

— 総 説 —

日本の海洋データ同化研究—20年間の功績と今後の展望—*

藤井 陽介^{1**}・蒲地 政文²・広瀬 直毅³・望月 崇²・瀬藤 聡⁴・美山 透²・
広瀬 成章¹・長船 哲史⁵・韓 修妍³・五十嵐 弘道²・宮澤 泰正²・豊田 隆寛¹・
干場 康博⁶・増田 周平⁵・石川 洋一²・碓氷 典久¹・黒田 寛⁷・高山 勝巳³

要 旨

第2回世界気象機関(WMO)大気・海洋データ同化シンポジウムが東京で開催され、それをきっかけにデータ同化夏の学校が開始されたのは1995年のことである。それから20年あまりの間に、日本における海洋データ同化の研究は、黒潮大蛇行の予測の成功や4次元変分法大気海洋結合データ同化システムの開発など、世界に伍する成果を上げてきた。そして現在では、海況予測等を目的とした海洋データ同化システムが現業的に運用され、そのプロダクト(あるいは、海洋再解析データ)が、海洋・気候研究の他、漁業や防災、沿岸保全に資する情報として、広く提供されるようになってきている。本稿では、日本の海洋データ同化研究のこれまでの成果や、海洋データ同化プロダクトの現状、現在の課題とそれを解決するための研究について総括し、今後の継続的な発展のために何が必要かについて議論する。

キーワード：海洋データ同化，海洋再解析，海況予測，4次元変分法大気海洋結合同化システム，データ同化夏の学校

* 2016年11月11日受領；2016年12月12日受理
著作権：日本海洋学会，2017

1 気象庁気象研究所 海洋・地球化学研究部
〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1
2 海洋研究開発機構
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
3 九州大学 応用力学研究所
〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1
4 水産研究・教育機構 中央水産研究所
〒236-8648 神奈川県横浜市金沢区福浦2-13-4
5 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター
〒237-0061 神奈川県横浜須賀町夏島町2-15
6 東京大学 大気海洋研究所
〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5
7 水産研究・教育機構 北海道区水産研究所
〒085-0802 北海道釧路市桂恋116

** 連絡著者：藤井 陽介
TEL：029-853-8658 FAX：029-855-1439
e-mail：yfuji@mri-jma.go.jp

1. はじめに

1995年に東京で開催された第2回世界気象機関(WMO)大気・海洋データ同化シンポジウムにおいて、日本の海洋学者たちは、海外でデータ同化が新たな学問として追求されていることに大きな衝撃を受けた。このことは、同年7月の第1回データ同化夏の学校の開催など、日本で本格的な海洋データ同化研究が開始されるきっかけとなった。それから20年あまり、日本の海洋データ同化研究は大いに進展し、世界に伍する様々な成果を上げた。例えば、2004年には、海洋データ同化システムを活用することにより、それまで日本の海洋学にとって大きな課題であった黒潮大蛇行の予測に成功した。また、世界で唯一の4次元変分法(4DVAR)大気海洋結

合データ同化システムの開発にも挑戦した。その他、2005年には、大型クラゲのリアルタイム漂流予測にも成功し、海洋データ同化システムを活用したエルニーニョ予測の精度も、この間、着実に向上した。そして現在では、海洋データ同化システムのプロダクトが一般に公開され、政府や民間による海洋情報サービスや海洋研究に利用されるようになってきている。これらの成果は、これまで日本の研究者が海洋学と数学の融合した新たな学問分野として、データ同化の研究に真摯に取り組んできた結果であるといえる。一方で、この20年間の海洋データ同化研究の進展が、海洋数値モデルの着実な精度向上と、海面高度計、アルゴフロート、TAO/TRITON アレイなどの海洋観測システムの継続的な発展に支えられてきたことも忘れてはならない。

しかしながら、昨今、新たな課題が顕在化しつつあり、データ同化研究の進展を今後さらに継続させるためには、これらの課題に取り組んでいかなければならない。例えば、今後は、単にデータ同化プロダクトを生成するだけでなく、その大容量で高精度なデータを有効に活用する方法についても研究していく必要がある。そのためには、多くの研究者とデータを共有し、その活用の成果についてフィードバックが得られるような体制の構築が求められる。また、データ同化技術のさらなる高度化も必要である。たとえば、日本周辺海域のデータ同化システムはこれまで主に黒潮流軸の変動やメソスケール渦などおおよそ100 km以上のスケールの現象を対象としていたが、今後は沿岸域の変動の再現などに向けて、より細かなスケールの現象の再現を可能とするような同化システムの開発が期待される。そのためには、面的海面高度計データや流速データなどの新たな観測データの同化や、より高度なデータ同化手法の導入が必要となる。また、海洋大循環モデルだけでなく、海氷や潮汐、生態系などの新たなモデル、あるいはそのコンポーネントに対するデータ同化手法の開発も期待される。その他、データ同化技術を活用し、より効率的な海洋観測システムの設計を提案することにより、海洋データ同化システムの精度向上に貢献していくという方向性も考えられる。

上記のような背景のもと、日本海洋学会2016年度春季大会の期間中に行われたシンポジウム「海洋データ同化20年の歩みと今後の展望」では、日本における海洋

データ同化研究のこれまでの発展を主な功績を中心に振り返り、その成果が海洋学の他、水産、気象、防災、海運など様々な分野で活用されつつある現状と解決すべき課題について総括し、今後の発展のための研究の方向性や体制の構築について議論した。本稿は、日本の海洋データ同化研究の今後の発展に資することを目的として、上記シンポジウムの内容について改めて論ずる。

2. 日本海洋データ同化研究の歩み

2.1 黎明期から現業海況予測システムまでの道程

冒頭にもあるように、1995年のWMO大気海洋データ同化シンポジウムのショックは大きかった。それを契機として海洋データ同化夏の学校が開始され、日本での人材育成が始まった経緯は、その活動を基に作成されたデータ同化の教科書(淡路ら, 2009)のあとがきに詳しい。一方、1980年代の末には、九州大学応用力学研究所(応力研)や東海大学で、衛星海面水温のパターンマッチングによる表面流速の算出(Kamachi, 1989)など、データ同化の先駆けとなる研究が始まっていた。やがて、日本でも海洋でのデータ同化研究への機運が芽生え、1988年5月にパリで開催された政府間海洋学委員会(IOC)総会で山形俊男応力研助教授(当時)がフロリダ州立大学のJames O'Brien教授に日本で研究を始めるにあたっての起点となる参考文献をご教示願った。その時に山形助教授がO'Brien教授から頂いたメモ(Plate 1)が、日本での海洋データ同化研究の始まり(の少なくとも1つ)である。

さて、WMOのシンポジウムが日本で開催された1995年当時には、人工衛星TOPEX/Poseidon搭載の海面高度計データが利用可能になるとともに、現在のアルゴ計画の先駆けとなる中層フロートの技術開発も大幅に進展していた。さらに海洋大循環モデルの性能も実用レベルまで向上していた。この状況は、1970年代に気象学でFirst GARP Global Experiment (FGGE)により天気予報が開始された状況に酷似していた。そのため、フランスの気象学者P. Courtierほかの提言により、FGGEに真似て、海洋予報の現業的な実施をデモンストレーションし、現業運用の開始を目指すGlobal Ocean Data Assimilation

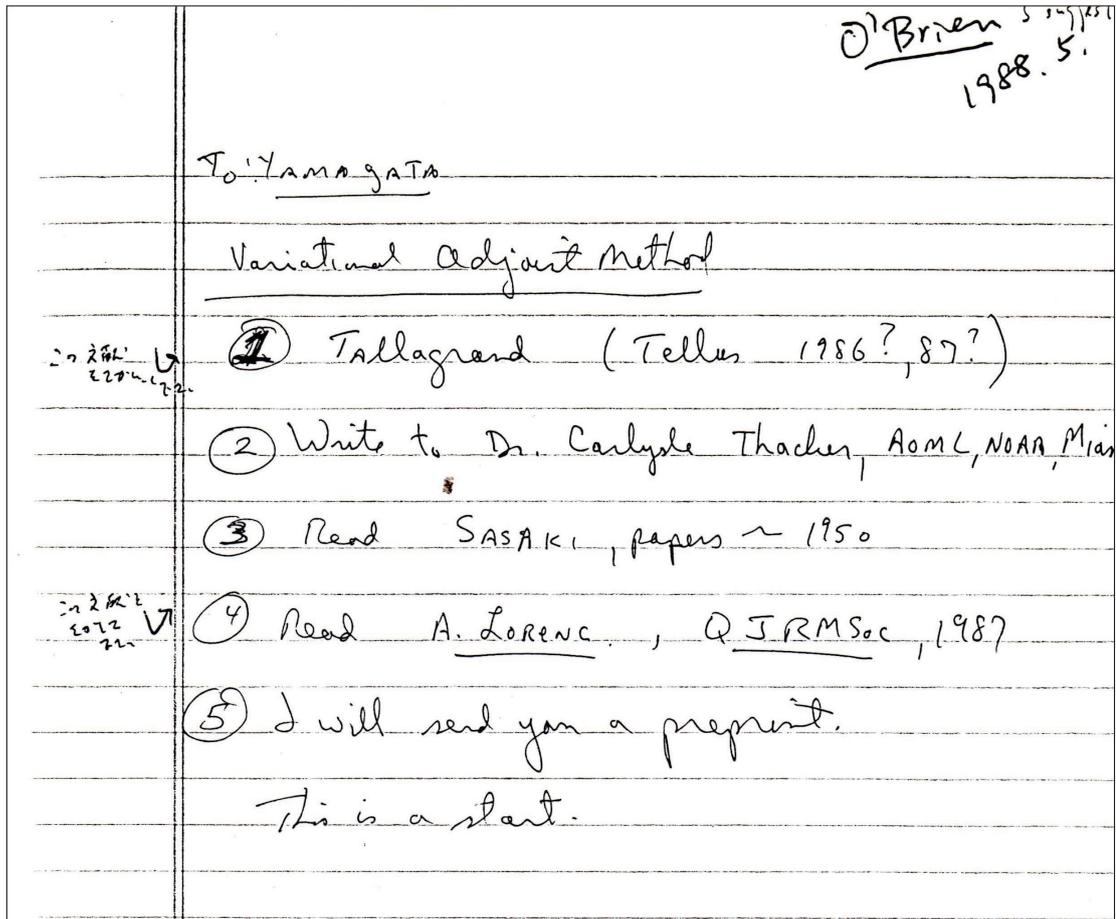


Plate 1. A note scratched by Prof. O'Brien for Japanese pioneers of ocean data assimilation. Provided by Masafumi Kamachi.

lation Experiment (GODAE) 計画を 1997～2008 年に実施することとなった (例えば, Dombrowsky, *et al.*, 2009)。なお, その後 GODAE は予定通り実施され, ユーザとの連携と更なる同化研究の発展を目指す GODAE Ocean View として, 現在へと引き継がれている。また, 関連して「オペレーショナル海洋学」という分野も誕生した。

一方, 1990 年頃の気象庁では, 海洋の現況解析は主に主観解析に, 予測は主に統計的手法に頼っており, 解析・予測手法の現代化が望まれていた。そこで, 1991 年頃より気象研究所 (気象研) でも, 海洋データ同化システムの開発が進められた。まず TOPEX/Poseidon の海面高度計データと観測船による現場海洋観測データを用い

た時空間代表スケールの算出と, それに伴う時空間最適内挿法の開発 (Kuragano and Kamachi, 2000) が行われた。その後, 鉛直プロファイルの推定方法として相関投影法, モデルへの挿入方法として時間先行ナッジング法が導入され (Kamachi *et al.*, 2004a, b), 気象庁第一世代海況予報システム COMPASS-K (Comprehensive Ocean Modeling, Prediction, Analysis, and Synthesis System in the Kuroshio region) として 2000 年に現業運用が開始された。このシステムは北西太平洋や日本近海の海況情報の発信に用いられ, 特に 2004 年の黒潮大蛇行の予測の成功をみた (Fig. 1)。また, 油流出事故後の拡散予測や海上保安庁での救命救難活動での基礎資料として利用され (Davidson *et al.*, 2009), 海洋予報現業の実施の一例

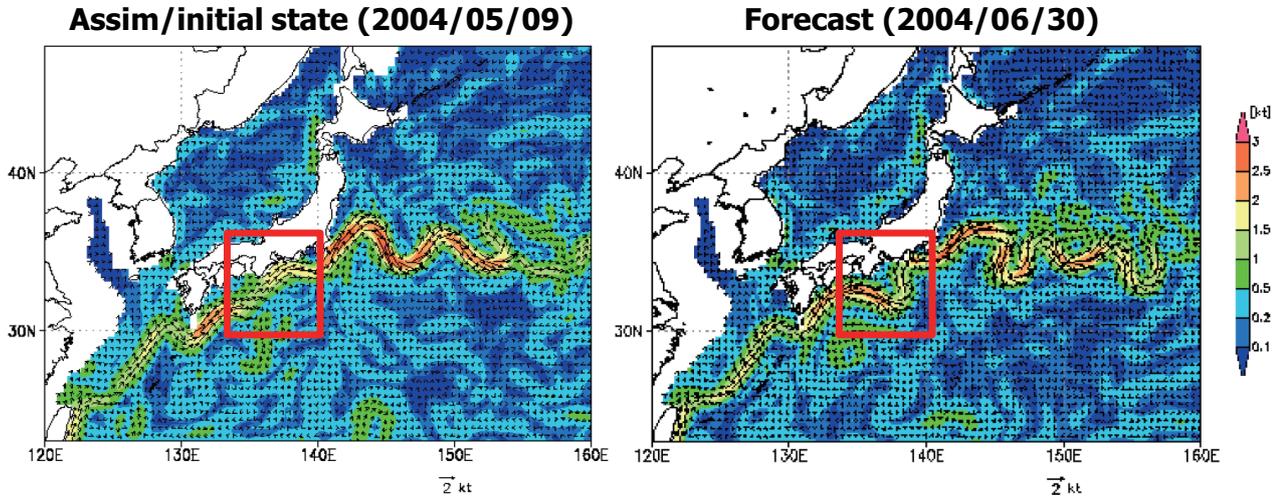


Fig. 1. Current fields at 70 m depth on 09 May 2004 estimated by data assimilation (left) and on 30 June 2004 forecasted from 09 May 2004 (right) in COMPASS-K. The Kuroshio large meander is successfully forecasted in the red square in the right panel.

