

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

日原 勉^{*1}, 宮澤 泰正^{*1}, 美山 透^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

本研究は、データ同化手法によって衛星海面水温データ等を海洋数値モデルと融合し、黒潮前線波動の変動を再現、予測できる新たな海洋プロダクトを作成して精度を検証するとともに、一般に公開してその社会応用を促進することを目的とする。このため、日本南岸域を対象とする Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) を用いたデータ同化システムを構築した。本研究で構築したデータ同化システムは、2016 年 11 月末の海況の変化をよく再現していた。ただし、高知沿岸に係留されているブイを用いた評価結果では、黒潮前線波動に伴うと思われる数日周期の海面水温変動の再現性に課題を残していることが示された。本システムの利用実証を行うために、和歌山県水産試験場と連携して、データ同化システムによって得られた解析値および、解析値をもとに計算した予測値の情報を漁業関係者向けに提供するウェブサイトを作成した。今後の課題は、ひまわり 8 号の高頻度・高解像度観測能力をさらに活用することである。ひまわり 8 号は 10 分間・2km 間隔で観測しており、海面水温の日内変動や沿岸域における数十 km スケールの擾乱を解像する能力を有している。今後、同化間隔を 1 日より短くし、沿岸域における顕著な日内変動である潮汐を考慮するモデルを導入することを検討する。

キーワード：日本南岸海域, データ同化, 海洋モデル, 衛星海面水温データ, 海況予測

1. 背景及び目的

宇宙航空研究開発機構は、地球観測衛星による地球観測を推進するとともに、観測成果の社会応用を拡大深化させるための施策を強化している。近年、衛星観測データと数値モデルの融合による観測成果の高精度化および利用可能性の拡大が注目されるようになった。海洋研究開発機構が開発している海洋数値モデル、および観測データと数値モデルの融合を実現するデータ同化手法も、そのための有力な手段であると考えられている。本研究は、データ同化手法によって衛星海面水温データ等を海洋数値モデルとそれを融合し、新たな海洋プロダクトを作成してその精度を検証し、一般に公開してその社会応用を促進することを目的とする。

2. 同化手法

2.1 Local Ensemble Transformation Kalman Filter データ同化システム

本研究では、局所アンサンブル変換カルマンフィルター (Local Ensemble Transformation Kalman Filter; LETKF) [1] を用いた。LETKF は、アンサンブル予測の束を用いてモデル力学を反映した予測誤差共分散を表現できるため、高解像度海面水温観測データが含まれている水温急変部（フロント）の情報を平滑化することなく正確に表現するのに適している [2]。また、局所化することによって、格子点毎に独立して実行できることから並列効率がよい。これに加え、アンサンブル予測も並行して実行できるので、現代の高速計算機の主流となっている並列計算機に適した同化手法である。LETKF 計算コードは、Miyoshi et

al. (2010) [3] において実装されたものを用いた。

準リアルタイムでの利用実証を目的として、鉛直シグマ座標海洋循環モデル (Stony Brook Parallel Ocean Model; sbPOM) [4] を用いた Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 水温データの同化実験 [2] をベースとする日本南岸全域 (128-142E, 28-36N) を対象とする LETKF 同化システムを元に、1 日ごとにデータ同化を行うシステムを構築した。同化システムのパラメータを表 1 に示す。水平解像度は 1/36 度、鉛直シグマレベルは 47 レベルである。海表面外力は、National Centers for Environmental Prediction (NCEP) /National Center for Atmospheric Research (NCAR) 再解析データの 10m 風速、2m 気温、2m 水蒸気量、雲量、モデル海面水温、モデル流速を変数とするバルク式によって与えた。晴天短波放射は、Rosati and Miyakoda (1988) [5] の手法によって計算した。初期値水温塩分は、Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2M (JCOPE2M) 解析データ [6] の 2016 年 11 月 1 日の水温塩分値をモデル格子に内挿して作成した。静止状態から出発し、2016 年 11 月 1 日から 2016 年 12 月 9 日まで同再解析データを側面境界条件として与えモデルを駆動した。その際、モデルの水温塩分計算値の 50 時間移動平均値を JCOPE2M 再解析データ水温塩分にそれぞれ 2 日の時間スケールで緩和させる（スペクトルナッジング）ことでモデルの状態をスピニングアップした。

2016 年 12 月 9 日から、スペクトルナッジングを行わず、LETKF を用いて、表 2 に示す衛星海面高度偏差、衛星海面水温、現場水温塩分データを 1 日毎に同化する実験を開始した。同システムの準リアルタイムでの運用にあたっては、側面境界条件は、週 2 回の頻度で更新され

