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
宮澤　泰正　　海洋研究開発機構　アプリケーションラボ
美山　　透　　海洋研究開発機構　アプリケーションラボ

従来の海流予測研究で目標としてきた海流流路予測に加え、海流前線波動など、より小さな時空間スケールの海流現象の予測可能性を探るべく、地球シミュレータを用いた新しい海流予測システム Ensemble Kalman Filter for Kuroshio South of Japan（KFSJ）を開発した。KFSJ は、新たな海面水温データである気象衛星ひまわり 8 号の高解像度衛星海面水温データを同化して遠州灘沖における黒潮前線波動の特徴を現実的に表現するとともに、日本南岸黒潮流路の現業的アンサンブル予測をはじめて実現した。黒潮流路変動の予測精度は、従来の海流予測モデル JCOPE2 に比べて向上していることが確認された。

キーワード： 海流予測, 黒潮流路, 黒潮前線波動, アンサンブルカルマンフィルター , アンサンブル予測

1. はじめに

海洋研究開発機構･アプリケーションラボが推進する「日本沿海予測可能性実験（Japan Coastal Ocean Predictability Experiment; JCOPE）」において、日本近海の海流変動を予測し、黒潮大蛇行等の海流変動のメカニズムを解明するとともに海運、水産、海底開発などに海流予測データを応用する研究を実施してきた。研究を進めるため、JCOPE2 予測システムをはじめとする各種の海流予測システムを開発してきた。研究の進展とともに、従来の予測目標としてきた海流の流路変動や中規模渦（100km スケール）だけでなく、海流の前線変動や、より小さな渦（10km-1km スケール）が、工学的応用や、物質輸送・生態系変動において重要な役割を担っていることが認識されてきた。こうした現象の予測可能性の理解はまだ不十分であり、初期値に対する感度が大きいと予想されることから、アンサンブル手法によって確率的な予測を行っていくことが有効であると考えられる。そこで、海洋モデルの空間解像度を従来の 10km オーダーから 1km 以下オーダーに高解像度化したうえで、アンサンブル予測モデルの開発も進める。これらのモデルを十分に活用するためには地球シミュレータ上での計算が必須である。モデルが完成し安定運用できるようになれば、こうした予測結果は工学的応用や物質輸送・生態系変動予測の応用など実利用に直接適用できるものとなる。

今年度は、日本南岸海域を 1/36 度格子で解像した海洋循環モデルを対象として局所変換アンサンブルカルマンフィルター手法 [1][2] を適用し、アンサンブルカルマンフィルター解析・予測システム（Kalman filter for South of Japan: KFSJ）を構築した。黒潮変動を対象として、2015 年 10 月から 2016 年 3 月にかけてデータ同化・アンサンブル予測実験を行った。

2. 手法とデータ

地球シミュレータ上において MPI を用い、海底地形に沿うシグマ座標系の海洋循環モデル Princeton Ocean Model を実装した。モデル海域は、日本南岸の北緯 28 度 -36 度、東経 128 度 -142 度の範囲であり、シグマレベルを 47 層とした。NCEP/NCAR 再解析データを種々のバルク公式に入力して海表面での運動量・熱フラックスを与えた。海面塩分は、月平均気候値に緩和させた。JCOPE2 海洋再解析データによって 2015 年 7 月 1 日の水温・塩分を与え、静止状態から JCOPE2 データの水温塩分値に緩和させながらモデルを走らせた。その際、側面境界条件も JCOPE2 データから与えた。

2015 年 10 月 9 日から JCOPE2 水温・塩分データへの緩和を止め、LETKF によるデータ同化とそれによる初期値からの 20 メンバーアンサンブル予測実験を開始した。同化データは、衛星海面高度偏差（Jason-2, Cryosat-2, Saral/Altika）、衛星海面水温（Himawari-8, NAVOCEANO MCSST）、現場水温塩分（GTSPP）である。LETKF 解析は 2 日毎に行い、観測データを逐次収集し初期値をおおむね週毎に更新しながら 50 日予測実験を行った。

感度実験試行の結果、衛星海面高度偏差の観測誤差（0.03m）とコンポジット期間（解析日前後 6 日）の 2 つが黒潮流路を現実的に表現するために重要なパラメータであることがわかった。そのほかのパラメータは、先行研究 [4] と同じとした。