として GODAE 計画にも貢献した。

また、上記の成功と前後して、海況予報と全球の気候変動(エルニーニョ・季節)予報のためのシームレスな初期値作成を可能とするシステムの開発が、気象庁から求められるようになった。そこで気象研では、水温・塩分場の相関した変動を取り出すことを主眼として、水温・塩分結合経験的直交関数(EOF)展開により背景誤差共分散行列を薄減化する3次元変分法 MOVE (Multivariate Ocean Variational Estimation; Fujii and Kamachi, 2003)を開発し、変分法による観測データの品質管理や解析場の密度逆転、異常な低水温などを防ぐ制約条件の導入(Fujii *et al.*, 2005; Usui *et al.*, 2011)により精度向上を図った。さらに、この手法を気象研共用海洋モデル(MRLCOM)に基づく渦解像北西太平洋モデルに適用し、気象庁の第二世代海況予報システム MOVE/MRLCOM-WNP (Usui *et al.*, 2006; 以後 MOVE-WNP)として、2008年に現業運用を開始した。このシステムでは、歴史的に観測数の少ない塩分場の再現性を高め、水塊分布の再現性を飛躍的に向上させた。また、黒潮大蛇行の発生・解消のメカニズムの解明に大いに貢献した。例えば、Usui *et al.* (2008a)は、大蛇行の発生を引き起こす九州南東沖の小蛇行の形成メカニズムの研究に MOVE-WNPを用いた。また、Usui *et al.* (2008b)は、MOVE-

WNPを用いて、日本の南岸で上層の小蛇行が下層の高気圧性渦と共に傾圧不安定により発達し大蛇行へと至る過程(Fig. 2)を明らかにした。

その後、気象庁では、上記システムを4DVARに拡張した第三世代海況予報システム MOVE/MRLCOM-WNP-4DVAR (Usui *et al.*, 2015)の現業運用を2016年より開始している。同システムの導入により、黒潮流軸の詳細な変動や沿岸水位の再現性は飛躍的に向上した。気象研では、高精度な海況予報現業の実現のために、1990年代から4DVARの研究を行ってきたが(Kamachi and O'Brien, 1995; Zhu and Kamachi, 2000; Fujii *et al.*, 2008), その志が20年以上の歳月をかけてようやく結実したといえる。

2.2 日本海・東シナ海海況予報の発展

1997年1月に日本海南部で発生したタンカー「ナホトカ号」の沈没事故は、沿岸環境に与えた被害も甚大であったが、海洋物理学の観点からしても、流出重油の移動過程をほとんど予測できず、関係者に大きな反省を強いることとなった。これを受けて、九州大学応力研は、その後、精力的に流出重油の漂流シミュレーションに取り組んだ。例えば、Varlamov *et al.* (1999)は、A吹送流のみ、B気候的な海流を考慮した場合、C海流モデル

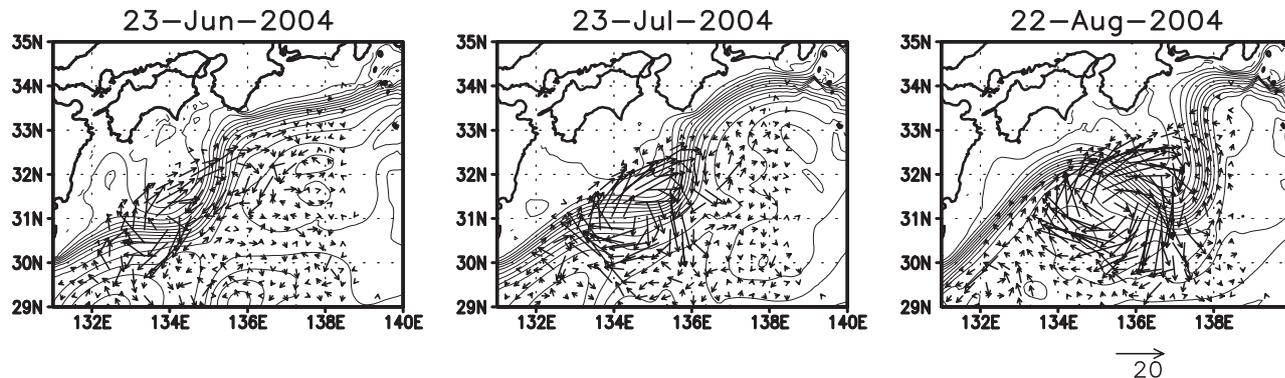


Fig. 2. Formation of the Kuroshio large meander and the relevant anticyclonic eddy in the deep layer in the prediction initialized on 1 June 2004 by MOVE-WNP. Contours show potential density fields at 400 m depth (contour interval: 0.1 kg m^{-3}) and arrows show horizontal velocity at 3000 m depth (units in cm s^{-1}). Valid dates are denoted at the top of each panel. Adjusted from Usui *et al.* (2008).

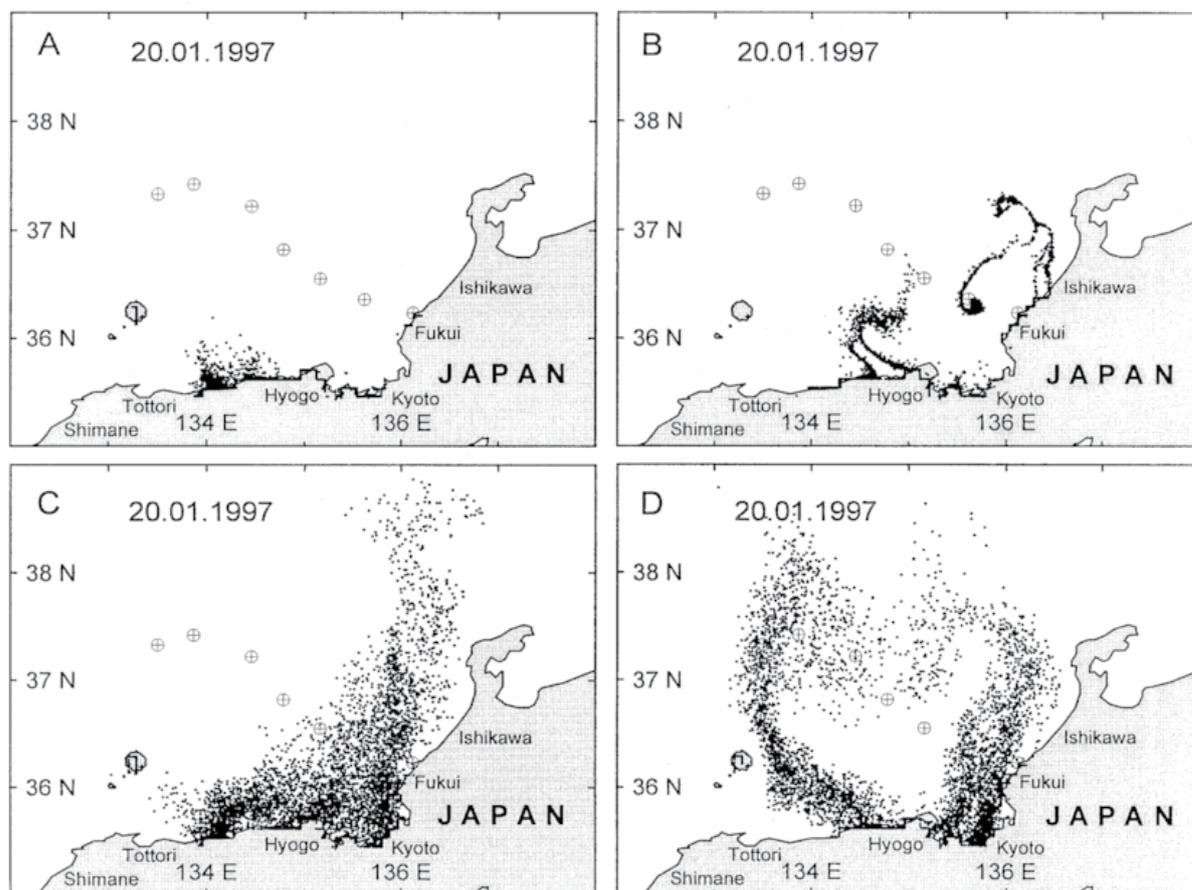


Fig. 3. Simulated spread of spilled oil 18 days after the Nakhodka accident on 2 January 1997 in experiments A-D. Advection of the spilled oil is calculated from wind drift currents alone in experiment A, climatological ocean currents in experiment B, ocean currents simulated by an ocean model in experiment C, and ocean currents simulated by an ocean data assimilation system in experiment D. Cited from Varlamov *et al.* (1999).

によるシミュレーションを利用した場合、Dデータ同化モデルの場合、の4通りの漂流実験を行い、その各々で油粒子の挙動が全く異なることを示した(Fig. 3)。当時のデータ同化はまだ精度が不十分であり、漂流物質の挙動を正確に再現するためには、さらなる改良が必要とされた。

その後、Hirose *et al.* (2005) や Hirose *et al.* (2007) などにより、矢継ぎ早に日本海の海況予測モデルが改良された。特にユニークな取り組みとして、対馬海峡の海流データ(ADCP観測値)とモデル流速とをマッチアップし、海底水深の逆推定を試み(Hirose, 2005)が挙げられる。また、2005年には、急速に被害が拡大していた大型クラゲ漂流のリアルタイム予測に成功し(Fig. 4)、日本海の海流の再現性や予測精度が実用レベルに達してきたことが広く認知されることとなった(水産総合研究センター, 2005)。2008年には、日本海区水産研究所(水産総合研究センター)と第九管区海上保安本部(海上保安庁)でそれぞれ海況予測での利用が開始された。前者では水産資源の変動要因の調査を、後者では漂流物予測の

精度向上を主な狙いとしている。近年では、水平メッシュを1.5 kmまで高分解能化した沿岸モデルを開発し、定置網漁業に甚大な被害を及ぼす急潮発生の数値予測にも成功している(Hirose *et al.*, 2016)。

現在、この海況予測システムは、日本海に流入する様々な物質や水産資源が東シナ海や大陸沿岸を起源としていることを考慮して、東シナ海へと拡張され、DREAMSと呼ばれている(Hirose *et al.*, 2013)。DREAMSでは、予測精度の向上のために、モデルグリーン関数による海洋モデルの経験的なパラメータ(粘性係数や拡散係数)の最適化も実施している(Hirose, 2011)。さらに、東シナ海と日本海とでは潮汐振幅に大きな差があるため、主要分潮の位相と振幅の最適化も実施している(Moon *et al.*, 2012)。また、さらなる高分解能化にも取り組み、トカラ海峡を通過する黒潮を利用した海流発電や、久米島北東岸における海洋温度差発電のエネルギー賦存量推定にも貢献している。

2.3 エルニーニョ予測と海洋データ同化の進展

エルニーニョの予測には、熱帯太平洋の海洋内部の状態を把握することが必要不可欠であり、そのために、海洋データ同化システムが広く用いられている。エルニーニョ予測における海洋の内部状態の把握の重要性が初めて強く意識されたのは、1982年の終わりに発生したエルニーニョの時である。実はこの年の10月、Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA) プロジェクトの計画立案のために各国の研究者が一堂に会していたが、その中で今まさに起きようとしていたエルニーニョに気づく者は誰一人いなかったそうである(Philander, 1990)。すでにこの時には衛星による海面水温観測も始まっていたが、結局、エルニーニョの発生は十分に予測されなかった。この苦い経験は、研究者らに海洋内部の観測の重要性を強く認識させ、その後のTAO海面係留ブイ観測網(TAOアレイ)の構築につながった。

1990年代になると、TAOアレイが熱帯太平洋全体に展開され、多くの水温プロファイルがリアルタイムで観測されるようになった。しかしながら、観測ブイの分布は空間的にまだまばらであり、海洋変動を三次元的に把握し、大気・海洋結合モデルによる予測を行うためには、観測の無い海域についても適切な推定によりデータを埋

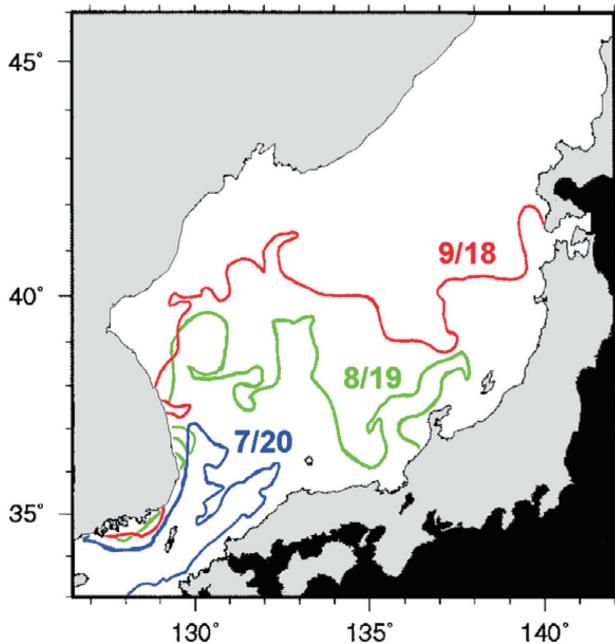


Fig. 4. Area of distributing Giant Jerry Fish on 20 July (nowcast), 19 August, and 18 September (forecasts), in 2005 simulated by RIAM Ocean Model. Cited from Fishery Research Agency (2005).

めて格子点化したデータセットを作成する必要があった。そのため、米国海洋気象局 (NOAA) では、地球流体力学研究室 (GFDL) が海洋データ同化システムを開発し (Derber and Rosati, 1989), そのシステムの現業運用を米国環境予測センター (NCEP) が 1995 年に開始した (Ji *et al.*, 1995)。また、日本の気象庁では 1994 年頃から全球海洋データ同化システムの開発を行い (石井, 1997), 1999 年には、それを用いたエルニーニョ予測を開始している。ただし、この時期の海洋同化システムは水温データのみを同化するいわゆる第 1 世代の同化システムであった。

その後、2000 年に TAO アレイは TAO/TRITON アレイへと拡張された (Ando *et al.*, 2017)。また、同年にはアルゴフロートによる全球的な観測網の構築を目指すアルゴ計画が開始され、2000 年代中頃には、従来は少なかった塩分の観測データが多く取得できるようになった。海洋表層の塩分分布は、太平洋の赤道上看られる塩分フロントの移動やバリエイヤーの形成を通して、エルニーニョの予測に影響を与える (Picaut *et al.*, 1997; Maes and Belamari, 2011 など)。そこで、アルゴ計画の進展と共に塩分データの同化が可能な同化システムの開発が開始された。一方、エルニーニョ予測のキャリブレーションでは、30 年以上の長期間にわたるデータ同化

シミュレーションの結果 (再解析) が必要となるため、塩分観測データが充実していなかった 2000 年以前の同化シミュレーションについても、2000 年以後と同様の安定した性能を持つことが望ましい。そのため、水温の観測データからもある程度、塩分分布の推定が可能であるシステム、すなわち、第 2 世代の海洋データ同化システム (Balmaseda *et al.*, 2009) が利用されるようになった (Ricci *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2008 など)。気象庁でも 2008 年から、MOVE (2.1 節参照) を利用した第 2 世代の全球海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM-G (以後、MOVE-G) の現業運用を開始している。

Fujii *et al.* (2011) は、MOVE-G を用いて第 2 世代のシステムの塩分同化の効果を検証している。MOVE-G で塩分データを同化せず水温や海面高度データを利用したモデル塩分場の修正も行なわなかったものを第一世代の結果と見なし、第 2 世代である通常の MOVE-G の結果と比較したところ、第 1 世代の同化システムには太平洋熱帯域の表層、亜表層に低温バイアスが見られた (Table 1)。塩分を調節せずに水温だけ修正するため、密度成層構造が崩れ、現実が無い鉛直混合が生じたためである。一方、第 2 世代のシステムでは、成層構造を保つように水温の修正に合わせて塩分も調節するため、低温バイアスを生じておらず、水温の平均二乗誤差 (RMSE)

Depth (m)	Bias (°C)		RMSE (°C)	
	1st GE	2nd GE	1st GE	2nd GE
10	-0.134	0.029	0.572	0.487
50	-0.120	0.079	0.620	0.553
100	-0.471	0.030	2.386	1.121
150	-0.584	0.120	1.893	1.536
200	-0.350	0.129	1.391	1.202
300	-0.259	-0.116	0.557	0.410

Table 1. Biases and Root Mean Square Errors (RMSEs) of temperature at each depth in the equatorial Pacific (2°S–2°N, 130°E–80°W) simulated by the first and second generation (GE) global ocean data assimilation systems. Argo float data that are not assimilated (20% of all Argo float data) are used for the reference. Adjusted from Fujii *et al.* (2011).