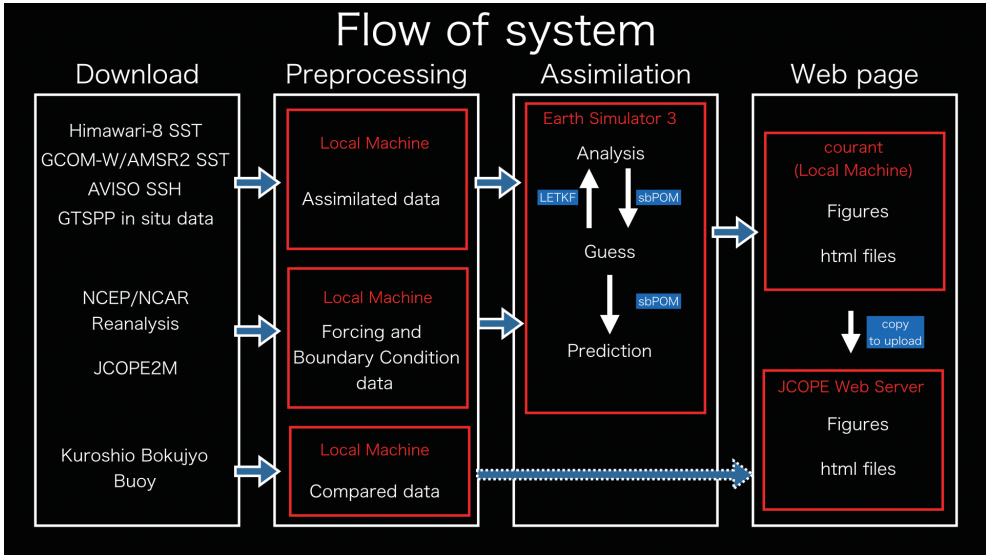


図 1 LETKF データ同化システムの概要。

る JCOPE2M 予測データから与えた。また、同化システムによって得られた解析値を初期値として 34 日間分の予測値を計算している。

図 1 に同化システムの概要を示す。今回開発した同化システムでは、ローカルワークステーションでダウンロードしたデータの前処理を行なったのち、JAMSTEC の地球シミュレータ（NEC SX-ACE）にてデータ同化、将来予測を行なっている。さらに、得られた解析値、予測値は、漁業関係者等に向けてウェブサイトで公開している。

表 1 LETKF パラメータ

局所化水平範囲	1/3 度
局所化鉛直範囲	2000m
共分散膨張パラメータ	1.21
モデル平均海面高度	2007 年 -2010 年の平均
衛星海面高度基準面	1992 年 -1999 年の平均がゼロ
衛星海面高度コンボジット期間	解析日前後 5 日
衛星海面水温コンボジット期間	解析日 1 日
現場水温塩分コンボジット期間	解析日 1 日
海面高度観測誤差	0.1m
海面水温観測誤差	1°C
現場水温観測誤差	1°C
現場塩分観測誤差	0.1psu

表 2 同化されるデータ一覧

衛星海面高度データ	Jason-2、Cryosat-2、Sara1-Altika
衛星海面水温データ	ひまわり 8 号 /Advanced Himawari Imager (AHI)、Global Change Observation Mission - Water (GCOM-W) /Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2)
現場観測データ	Global Temperature and Salinity Profile Programme (GTSP)

3. 同化結果

2016 年度は、LETKF データ同化システムの安定運用を目的として、パラメータの再設定やジョブスクリプトの改善といった作業を主に行った。その作業の中で、いくつかの事例を抽出し、解析値が現実を十分に再現しているか調査している。その一例を図 2、図 3 に示す。図 2 は、2016 年 11 月 22 日から 25 日までの衛星データと LETKF 解析値の海面水温空間分布図である。この期間、発達した低気圧が、寒冷な空気を伴って日本南岸を通過したため、関東周辺で季節外れの降雪、積雪が観測された。その影響として、ひまわり 8 号、GCOM-W とともに、日本南岸の海面水温低下を観測している。ただし、日本南岸の大半が雲で覆われた 11 月 23 日においては、ひまわり 8 号の分布図に欠測域が顕著に見られる。また、GCOM-W の海面水温データは、雲を透過して海面水温を観測できるため、ひまわり 8 号の欠測域を補完することができているが、空間解像度は比較的荒いために、沿岸域は欠測となっている。一方、解析値は、同期間の海面水温低下をよく再現しており、衛星データにみられる欠測域を完全に補完することができている。さらに、解析値の鉛直分布図を見ると、海面水温の低下とともに海洋表層における水温の等値線の間隔が広がっており、混合層が深化していることがわかる（図 3）。このように、データ同化によって得られる解析値は、衛星データを空間的に補完するだけでなく、海洋内部の有用な情報を付加することが可能であることが示された。

また、LETKF データ同化システムによって得られた解析値および予測値に対して、同化していない独立な現場観測データを用いた検証を行っている。使用する現場観測データは、高知県沖に係留されている黒潮牧場ブイという名前の 4 基のブイ（図 4、<http://www.suisan.tosa.pref.kochi.lg.jp/>）の観測値です。また、独立なデータではないが、ひまわり 8 号が観測した海面水温との比較も行なっている。その結果を図 5 に示す。黒潮の強流域に接する位置に係留されている No. 10 と No. 13 の結果を比べると、

