

# 海流前線波動予測に向けた高解像度海流モデリングの応用研究

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

Varlamov Sergey M.<sup>\*1</sup>, 日原 勉<sup>\*1</sup>, 宮澤 泰正<sup>\*1</sup>, 美山 透<sup>\*1</sup>, 石津 美穂<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

JAMSTEC JCOPE-T 海洋循環モデルに MPI 並列化を実装することにより、高解像度化したダウンスケール入れ子モデルの積分を著しく高速化し、実用的なリアルタイム運用を可能にした。さらにモデルシステムの一部として、マルチスケール 3 次元変分法 (MS3DVAR) による直接的なデータ同化手法を導入し、計算結果が観測された海洋状況に近づくようにした。

キーワード：海流予測, 黒潮流路, 黒潮前線波動, 海洋データ同化

## 1. はじめに

海洋数値モデル Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE) は、2000 年代に、Open Multi-Processing (OMP) を用いたメモリ共有による並列化によって高速化を実現した。この手法は長い間有効で、十分に能力を発揮してきた。しかし、現在、活発に利用されている非常に高解像度化されたダウンスケールモデルに対しては、あまり効果的ではない。この問題を解決するために、MPI 並列手法を適用した JCOPE-T (潮汐を考慮した高空間解像度の JCOPE モデル) を構築した。そして、新たに構築したこのモデルのテストを、地球シミュレータや他の JAMSTEC 内で利用できる計算機システムで行った。その結果、MPI 並列化の適用することで、JCOPE-T の安定したリアルタイムの運用と、豊後水道やトカラ海峡を対象とした 3 段のダウンスケール入れ子モデル (空間解像度: 1/500°, 200m) の活用が可能となった。

## 2. JCOPE-T MPI モデル

JCOPE-T MPI モデルは Princeton Ocean Model (POM) [1] と JCOPE/JCOPE-T[2, 3] モデルを基に作成されている。このモデルの座標系は、水平方向には緯度-経度座標系、鉛直方向には静水平圧近似を仮定して規格化したシグマ座標系である。JCOPE-T MPI のコードは主に FORTRAN で書かれており、モジュール構造やストリーム入出力など、Fortran90 と Fortran2003 の機能が多用されている。JCOPE-T MPI のモジュールは、メインプログラムのほか、変数とパラメータを定義するモジュール、物理モデルと開境界条件のモジュール、MPI 機能サポートモジュール、気象データと潮汐データを入力、内挿するモジュール、I/O モジュール、河川供給モジュールなどが含まれている。I/O モジュールで用いられる入出力ファイルの形式は、これまでの JCOPE モデルと同様である。ハードディスクの I/O オペレーションの大半はマスタープロセスによって実行されており、すべてのサブプロセスから出力に必要と

されるモデル変数の情報がマスタープロセスに集約され、その後、計算結果の出力が実行される。データの入力においては、まず、マスタープロセスによって全領域のデータが読み込まれ、その後、各サブプロセスへと入力データの分配が行われる。各数値実験に対するパラメータは、FORTRAN ネームリストファイルによって入力される。JCOPE-T MPI モデルでは、 $N_x * N_y$  個 MPI サブ領域から成るほぼ任意の矩形領域へ分割するために、コンパイラプリプロセッサディレクティブを使用している。全 MPI サブ領域の格子点数の総和は、全領域の格子点数と必ずしも一致する必要がなく、その数以上であればよい。場合によっては、最も東側と最も北側の MPI サブ領域では計算に使われない部分が生じる。陸と海の分布が複雑な場合、いくつかの MPI サブ領域には、海として計算される格子点が含まれていない、あるいはその数が限られている可能性がある。

MPI を用いた並列化の効率性を確認するために、我々はきわめて高解像度な 3 段のダウンスケール入れ子モデルである JCOPE-T-Tokara500 モデルを用いて検証した。このモデルの空間解像度は 1/500° であり、格子サイズは 1002x1002x46 である。2 次元順圧モードの積分時間ステップは 0.2 秒、3 次元傾圧モードの積分時間ステップは 4 秒である。この小さな積分時間ステップは、「2 次元モードの最大モデル深度」、「生じる可能性がある水平移流速度とモデル解像度」、および「モデルによって陽に再現される内部潮汐波によって引き起こされる強い鉛直流」の関係によって決定される。OMP タイプの自動並列化でコンパイルし、SX-9 ベクトルスーパーコンピュータにおいて 4 つのコアを使用してモデルを実行すると、1 日分の計算を終えるのに約 12 時間かかった。一方、ES における MPI バージョンの計算では、1 日分の計算にかかった時間は、「16 コア、4x4 分割」の場合は約 6.1 時間、「64 コア、8x8 分割」の場合は約 2.0 時間、「100 コア、10x10 分割」の場合は約 1 時間 25 分であった。これらの検証によって、