が減少している。このように、第2世代の登場は熱帯太平洋水温場の精度向上にもつながっている。

以上のように、エルニーニョ予測のための海洋データ同化技術は、これまで、海洋観測システムの発展とともに着実に進展してきたが、近年は問題も生じている。それは、TAO/TRITONアレイの縮小である。TAO/TRITONアレイは、2000年以降エルニーニョの予測に不可欠な熱帯太平洋の水温プロファイルを多くの点で観測してきたが、2012年から2014年にかけて維持予算の削減のため、中央・東側部分のTAOアレイを構成する観測ブイの数が著しく減少した(例えば、Fuji *et al.*, 2015)。この問題は米国海洋大気庁(NOAA)の努力により一時的には回復した。しかし、2014年以降には、TAO/TRITONアレイの西側部分を構成しているTRITONアレイを運用する海洋研究開発機構(JAMSTEC)が、観測ブイの削減を始めている。そのため、研究コミュニティではTropical Pacific Observing System 2020プロジェクト(<http://tpos2020.org>)を立ち上げ、より効率的な熱帯太平洋観測システムを検討するとともに、海洋データ同化システムに対する観測システムの変化の影響をモニターするための海洋再解析リアルタイム相互比較を2014年より実施している(Xue *et al.*, 2016)。

2.4 気候変動に対する4DVAR結合同化システム開発への挑戦

日本の海洋データ同化コミュニティは、気象学者らとも連携し、「気候変動」、「4DVAR」、「結合同化」という3要素をあわせもつ極めて野心的なシステムの開発にも挑戦した。とりわけ、2002～2006年度に実施された文部科学省受託研究「人・自然・地球共生プロジェクト」第7課題は、この挑戦を世界へ羽ばたかせ、データ同化研究コミュニティの拡大や発展に大きな役割を果たした。プロジェクト課題として掲げられた目標は、統合的な全球大気海洋結合再解析データセットの作成であったが、実際の研究開発現場で多大な労力が費やされたのは、その一歩手前の結合同化システムの開発である(Sugiura *et al.*, 2008)。観測データ情報を取り込んで現実的な気候シミュレーションを行うため、そもそもの結合モデル制御可能性の探求から始まり、同化システム構築と改良、実験遂行、検証解析を粘り強く繰り返す必要があった。

最初の成果は、結合モデルのパラメータ最適化による「気候値同化」の実現である(Mochizuki *et al.*, 2007)。結合モデルの海面や陸面における大気との熱や運動量の交換式に結合係数(規定値は1)というパラメータを導入し、それを制御変数として時空間的に最適化することによって、気候値バイアスが小さな気候モデルシミュレーションに成功した。結合係数による結合気候モデルの制御可能性を実証したことが重要な成果である。これに続き、制御変数として結合係数とともに海洋初期値を最適化することによって季節経年規模の気候変動を再現する「経年変動同化」にも成功した(Mochizuki *et al.*, 2009)。

さて、再解析データセット作成は学界に対する貢献度が非常に高い成果であるが、一方、気候変動に対する4DVAR結合同化システムを開発した価値は、以下に述べるようにもっと別なところにもあると考えられる。

第1には、4DVARに付随するアジョイントモデルは、時間方向の逆演算モデルであるから、個別の事象に対する感度解析や逆追跡を結合系として直接実施できる強力なツールとなることである。いわゆる輸送モデルではなく、波動による情報伝播も表現でき、その起源を他の物理量にも遡って確率的に推定できる。このため、同化システム構築の取り組みと並行して、結合逆演算モデルの気候変動研究での感度解析ツールとしての有用性の検証が進められた。短期気象現象に対する逆追跡(1週間程度)は期待通りの動作が確認され、例えば、ある降水事例に対する水蒸気供給源を遠く離れた海面水温偏差に遡ることに成功した(石田ら, 2005)。ただし、アリュシャン低気圧変動の起源を熱帯海洋に遡るという例題など、振幅が必ずしも大きくないゆっくりした気候変動要因を個別に逆追跡することは容易でなく、今後の課題である。

第2には、最適化された制御変数の時空間分布の物理的な理解によって、結合気候モデルの弱点の修正方法に関する提言を期待できることである。もし、同化実験における結合係数の最適化が単にモデル誤差の局所的な結合係数値への押し付けであるならば、最適化により推定された時空間構造に物理的な意味はほぼなく、結合気候モデル開発への貢献はあまり期待できない。しかし実際には、部分的であれ、結合係数の最適化は物理的な何かを反映することが示唆される。例えば、熱帯海洋上の結

合係数最適値は、大気対流活動の活動度やそれに伴うモデル格子内での微小擾乱の強さとよく対応する (Mochizuki *et al.*, 2007)。これはモデル物理の理解やスキームの開発・改良に重要な示唆を与えるものであり、潜在的メリットとしてとらえられるのではないだろうか。

そして第3には、結合同化結果の気候予測への応用が期待されることである。これまでに4DVAR 結合同化システムは、エルニーニョ予測 (Nishikawa *et al.*, 2015) や数年先までの気候予測 (Mochizuki *et al.*, 2016) において、初期値化システムとして有効に機能することが実証されている。ただし、これらの数値実験では予測計算実施時の結合係数を規定値1に固定している。一方で、結合係数の何らかの最適化情報を予測計算にも使って、いわば気候モデルの“改良”をおこなうことによって予測性能をさらに向上させる試みもある。例えば、結合係数最適値の時間変化を何らかの方法で適切に推定できれば、予測性能はさらに向上するかもしれない (Masuda *et al.*, 2015a)。過去の結合係数最適値の時空間変動について、支配的な物理プロセスや他の大気海洋変数との関係を解き明かすことは予測システムの改良や物理メカニズムの理解としてもとらえることができる。

ここで紹介した4DVAR 結合同化の基盤システムは10年以上前の大型プロジェクトの後押しがあって構築できたものである。しかし、今もなお現役として研究成果を生み出せるレベルにあり、ここで挙げたように、さらに大きな研究発展のポテンシャルを有する。個々の気候モデルに応じたアジョイントモデルや大きな計算機資源を必要とするなど困難な点も少なくないが、野心的かつ奥深い研究課題として、その発展が望まれる。

3. データ同化プロダクトとその活用例

本節では、現在、日本国内の各現業機関や研究で用いられているデータ同化プロダクトとその利用状況について紹介する。

3.1 JCOPE2 再解析および JCOPE-T-NEDO

JAMSTEC アプリケーションラボが行っている研究計画「日本沿海予測可能性実験 Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE)」では、日本近海にお

ける海流変動の予測可能性の理解を深め、さらにその結果を社会や産業界での応用に用いる研究を進めている。現在では極を除く準全球での1/10 度格子海流予測モデル (宮澤・早稲田, 2010) から、日本近海での1/36 度格子海流・潮汐流同時予測モデル (JCOPE-T; Varlamov *et al.*, 2015), さらに200 m 格子での沿岸ダウンスケーリングモデル (早稲田ら, 2016) まで、最短で1日毎に予測を更新しながら研究者や産業界に予測・再解析プロダクトを提供する体制を構築している。

JCOPE では、主要な再解析データとして、北西太平洋の黒潮・黒潮続流、親潮、中規模渦の変動を記述するために、衛星データおよび現場水温塩分データを海洋循環モデル Princeton Ocean Model (POM) に同化した FRA-JCOPE2 再解析 (以下 JCOPE2 再解析) を作成している (Miyazawa *et al.*, 2009)。JCOPE2 再解析には、北西太平洋 (108–180°E, 10.5–62°N) の深さ6500 m までの、水位、水平流速、ポテンシャル水温、塩分データが、水平1/12°格子で作成されている。データ同化手法は、MOVE (2.1 節参照) に準じている。衛星海面高度が利用可能な1993年以後の日平均データが利用できる。現在の約1週間前までのデータが利用でき、現在進行中の海洋現象を過去の事例と比較することも可能である。JCOPE2 再解析データの提供は、学術研究利用の場合には無償で行われている (<http://www.jamstec.go.jp/jcope/htdocs/distribution/index.html> を参照)。

以下に、JCOPE2 再解析データを使用した研究をいくつか紹介する。まず Chang *et al.* (2015) は、ウナギの幼生が産卵場所であるフィリピン沖からどのように日本沿岸に達するか調べるため、JCOPE2 再解析の流速にウナギに見立てた遊泳力を加味した粒子を流し、従来、エルニーニョの影響が強調されてきた回遊の経年変動にフィリピン台湾振動が影響していることを明らかにした。この研究は、(1) 高分解能で中規模渦が再現されていることが重要である (代わりに低分解能の同化データを使うと良好な結果が得られない)、(2) 3次元的な場が重要である (ウナギは上下に移動する)、(3) 長期のデータがあるので経年変動を取り扱うことができる (Philippines-Taiwan Oscillation に注目している)、(4) データは物理場だがアイデア次第で生態系などの研究にも応用できる、などの点で JCOPE2 再解析のメリットを十二分に活

かした例と言える。

一方、気象や気候分野では、近年、海洋フロントが大气に与える影響の研究が進んでおり、高解像度の海洋再解析が利用される機会も増えている。例えば Kawai *et al.* (2015) は、夏季の黒潮続流における3隻の船舶による同時観測が捉えた強い海洋フロントと上空の雲分布の関係を考察し、JCOPE2 再解析海面水温を下部境界条件に使った領域大気モデルによる実験を行っている。JCOPE2 再解析では一般的な衛星由来の海面水温データに比べて観測に近い強い海洋フロントが再現されているので、上記の実験では続流をはさんだ雲高度の違いが良く再現され、黒潮フロントの雲形成に果たす役割が明らかになった。この他にも、従来の海洋物理分野での解析データとして利用(例えば, Zhao *et al.*, 2014) や、高解像度沿岸モデルの側面境界条件としての使用(例えば, Isobe *et al.*, 2010) など、多くの利用例がある。

また、早稲田ら(2016)は JCOPE-T-NEDO 再解析データを作成した。これは、JCOPE2 を側面境界条件としてネストした、日本沿岸(125-148°E, 24-48°N)を対象とする高分解能(1/36°)モデルによる再解析データである。高分解能であるだけでなく、沿岸の海洋現象の理解には欠かせない潮汐を外力に加えた JCOPE-T を使用している。データ同化については、JCOPE-T の計算結果

から潮汐の変動を除いた場合を JCOPE2 再解析に5日の時間スケールでナッジングしている。この手法では、JCOPE-T の時空間分解能のデータを制御できる密な海洋観測データは存在しないので、黒潮の流路などの大きなスケールの現象を JCOPE2 再解析に近づけることで現実に近いと考えられる場を確保したうえで、時空間的に細かい部分をモデル物理によって加えていると考えられる。データは2002年からあり、1時間間隔という従来の再解析にはない時間分解能である。このデータも公開されている(上記の JCOPE2 再解析の入手法を参照)。

Fig. 5 に、JCOPE2 と JCOPE-T-NEDO で得た同じ日の九州・四国沿岸の海面水温と海流の分布を比較のために示す。JCOPE2 に比べて、分解能の高い JCOPE-T-NEDO の方が黒潮と沿岸の関わりを詳細に捉えており、潮汐による時間変化も見ることができる。潮汐の変動が入った高分解能のデータとして、日平均データでは判別が難しい短周期の変動現象など、新たな研究での利用が考えられる。例えば、Miyama and Miyazawa (2013) は、JCOPE-T-NEDO の開発段階の潮汐を含まない高分解能(1/36°)データで、黒潮急加速現象という JCOPE2 再解析では明瞭ではなかった現象について、地形との関係などを詳細に調べ、その形成メカニズムを提唱した。Miyazawa *et al.* (2012b) は、2011年3月の東日本大震災に

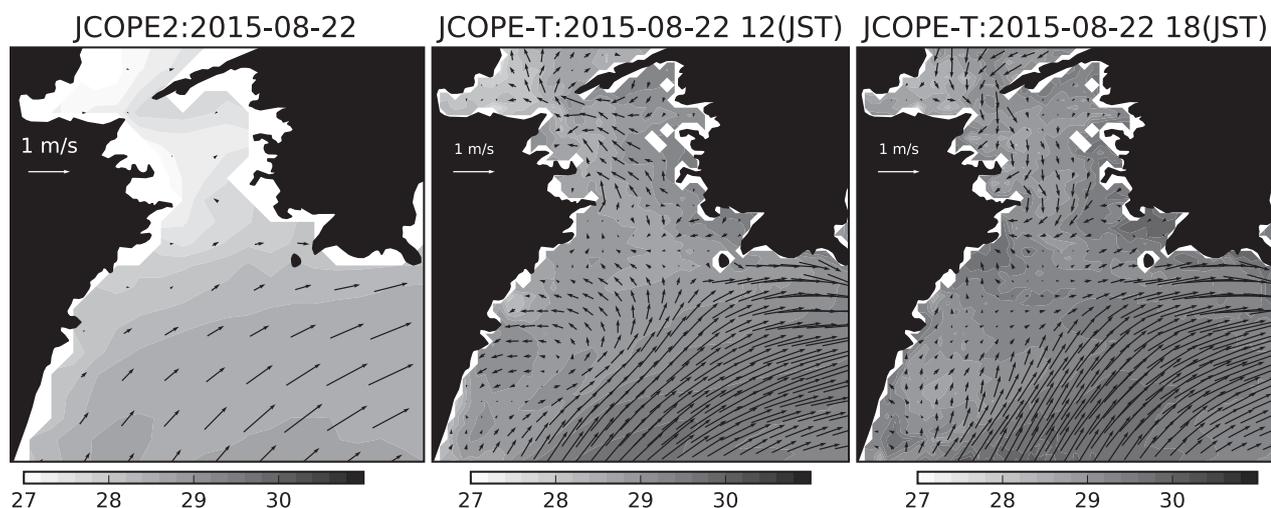


Fig. 5. Snapshots of sea surface temperature (in °C) and current (in m/s) on 22 August 2015. (a) Daily mean of JCOPE2 reanalysis. (b) Hourly mean of JCOPE-T-NEDO at 12 JST, (c) As in (b) except for at 18 JST.