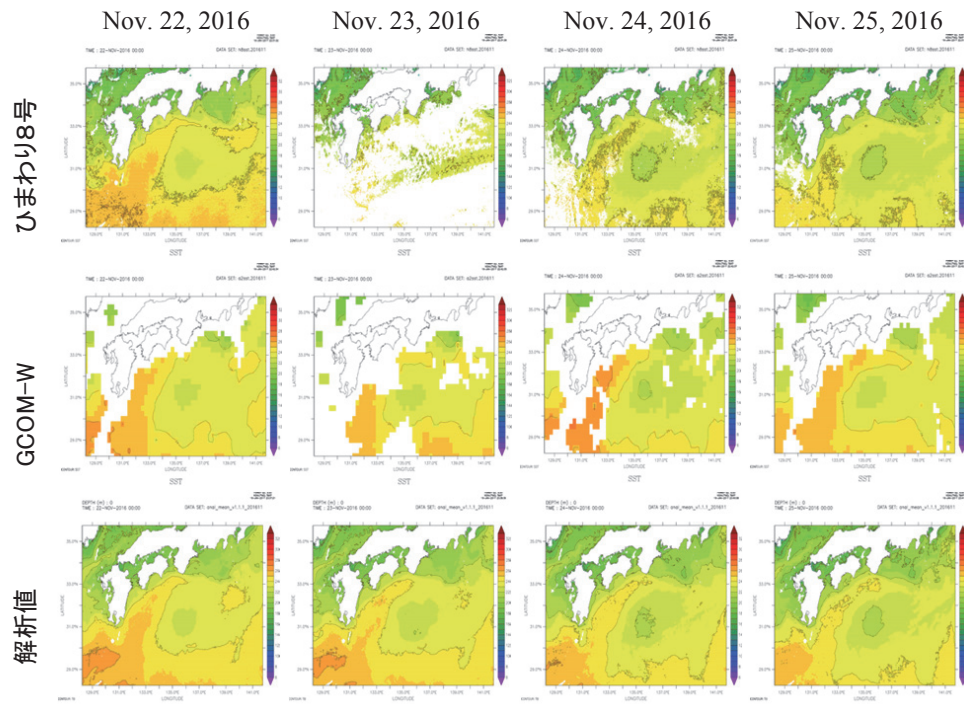


図2 2016年11月22日から25日にかけてのひまわり8号(上段)、GCOM-W(中段)および、解析値(下段)の海面水温の空間分布。

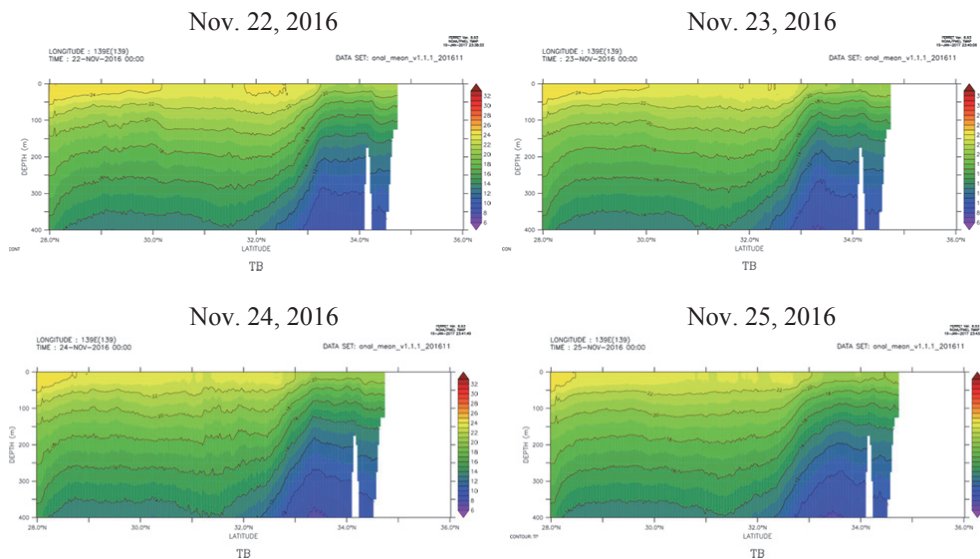


図3 2016年11月22日から25日にかけての解析値における139°Eに沿った水温の鉛直分布。

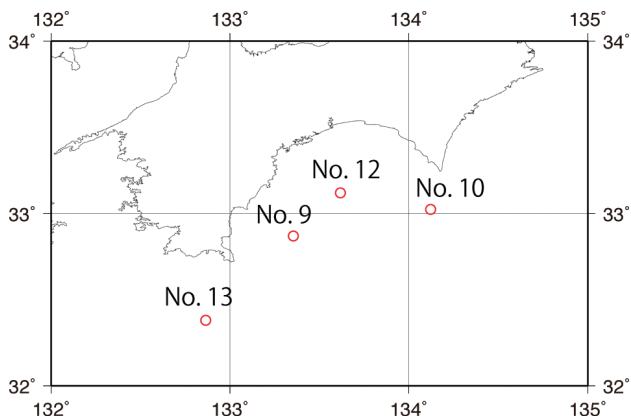


図4 黒潮牧場ブイの係留位置。

No. 13では、解析値が観測値を概ね追従しているが、数日周期の変動が比較的大きいNo. 10では、解析値は、ブイとひまわり8号の観測値の双方に見られる数日周期の変動を再現できていない。土佐湾内に係留されているNo. 9、No. 12の比較結果では、解析値の水温は、3月11日から15日にかけて一時的に上昇するが、観測値にはそのような変化は見られない。この期間のひまわり8号の海面水温データは欠測であり、海洋モデルのアウトプットが、データ同化によって十分に修正できなかったと考えられる。これらの短周期の変動は、黒潮前線波動の移動に伴うものと考えられる。黒潮前線波動は、日本南岸の漁業者にとって海況の変化を知るための情報であり、この変化を再現、予測することが、本研究の重要な課題の一つである。今後も、黒潮前線波動の再現性の改善に一層、