ESを利用することによって、高解像度モデルのリアルタイム運用が可能であることが確認できた。

## 2.1 データ同化モジュール

我々はさらに、JCOPE-T MPI モデルに対してオフラインのマルチスケール3次元変分法 (MS3DVAR) [4] と Increment Analysis Update (IAU) を用いたデータ同化手法を導入した。この同化手法を導入するにあたり、時空間解像度の高い新しい衛星海面水温データが利用可能になったことで、海面水温に対する同化時間間隔を1日に短縮し、同化計算における空間解像度を $1/4^\circ$ から $1/8^\circ$ まで小さくした。この同化手法では、観測値とモデルアウトプットを大スケール(100km以上)と小スケール(30kmオーダー)に分解したあと、各スケールに対して個別に誤差の最小化が行われる。データ同化が行なわれる格子間隔( $1/8^\circ$ )はモデル格子の空間解像度( $1/36^\circ$ )よりも粗いので、より小さなスケール(20km以下)のモデルの擾乱が解析値に対して影響を与えないようにしなければならない。そこで、データ同化によって得られた解析値と、初期推定値であるモデルのアウトプットの日平均値の差であるIAUインクリメントを算出し、IAUに20kmの空間スケールのガウスフィルターを適用することで、20kmよりも小さい擾乱をIAUインクリメントから取り除いている。フィルタリングを行うことで、データ同化によって得られた解析値の「急変部分」を平滑化することもできる。この急変部分は、インクリメントが定義されている領域と定義されていない(ゼロの)領域の差や、モデルのアウトプットを解析値の格子点に補完する際に用いる双線形補間によって生じる。さらに、IAUインクリメントの値から、データ同化の際に考慮されていない小スケールのシグナルも取り除いている。その結果として、モデルにおいて考慮されている小スケール(メソスケール)の変化を過剰に平滑化することを防ぐことができる。モデルのアウトプットと観測値の大スケール(100km以上)および、中間スケール(30km以上)の空間分布は比較的良好に一致する。図1(a)に、新しいデータ同化手法によって得られた解析値の例として、2018年3月20日の日本海南部における海面水温を示す。また、比較対象として、同日における多種類衛星コンポジット海面水温データと以前のデータ同化手法(ナッジング)によって得られた解析値の海面水温データの空間分布をそれぞれ、図1(b)、(c)に示す。

ナッジングを用いていた以前の同化結果は、新しい同化結果と比べて空間分布が平滑化されており、衛星海面水温データと比較すると、韓国沿岸に沿って北へ伸びている暖水と北朝鮮沿岸にそって南へ伸びている冷水を過大評価していることがわかる。また、能登半島から北西へ伸びる暖水の空間規模を過小評価している。ただし、

新しいデータ同化手法によって得られた海面水温の空間分布も、衛星海面水温データの空間分布と比較すると、 $133^\circ\text{E}$ に沿った北への暖水の流入など、いくつかの違いが見られる。新しいデータ同化手法によって得られた結果の妥当性は今後さらに検討していく必要がある。