よる津波被害によって生じた福島第一原子力発電所の事故を通じて海洋に直接流出した放射性物質の、陸棚域から外洋域への漏出において、海上風、河川水、潮汐などの各物理過程が及ぼす役割を明らかにした。今後、新しい海洋再解析データの従来とは違う目的での利用が広がることを期待したい。

3.2 海況予測システム FRA-ROMS とその水産海洋研究への活用

国立研究開発法人水産研究・教育機構は、黒潮や親潮など日本近海域の中規模海況変動をモニタリングし、2カ月後までを予測するため、海況予測システム FRA-ROMS (Kuroda *et al.*, 2016; <http://fm.dc.affrc.go.jp/fra-roms/index.html>) を開発し、2012年5月より経常運用している。同システムは海洋大循環モデル、データ同化システム、現場データ流通システムの3つの要素で構成されている。海洋大循環モデルは ROMS (Regional Ocean Modeling System; Shchepetkin and McWilliams, 2005) を整備したもので、静水圧近似を施したプリミティブ方程式に基づき、中規模渦の解像可能な格子間隔を採用している (Kuroda *et al.*, 2013)。データ同化手法は MOVE (2.1 節参照) に準じている。観測値には衛星海面水温、衛星海面高度、現場水温・塩分を利用している。特に現場水温・塩分については、GTSP (Global Tem-

perature and Salinity Profile Programme) データとともに日本沿岸に稠密に展開されている地方自治体の水産試験研究機関の現場観測値 (Fig. 6) をリアルタイムでシステムに組み込めるよう、現場データ流通システムを独自に開発している (清水ら, 2007)。FRA-ROMS は運用開始から4年が経過し、現在では海洋流動モデルとしてだけでなく、関連する他の数値モデルの基盤として、多面的な活用が進んでいる。

まず、FRA-ROMS は主要な水産資源の魚群の出現状況や来遊経路を予測するのに利用されている。例えば、久野・瀬藤 (2015) は熊野灘で採捕されたブリ幼魚の出生海域を探るため、FRA-ROMS を基にブリ幼魚の生理的特性を組み込んだ数値実験を実施し、実験によって推定された出生海域が、船舶調査によって特定された親魚の産卵海域と一致することを示した。一方、資源変動の解析にも FRA-ROMS は利用される。浮魚類の資源が変動する要因として発育段階初期の死亡率や成長の速度が候補に挙げられるが、これらを評価する際には、孵化してから仔稚魚に至るまでに被る被食や疾病状況や輸送過程で経験する海洋環境などを見積もる必要がある。そのためには、データ同化システムにより再現された流動場を用いた粒子追跡実験によって、仔稚魚の経験した海洋環境や生育環境を分析することが有効である。例えば、奥西ら (2016) は、耳石解析と飼育実験をもとにマサバ

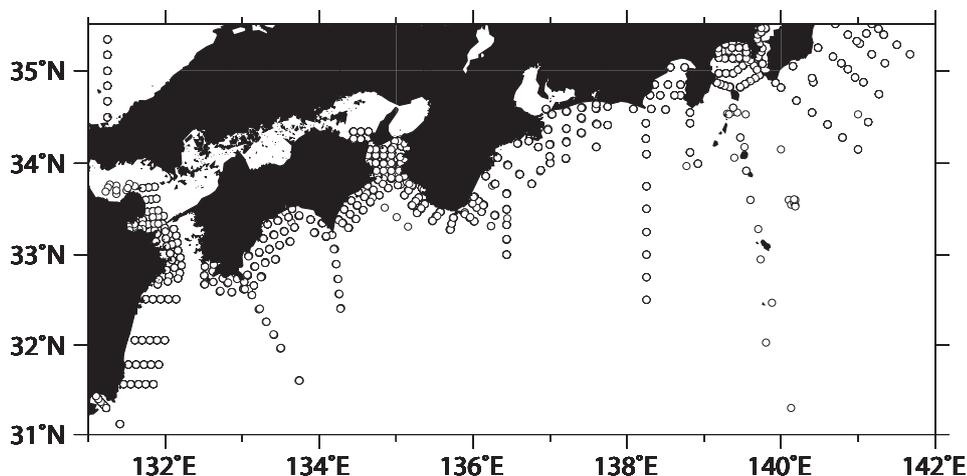


Fig. 6. Distribution of profiles (temperature and salinity) observed by Japanese local fisheries research institutions during 2015, delivered by realtime data collection and distribution system.

の成長式を構築し、FRA-ROMS の水温と流速を外力としたマサバ仔魚期の輸送と成長を推定するモデルを開発した。Sakamoto (2016) は、耳石酸素安定同位体比 $\delta^{18}\text{O}$ からマイワシが経験した水温・塩分履歴を抽出し、FRA-ROMS の海況環境場と対応させることによりマイワシ成魚が回避した経路を推定した。FRA-ROMS は、さらに、プランクトンなどの餌料環境や栄養塩動態の研究にも利用されている。例えば、日高 (2016) は日本南岸域における動物プランクトン群集の分布特性を解明するため、プランクトンの寿命と海況の代表的な時間スケールとの対応関係を分析し、動物プランクトンの海域定着特性について論じている。Kodama *et al.* (2015) は、春季東シナ海中東部に出現する特徴的な栄養塩分布構造に着目し、それが東シナ海流動場の季節変動特性に起因することを明らかにしている。

上記の研究の蓋然性を評価するためには、FRA-ROMS による海況の再現精度を定量的かつ客観的に示すことが不可欠である。Kuroda *et al.* (2016) は FRA-ROMS 長期再解析値の流動場を用いた卵稚仔輸送実験の再現精度を評価するため、漂流プイの輸送経路と追跡粒子との対応関係を統計的に評価し、粒子追跡実験の精度を評価する方法を新たに提案した。水産海洋研究に利用される各種モデルの再現精度を客観的に評価する方法を整備することは、今後この分野の研究活動の進展に大きく貢献するものと考えられる。

3.3 4次元変分法による海洋長期再解析データ FORA

北西太平洋海洋長期再解析データセット FORA-WNP30 (Four-dimensional variational Ocean ReAnalysis for the Western North Pacific over 30 years) は、MOVE/MRLCOM-WNP-4DVAR (2.1 節参照) を元に、2015 年 3 月に更新された JAMSTEC の地球シミュレータを用いて作成された (Usui *et al.*, 2016)。最新の計算機資源を利用することで、北西太平洋域で中規模変動を解像できる分解能を有し、衛星高度計の打ち上げ以前の 1982 年からの長期にわたる海洋再解析データセットを作成することができた。

FORA で利用した海洋大循環モデルは、MRLCOM バージョン 2.4 (Tsujino *et al.*, 2006) で、水平分解能は 1/10 度 (北緯 50 度以北と東経 160 度以東はそれぞれ 1/6

度)、鉛直層は海面から 6300 m まで 54 層である。境界値は水平分解能が 1/2 度の北太平洋モデルからネスティングにより与えている。また、海水モデルを結合しており、海水密接度等の海水の要素も計算している。モデルの外力には、気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55; Kobayashi *et al.*, 2015) の日別値を用いた。データ期間は、現在、1982 年から 2014 年までである。

海洋同化システムは、MOVE を 4DVAR に拡張した MOVE-4DVAR (Usui *et al.*, 2015) を採用しており、数値モデルによる同化ウィンドウ内の場の時間発展を観測に合うように最適化している。3 次元変分法の MOVE では解析時刻の前後の観測をすべて同時刻とみなして扱っていたが、MOVE-4DVAR では観測時刻を反映した修正が行われ、短周期変動の再現に有利である。同化ウィンドウは旬ごとの約 10 日であり、この期間毎に 4DVAR で初期から 3 日間、水深 1500 m 以浅の水温・塩分場に加える同化修正量を最適化している。修正量を 3 日間に分散することにより初期ショックを低減している。また、海水についてはナッジングにより海水密接度を同化している。海洋同化に用いた観測データは、WOD13 (World Ocean Database 2013) と GTSP の現場水温・塩分、MGDSST (Merged satellite and in situ data Globally Daily Sea Surface Temperatures) の海面水温、AVISO が公開している衛星高度計の海面高度偏差である。

FORA は、衛星海面高度計打ち上げ以前の特異イベントの再現に成功している。例えば、黒潮大蛇行は、気象庁の主観解析による日本南岸の黒潮南下緯度と比較して、最近の 2004-2005 年のみならず、1982-1984 年、1986-1988 年、1989-1990 年においても、よく再現されていた。特に、1986-1988 年の大蛇行に注目すると、2.1 節でも述べたような、九州沖の小蛇行が下層の高気圧性渦と共に発達し大蛇行へと至る様子がよく再現されている。ここで、下層の高気圧性渦はデータ同化による修正ではなく傾圧不安定により発達しており、力学メカニズムの再現性が妥当であることがわかる。また、親潮の変動についても、1984 年の親潮の異常南下による冷水の広がりが現れており、期間を通じて最も大きい親潮面積 (東経 148 度以西、北緯 43 度以南で 100 m 層水温が 5°C 以下の面積) を示していた。衛星高度計の打ち上げ以前の黒潮大蛇行や親潮の異常南下の再現については、密な現場

観測データが日本の沿岸付近に揃っていることが大きな要因であると考えられる。また、2005年には、冬から春にかけて幅の狭い冷水が茨城沖にまで南下していたが、例えば3月7日の海面水温について、人工衛星搭載MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) による海面水温分布と FORA の結果を比較すると、MODIS で捉えられている三陸沖から茨城沖までの細い冷水の分布が FORA においても同様に再現されている (Fig. 7)。また、銚子沖から東方にかけての黒潮続流の北側への蛇行も、FORA に現れているようである。このように、暖水と冷水が混じりあう混合水域におけるメソスケール現象を捉えることができるのも、観測時間も考慮した修正を行う 4DVAR の利用と空間解像度が渦解像であることの効果が大きいと思われる。

一方、FORA にはいくつかの問題点もある。表層水温にバイアスが見られること、海面高度データの入力前後 (1993 年前後) の黒潮続流域などにおける渦活動性に違いがあること、旬ごとの同化ウィンドウ間のギャップが

あることなどがある。これらについては、FORA の利用者の意見も参考に今後の改善に向けて検討を行っている。FORA のデータセットは一般公開されており、研究の範囲内で利用が可能である。水平流速、水温、塩分、海面高度と海水密度の日平均データが提供されている。データセットの詳細は、FORA のホームページ (<http://synthesis.jamstec.go.jp/FORA/>) に記載している。

3.4 気候変動研究の為の長期全球海洋環境再現データセット ESTOC

ESTOC (Estimated State of Ocean for Climate research) は、データ同化手法を応用したデータ統合実験を通じて作成された準全球全層長期海洋環境再現データセットであり、水温・塩分・流速等の物理場に加え、生物化学変量も含んでいる。計算領域は南緯 75 度から北緯 80 度の準全球であり、水平解像度は 1 度、計算期間は 1957 年から 2011 年の 55 年間である。JAMSTEC で

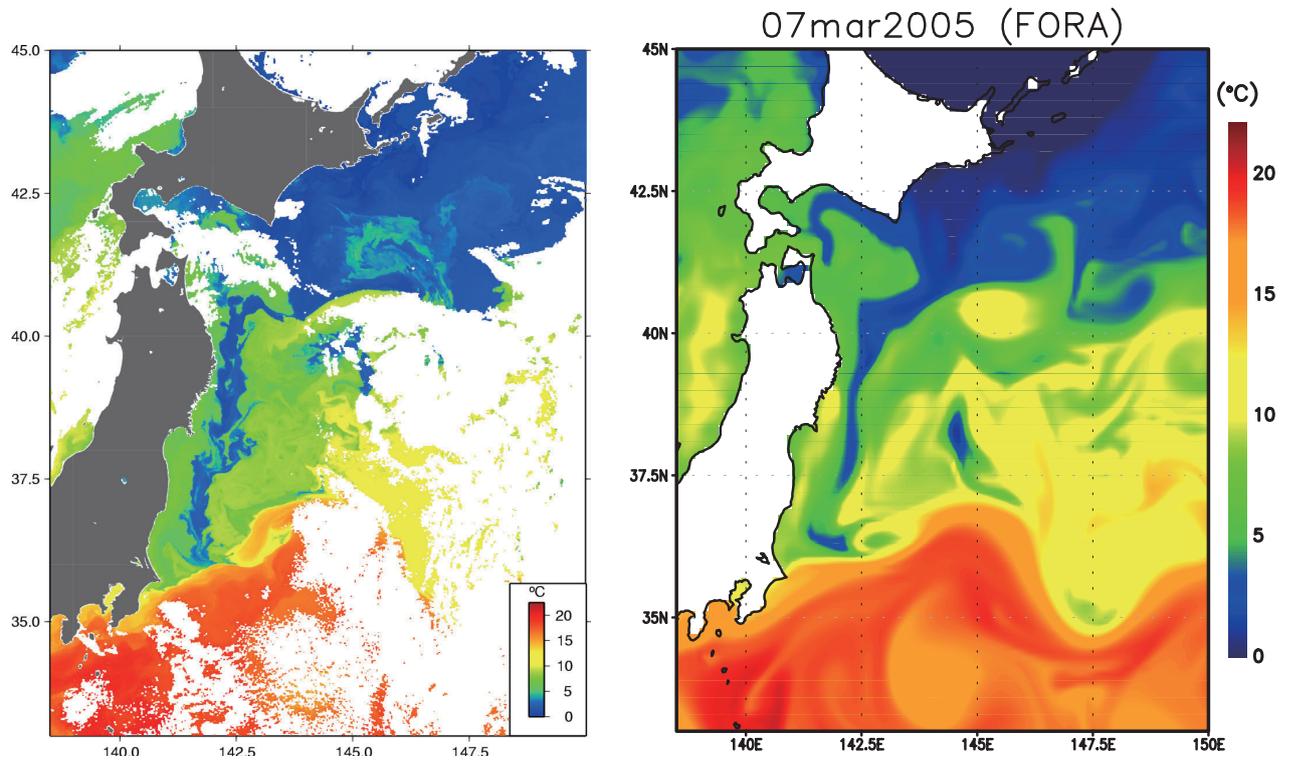


Fig. 7. Left: MODIS image of SST on 7 March 2005 produced by Japan Aerospace eXploration Agency (©JAXA The Earth Observation Research Center (EORC)). Right: SST fields on the same day in FORA.