取り組むこととする。

LETKF データ同化手法に採用することの利点の一つは、アンサンブル間のスプレッド（図 5 中のエラーバー）を解析値や予測値の不確かさの指標とすることができる点である。予測値のスプレッドは、土佐湾の外に係留されている No. 10、No. 13 の位置において、予測時間が長くなるほど、予測精度が低くなることを示している。一方、土佐湾内に係留されている No. 9、No. 12 の位置においては、予測精度の悪化はあまり見られない。

4. 情報提供サイトの構築

LETKF データ同化システムの利用実証を目的として、和歌山水産試験場と連携して、漁業関係者向けに解析値および、予測値の情報を提供するウェブサイト「Kuroshio Forecast for South of Japan 2 (KFSJ2; <http://www.jamstec.go.jp/jcope/KFSJ2/>)」を作成した。図 6 にウェブサイトのトップページとコンテンツページの一例を示す。また、提供している情報の一覧を以下に示す。

- ・ 解析値と予測値（水温、塩分の 0m から 3000m までの 17 層の空間分布と経線に沿った鉛直分布および、海洋表層の流れ）
- ・ ひまわり 8 号と GCOM-W が観測した海面水温の空間分布
- ・ 日本南岸の潮位観測位置における海面変動の時系列
- ・ 高知県沖に係留されている黒潮牧場ブイの位置における海面水温の時系列

更新頻度は、毎日更新している衛星データを除いて、週一回である。現在提供しているウェブサイトでは、和歌山水産試験場との連携から、九州の東沖から紀伊半島の南沖までの海域をクローズアップしている。ただし、今後、より多くの漁業者に向けて情報を提供するために、海域を拡大していく予定である。

5. まとめと今後の課題

地球シミュレータを用いて 1 日ごとにデータ同化を行う LETKF データ同化システムの運用を開始した。こ

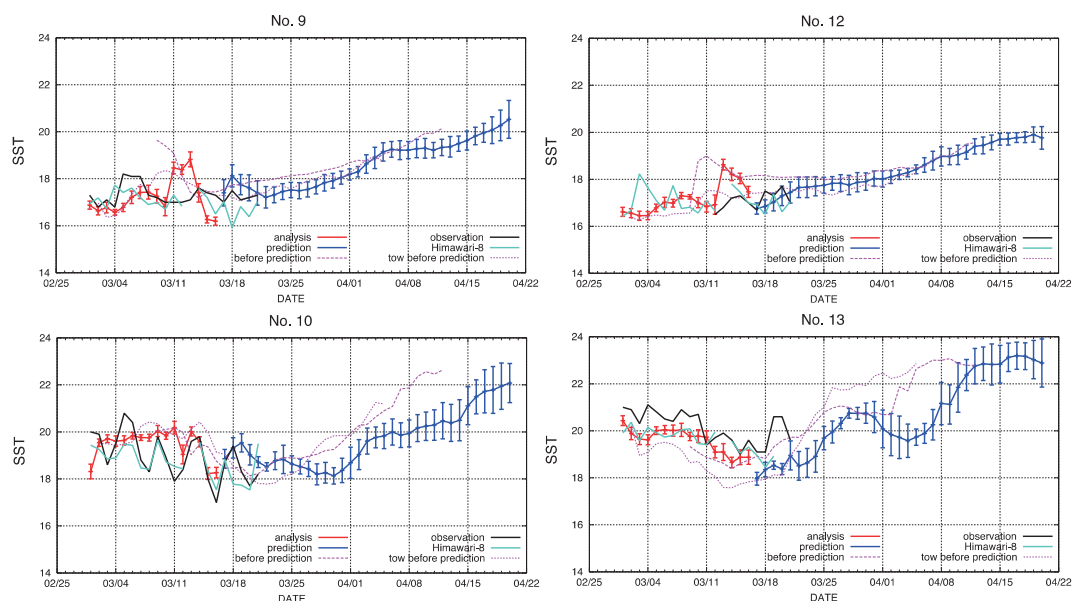


図 5 黒潮牧場ブイ（黒）とひまわり 8 号（水色）の海面水温の観測値との比較結果。解析値（赤）と予測値（青）のアンサンブル間の標準偏差をエラーバーで示している。ピンクの破線と点線は過去 2 回の予測値である。