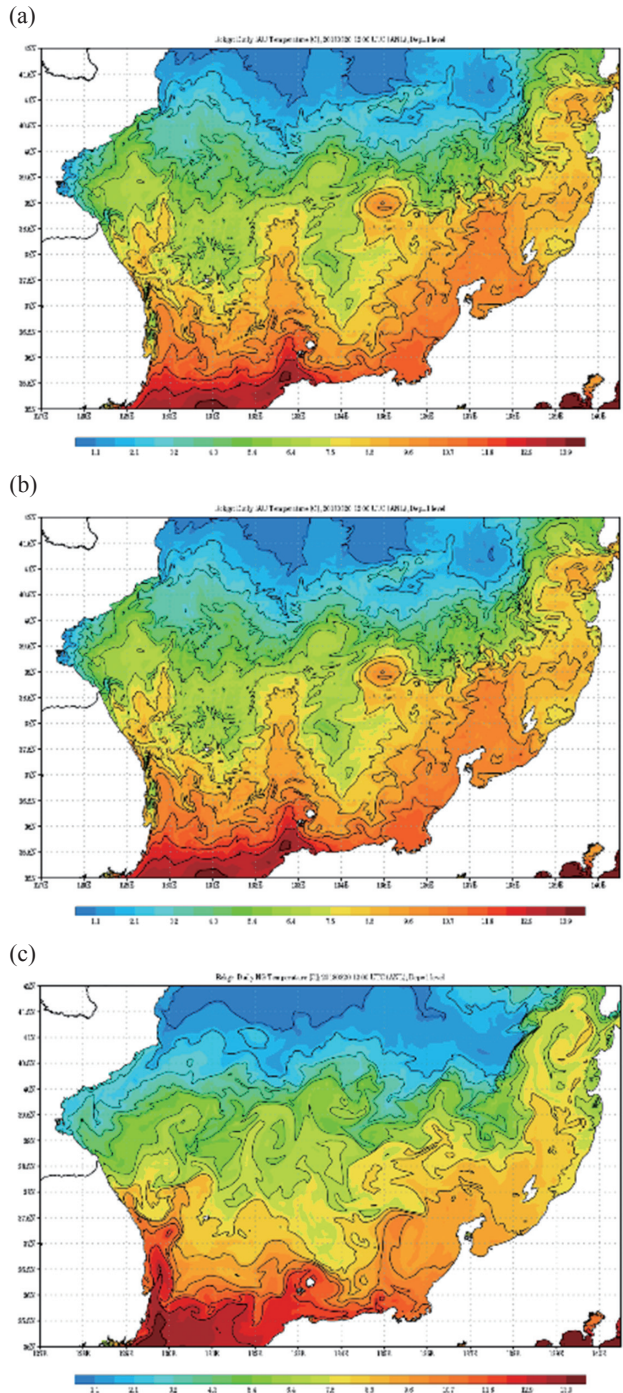


図1 2018年3月20日の日本海南部における日平均海面水温の空間分布 (a)MS3DVAR IAU データ同化手法によって得られた解析値、(b)多種類衛星コンポジット海面水温データ、(c)潮汐の影響を取り除いたモデルアウトプットにJCOPE2Mからの補間値にナッジングする手法によって得られた解析値

## 謝辞

本研究におけるひまわり8号海面水温データの利用およびこれに関係する衛星海面水温データの解析処理は、宇宙航空研究開発機構からの受託業務「衛星データの海洋モデルへの適用と利用実証」によるものである。

## 文献

- [1] Mellor G.L., Hakkinen S., Ezer T., Patchen R., A generalization of a sigma coordinate ocean model and an inter comparison of model vertical grids. In: Pinardi N., Woods J.D. (eds) *Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications*, Springer, New York, pp. 55-72, (2002).
- [2] Miyazawa Y., Zhang R.C., Guo X., Tamura H., Ambe D., Lee J.S., Okuno A., Yoshinari H., Setou T., Komatsu K., Water mass variability in the Western North Pacific detected in a 15 years eddy resolving ocean reanalysis. *J. Oceanography* vol. 65 pp. 737-756 (2009).
- [3] Varlamov S.M., Guo X., Miyama T., Ichikawa K., Waseda T., Miyazawa Y., M2 baroclinic tide variability modulated by the ocean circulation south of Japan. *J. Geophysical Research Oceans*, vol. 120, pp. 3681-3710 (2015).
- [4] Miyazawa Y., Varlamov S.M., Miyama T., Guo X., Hihara T., Kiyomatsu K., Kachi M., Kurihara Y., Murakami H., 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 Dyn.*, vol. 67, pp. 713-728 (2017).

# Application Study of High-resolution Ocean Current Modeling toward the Frontal Wave Prediction

Project Representative

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

Authors

Varlamov Sergey M.<sup>\*1</sup>, Tsutomu Hihara<sup>\*1</sup>, Yasumasa Miyazawa<sup>\*1</sup>, Toru Miyama<sup>\*1</sup> and Miho Ishizu<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

An MPI parallelization that was implemented for JAMSTEC JCOPE-T ocean circulation models allow significantly accelerate integration of very high resolution nested downscaled models that makes them practically useful even for the real-time applications. In addition, new direct MS3DVAR data assimilation method was made a part of modeling system that allows to model closer follow the observed ocean conditions.

**Keywords:** Ocean current forecast, Kuroshio path, Kuroshio frontal wave, Ocean assimilation

## 1. Introduction

Historically, JCOPE (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment) family of ocean models were developed in 2000th and utilized automatic compiler generated OMP-type shared memory parallelization. It was enough at some stage, but recently it became a weak point in applications of very high-resolution downscaled versions of model. To overcome this limitation, MPI parallelized version of JCOPE-T (tide enabled) model was realized and tested on ES and other computer systems available in JAMSTEC: local workstations and DA (Data Analysis) system. MPI parallelization made it possible to start stable real-time and research operations of very high resolution (1/500th degree or ~200 m) 3rd level nested downscaled models for Bungo Strait and Tokara Strait areas.