運用されていて、地球シミュレータを用いた大規模並列計算により作成されている。その詳細は、物理モデルについては Osafune *et al.* (2015) を、低次生態系モデルについては Doi *et al.* (2015) を参照されたい。

本データセットの物理部分に関しては、2.4 節で紹介した結合同化システムの海洋部分を用いており、データセット作成の期間全体を1つの同化ウィンドウとした4DVARにより大気外力を含めて最適化している点が大きな特徴である。この手法には、計算期間を通じて海洋内部における熱・塩分・運動量等の人工的なソース・シンクがなく、モデル方程式で表される力学と整合した四次元変動場が得られるという利点がある。モデル方程式に則って無理なく観測データを補間する事から、しばしば力学内挿とも呼ばれる。アジョイントモデルは、元のモデルの非線形性が大きい程不安定化しやすく、長期積分する事が困難となるため、本システムでは比較的解像度の粗いモデルを使用している。このため、中規模渦が本質的な役割を果たすような現象はパラメタリゼーションに依存しており、適切に表現出来ていない可能性がある。力学内挿では、誤差を含む様々な情報を持った観測データから、モデルによって表現可能な力学と整合したシグナルのみを抽出する事が可能である。海盆スケールの気候変動においては、中規模渦より大きな時空間スケールを持った力学が主要な役割を果たす現象が多く、力学内挿によって推定された ESTOC は、そのような気候変動現象を対象とする研究を行ううえで有用なデータセットである。同様の手法を用いて全球規模で数十年スケールのデータ統合を行えるシステムは世界的にも稀有であり、ESTOC 以外には、アメリカの JPL/MIT を中心に開発された ECCO (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean; Wunsch and Heimbach, 2013)、およびドイツのハンブルグ大で開発された GECCO (the German partner of the ECCO effort; Köhl, 2015) がある。それらの中でも本システムは、独自に開発したアノマリー同化手法を適用するなど、特に深層の再現性に注意を払って設計されており、近年、観測から明らかになった海盆規模の底層昇温(例えば、Fukasawa *et al.*, 2004) を唯一再現に成功している。この他、表中層における様々な時間スケールを持った現象についても、複数の例についてその再現性が実証されている (Osafune *et*

al., 2015)。

ESTOC では、上記の物理モデルに対し、Oschlies (2001) の NPZD モデルをベースに、全炭酸およびアルカリ度を組み込んだ低次生態系モデルをカップルしており、グリーン関数法 (Menemenlis *et al.*, 2005) を用いて、生物地球化学パラメータの最適化を行った (Doi *et al.*, 2015)。このモデルでは、無機溶存炭素やアルカリ度の気候場をよく再現しているだけでなく、十年規模の溶存無機炭素の増加量についても、過去の観測に基づく推定をよく再現している事が確かめられている。このような物理場と整合性のとれた統合的データセットは炭素循環の動態把握などにも利用可能であり、他の全球規模長期海洋環境再現データセットにない特徴の1つである。

以上のように、ESTOC は、気候変動に関わる海洋の役割を解明していくうえで有用な、世界的にも貴重なデータセットである。しかし、全ての海洋構造や変動を網羅的に再現出来ているわけではなく、渦より大きな時空間スケールを持った現象に関しても万能なデータセットとは言えない。そのため、現在 JAMSTEC では、より精緻なデータセットの作成のため、より高解像度の次期システムを開発するとともに、拡散スキームの更新など現行システムの改良も進めている。

4. 高度利用のための取り組み

これまでも紹介したように、データ同化プロダクトは、そのまま利用する他に、漂流予測や海中の粒子追跡のための海流場や、大気モデルの海面境界条件として利用するなど、様々な方法により有効活用が図られている。本節では、上記のような有効活用をさらに促進するための取り組みとして、マルチシステムアンサンブルとハビタットマッピングについて紹介する。

4.1 マルチシステムアンサンブルの利用

マルチモデルアンサンブル (Multi Model Ensemble: MME) とは、複数の異なるモデルによるシミュレーション (メンバー) の集合を指し、MME 法とはメンバーの情報を統合し個々のメンバーよりも精度の高い推定値を作り出す手法を指す。また、モデルとしてデータ同化システムを利用する場合、特にマルチシステムアンサンブル

と呼ばれる。MME法は、全てのメンバーを等しく扱うアンサンブル平均(単にMMEとも呼ぶ)と、回帰分析を利用したMulti Model Super Ensemble(MMSE)に大別される。MMSEでは観測値を背景にした線形重回帰をもとに、個々のメンバーに対する統計的な荷重を決定する。

アンサンブル平均については、例えば海洋再解析相互比較(ORA-IP)プロジェクトにおいて、複数の海洋データ同化システムのアンサンブル平均が個々のシステムに勝ることが示されている(例えば、Toyoda *et al.*, 2016a)。またMMSEについては、例えばKrishnamurti *et al.* (2000)が、ハリケーンの進路と強度の予測に対して個々のモデル結果よりもMMSEの結果が高性能であることを示している。そこで本節では、マルチシステムアンサンブルの例として、Han *et al.* (2016)による、日本海に通じる主要な3つの海峡(対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡)の通過流量をマルチシステムアンサンブルにより推定した結果を紹介する。

日本海は半閉鎖性海域であるため、主要な3つの海峡での流入量の和と流出量の和はほぼ一致するはずであるが、それぞれの海峡で観測された流量の収支はバランスしていない。一方、海洋データ同化システムでは、システムによって海峡毎の流量に違いがあるものの、3海峡の流量収支はそれぞれバランスしている。そこで、同化システムと観測データの双方の長所を生かすため、MME法により3海峡の通過流量を推定した。なお、ここではアンサンブル平均の他、MMSEとして重回帰分析とリッジ回帰分析をおこなった。

MMSEでは、観測データは従属変数の役割を果たす。対馬海峡の通過流量は博多-釜山間を往復するフェリーに搭載されたADCP観測(Fukudome *et al.*, 2010)から、津軽海峡の通過流量は西田ら(2003)の手法に基づき海峡間の水位差から、宗谷海峡の通過流量はADCP観測と海洋レーダーから(Fukamachi *et al.*, 2010)、それぞれ推定している。これら3つの海峡通過流量の収支は年平均で0.37 Svとなり、バランスしていない。一方、独立変数であるメンバーとして使用するものは、DREAMS(2.2節参照)、MOVE-WNP(2.1節参照)、JCOPE2(3.1節参照)およびU.S. Naval Research LaboratoryのHYCOM(Cummings *et al.*, 2013)の4つのシステムによる海洋データ同化プロダクトである。それぞれのシステムで海

峡通過流量の平均値と変動量は違うが、観測と同様の季節変化のパターンを示している(Fig. 8a)。

以上の観測データと同化システムの結果を利用して、3海峡を1つのシステムであると考えMME法を実行した。その結果、多くの統計的指標でMMSEの結果が高い精度を示した(Fig. 8)。また、MME法の結果では観測データで流量収支が釣り合わない問題が解決されている。ただしアンサンブル平均では、津軽海峡で観測値より大きく、宗谷海峡で観測値より小さく推定された。津軽海峡で推定流量が過大となるのは、すべてのシステムで通過流量が過大なためである。一方、MMSEによる推定流量は、対馬海峡で観測流量より小さく、津軽海峡で観測流量より大きい結果となった。

この推定結果の正当性を検証するため、流量と関連性の高い海峡間の圧力勾配をMME法で推定した。圧力勾配の計算には、AVISOの衛星海面高度計データを利用した。対馬、津軽、宗谷海峡の出入口の高度差についてMME法で推定したが、その傾向は流量と変わらなかった。結局、本研究の結果から対馬海峡(津軽海峡)で観測された通過流量は過大評価(過小評価)であると考えられる。このように、MME法により、個々のシステムを用いるよりも高精度な解析が可能となる場合がある。

4.2 海洋データ同化を利用したハビタットマッピング

ハビタットマッピングは環境データを用いて対象となる生物の好適生息域を推測する手法であり、水産分野では沖合~外洋漁業における漁場探索の手法として近年、注目され始めている。水産分野でのハビタットモデル研究では、これまで海面水温やクロロフィルa濃度等の衛星観測データを使ったものが多かったが、近年では、データ同化技術の向上に伴い高解像度の海洋再解析データが作成されるようになり(3節参照)、また再解析データを初期値とした海況予測データの入手も比較的容易になったことから、これらのデータを用いたハビタットモデルの構築が試みられるようになった。海洋再解析データには、欠測が無く、全ての漁獲データとの統合解析が可能である、海表面だけでなく亜表層のデータも利用できる、再解析を初期値とした予測実験の結果にハビタットモデルを適用した漁場予測が可能である、といった利点がある。そこで本小節では、文部科学省気候変動適応

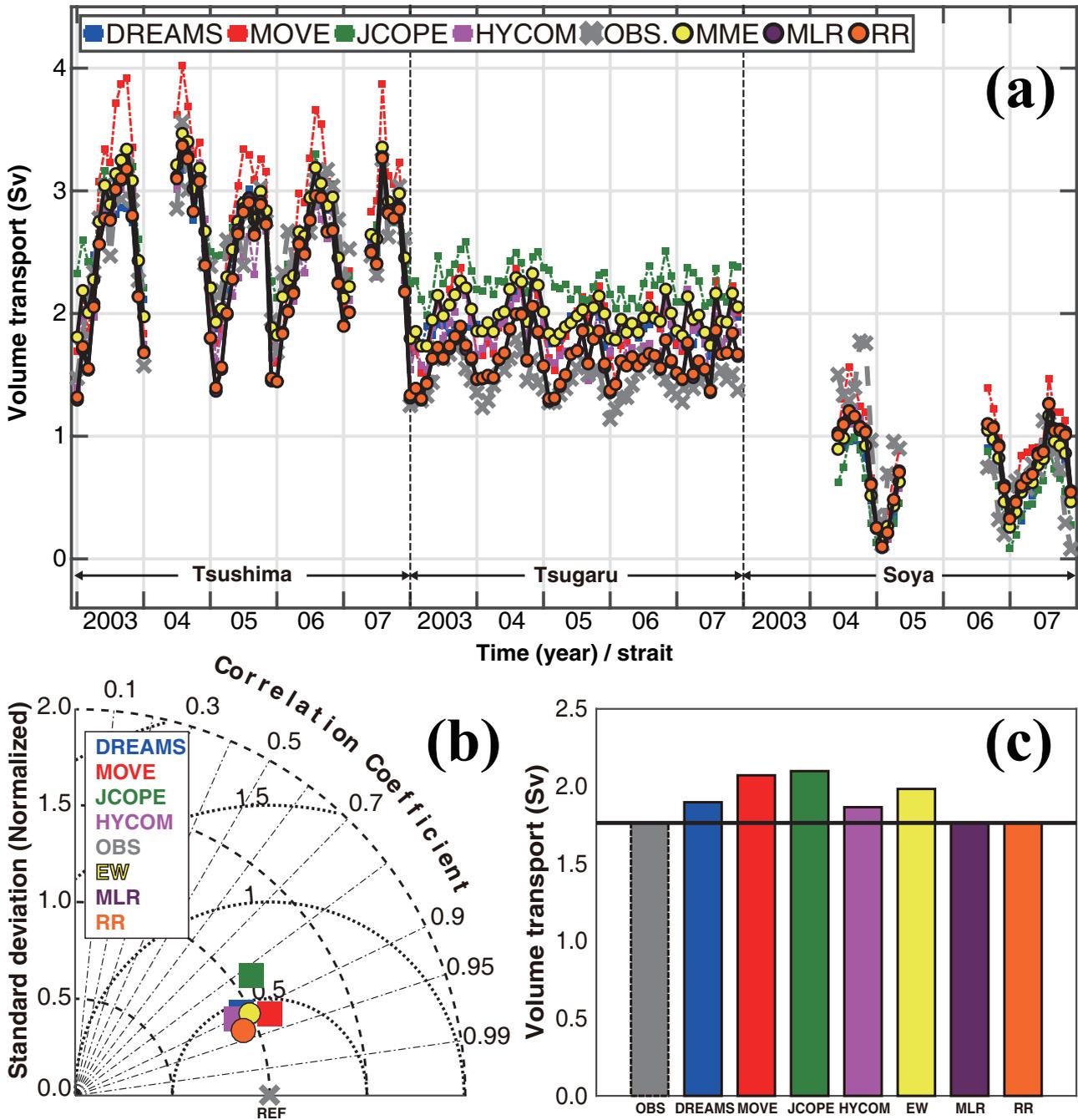


Fig. 8. (a) Monthly averaged volume transports through straits from January 2003 to December 2007. The observed data, reanalyses of models (DREAMS, MOVE, JCOPE, and HYCOM), and multi-system ensemble estimates (ensemble mean: EW, multiple linear regression: MLR, ridge regression :RR) are represented by the gray cross mark, colored square marks and circle marks, respectively. (b) Statistical analysis using a Taylor diagram for volume transport. The reference (REF) at the bottom indicates the observation. (c) Five-year mean model volume transports through Tsugaru Strait. Horizontal line: the observation.

研究推進プログラムの研究課題「気候変動に伴う水産資源・海況変動予測技術の革新と実利用化」で行われた、海洋再解析データを用いたアカイカ漁場予測の事例(五十嵐ら, 2011) について紹介する。

アカイカ (*Ommastrephes bartramii*) は北太平洋に広く分布する外洋性のイカである (Ichii *et al.*, 2004)。寿命は1年で、亜熱帯の産卵域と摂餌場となる亜寒帯域との間で季節的な南北回遊を行う。北太平洋における系群は産卵時期により秋生れ群と冬春生れ群に分かれ、日本漁船の操業は冬季に三陸沖 (36°N 以北, 147°E 以西) で行われる「冬イカ漁」と夏季に北太平洋中央部 (37-46°N, 175°E-160°W) で行われる「夏イカ漁」がある。

ハビタットモデルは、対象となる生物の資源量と様々な環境変数との散布図から統計的な関係式を作成し、そ

れらを統合することにより、対象生物の好適環境を推定する統計モデルの総称であり、その例としては、各環境変数の好適度を Suitability Index (SI) で表現してそれらを統合する Habitat Suitability Index (HSI) などが挙げられる (齊藤, 2014)。アカイカのハビタットモデル作成には、環境変数として MOVE-WNP (2.1 節) と FORA (3.3 節) のデータを使用した。アカイカは、夜間は索餌のため海面付近まで上昇するが日中は水深 120-600 m 付近に留まる (酒井ら, 2006) ことから、海洋表層だけでなく亜表層の環境がハビタットに影響を及ぼすため、3次元の海洋環境情報が得られる再解析データの利用は有効である。作成されたハビタットモデルから得られる漁場推定の結果から、三陸沖の「冬イカ漁場」では黒潮の北側に出現する暖水渦がアカイカの漁場形成に影響を及ぼし

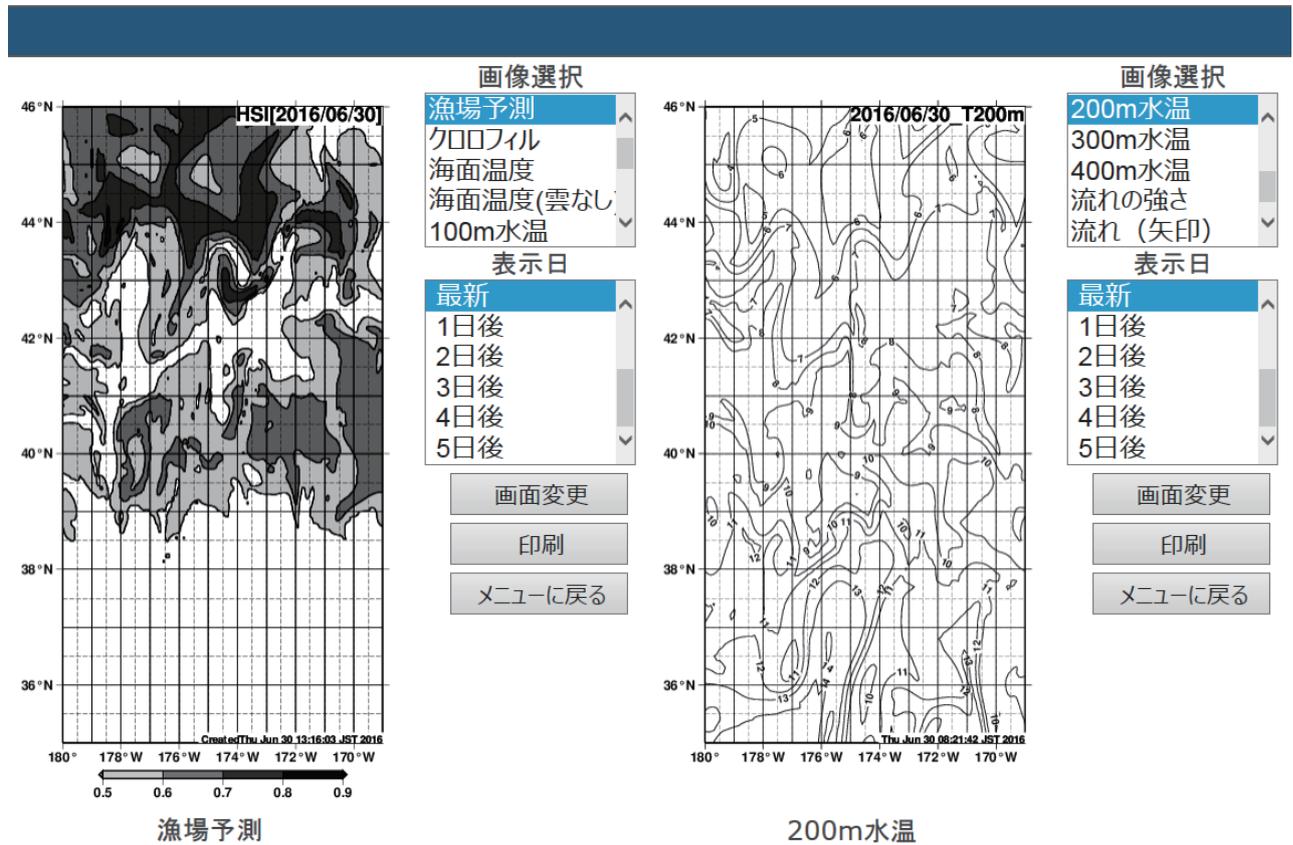


Fig. 9. Screenshot of the web page providing fishery and ocean state information on the website “Summer Fishing Ground of Neon Flying Squid” on 30 June 2016. The left panel depicts the HSI map for Neon Flying Squid. The right panel depicts the temperature field at 200 m depth.