実行試験の結果、大型計算機システム（ICE）1 node（8CORE）と地球シミュレータ : 1 node（4CORE）での結果を比較した場合、計算実行待ちを考慮しないと 4.56 倍の実行速度となった。経過時間の実態としては、9.8 倍の効率であった。ICE と ES2（前世代地球シミュレータ）の比較では、経過時間においてほぼ同等の結果であったことを考慮すると、現地球シミュレータの単体効率改善に加え、ES2 に比べたノード数増加が、現地球シミュレータの ICE に比して高い実効率性を実現することになったといえる。

3. 結果

LETKF 解析値を、Himawari-8 コンポジット値、JCOPE2 解析値と比較したところ、LETKF 解析値は、従来の JCOPE2 解析値に比べ、黒潮流路のみならず黒潮流路の前線上にみられるさらに時空間スケールが小さな変動をよく表現していることを確認できた。たとえば図 1 に示すように、LETKF 解析値（図 1b）は、Himawari-8 コンポジット値（図 1a）にみられる、北緯 33.5 度 東経 138 度付近の黒潮前線変動をよく再現しているが、JCOPE2 解析値（図 1c）は振幅を過大評価している。JCOPE2 のより粗い水平解像度（1/12 度格子）による限界もあるが、Himawari-8 を同化した場合と同化しない場合そもそも JCOPE2 では違いがほとんどみられなかったので（図無し）、JCOPE2 で用いている同化手法である 3 次元変分法にも改良の余地があることが示唆される結果である。

今回、LETKF 解析値を週ごとに更新しながら、それを初期値とした予測を逐次行い、海上保安庁による海洋速報などの観測実績と比較した（図 2）。1 ヶ月の予測結果を見ると、アンサンブル予測に伴うばらつきは無視できないものの、遠州灘の黒潮が八丈島の南を通るか（離岸流路の傾向）、それとも北を通るか（接岸流路の傾向）という点に

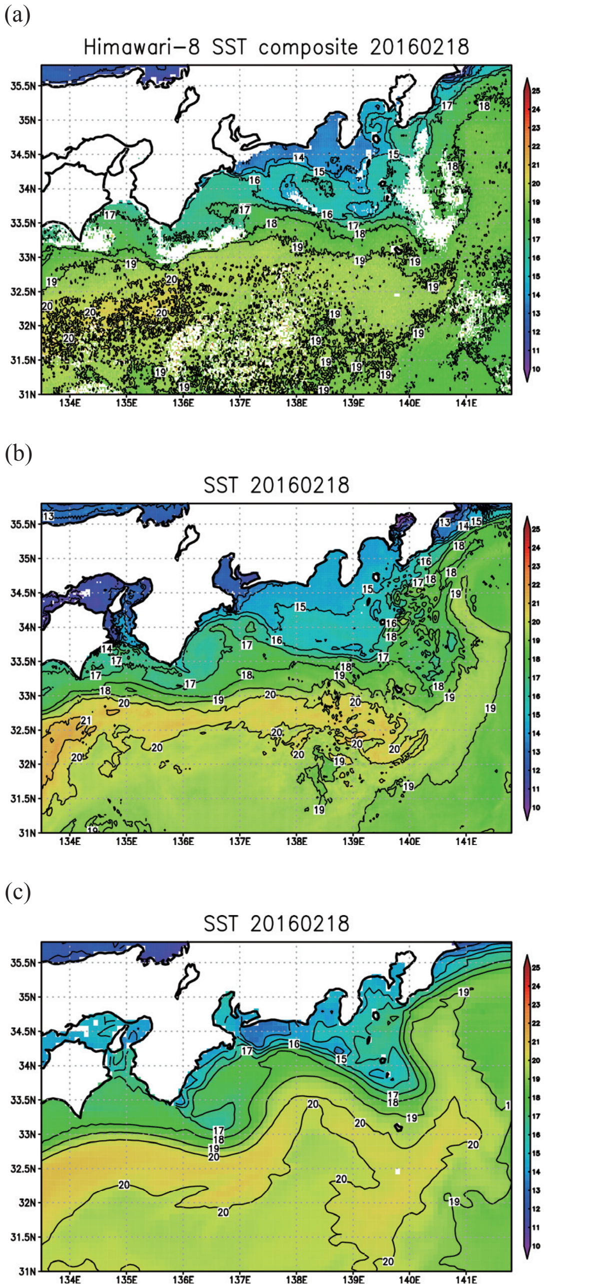


図 1　2016 年 2 月 18 日の遠州灘における海面水温。(a) Himawari-8 2日コンポジット。1/10 度格子。(b) LETKF 解析値。1/36 度格子。(c) JCOPE2 解析値。1/12 度格子。