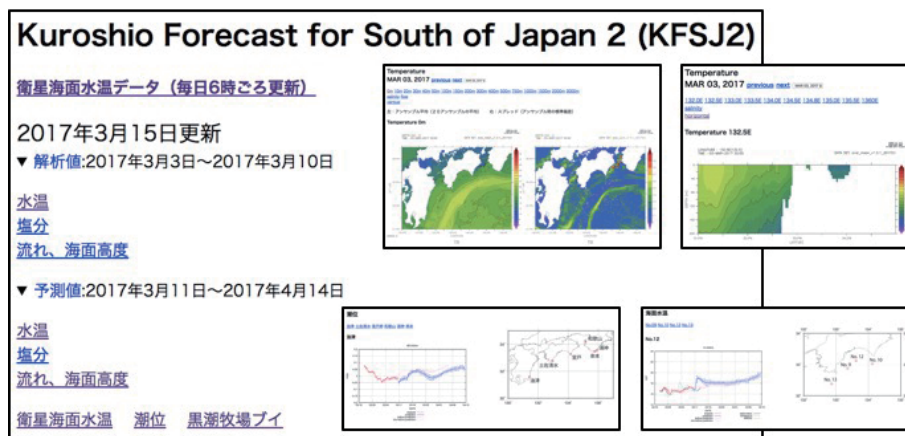


図 6 情報提供サイト KFSJ2 のトップページおよび、コンテンツページの例。

のシステムによって得られた解析値および予測値を元に、利用実証を目的としたウェブサイトを作成し、週一回の頻度で更新を行なう体制を構築した。今年度の成果は、The 17th International GHRSSST Science Team Meeting (GHRSSST XVII)[7]、2016 年度日本海洋学会秋季大会 [8]、Application Laboratory 2017 Symposium、平成 28 年度地球環境観測ミッション合同 PI 報告会で報告されている。

本年度は、1 日ごとにデータ同化を行うシステムの定常運用を開始した。しかし、時間解像度 10 分、空間解像度 2km の観測能力を有するひまわり 8 号の海面水温データをより有効的に利用するためには、1 日以下の間隔でデータ同化を行い、より細かい時空間スケールの現象を再現することが必要と考えている。また、本研究成果の主要な利用者であると想定する漁業関係者にとっても、そういった情報は有用である。そこで、本年度においても、6 時間ごとのデータ同化システムを試作しているが、パラメータの設定や計算処理の高速化に課題を残した。加えて、1 日以下の現象を再現するには、海洋モデルをより時空間スケールの現象を考慮するものに変える必要がある。そこで、来年度は、以下にあげる課題に取り組む。

- ・ 対象海域を日本周辺海域へと拡大
- ・ 1 日以下の時間間隔でのデータ同化
- ・ 潮汐を考慮した海洋モデルの利用
- ・ 外力データの高分解像度化

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については、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（その 1）」によるものである。

文献

- [1] B. R. Hunt, E.J. Kostelich, and I. Szunyogh, “Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter,” *Physica D*, vol.230, no.6, pp.112-126, June 2007.
- [2] Y. Miyazawa, H. Murakami, T. Miyama, S.M. Varlamov, X. Guo, T. Waseda, and S. Sil, “Data assimilation of the high-resolution sea surface temperature obtained from the Aqua-Terra satellites (MODIS-SST) using an ensemble Kalman filter,” *Remote Sens.*, vol.5, no.6, pp.3123-3139, June 2013.
- [3] T. Miyoshi, Y. Sato, and T. Kadowaki, “Ensemble Kalman Filter and 4D-Var intercomparison with the Japanese operational global analysis and prediction system,” *Mon. Wea. Rev.*, vol.138, no.7, pp.2846-2866, July 2010.
- [4] A. Jordi, and D.-P. Wang, “sbPOM: A parallel implementation of Princeton Ocean Model,” *Environmental Modelling & Software*, vol.38, no.12, pp.59-61, December 2012.
- [5] A. Rosati, and K. Miyakoda, “A general circulation model for upper ocean simulation,” *J. Phys. Oceanogr.*, vol.18, no.11, pp.1601-1626, November 1988.
- [6] Y. Miyazawa, R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu. “Water mass variability in the western north Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis,” *J. Oceanogr.*, vol.65, no.6 pp.737-756., November 2009.
- [7] T. Hihara, Y. Miyazawa, M. Kachi, Y. Kurihara, and H. Murakami, “Dynamic interpolation of HIMAWARI-8 SST,” The 17th International GHRSSST Science Team Meeting (GHRSSST XVII), Virginia, USA, June 2016.
- [8] 日原勉, 宮澤泰正, 美山透, 可知美佐子, 栗原幸雄, 村上浩, “データ同化を用いた高分解像度海面水温プロダクトの作成,” 2016 年度日本海洋学会秋季大会, 鹿児島, 2016 年 9 月.

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

Tsutomu Hihara^{*1}, Yasumasa Miyazawa^{*1} and Toru Miyama^{*1}

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

This study is aiming at creation of a new ocean product, which is able to reproduce and predict the Kuroshio frontal wave variations using an assimilation technic to combine the satellite sea surface temperature (SST) data with ocean model outputs. For this purpose, we constructed the data assimilation system covering south of Japan using Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF). We validated the product and developed social application of the product through a website. The assimilation system well reproduced the variation of oceanic condition at the end of November 2016. However, it was shown that problems remained in reproducibility of Kuroshio frontal waves, which were characterized by several-days cycle of SST variations shown in situ data obtained by mooring buoys off the Shikoku Island. Future works include utilizing observation capability of Himawari-8 SST characterized by high frequency (10-minute interval) and horizontal high resolution with a 2 km mesh. Himawari-8 has ability to detect SST diurnal variations and disturbances with tens km scale near coasts. We hence will examine feasibility of a more frequent assimilation cycle less than daily interval using tide-resolving ocean models with comparable or higher horizontal resolution.