ていることが明らかになった(五十嵐ら, 2011)。MOVE-WNP 及び FORA の水平解像度は 1/10 度であり中規模渦の位置や 3 次元構造が精度良く再現できているため、暖水渦の縁辺部にアカイカ漁場が形成されていることがハビタットモデルにより捉えることができた。

海洋再解析データと漁獲データとの統合解析により作成したアカイカのハビタットモデルを海況予測モデルの結果に適用することにより、アカイカ漁場の予測が可能となる。現在、本研究で作成した 2 つの漁場のハビタットモデルを海況予測に適用したアカイカ漁場予測マップを漁業者に対してウェブ配信している。このうち北太平洋中央部での「夏イカ漁場」については、JAMSTEC 地球情報基盤センターで開発した海況予測システム SKUIDS (Scalable Kit of Under-sea Information Delivery System) により 6 ~ 8 月の漁期についてオペレーショナルな海況予測を行い、ハビタットモデルを適用して漁場予測マップを作成している。漁業者は、操業中の漁船から衛星通信を介してインターネットにアクセスし、5 日先までの亜表層水温図と漁場予測マップを閲覧することができる。「夏イカ漁場」ウェブサイト (Fig. 9) では、プルダウンメニューの選択により、5 日前 ~ 5 日後までの HSI マップ及び亜表層水温図が 2 画面表示される。このような漁海況情報を日々の操業に役立てることにより漁業の効率化が図られ、その結果として漁船の燃油代節約につながっていることが漁業者から報告されている(淡路, 2014)。

現在、ハビタットモデルの構築には海面高度・水温・塩分・流速といった物理環境変数のみが利用されているが、今後、海洋再解析・海況予測データと整合性のある海洋低次生態系モデルプロダクトが作成されるようになれば、そこから得られる生物環境変数を入力としたハビタットモデルが構築でき、モデルの更なる精度向上や漁場形成メカニズムの新たな理解につながることを期待される。

5. 新たな同化技術の開発

本節では、今後の海洋データ同化システムの発展に向けて、データ同化技術をさらに高度化するための取り組みについて紹介する。

5.1 100 km 以下のスケールの現象の再現に向けた取り組み

JCOPE (3.1 節参照) では、最近、現状の衛星海面高度計の計測限界である 100 km (Fu and Ferrari, 2008) 以下の空間スケールの現象の把握と予測を行う研究に取り組んでいる。現在開発中の面的海面高度計(市川, 2014)の実現が上記の達成には有効であるが、その他にも、同化できる観測データの種類と数を増やす努力を行っている。例えば、宮澤ら(2015)は流速の地衡流成分の同化手法を開発し、漂流ブイや船舶に加えて、オオミズナギドリの海上休息時の偏流データの同化にも取り組んだ。その結果、こうしたデータが地衡流成分を十分に含んでいる場合には、推定精度の明らかな向上が見られ、空間スケール 100 km 以下の現象を捕捉できる可能性が示された(Miyazawa *et al.*, 2015)。また、静止気象衛星ひまわり 8 号の高頻度(10 分間隔)・高解像度(2 km 格子)海面水温データを同化し、より時空間スケールの小さな現象を捕捉・予測するための研究にも着手している(宮澤・美山, 2016)。さらに、こうした研究を進める中で、観測データを取得する現場の関係者に予測プロダクトを提供し、観測データ取得と予測精度向上のフィードバックループを動かすことで、観測網をさらに強化していく展望も見出されている(Miyazawa *et al.*, 2015)。

より時空間スケールの小さな現象を適切に同化していくためには、同化に必要な予測誤差共分散を、現象や観測データの時空間特性の変動に応じて力学的に変動させる「動的な同化手法」(淡路ら, 2009)の適用が必要となる。例えば、Usui *et al.* (2015) は、4DVAR の導入により黒潮の小規模波動や数日スケールの沿岸水位変動の再現性が向上することを示している。一方 JCOPE では、アンサンブルカルマンフィルタのひとつである Local Ensemble Transformation Kalman Filter (LETKF; Hunt *et al.*, 2007) を海流予測に適用する研究を進めている。最初に、冬季紀伊水道に出現する熱塩フロントとその沖合の黒潮変動の相互作用を検出する研究に取り組み、LETKF によって表現される時空間変動する予測誤差共分散が、互いに時空間スケールが異なる現象の相互作用の記述に有効であることを示した(Miyazawa *et al.*, 2012a)。次に、時空間的に高解像度(1 km)の衛星海面

水温データ MODIS の同化を LETKF に導入し、1/36 度格子の海洋モデルで空間スケール 25 ~ 50 km の黒潮前線波動の検出が可能であることを示した (Miyazawa *et al.*, 2013)。さらに最近では、LETKF を気象衛星ひまわり 8 号海面水温データの同化に適用するとともに、派生プロダクトとして得られるアンサンブル予測データの黒潮流路予測への活用にも取り組んでいる (Fig. 10; 宮澤・美山, 2016)。今後は、4次元変分法を適応した場合と同様に観測データに含まれる時間変動の情報を効果的に取り込むため、4D-LETKF-Running-In-Place 法 (Kalnay and Yang, 2010) の適用を進めていく予定である。

5.2 極域における海洋・海氷データの同化

極域の海洋・海氷現象に対するモデリング研究は、極域における物理プロセスや深層水形成、温暖化の増幅、中緯度気候への影響などの理解のため、近年、活発に行われている。その中で、現実的な再現を得るため、データ同化手法を用いたモデル系統誤差の低減についても研究されている。極域では中低緯度に比べて観測が圧倒的に少ないため、データ同化による力学を用いた補間の重要性は相対的に高くなる。その一方で、極域における

データ同化に特有の課題も存在する。例えば、海水は過冷却を除き、結氷点以下にはならないのが現実であるが、誤差情報のみから作成した推定値は非現実的な値をとり、そこから計算した同化修正量をモデルに与えると、モデルの場を大きく歪める可能性がある。さらに、結氷点は塩分の関数であるが、モデルでの極域における塩分の再現性については大きな課題が残されていて、このことが結氷点とさらには上記のプロセスを通じて、解析水温にも影響しうる。同様に、海水の密度や厚さは正の値のみを取るため、これら変数の同化にもそれに対応した取り扱いが必要である。これらは、降水量データの同化や海洋の水塊特性を考慮した同化 (Usui *et al.*, 2011) などとも共通する部分があり、今後更なる手法の開発が必要である。

また、海洋・海水モデルへの境界条件を与える大気再解析データに大きな誤差が報告されている。例えば、気象庁の大気再解析 (ここでは JRA-25 を 2005 年以降に延長したもの) には氷縁域において船舶観測と比べて約 6°C の低温バイアスがあることが報告されており、大気再解析における海水分布の取り扱いの問題が指摘されている (Inoue *et al.*, 2012)。加えて、低層雲の再現やメル

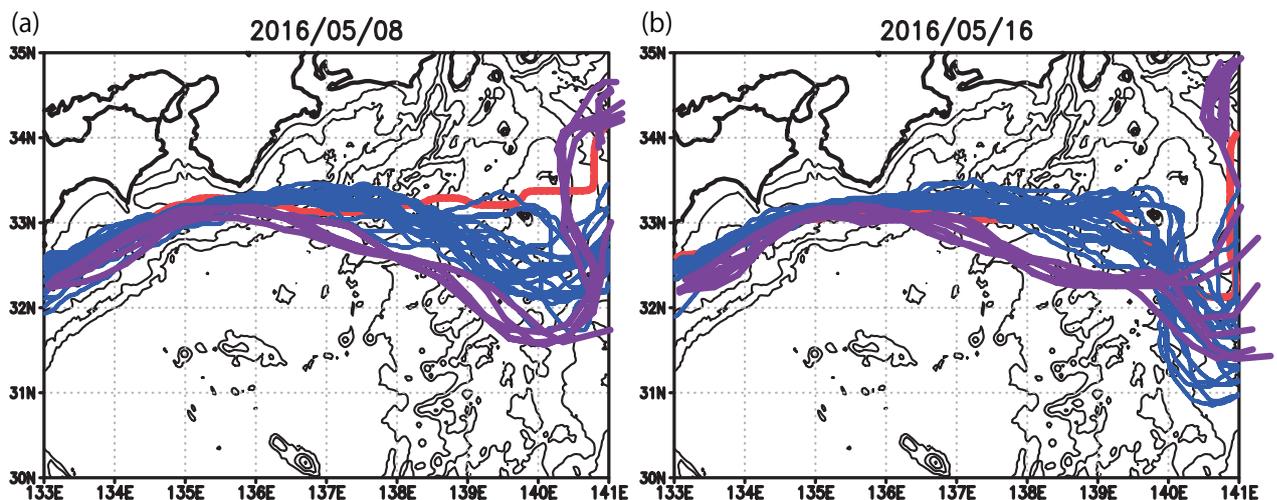


Fig. 10. Examples of 1-month lead Kuroshio path forecast south of Japan. Blue (red) curves: the Kuroshio path predicted by LETKF (JCOPE2). Purple curves: the weekly mean Kuroshio path reported by the Japan Coast Guard (all data including the target day in their averaging periods are plotted). Thick (thin) contours: shore-lines (iso-depth lines: 200, 1000, 2000, 3000, 4000, and 5000 m). (a) Forecast on 8 May 2016 starting from 8 April 2016. (b) Forecast on 16 May 2016 starting from 16 April 2016.

トポンドの効果などアルベド(反射率)の推定に関係した困難もあり、現状では大気再解析間の食い違いが大きく(Lindsay *et al.*, 2014 など)、氷縁部・中央部ともに観測される地上気温分布の十分な再現には至っていない(Jakobson *et al.*, 2012 など)。

近年、海洋・海水モデルにおける海水分布の再現には、海面強制、特に上記の地上気温の影響が非常に大きいことが明らかになりつつある(例えば、Hunke, 2014)。同化する観測データのうち最も広く使われているのは、衛星観測により北極海の長期間データが得られている海水密度であるが(例えば、Lindsay and Zhang, 2006)、モデルの海水密度をデータに強く復元しても、氷上端温度の格子点値(格子領域内の氷上端温度と開水部水温の面積平均)はほとんど変わらず、この温度の決定について大気強制が支配的であることが示唆される(Toyoda *et al.*, 2016b)。また、オホーツク海での実験でも、海水密度の時間変化に対する寄与(タームバランス)を調べると、海水密度の復元による同化修正項と熱力学項が釣り合っており、同化による修正のないモデル力学の自然な熱力学・力学的つり合いにおいては観測される海水分布の再現が困難であることが示されている(碓氷ら, 2010)。つまり、これまで行われてきた海水密度データの同化実験では、海水密度の修正と大気強制の不整合のために海水場の熱力学構造が歪められており、予報の際には大きなショックが起こることが予想される。

このような問題意識から、Toyoda *et al.* (2016b) は海水密度データを同化する際に、この修正と整合するように大気強制の一部である地上気温・比湿を修正する手法を開発した。この手法で熱力学的により整合した海水場が実現することにより、大気場の修正を行わない実験に比べて観測に近い解析場が得られた。同時に、上記の大気場の修正は報告されている大気再解析データの誤差を低減するような修正であることが確認され、海水の鉛直構造(厚さ・温度分布)を変えずに面積を修正し、氷上端温度格子点値の変化分を大気場にも反映させるという比較的簡便な手法ではあるものの、解析場全体の改善に繋がっていることがわかった。

なお、海水の初期値化については、海水密度以外にも海水速度データの同化が行われている(例えば、Zhang

et al., 2003)。また、今後の気候研究において、氷厚データの同化(例えば、Lindsay *et al.*, 2012) が特に重要なテーマになると考えられるが、その際にも、上記のような海水の熱力学のタームバランスを考慮した同化が有効である。また、海水の初期値化に加えて、海洋表層の成層・貯熱量の初期値化が予測研究の重要な要素であり(例えば、Toyoda *et al.*, 2011)、海水下での更なる海洋観測(例えば、Toole *et al.*, 2011) や同化手法の高度化(例えば、Kauker *et al.*, 2009) も必要である。

5.3 海洋生態系生物変数のデータ同化に向けて

データ同化は物理分野のみならず、低次海洋生態系モデル(以後、生態系モデル)を始めとした海洋物質循環の分野にも、近年、広がりを見せている。データ同化手法には大きく分けて、(1) なんらかの強制力を与えてモデル値を任意の値に近づけるものと、(2) 参照値に近い結果を出したパラメータ群を選出するものとがある。本小節では(2)のデータ同化手法を用いた生態系モデル研究について焦点を当てる。

生態系モデル変数の数は研究目的に応じて大きく異なる。栄養塩(N)、植物プランクトン(P)、動物プランクトン(Z)、デトリタスなどの有機物(D)がそれぞれ1種類のいわゆるNPZDモデルから、数種類のものまで様々である。日本では生態系モデルNEMURO(the North Pacific Ecosystem Model Used for Regional Oceanography; Kishi *et al.*, 2007)がよく知られている。変数の数が増加するのに伴い、それらを制御するパラメータの数もまた増加する。NEMUROのコンセプトをもとにして、粒状有機物プロセスなどを強化し、鉄サイクルを加えたNSI-MEM(the Nitrogen, Silicon and Iron Regulated Marine Ecosystem Model; Shigemitsu *et al.*, 2012)では、モデル変数の数は14であり、パラメータの数は100を超える。これらの生理パラメータには、現実での詳細が知られていないものが数多く存在し、過去に室内実験で値が調べられていたとしても、現場状況によって異なるとの議論もあり、その値の推定の幅は大きい。モデルチューニングには人力で経験的・職人的な方法に頼ることが多々ある。一方で、遺伝的アルゴリズム(例えば、Schartau and Oschlies, 2003)、BHM(Bayesian Hierarchical Model; 例えば、Fiechter *et al.*, 2013)やグリーン