## 2. JCOPE-T-MPI model structure

The JCOPE-T-MPI model is based on the code of POM [1] and JCOPE/JCOPE-T [2,3] models. Model is formulated in generalized sigma vertical coordinates and latitude – longitude horizontal coordinates, it utilizes hydrostatic approximation. JCOPE-T-MPI code is mainly FORTRAN code that uses many features of FORTRAN 90 and FORTRAN 2003 programming languages: modular structure, stream output/input operations etc. Basic modules of JCOPE-T-MPI include: main program, shared variables and parameters definition module, model physics and open boundary conditions module, MPI functionality support module, meteorological and tidal date input and interpolation modules, general I/O operations module, rivers fresh water supply module etc. IO module preserves succession with earlier versions of JCOPE models data files structure. Majority of the hard disks IO operations are performed by master process. Before output, necessary model field are gathered by master

process from all sub-processes and then single output operation is performed. On input stages, global domain data are read in memory by master process and then scattered to all sub-processes. Parameters for each experiment are provided using FORTRAN name-list files. JCOPE-T-MPI model uses compiler preprocessor directives to supports almost arbitrary rectangular domain decomposition on  $N_x * N_y$  equal MPI subdomains. For semi-global model number of subdomains in longitudinal direction must exactly match the global model grid size, when in other cases most eastern MPI subdomains and most northern ones could be used partially. For complicated shapes of land and sea distribution, some MPI subdomains could do not include active model points or very limited number of such.

To demonstrate MPI parallelization efficiency, we can consider 3<sup>rd</sup> level very high resolution downscaled JCOPE-T-Tokara500 model case. With horizontal resolution of 1/500<sup>th</sup> degree and grid size 1002x1002x46 grid points, model 2D barotropic mode integration time step was 0.2 seconds and 3D baroclinic mode time stepping was 4 seconds. So small integration time steps were dictated by maximum model depth (2D mode) and by possible horizontal advection speed and model resolution as well as by strong vertical motion caused by internal tidal waves that are explicitly simulated by model. When compiled with OMP-type auto-parallelization and running model using 4 cores on SX-9 vector supercomputer, it required ~12 hours of wall clock time for one-day integration, when for MPI version on ES it took ~6.1 hours per day using 4x4 decomposition with 16 cores, ~2.0 hours per day with 8x8 decomposition and 64 cores used and ~1h25m for 10x10 decomposition (100 cores). It made possible to start real time operations of such high-resolution models.

## 2.1 Data assimilation module

The newly implemented offline MS3DVAR (multi scale 3D variational) data assimilation method, details of which are described in [4], can be used with new model. Availability of new satellites data made it possible to decrease assimilation time windows up to 1 day for SST and refine an assimilation analysis grid from  $1/4^{\text{th}}$  to  $1/8^{\text{th}}$  degree. Method also uses horizontal scales separation of observed and model data on large (100 km and more) and small (order of 30 km) scales and realizes error minimizing search separately for each scale. As an assimilation analysis is done on coarser than model grid

( $1/8^{\text{th}}$  degree vs  $1/36^{\text{th}}$  degree for JCOPE-T), the smaller scale model disturbances (less than  $\sim 20$  km) must do not be impacted by analysis fields. To realize it, we estimate an IAU (increment analysis update) as difference of assimilation analysis minus model daily mean values as first guess and then filter out from IAU smaller than  $\sim 20$  km disturbances by applying Gaussian filter with 20 km scale. Filtering also smooths “jumps” in assimilation analysis field between defined and undefined (zero) zones as well as created by bilinear interpolation to finer model grid jumps in gradients of analysis. In addition, we remove from IAU values the small scale signal do not supported by used analysis scaling and as result do not over-smooth corresponding model small scales (mesoscales) variability. Same time model fields relatively close follow to the large ( $>100$  km) and intermediate ( $>30$  km) scale features found in observed data. On Fig. 1 it is given one example of new (a) and old (c) data assimilation results for 2018 March 20<sup>th</sup> UTC in the Southern part of Japan Sea with an observed merged satellites SST field as (b).