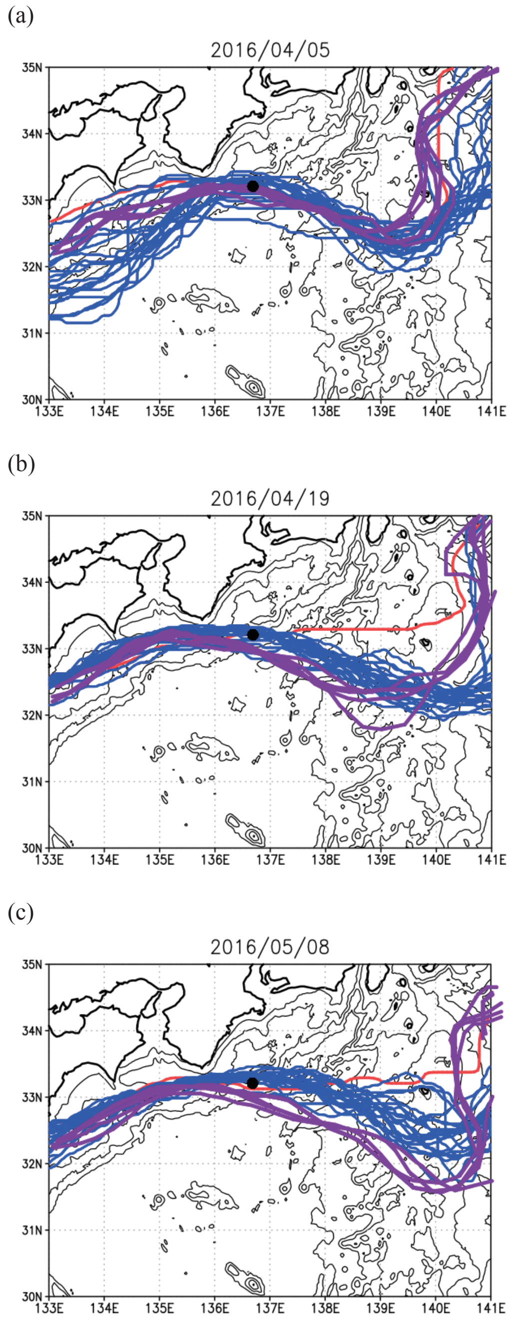


図 2　黒潮流路 1 か月予測の比較。青線は LETKF20 メンバーアンサンブル予測。赤線は JCOPE2 予測。モデルの流軸は海面高度の水平勾配の極大位置から推定した。紫線は海洋速報による流軸。海洋速報は 1 週間程度の移動平均を示すものであり、対象日を含む結果をすべて示している。(a) 2016 年 3 月 5 日を初期値とした場合の 4 月 5 日予測結果。(b) 3 月 19 日から 4 月 19 日の予測結果。(c) 4 月 8 日から 5 月 8 日の予測結果。黒点は海洋掘削船「ちきゅう」の掘削点 C0010A, 北緯 33 度 13 分、東経 136 度 41 分。

おいて、JCOPE2 を上回る予測精度を示した（図 2b, c）。

本研究において構築した予測システム KFSJ を、2016 年 3 月から 4 月にかけて行われた地球深部探査船「ちきゅう」による第 365 次航海中での掘削点 C0010A（図 2 中の黒点）における流速変動予測に適用した [5]。「ちきゅう」による現場観測結果からおおまかな傾向として、3 月 29 日から 4 月 6 日までの高流速期、4 月 7 日から 4 月 15 日までの低流速期、4 月 16 日から 4 月 24 日までの高流速期が認められた。