関数 (Toyoda *et al.*, 2013) などを用いて最適な生態系パラメータを見積もるデータ同化手法も研究されてきた。その一例として、ここでは、遺伝的アルゴリズムを用いた最新の研究 (Hoshiba *et al.*, 2017) の一部を紹介する。

遺伝的アルゴリズムは生物の進化を模倣した、交叉、変異や選択を通して、参照値に近い結果を出すモデルパラメータを選ぶ最適化アルゴリズムである。Hoshiba *et al.*, (2017) は NSI-MEM の植物プランクトン 2 種 (PL, PS) に対してデータ同化を行っている。PL はケイ藻類を主とした大型の植物プランクトンを、PS はそれ以外の小型のものを想定している。この 2 変数を制御するパラメータを見積もるには、PL, PS の観測された濃度が参照値として必要になるが、それぞれの時間・空間的に連続した細かな濃度分布を得るのは難しかった。しかしながら近年、衛星データからクロロフィル a と色素を用いて植物プランクトン種を分類する研究が進展し (Hirata *et al.*, 2011), 異なる植物プランクトングループ (すなわち、PL と PS) の 2 変数についてのデータ同化が可能となった。そこで本稿では、モデル内の表層 PL, PS 濃度を 1998 年の衛星観測値を使って同化を行い、PL, PS に直接関係する 23 個の生態系パラメータについて最適な値を見積もった結果について示す。使用したモデルは 3 次元の NSI-MEM で、物理場としては MOVE-WNP (2.1 節参照) のデータを用いた。計算領域、水平格子サイズも MOVE-WNP に合わせた。なお、これら全ての格子でパラメータ推定するのが理想であるが、鉛直的観測の少なさやコンピュータ資源の都合上難しいので、今回はその第一歩として、1 次元 NSI-MEM (Shigemitsu *et al.*, 2012) で測点 A4 (42.25°N, 145.125°E) におけるパラメータ推定を行い、そのパラメータを 3 次元で使用した。

パラメータ推定を行った場合と、行わない場合の植物プランクトン濃度分布の一例を示す (Fig. 11)。パラメータ推定により、春季ブルームが起こっている 5 月の亜寒帯域で濃度が PL, PS ともに大きくなる。PL 濃度の亜寒帯域と亜熱帯域の大小コントラストもはっきりし、衛星観測分布に近づいている。衛星観測値との相関を月ごとの 1 年平均で調べても、パラメータを見積もったほうが PL, PS どちらも相対的に大きい。亜熱帯や亜寒帯の他観測点でパラメータ推定を行った場合でも、プランクトンブルームのタイミングなどが衛星観測のそれに近づく

など、対象海域での改善がみられる。

もし全ての格子点でパラメータ推定ができるのであれば、モデルはさらに参照分布に近づくことと期待される。今後、観測網の整備が進み、コンピュータ資源が豊富になることにより、生態系モデルを始めとした海洋物質循環分野でも、データ同化の重要性がより一層高まっていくと予想される。

5.4 アジョイント感度解析を用いた最適観測網の構築にむけて

アジョイント手法を用いた海洋データ統合システム (すなわち 4DVAR) が 2000 年代に入り本格的に実用化されるようになってきたことを受け、それを気候変動研究に利用する研究も増えてきた。例えば、Masuda *et al.* (2010) は地球の熱バランスの変化を考える上で無視できないと考えられている北太平洋底層での水温上昇の要因を調べるために、深層のトレーサー感度まで評価できる四次元変分法データ同化システムを用いた感度解析シミュレーション実験を実施し、この水温上昇の動態と原因について重要な指摘をしている。

また、観測網の整備にアジョイント感度を利用する研究も継続的に行われており (例えば、Köel and Stammer, 2004; Masuda *et al.*, 2015b) 実応用に向かって着実に進んでいる。アジョイント感度解析はモデル内のある物理変数を 4 次元 (空間 3 次元, 時間 1 次元) 的に任意に変化させたとき、ある時間、地点で同じ、あるいはほかの物理変数が力学に基づいてどのように変化するか (感度) を時間逆方向に計算する解析手法である。本小節では、深海の環境変動に関して、そのモニタリングシステムの構築にアジョイント感度解析の利用可能性を調べた研究を紹介する。

近年、気候変動による政府間パネル第 5 次報告書でも触れられているように、2000 m より深い海洋中深層の海洋環境変動が注目されている。Fukasawa *et al.* (2004) が高精度の反復海洋観測によって初めて深層昇温の存在を明らかにして以来、様々なアプローチの観測、解析が実施されており、特に中・深層の貯熱量変化と地球環境変動との関連などについて、包括的な理解を深めることの必要性が指摘されている (例えば、Kouketsu *et al.*, 2011)。このため、中・深海の海洋環境を正確に把握す

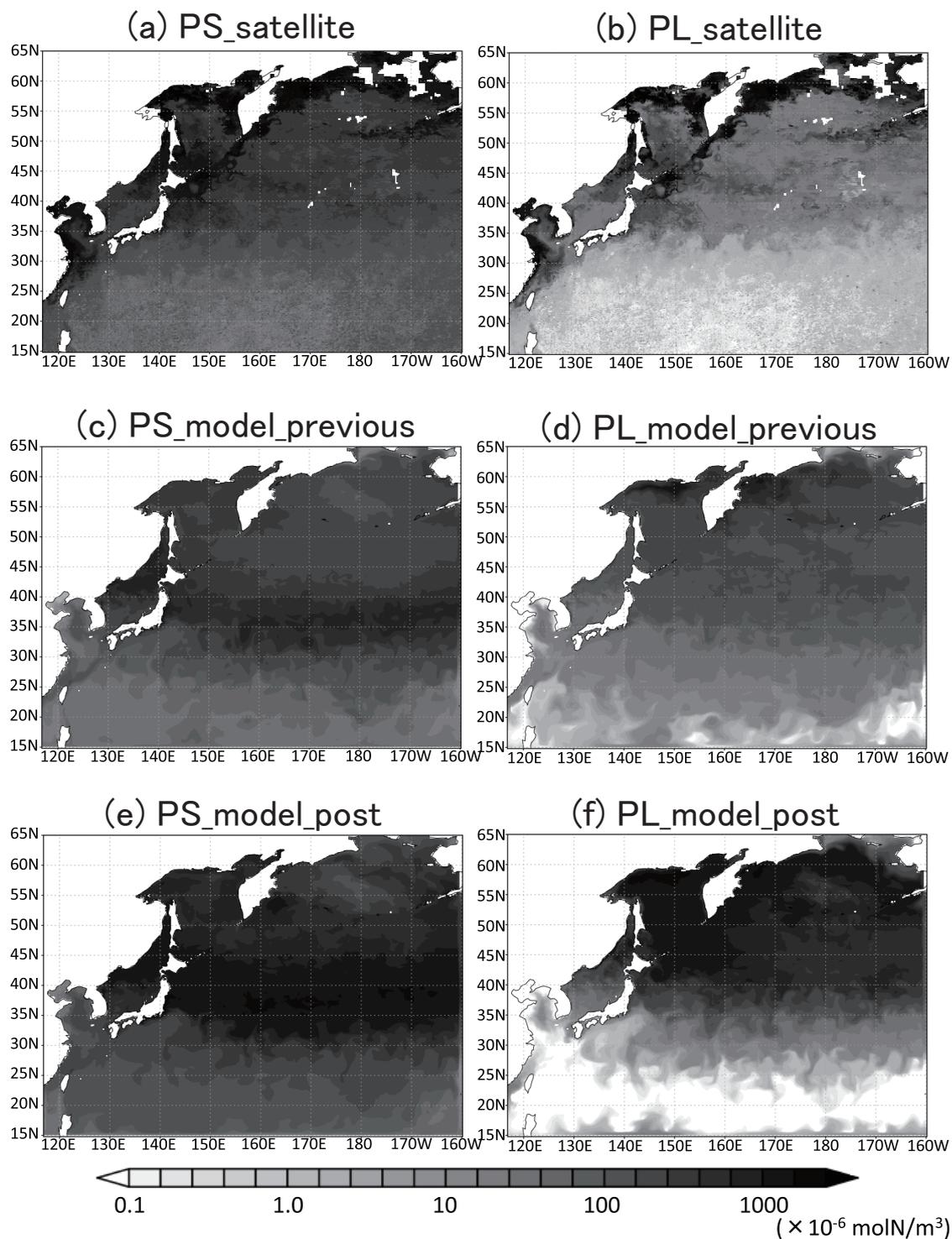


Fig. 11. Distributions of phytoplankton at the surface in May 1998. (a), (b) Distributions of PS (small phytoplankton) and PL (large phytoplankton) from satellites observations. (c), (d) Distributions of PS and PL simulated by NSI-MEM before the parameter estimation in Section 5.4. (e), (f) Same as (c), (d) but after the parameter estimation. Areas without data are left blank.

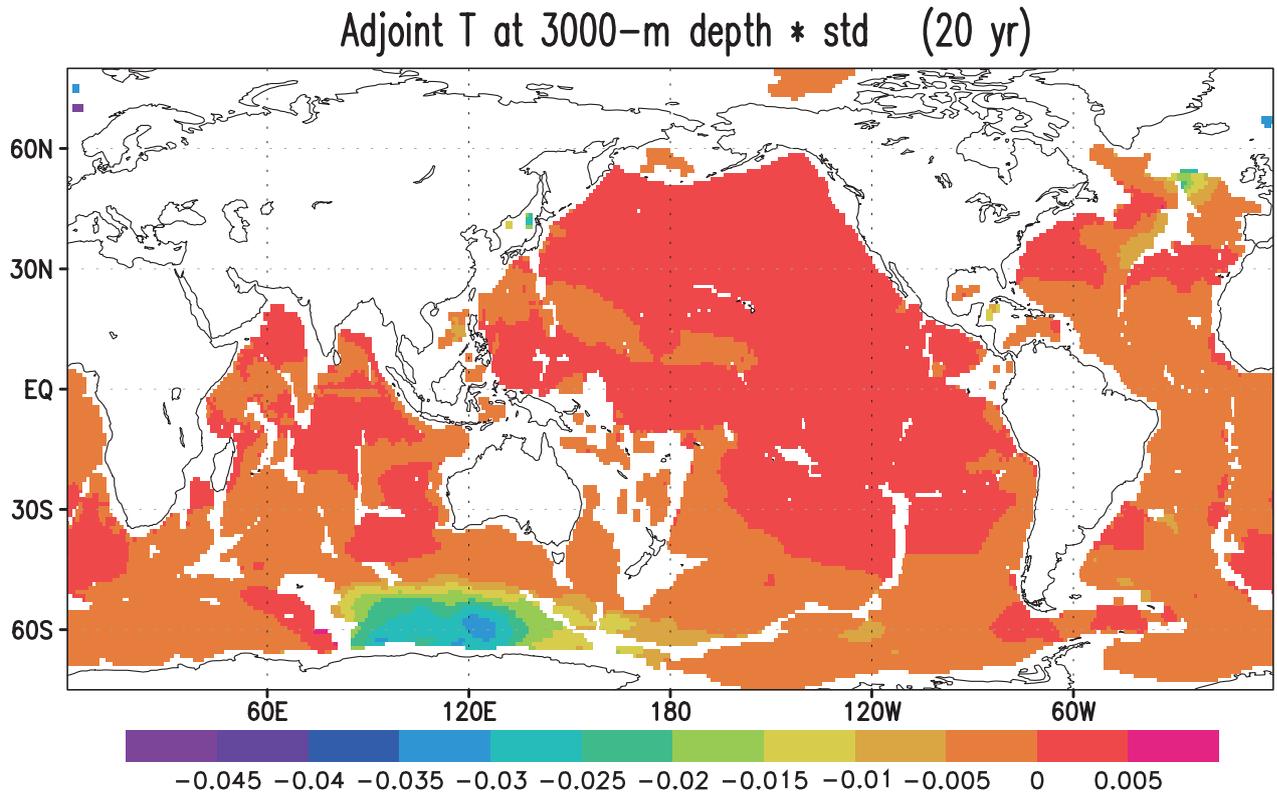


Fig. 12. Adjoint variable for a decadal heat content increase from 2000 to 2010 below 2000 m depth. The distribution is for 1990 at the depth of 3000 m. Cited from Masuda *et al.* (2015b).

ることが求められており、定常的なモニタリングのために、自動昇降型漂流ブイを利用する国際的な計画も現在検討されている。

上記のような背景のもと、Masuda *et al.* (2015b) は大深度フロートを効率的に展開するための観測網構築に向け、アジョイント感度解析実験を実施した。2000 m 以深の貯熱量の10年規模の変化に対して、どの海域の海洋変動がどの程度の影響力を持ちうるかを定量的に示すのが目的である。用いられたのは3.4節で記述したESTOCで利用したのと同様の1度の水平解像度を持つ46層のレベルモデルで準全球・全層海洋を再現したものである。

Fig. 12 に感度解析結果の一部を示す。2000年から2010年の10年間で2000 m 以深の貯熱量が増加したというシグナルに対して、20年間のアジョイント逆追跡を行った結果である。10年スケールの貯熱量変化には南大洋と北大西洋の限定された海域に大きな感度がみられ、それらの海域での長期モニタリングの重要性を示唆して

いる。この結果は、深海型アルゴフロートの効率的展開を考える上で重要な示唆を与える。これらの研究成果はまだほとんど実海域で検証されていないが、今後、パイロット観測などを通して検証を重ねることで最適観測網の構築に資する可能性がある。

6. 今後のさらなる発展のために

これまで述べてきたように、日本の海洋データ同化研究はこの20年あまりで着実に進展し、今では海洋データ同化プロダクトが、研究のみならず、漁業や海運、気象・気候予測、防災、沿岸保全のための実用情報としても利用されるまでになった。しかしながら、小規模スケールの現象や生態系、海水などに関わる現象について、今後、再現性を高めていく必要があり、プロダクトの利用に関してもさらなる有効活用の余地を残している。すなわち、海洋データ同化研究は今後も発展を続けなければならない

い。そこで本節では、本稿のまとめとして、日本の海洋データ同化研究が今後も発展を継続するために何が必要かについて論ずる。

まず、第1に必要なことは、データ同化プロダクトの利用を普及させ、その有用性の認知を広めることである。そのためには、データを単に公開するだけでなく、ユーザが利用しやすいように加工することが大切である。例えば、月平均値やその気候値、偏差を提供するだけでも効果的かもしれない。また、4.2節で紹介したHSIは漁獲と直接関係し漁業関係者にとって利用しやすい情報であるが、このようなデータの提供も有効な手段の1つである。プロダクトの仕様や精度の情報もできるだけ公開するのがよい。データの取得や可視化のためのホームページなどインフラの充実も望まれる。プロダクトの有用性や利用法などについて学会などの場で積極的に発表していくことも必要である。プロダクトの充実、データ同化研究の進展のためには、ユーザからのフィードバックを受けることも有効である。ユーザのニーズやユーザの視点からみたプロダクトの欠点に関する情報を受け、システムの改良につなげ、より良いプロダクトをユーザに提供するといった、正のフィードバックを構築することが、今後の普及促進のための近道である。

