methods Fluids
18, 361-383, (1994)
- [5] Varlamov, S. M. et al., “M2 baroclinic
tide variability modulated by the ocean
circulation south of Japan” , J. Geophys.
Res. Oceans 120, 3681-3710, (2015)
- [6] Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y.,
“Efficient inverse modeling of barotropic
ocean tides” , J. Atmos. Oceanic Tech. 19,
183-204, (2002)
- [7] Mellor, G. L., “Users guide for a
three-dimensional, primitive equation,
numerical ocean model” , (2004)
- [8] Miyazawa, Y. et al., “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, (2017)
- [9] Lee, J.-S. and Matsuno, T., “Intrusion
of Kuroshio Water onto the Continental
Shelf of the East China Sea” , J.
Oceanography 63, 309-325, (2007)
- [10] Hirose, N., “Inverse estimation of
empirical parameters used in a regional
ocean circulation model” , J. Oceanography
67, 323-336 (2011)
- [11] Aoki, K. et al., “An objective method
for probabilistic forecasting of
multimodal Kuroshio states using ensemble
simulation and machine learning” , J. Phys.
Oceanography 50, 3189-3204, (2020)
- [12] Miyazawa, Y. et al., “Applying the
adjoint-free 4dVar assimilation to
modeling the Kuroshio south of Japan” ,
Ocean Dynamics 70, 1129-1149, (2020)
- [13] 宮澤泰正, 青木邦弘, “海洋変動予測モ
デルのアンサンブル化による観測との協働可
能性について” , 52, 332-338, (2020)

High-performance Computing of Ocean Models for Japan Coastal Ocean Predictability Experiment: A Parallelized Sigma-coordinate Ocean Circulation Model JCOPE-T

Project Representative

Yasumasa Miyazawa Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Sergey M. Varlamov*¹, Yasumasa Miyazawa*¹

*¹ Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We have developed a parallelized ocean circulation model based on the Princeton Ocean Model with generalized coordinate of sigma. The model is the Third generation of the ocean circulation model used for Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE-T). Horizontal two-dimensional region decomposition is applied for parallel computing with the Message Passing Interface. The numerical schemes are designed for enabling the concurrent simulation of both geostrophic and ageostrophic ocean currents driven by the atmospheric, tidal, and river discharge forcing components. Additional parameterization schemes are newly included for the non-tidal simulation in basin scales. Several modifications of the calculation code for increasing efficiency in the vector computation demonstrate reduction of the elapsed time in approximately 50% on the Earth Simulator.

Keywords : ocean general circulation, geostrophic currents, tidal currents, parallel/ vector computation

1. Introduction

Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE) aims at investigation of the predictability in the ocean current variations and applications of the ocean current simulation results for both scientific and social needs. The numerical models used for the simulations are based on the Princeton Ocean Model with generalized coordinate of sigma [1]. Recently we have reconstructed the model using the Message Passing Interface (MPI). The reconstructed model is the third generation of the JCOPE model (JCOPE-T). This document describes the numerical schemes and the code structure of JCOPE-T, and improvements in computational efficiency on the third generation of the Earth Simulator (ES3).

2. Numerical schemes

The model is a variant, the primitive equation, of the Navier-Stokes equation with the Boussinesq and hydrostatic approximations [1]. The basic equations consist of the momentum equations, volume conservation equation, transport equations of temperature and salinity, and turbulence kinetic energy equation. The coordinate system of the equations is described horizontally in the longitude-latitude coordinate, and vertically in the generalized sigma coordinate. Splitting the momentum equations into the barotropic and baroclinic modes is adopted for the efficient calculation. The horizontal viscosity and diffusion are represented by the biharmonic operators with the Smagorinsky-type coefficients.

We include the lateral horizontal diffusion along not a sigma-level but along a z-level to exclude erroneous temperature and salinity states near the steep bottom topography. The vertical viscosity and diffusion are represented by the harmonic operator with the coefficients obtained from the turbulent closure model derived by Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino-Furuichi [2].

Time-stepping is discretized by the Leapfrog scheme with the Asselin-type temporal smoothing. The momentum advection and viscosity are discretized using the second order difference scheme. The horizontal advection of the tracers is represented by the flux-correction scheme for reducing small scale noises [3]. Since the use of the sigma coordinate could result in the baroclinic pressure gradient errors in cases of steep bottom topography, the baroclinic pressure gradient is carefully discretized using the fourth-order pressure gradient schemes [4]. The vertical viscosity and diffusion are represented by the harmonic operator with the implicit discretization for allowing the relatively large amplitude of the viscosity and diffusion coefficients in case of the enhanced mixing represented by the MYNNF turbulent closure model. The lateral boundary conditions can be supplied from outside models in case of the open boundaries (one-way nesting).