KFSJ は、前期と後期の高流速期は予測できたが、中期の低流速期についてはその傾向は予測できたものの、流速を過大に予測した [5]。海洋速報から、3 月 29 日に室戸岬沖にみられた黒潮流路の離岸傾向が 4 月 7 日以降さらに東の掘削点まで伝播し流速の減少を生じさせたものと推測された。海洋速報と LETKF 解析値の比較（図 3）から、3 月 29 日に室戸岬沖にみられた黒潮の離岸傾向の振幅が LETKF 解析値ではより弱く表現されていたことがわかった。海面高度偏差観測には、この離岸傾向に対応する変動が認められず（図無し）、結果として解析値に反映されなかった。一方、Himawari-8 海面水温観測値（図 4a）にはこの離岸傾向が部分的ながら検出されていたが、LETKF 解析値（図 4b）にはそれが十分に反映されることはなく、こうしたことが低流速期の予測を不十分な精度にしたのだと考えられる。

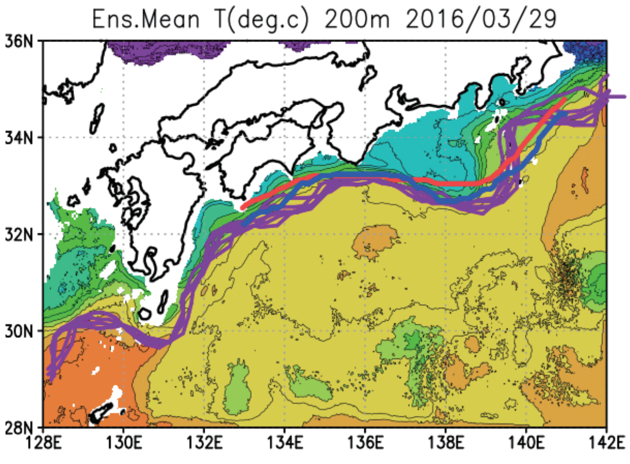
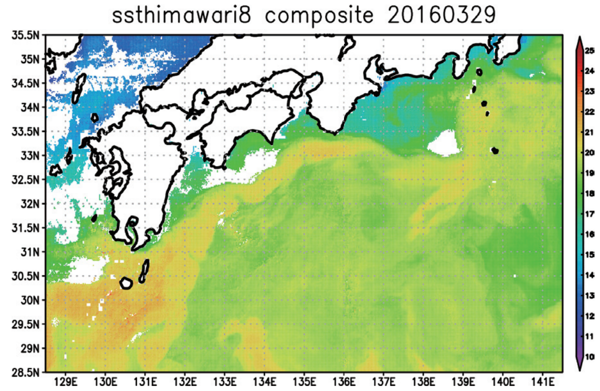


図 3　2016 年 3 月 29 日の LETKF 解析値 200m 水温（色影と黒線；1 度 c 間隔）。青線は LETKF 解析値から推定した黒潮流軸。赤線は JCOPE2 解析値による流軸。紫線は海洋速報による流軸。

(a)



(b)

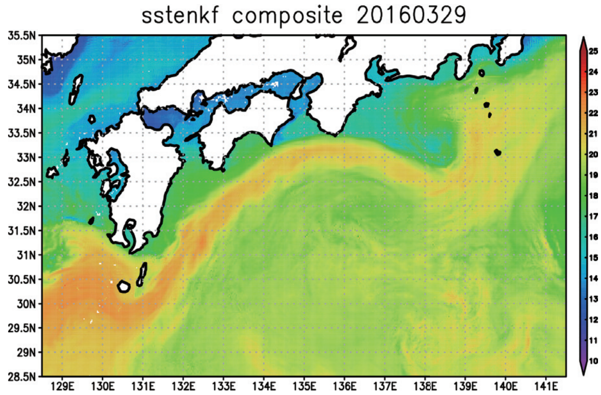


図 4　2016 年 3 月 29 日の海面水温。(a) Himawari-8　1 日コンポジット。(b) LETKF 解析値。

まとめ

本研究において日本南岸の黒潮変動を対象とした現業的なアンサンブル予測システムを構築し、一定の予測精度を実現することができた。来年度は、今回、「ちきゅう」による現場観測でみられたような、比較的時空間スケールが小さい離岸（接岸）傾向をより現実的に再現できるような改良に取り組む予定である。

謝辞

本研究における Himawari-8 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（試作検討）」によるものである。また、本研究における現業的な予測の試行を円滑に遂行するため、当初の平成 27 年度所内課題「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」に加え、指定課題（特別割当）「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：工学利用」においても地球シミュレータを使用した。関係者からのご支援に感謝申し上げる。

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] 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.