Keywords: South of Japan, Data assimilation, Ocean model, Satellite sea surface data, Ocean current forecast

1. Introduction

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) promotes observation capability by using earth observation satellites and strengthens to develop social applications of their observation results. In recent years, data assimilation techniques allowing combination of the satellite data and numerical model outputs have been well developed. This study aims to construct a new ocean product using a data assimilation method and to promote the social application of this product.

2. Assimilation Method

In this study, we constructed an ocean nowcast/forecast system assimilating observation data in a daily-basis using Stony Brook Parallel Ocean Model (sbPOM) [1] and Local Ensemble Transformation Kalman Filter (LETKF) [2] [3]. This system is based on a data assimilation experience on usability of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sea surface temperature (SST) data on south of Japan [4]. Spatial and vertical resolution is 1/36° and 47 sigma levels, respectively. Forcing data of sbPOM is calculated by bulk formulae using the National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/National Center for Atmospheric Research (NCAR) reanalysis atmospheric data (wind speed at 10m, temperature at 2m, water vapor at 2m, cloud amount, SST, ocean flow). Clear-sky shortwave radiation is calculated by the method of Rosati and Miyakoda (1988) [5]. Assimilated data are satellite sea

surface height anomaly (SSHA) data, satellite SST data, and in situ temperature and salinity data (Table 1). Figure 1 shows a schematic of the assimilation system. Using this system, we producted the data assimilation and the prediction of ocean condition in the Earth Simulator after the preprocessing at a local workstation. In addition, we provide the information of

Table. 1 List of assimilated observation data.

Satellite SSHA data	Jason-2, Cryosat-2, Saral-Altika
Satellite SST data	Himawari-8/Advanced Himawari Imager (AHI), Global Change Observation Mission – Water (GCOM-W)/Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2)
In situ ocean data	Global Temperature and Salinity Profile Programme (GTSP)

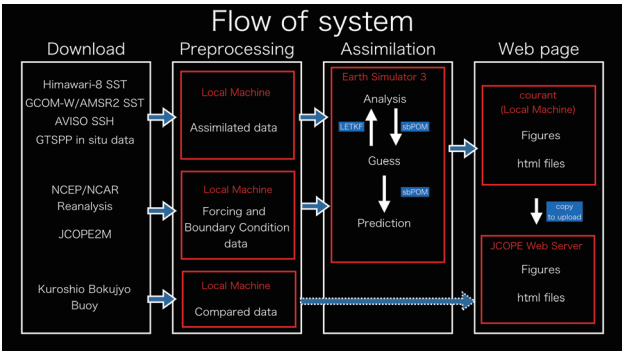


Fig. 1 Schematic of the LETKF data assimilation system.

analysis and prediction data to fishery people through a website.

3. Results

We modified parameters and job scripts to run the LETKF data assimilation system stably in the 2016 fiscal year and checked the reproducibility of analysis data in several cases. An example is shown in Figs. 2 and 3. Spatial distributions in Fig. 2 show SST variations of satellite and analysis data from November 22 to 25, 2016. It unseasonably snowed around Tokyo with cool air coming southward because a cyclone passed south of Japan from Nov. 23 to 24. As for the influence of this cyclone, decreasing of SST of south of Japan was detected by Himawari-8 and GCOM-W satellites. However, there were

large missing areas in Himawari-8 SST data on November 23, because it was covered with clouds. The GCOM-W satellite detected the SST distributions in cloudy areas, but was able to detect them in near-shore areas because of lower spatial resolution. On the other hand, the analysis data reproduced well the decreasing SST in this term and removed completely the missing areas of the satellite data. Additionally, vertical distributions of the analysis data shows that the mixed layer deepened and the contours of temperature became thinner as the SST dropped (Fig. 3). This result shows that the analysis data obtained by the data assimilation not only spatially interpolated the satellite SST data at surface but also were able to provide useful subsurface information.