We have rewritten the original Fortran 77 code of the Princeton Ocean Model with generalized coordinate of sigma [1] in Fortran 90-2003 format, and added the Message Passing Interface (MPI) functions and modules. Horizontal

two-dimensional domain decomposition is applied for parallel computing with MPI. Combinations of the domain decomposition can be selected arbitrarily. Input and output (I/O) operations are performed by reading/writing the binary files with the stream type allowing large file size. The domain decomposition of the input/output files for the parallel computation is internally conducted in the code using Fortran-MPI based subroutines/functions.

3. Coastal version of JCOPE-T

JCOPE-T was originally developed for regional coastal simulations with inclusion of the tidal currents [5]. To represent the tidal current effects, the model puts volume fluxes and sea level anomalies of 11 tidal constituents at lateral boundaries. Also, the surface pressure gradient includes the equilibrium gradient induced by 25 tidal potential constituents. Information of the tidal components is provided by a 1/12° version model of Oregon State University Tidal Inversion Software (OTIS) [6].

The bottom friction parameterization is represented as $K_m \partial U / \partial z_b = C_b (U_b, V_b) |U_b|$, $K_m \partial V / \partial z_b = C_b (U_b, V_b) |V_b|$ (1), where K_m , (U_b, V_b) , C_b are the viscosity coefficient, the current velocity components above the bottom (b), and the empirical bottom friction coefficient [7], respectively, and in the case of including the tidal currents, the external mode momentum equation additionally include the friction term as

$$C_e (U_e, V_e) |U_e|, C_e (U_e, V_e) |V_e| \quad (2)$$

, where C_e and (U_e, V_e) are the empirical external mode (e) friction coefficient and external mode (vertical mean) velocity components, respectively. The additional dissipation term (2) effectively stabilizes the unrealistic velocity fluctuation caused by the tidal forcing especially around the shallower shelf regions.

The inclusion of the tidal currents frequently causes the reflection of the internal tidal waves from the open boundaries of the regional models. To mitigate the reflection of the waves, we apply the horizontal smoothing (a simple three points smoothing) of temperature, salinity and internal velocity components near the open boundaries.

The fresh water discharge is represented as water volume fluxes at river mouth grids with monthly mean climatological discharge volumes. The atmospheric data required for calculation of the bulk formulae are obtained from several data sources including the Global Forecast System (GFS) and Climate Forecast System (CFS) of National Centers for Environmental Prediction (NCEP), and the MesoScale Model of Japan Meteorological Agency (JMA). The code directly reads the GRIB format data provided from the original atmospheric data providers.

4. Open ocean (non-tidal current) version of JCOPE-T

In this fiscal year, we have added a non-tidal option into the JCOPE-T code for basin-global scales simulations. A mainly targeted Northwest Pacific region covers 10.5° -62° N, 108° -180° E, as same as those simulated by JCOPE2M [8]. The Northwest Pacific model with a spatial grid of 1/12° and 46 vertical levels was embedded with one-way nesting in a low-resolution model with a spatial grid of approximately 1/4° and 21 sigma levels, covering the almost entire Pacific region (30° S-62° N, 100° E-90° W). Lateral boundary condition of the low-resolution model is monthly climatological temperature and salinity with zero velocity.

This version does not include the tidal currents, and excludes the additional bottom friction terms (2). We find that the additional inclusion of the dissipation term (2) results in unrealistically weakened geostrophic ocean currents over the bottom slopes in case of such non-tidal current condition. To represent the tidal mixing effect, we have enhanced the background turbulence as vertical eddy diffusivity and viscosity where the tidal current is strong, e. g. East China Sea [9].

The fresh water flux caused by the river discharge is basically represented as the enhanced precipitation along the coasts caused by the coastal precipitation over a strip of land 80 km wide, which represents the freshwater flux from small rivers [10]. The fresh water volume flux from the only two continental scale rivers: Changjiang and Amur, is included in the code. The hourly atmospheric data provided from NCEP-CFS are applied the calculation of the surface momentum, heat, and virtual salt fluxes. The heat and virtual salt flux terms include the correction terms representing relaxation to the monthly climatology of temperature and salinity, respectively. In both the Okhotsk and Bering Seas, temperature and salinity are relaxed to the monthly climatology with a restoring time scale of 30 days to improve water mass property in the Mixed Water Region.