[3] A. Jordi, and D.-P. Wang, "sbPOM: A parallel implementation of Princenton Ocean Model," Environmental Modelling & Software, vol.38, no.12, pp.59-61, December 2012.

[4] Y. Miyazawa, T. Miyama, S. M. Varlamov, X. Guo, and T. Waseda, "Open and coastal seas interactions south of Japan represented by an ensemble Kalman filter," vol.62, no.4, pp.645-659, April 2012.

[5] 黒潮親潮ウォッチ:「ちきゅう」のための海流予測（13）まとめ（最終回）
http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/?p=2568

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

To investigate predictability of smaller spatio-temporal scale ocean current variability including the Kuroshio frontal waves as compared to the larger scale Kuroshio path variation, we have developed a new ocean current forecast system using the Earth Simulator, 'Ensemble Kalman Filter for South of Japan (KFSJ)'. The system reasonably represents the Kuroshio frontal waves in Enshu-nada by assimilating the high-resolution sea surface temperature obtained by the recently launched meteorological satellite, Himawari-8, and achieves the first operational ensemble forecast of the Kuroshio path variation south of Japan. It basically outperforms the current operational forecast system JCOPE2 for representing the Kuroshio path position as observed.

Keywords: Ocean current forecast, Kuroshio path, Kuroshio frontal wave, Ensemble Kalman Filter, Ensemble forecast

1. Introduction

The Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE) promoted by APL, JAMSTEC aims at investigating predictability and mechanisms in the ocean current variability around Japan such as the Kuroshio larger meander together with the applicability of the forecast products for the human marine activities including the marine transportation, fisheries, and offshore industry. Recently it has been realized in the literature that the sub-meso scale variability with the horizontal scale, O (1 km-10 km), plays important roles in the engineering applications, ecosystem variability, and material transportation, in addition to the mesoscale variability with the larger scale, O(100 km), which has been targeted by the ocean current forecast studies so far.

The ensemble forecast based on the high-resolution ocean model is effective for investigating unknown predictability of the sub-mesoscale variability, which might be quite sensitive to the uncertainty involved in the initial condition. The Earth Simulator is definitely necessary for development of the high-resolution ensemble forecast system. Developing and establishing the new ocean forecast system will directly lead to applications to the marine engineering and the marine bio-geochemical studies.

In this fiscal year, we developed an ensemble Kalman filter analysis/forecast system (Ensemble Kalman filter South of Japan: KFSJ) based on an ocean model with horizontal resolution of 1/36 degree south of Japan. The local ensemble transformation Kalman filter algorithm (LETKF) [1][2] is used for the system. We conducted data assimilation and ensemble forecast experiments targeting the Kuroshio variations south of Japan for a period from October 2015 to March 2016.

2. Methods and data

An ocean model with a bottom-following sigma coordinate based on the Princeton Ocean Model is implemented on the Earth Simulator. The Massive Parallel Interface module is included in the original code [3] for full utilization of the available computational resource. The model covers a square region south of Japan, 28° -36° N and 128° -142° E, with 47 sigma levels. Bulk formulae using some atmospheric data provide from the NCEP/NCAR reanalysis data calculates momentum/heat fluxed at sea surface. Sea Surface salinity is relaxed to the monthly climatology. Staring from an initial temperature and salinity distribution obtained from the JCOPE2 ocean reanalysis data with no motion, the model ran with relaxation to the reanalysis temperature and salinity from 1 July to 9 October 2015. Lateral boundary condition was provided from the reanalysis data.