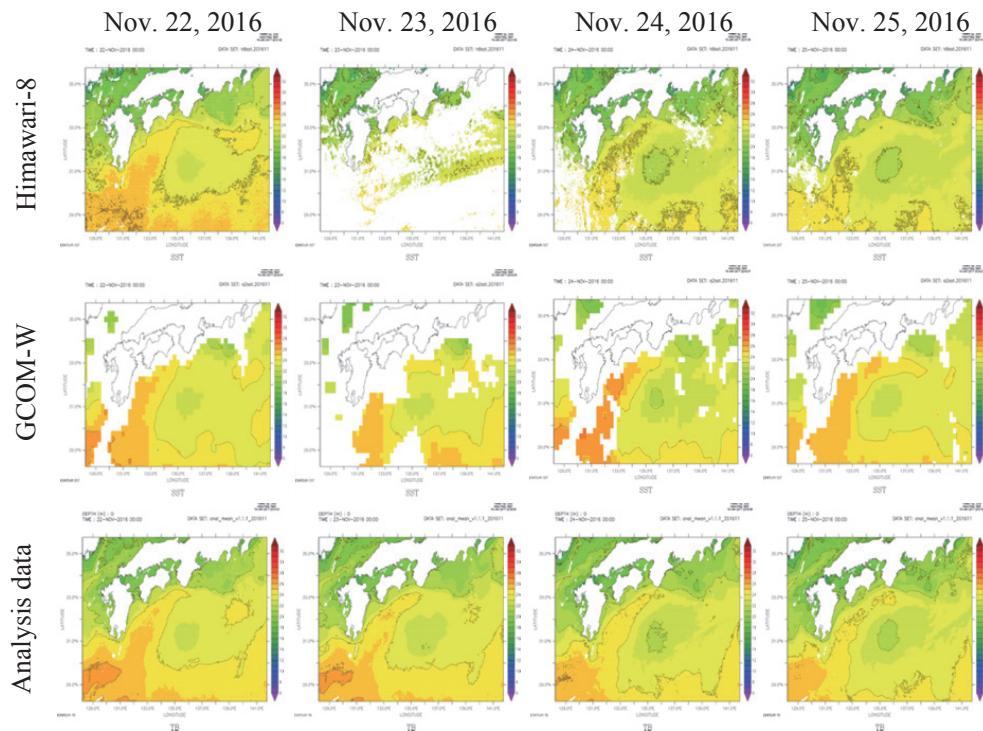


Fig. 2 Spatial SST distributions of Himawari-8 (upper), GCOM-W (middle), and analysis data (lower) from November 22 to 25, 2016.

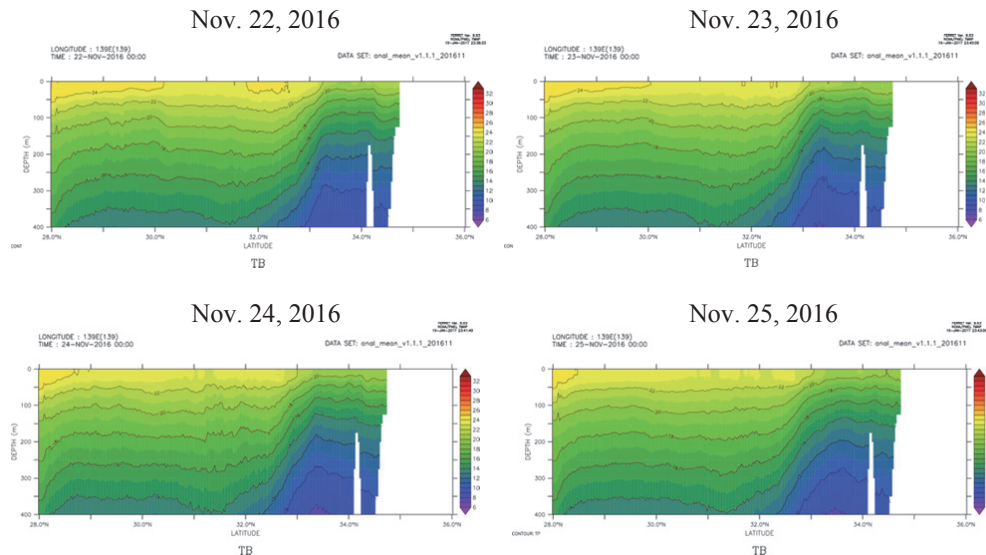


Fig. 3 Vertical distributions of analysis SST data along the 139°E from November 22 to 25, 2016.

We validated the analysis and prediction data created by the LETKF data assimilation system using independent in-situ data obtained by four buoys moored off the Kochi prefecture, named as Kuroshio-Bokujo buoy (Fig. 4; <http://www.suisan.tosa.pref.kochi.lg.jp/>). We also compared these data with the Himawari-8 SST data. The results are shown in Fig. 5. Comparing the validation results between No. 10 and No. 13 moored on the strong current area, the analysis data at No. 13 follow the observation data, but those at No. 10 don't reproduce observed several-days cycle variations. Validation results of No. 9 and No. 12 moored in the Tosa Bay indicate that temporal increase in SST from March 11 to 15 not represented by the observation data appears in the analysis data, suggesting decline in the ocean model skill because Himawari-8 did not detect the SST in this period. These short variations were considered as movement of the Kuroshio frontal wave. An improvement in the representation of the Kuroshio frontal waves that is the important information for fishery people south of Japan, is one of substantial subjects in this study. We will therefore continue to further improve the reproducibility of Kuroshio frontal waves.

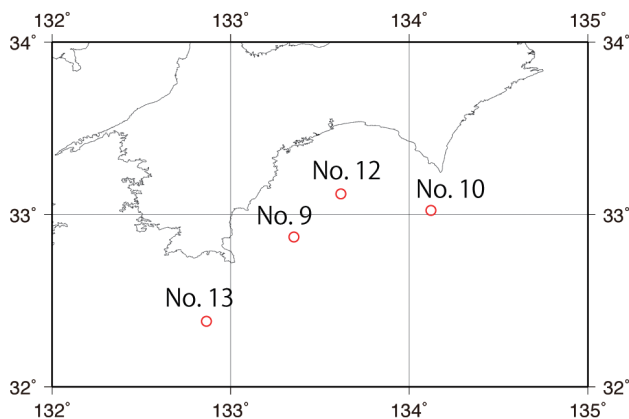


Fig. 4 Location of Kuroshio-Bokujo buoys.