5. Preliminary runs for code optimization

The low-resolution model was spun-up for a 35-year period from January 1986 to December 2020 by the NCEP-CFS forcing from an initial condition of no motion with the annual-mean temperature and salinity fields created from the climatology. The high-resolution model was also run using the NCEP-CFS forcing with one-way nesting by the low-resolution model outputs from the same initial condition.

The low-resolution model with an array size of 543 x 281 x 21 was compiled by Intel Fortran combined with Open MPI, and calculated on 20 numbers of Intel Xeon processors by applying 4 x 5 domain decomposition. The external and internal mode time steps were 24 and 960 seconds, respectively. The elapsed time required for 1-day calculation was 24 seconds.

The high-resolution model with an array size of 866 x 620 x 47 was compiled by FORTRAN90/SX combined with MPI/SX, and calculated on 8 nodes of ES3 (NEC SX-ACE). The domain decomposition of 4 x 8 was applied by considering 4 cores built-in 1 node of the SX-ACE architecture. The external and internal mode time steps were 8 and 240 seconds, respectively. The elapsed time required for 1-day calculation was 84 seconds after some code modifications (later described) for improvement in the computational efficiency.

We found that the inline expansion by adding a compiler option '-pi,auto' improved computational efficiency by 18%-33%, depending on the length of the simulation period. Also, improvement in vectorization rate from 94.6% to 96.8% by changing the order of some DO loops and by adding working arrays in some subroutines effectively improved the efficiency by 44%.

We will further continue the optimization in the computational efficiency of the same code at the newly introduced Earth Simulator in 2021 (ES4). We will utilize the improved computational efficiency for two directions: ensemble and downscaling. The ensemble simulation is performed using relatively coarser grid models like the Northwest Pacific model developed by the present study, and required for estimation of the uncertainty in the ocean prediction [11], improvements in data assimilation [12], and detection of forecast sensitivity [13]. The downscaling is necessary for answering an important open question in physical oceanography: open ocean and coastal currents interactions.

Acknowledgement

We deeply appreciate for all support by the support staffs of the Earth Simulator in Center for Earth Information Science and Technology (CEIST). In particular, the code optimizations described in the report were actually done by them.

References

[1] Mellor, G. L. et al., "A generalization of a sigma coordinate Ocean Model and an intercomparison of model vertical grids", in: *Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications*. N. Pinardi, J. Woods (Eds.), Springer, Berlin, 55-72, (2002)

[2] Furuichi, N. et al., "Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using a large eddy simulation model", *J. Oceanography* 68, 285-294, (2012)

[3] Boris, J. P. and Book, D. L., "Flux-corrected transport I: SHASTA, a fluid transport algorithm that works", *J. Comput. Phys.* 11, 38-69, (1973)

[4] McCalpin, J. D., "A comparison of second-order and fourth-order pressure gradient algorithms in a sigma coordinate ocean model", *Int. J. Num. Methods Fluids* 18,

361-383, (1994)

- [5] Varlamov, S. M. et al., "M2 baroclinic tide variability modulated by the ocean circulation south of Japan", *J. Geophys. Res. Oceans* 120, 3681-3710, (2015)
- [6] Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y., "Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides", *J. Atmos. Oceanic Tech.* 19, 183-204, (2002)
- [7] Mellor, G. L., "Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model", (2004)
- [8] Miyazawa, Y. et al., "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, (2017)
- [9] Lee, J.-S. and Matsuno, T., "Intrusion of Kuroshio Water onto the Continental Shelf of the East China Sea", *J. Oceanography* 63, 309-325, (2007)
- [10] Hirose, N., "Inverse estimation of empirical parameters used in a regional ocean circulation model", *J. Oceanography* 67, 323-336 (2011)
- [11] Aoki, K. et al., "An objective method for probabilistic forecasting of multimodal Kuroshio states using ensemble simulation and machine learning", *J. Phys. Oceanography* 50, 3189-3204, (2020)
- [12] Miyazawa, Y. et al., "Applying the adjoint-free 4dVar assimilation to modeling the Kuroshio south of Japan", *Ocean Dynamics* 70, 1129-1149, (2020)
- [13] Miyazawa, Y., and Aoki, K., "Feasibility of co-working between observation and ocean forecasting by ensemble" (in Japanese), *Kaiyo Monthly* 52, 332-338, (2020)