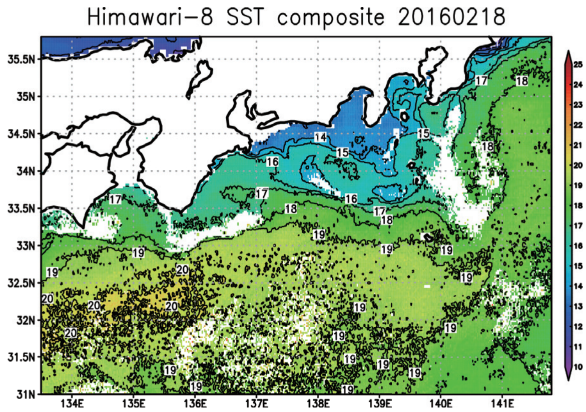
The LETKF analysis and its subsequent ensemble forecast operations with 20 ensemble members were conducted repeatedly with almost weekly update of the LETKF analysis with 2-day interval using the available observation data: sea surface height anomaly data obtained from Jason-2, Saral/Altika, and Cycrosat-2 satellites, sea surface temperature (SST) data from the Himawari-8 satellite and NAVOCEANO MCSST data archive, and in-situ temperature/salinity data from the GTSPP archive. The analysis/forecast operation involves no relaxation to the JCOPE2 data.

After trial and error, we have fixed some LETKF parameters: observation error (0.03 m) and composite period (6 days before and after the analysis date) of sea surface height anomaly, which are much sensitive to the initialization, in particular, the Kuroshio path position. The other parameters were same as those described in a previous study [4].

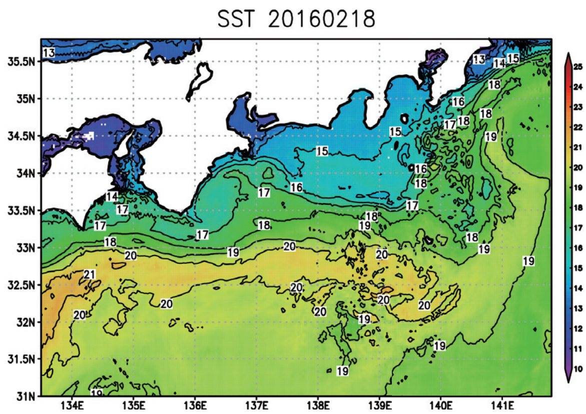
3. Result

A comparison of the Himawari-8 SST composite, SST analysis snapshots of KFSJ and JCOPE2 indicates that KFSJ represents the Kuroshio front shape more similar to Himawari-8 as compared to JCOPE2. The skill of 50-day lead forecast of the Kuroshio path by LETKF basically outperformed that by JCOPE2 (not shown). However, ocean current validation at a fixed point (a Chikyu drilling point: C0010A, 33° 13 'N 136° 41 'E) showed that decline of the ocean current magnitude in the middle of April 2016 associated with passing of a frontal disturbance was not well predicted by both LETKF and JCOPE2. We need to improve this defect by further adjusting the LETKF parameters and/or other factors in the forecast systems.

(a)



(b)



(c)

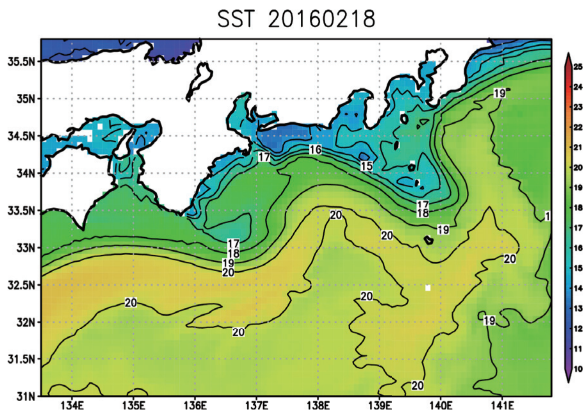


Fig. 1 Sea surface temperature around Enshu-nada on 18 February 2016. (a) Himawari-8 composite. (b) KFSJ analysis. (c) JCOPE2 analysis.

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] 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] 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.

[3] A. Jordi, and D.-P. Wang, “sbPOM: A parallel implementation of Princenton Ocean Model,” Environmental Modelling & Software, vol.38, no.12, pp.59-61, December 2012.

[4] Y. Miyazawa, T. Miyama, S. M. Varlamov, X. Guo, and T. Waseda, “Open and coastal seas interactions south of Japan represented by an ensemble Kalman filter,” vol.62, no.4, pp.645-659, April 2012.