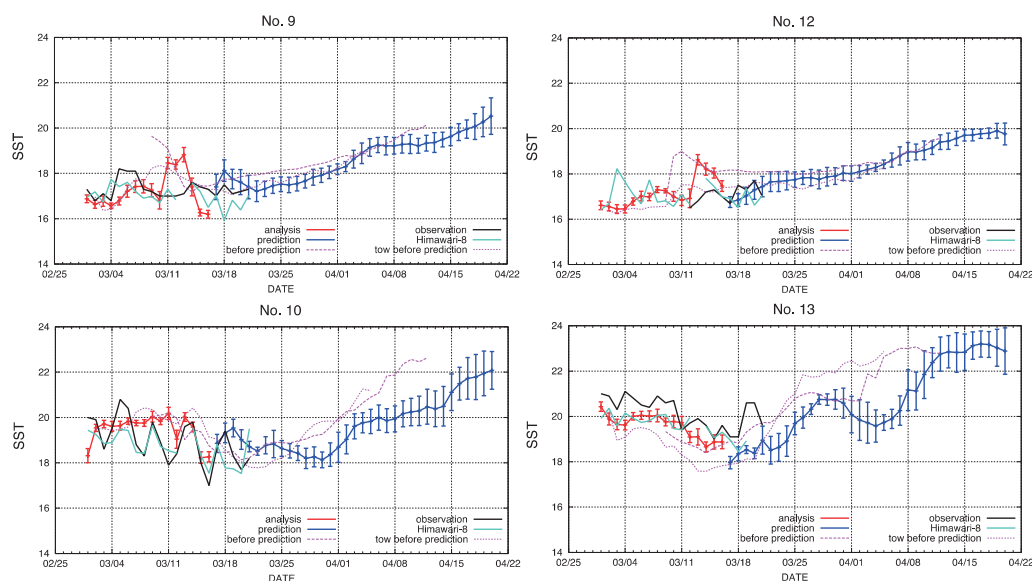


Fig. 5 Comparison results with SST data observed by Kuroshio-Bokujo buoys (black) and Himawari-8 (light blue). Error bars denote ensemble spread magnitudes of the analysis data (red) and latest prediction data (blue). Pink broken lines show the prediction data at past two times (pink).

One of advantages in the LETKF assimilation is providing ensemble spreads among ensemble members (error bars in Fig. 5) that can be used as indexes of uncertainty of the analysis and prediction data. Spreads of the prediction data indicate that the uncertainty of prediction increased as the prediction leading time got longer at No. 10 and No. 13 moored outside the Tosa Bay. On the other hand, uncertainty of prediction hardly changes at No. 9 and No. 12 moored inside the Tosa Bay.

4. Conclusion

We started to operate the LETKF data assimilation system, which assimilates the satellite SST data in a daily-basis using the Earth Simulator. We constructed the website which was updated every week to validate the usability of this system. We tried to assimilate the SST data every 6-hour in this study, although problems involved in parameter setting and speeding up of assimilation system remained.

We should assimilate the observation data more frequently to effectively use the Himawari-8 SST data which temporal and spatial resolutions are 10 minutes and 2 km, respectively. In addition, it is necessary to well reproduce the smaller spatial-temporal scale phenomena that are important information for fishery people. We also should utilize ocean models representing the smaller scale phenomena in order to reproduce the diurnal variations. In these reasons, we will address following issues in the next fiscal year.

- Expanding the analysis area covering the whole Japan Islands.
- Assimilating the observation data more frequently less than daily interval.
- Using tide-resolving ocean models.
- Increasing the spatial resolution of the forcing data.

Acknowledgement

This project was supported by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) for utilization of the satellite sea surface temperature data including Himawari-8 and GCOM-W.

References

- [1] A. Jordi, and D.-P. Wang, “sbPOM: A parallel implementation of Princeton Ocean Model,” *Environmental Modelling & Software*, vol.38, no.12, pp.59-61, December 2012.
- [2] B. R. Hunt, E.J. Kostelich, and I. Szunyogh, “Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter,” *Physica D*, vol.230, no.6, pp.112-126, June 2007.
- [3] T. Miyoshi, Y. Sato, and T. Kadowaki, “Ensemble Kalman Filter and 4D-Var intercomparison with the Japanese operational global analysis and prediction system,” *Mon. Wea. Rev.*, vol.138, no.7, pp.2846-2866, July 2010.
- [4] Y. Miyazawa, H. Murakami, T. Miyama, S.M. Varlamov, X. Guo, T. Waseda, and S. Sil, “Data assimilation of the high-resolution sea surface temperature obtained from the Aqua-Terra satellites (MODIS-SST) using an ensemble Kalman filter,” *Remote Sens.*, vol.5, no.6, pp.3123-3139, June 2013.
- [5] A. Rosati, and K. Miyakoda, “A general circulation model for upper ocean simulation,” *J. Phys. Oceanogr.*, vol.18, no.11, pp.1601-1626, November 1988.