Comparing these images, we can see, that old realization of assimilation (nudging) is smoother and overestimates warm waters intrusion along South Korean coast, overestimates intrusion of cold waters along the North Korea coast and underestimates penetration of warm waters to the north-west from the Noto Peninsular, when compared with observations. However, some differences can be found also for the new method implementation, like warm waters intrusion to the north along 133E.

## Acknowledgment

This project was supported by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) for utilization of the satellite sea surface temperature including Himawari-8. Usage of the Earth Simulator for conducting the operational forecasting in near real-time basis was definitely supported by Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (CEIST, JAMSTEC).

## References

- [1] Mellor G.L., Hakkinen S., Ezer T., Patchen R., A generalization of a sigma coordinate ocean model and an inter comparison of model vertical grids. In: Pinardi N., Woods J.D. (eds) *Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications*, Springer, New York, pp. 55-72, (2002).
- [2] Miyazawa Y., Zhang R.C., Guo X., Tamura H., Ambe D., Lee J.S., Okuno A., Yoshinari H., Setou T., Komatsu K., Water mass variability in the Western North Pacific detected in a 15 years eddy resolving ocean reanalysis. *J. Oceanography* vol. 65 pp. 737-756 (2009).

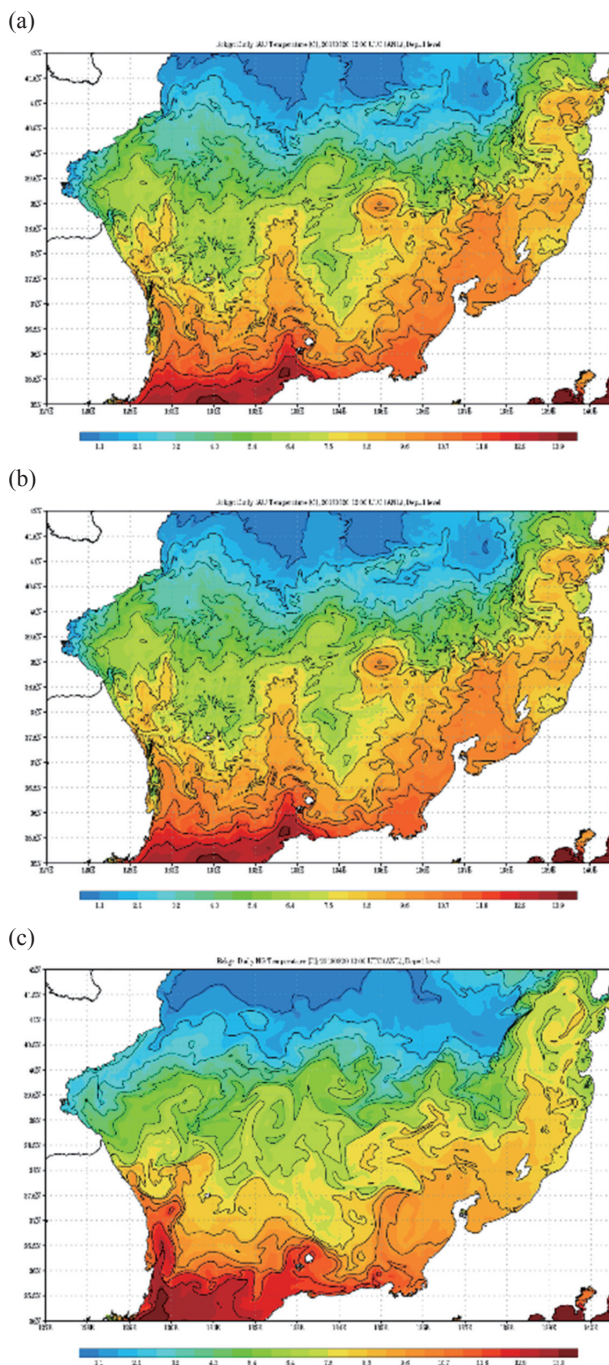


Fig. 1 Daily mean sea surface temperature for (a) new MS3DVAR IAU assimilation case, (b) observed merged satellites SST and (c) for nudging of de-tided model fields to interpolated JCOPE2M host model field, March 20, 2018.

- [3] Varlamov S.M., Guo X., Miyama T., Ichikawa K., Waseda T., Miyazawa Y., M2 baroclinic tide variability modulated by the ocean circulation south of Japan. *J. Geophysical Research Oceans*, vol. 120, pp. 3681-3710 (2015).
- [4] Miyazawa Y., Varlamov S.M., Miyama T., Guo X., Hihara T., Kiyomatsu K., Kachi M., Kurihara Y., Murakami H., 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 Dyn*, vol. 67, pp. 713-728 (2017).