第2に、新しい観測データを同化する手法の開発や新しいモデルへのデータ同化の適用を積極的に進めていくことが必要である。たとえば、10 km程度の小規模スケール現象を再現するには、現在、一般に同化されている観測データだけでは足りず、海洋レーダーなど沿岸観測網の充実のほか、5.1節で紹介したような新たな種類のデータを取り込んでいく必要もある。今後、面的海面高度計衛星の打ち上げも予定されており、技術の進展によりさらに画期的な観測データが供給される可能性もある。2.1節や2.3節で述べたように、これまでも技術革新に伴う観測システムの飛躍的な変化がデータ同化技術の進展をもたらしてきた。それゆえ、今後もデータ同化研究が進展を続けるためには、新たな観測データを同化するための技術を開発する努力を怠ってはいけない。また、さらに幅広い分野で活用可能なプロダクトの作成のためには、5.2節、5.3節でも述べられたように、海水や生態系など、新たな領域の数値モデルへの適応も積極的に進めていかなければならない。

第3に今後の研究・開発を担う次世代のデータ同化研究者の育成が必要である。しかしながら、海洋データ同化を学ぶには、海洋学や数学の他、数値モデルや観測データの知識も必要となり、一般にその習熟には時間がかかる。さらに昨今の数値モデルの複雑化や海洋分野の学生数の減少とも相まって、若手研究者が育ちにくい状況にある。この状況の打開は容易ではないが、そのヒントはこれまでの歴史に隠されているかもしれない。例えば、2000年代の初めに多くの若手研究者が育ったのは、2.4節で紹介した結合同化システムの開発という大型プロジェクトによるところが大きい。さらに遡ると、諸先輩方が20年前にWMO国際データ同化シンポジウムで受けた衝撃から、その後の研究ビジョンを描き、データ同化夏の学校を通じて若手研究者と共有したことが、上記の大型プロジェクトにつながり、これまでの日本のデータ同化研究を支えてきたといえるのではないであろうか。そう考えると、日本のデータ同化研究がこれから何を成し遂げるかについて、若手研究者と共有できるようなビジョンを描くことこそが、今後の発展のために求められることかもしれない。

これまで、日本のデータ同化研究は、いくつかのショックをばねに変え、飛躍的な発展を遂げてきた。今後も、これまでと同様に常に現状に危機感を持ち、今後の発展への原動力としていくことが望まれる。

謝辞

黎明期に日本のデータ同化研究の指針についてご教示頂き、その後も継続してご支援頂いたフロリダ州立大学のO'Brien教授は、本稿執筆中の2016年9月20日に他界された。心よりご冥福をお祈りする。また、これまでデータ同化夏の学校の運営を20年以上の長きにわたりご支援いただいた日本海洋科学振興財団には心より感謝を申し上げる。その他、これまで日本のデータ同化コミュニティを支えて頂いた多くの方々にも感謝したい。

なお、本論文の全体構想は藤井と石川が担当し、各小節の草稿は、1節を藤井と石川、2.1節を蒲地と碓氷、2.2節を広瀬(直毅)、2.3節を藤井、2.4節を望月、3.1節を美山、3.2節を瀬藤と黒田、3.3節を広瀬(成章)、3.4節を長船、4.1節を韓、4.2節を五十嵐、5.1節を宮澤、5.2節を豊

田, 5.3 節を干場, 5.4 節を増田, 6 節を藤井, 高山, 長船, 五十嵐, 宮澤が作成した。最終原稿は藤井が作成し, 全ての著者の承認を受けた。

References

- 淡路俊之 (2014): 平成 25 年度報告書「文部科学省気候変動適応研究推進プログラム, 気候変動に伴う水産資源・海況変動予測技術の革新と実利用化」, JAMSTEC 地球情報基盤センター, 横浜, 102pp.
- 淡路敏之, 蒲地政文, 池田元美, 石川洋一 (2009): データ同化, 観測・実験とモデルを融合するイノベーション. 京都大学学術出版会, 京都, 284pp.
- Ando, K., Y. Kuroda, Y. Fujii, T. Fukuda, T. Hasegawa, T. Horii, Y. Ishihara, Y. Kashino, Y. Masumoto, K. Mizuno, M. Nagura, and I. Ueki (2017): Fifteen years of the TRITON Array in the western Pacific and eastern Indian Oceans. *J. Oceanogr.*, accepted.
- Balmaseda, M. A., O. J. Alves, A. Arribas, T. Awaji, D. Behringer, N. Ferry, Y. Fujii, T. Lee, M. Rienecker, T. Rosati, and D. Stammer (2009): Ocean initialization for seasonal forecasts. *Oceanogr.*, **22**, 154–159.
- Chang, Y. L., J. Sheng, K. Ohashi, M. Beguer-Pon, and Y. Miyazawa (2015): Impacts of Interannual Ocean Circulation Variability on Japanese Eel Larval Migration in the Western North Pacific Ocean. *PLoS One*, **10**, e0144423. doi:10.1371/journal.pone.0144423.
- Cummings, J. A., and O. M. Smedstad (2013): Variational Data Assimilation for the Global Ocean, p. 303–343. In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*, edited by S. K. Park and L. Xu, Springer, Berlin and Heidelberg.
- Davidson, F. J. M., A. Allen, G. B. Brassington, O. Breivik, P. Daniel, M. Kamachi, S. Sato, B. King, F. Lefevre, M. Sutton, and H. Kaneko (2009): Application of GODAE Ocean Current Forecasts to Search and Rescue and Ship Routing. *Oceanography*, **22**, 176–181.
- Derber, J., and A. Rosati (1989): A global oceanic data assimilation system. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 1333–1347.
- Dombrowsky, E., L. Bertino, G. B. Brassington, E. P. Chassignet, F. Davidson, H. E. Hurlburt, M. Kamachi, T. Lee, M. J. Martin, S. Mei, and M. Tonani (2009): GODAE System in Operation. *Oceanography*, **22**, 80–95.
- Doi, T., S. Osafune, N. Sugiura, S. Kouketsu, A. Murata, S. Masuda, and T. Toyoda (2015): Multidecadal change in the dissolved inorganic carbon in a long-term ocean state estimation. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **7**, 1885–1900.
- Fiechter, J., R. Herbei, W. Leeds, J. Brown, R. Milliff, C. Wikle, A. Moore, and T. Powell (2013): A Bayesian parameter estimation method applied to a marine ecosystem model for the coastal Gulf of Alaska. *Ecol. Modell.*, **258**, 122–133.
- Fu, L. -L., and R. Ferrari (2008): Observing oceanic submesoscale processes from space. *Eos*, Transactions American Geophysical Union, **89**, 488.
- Fujii, Y., J. Cummings, Y. Xue, A. Schiller, T. Lee, M. A. Balmaseda, E. Remy, S. Masuda, G. Brassington, O. Alves, B. Cornuelle, M. Martin, P. Oke, G. Smith, and X. Yang (2015): Evaluation of the Tropical Pacific Observing System from the ocean data assimilation perspective. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **141**, 2481–2496.
- Fujii Y., S. Ishizaki, and M. Kamachi (2005): Application of nonlinear constraints in a three-dimensional variational ocean analysis. *J. Oceanogr.*, **61**, 655–662.
- Fujii Y., and M. Kamachi (2003): Three-dimensional analysis of temperature and salinity in the equatorial Pacific using a variational method with vertical coupled temperature-salinity EOF modes. *J. Geophys. Res.*, **108**, 3297. doi:10.1029/2002JC001745.
- Fujii Y., M. Kamachi, T. Nakaegawa, T. Yasuda, G. Yamanaka, T. Toyoda, K. Ando, and S. Matsumoto (2011): Assimilating Ocean Observation data for ENSO monitoring and forecasting, p. 75–98. In *Climate Variability - Some Aspects, Challenges and Prospects*, edited by A. Hanachi, InTechOpen, Rijeka, Croatia.
- Fujii, Y., H. Tsujino, N. Usui, H. Nakano, and M. Kamachi (2008): Application of singular vector analysis to the Kuroshio large meander. *J. Geophys. Res.*, **113**, C07026. doi:10.1029/2007JC004476.
- Fukamachi Y., K. I. Ohshima, N. Ebuchi, T. Bando, K. Ono, and M. Sano (2010): Volume transport in the Soya Strait during 2006–2008. *J. oceanogr.*, **66**, 685–696.
- Fukasawa, M., H. Freeland, R. Perkin, T. Watanabe, H. Uchida, and A. Nishina (2004): Bottom water warming in the North Pacific ocean. *Nature*, **427**, 825–827.
- Fukudome, K., J.-H. Yoon, A. Ostrovskii, T. Takikawa, and I. Han (2010): Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 years of ADCP observations. *J. oceanogr.*, **66**, 539–551.
- Han, S., N. Hirose, N. Usui, and Y. Miyazawa (2016): Multi-model ensemble estimation of volume transport through the straits of the East/Japan Sea. *Ocean Dyn.*, **66**, 59–76.
- 日高清隆 (2016): 黒潮内側域のプランクトン輸送環境とその経年変動, 黒潮の資源海洋研究, **17**, 7.
- Hirata, T., N. J. Hardman-Mountford, R. J. W. Brewin, J. Aiken, R. Barlow, K. Suzuki, T. Isada, E. Howell, T. Hashioka, M. Noguchi-Aita, and Y. Yamanaka (2011): Synoptic relationships between surface Chlorophyll-a and diagnostic pigments specific to phytoplankton functional types. *Biogeosciences*, **8**, 311–327.
- Hirose, N. (2005): Least-squares estimation of bottom topography using horizontal velocity measurements in the Tsushima/Korea Straits. *J. Oceanogr.*, **61**, 789–794.
- Hirose, N. (2011): Inverse estimation of empirical parameters used in a regional ocean circulation model. *J. Oceanogr.*, **67**, 323–336.
- Hirose, N., I. Fukumori, C.-H. Kim, and J.-H. Yoon (2005): Numerical simulation and satellite altimeter data assimilation of the Japan Sea circulation. *Deep Sea Res. II*, **52**, 1443–1463.
- Hirose, N., H. Kawamura, H. J. Lee, and J.-H. Yoon (2007): Sequential forecasting of the surface and subsurface conditions in the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, **63**, 467–481.
- Hirose, N., Y. Kumaki, A. Kaneda, K. Ayukawa, N. Okei, S. Ikeda, Y. Igeta, and T. Watanabe (2016): Numerical simulation of the abrupt occurrence of strong current in the southeastern Japan Sea. *Cont. Shelf Res.*, in press.
- Hirose, N., K. Takayama, J.-H. Moon, T. Watanabe, and Y. Nishida (2013): Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas. *海と空*, **89**, 43–51.
- Hoshiba, Y., T. Hirata, M. Shigemitsu, H. Nakano, T. Hashioka, Y. Masuda, and Y. Yamanaka. 2017: Data assimilation with parameter estimation

- for two Phytoplankton Functional Types (PFTs) using a lower trophic level marine ecosystem model (3-D NSI-MEM) in the western North Pacific. *Ocean Sci.*, to be submitted.
- Huang, B. Y. Xue, and D. Behringer (2008): Impacts of Argo salinity in NCEP global ocean data assimilation system: the tropical Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, **113**, C08002, doi:10.1029/2007JC004388.
- Hunke, E. C. (2014): Weighing the importance of surface forcing on sea ice: a September 2007 modelling study. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **142**, 539–542, doi:10.1002/qj.2353.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, (2007): Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physica*, **230**, 112–126.
- Ichii, T., K. Mahapatra, M. Sakai, D. Inagake, and Y. Okada (2004): Differing body size between the autumn and the winter-spring cohorts of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) related to the oceanographic regime in the North Pacific: a hypothesis. *Fish. Oceanogr.*, **13**, 295–309.
- 市川香 (2014): 21世紀初頭の衛星海面高度計, 海の研究, **23**, 13–27.
- 五十嵐弘道, 淡路敏之, 蒲地政文, 石川洋一, 杉浦望実, 増田周平, 土居知将, 碓氷典久, 藤井陽介, 豊田隆寛, 日吉善久, 佐々木祐二, 齊藤誠一, 酒井光夫, 加藤慶樹, 佐藤晋一 (2011): 気候変動に伴う水産資源・海況変動予測技術の革新と実用化. 土木学会論文集G(環境), **67**, 9–15.
- Inoue, J., M. E. Hori, T. Enomoto, and T. Kikuchi (2011): Intercomparison of surface heat transfer near the Arctic marginal ice zone for multiple reanalyses: a case study of September 2009. *SOLA*, **7**, 57–60.
- 石井正好 (1997): 海洋データ同化システム, 平成9年度季節予報研修テキスト「エルニーニョ現象の予測に向けて」, 気象庁気候・海洋気象部, 東京, 30–36.
- 石田信浩, 五十嵐弘道, 杉浦望実, 中村知裕, 増田周平, 美山透, 望月崇, 淡路敏之 (2005): アジョイントモデルを用いた結合感度解析. 日本気象学会2005年度春季大会予稿集, A266.
- Isobe, A., X. Guo, and H. Takeoka (2010): Hindcast and predictability of sporadic Kuroshio-water intrusion (kyucho in the Bungo Channel) into the shelf and coastal waters. *J. Geophys. Res.*, **115**, C04023, doi:10.1029/2009JC005818.
- Jakobson, E., T. Vihma, T. Palo, L. Jakobson, H. Keernik, and J. Jaagus (2012): Validation of atmospheric reanalyses over the central Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L10802, doi:10.1029/2012GL051591.
- Ji, M., A. Leetmaa, and J. Derber, J. (1995): An ocean analysis system for seasonal to interannual climate studies. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 460–481.
- Kalnay, E., and S.-C. Yang (2010): Accelerating the spin-up of Ensemble Kalman Filtering. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 1644–1651.
- Kamachi, M. (1989): Advective surface velocities derived from sequential images for rotational flow field: Limitations and applications of maximum cross-correlation method with rotational registration. *J. Geophys. Res.*, **94**, 18227–18233.
- Kamachi, M., T. Kuragano, H. Ichikawa, H. Nakamura, A. Nishina, A. Isobe, D. Ambe, M. Arai, N. Gohda, S. Sugimoto, K. Yoshita, T. Sakurai, and F. Uboldi (2004a): Operational data assimilation system for the Kuroshio south of Japan: Reanalysis and validation. *J. Oceanogr.*, **60**, 303–312.
- Kamachi, M., T. Kuragano, S. Sugimoto, K. Yoshita, T. Sakurai, T. Nakano, N. Usui, and F. Uboldi (2004b): Short-range prediction experiments with operational data assimilation system for the Kuroshio south of Japan. *J. Oceanogr.*, **60**, 269–282.
- Kamachi, M., and J. J. O'Brien (1995): Continuous data assimilation of trajectories of drifting buoys into an equatorial Pacific Ocean model. *J. Mar. Syst.*, **6**, 159–178.
- Kauker, F., T. Kaminski, M. Karcher, R. Giering, R. Gerdes, and M. Voßbeck (2009): Adjoint analysis of the 2007 all time Arctic sea-ice minimum. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L03707, doi:10.1029/2008GL036323.
- Kawai, Y., T. Miyama, S. Iizuka, A. Manda, M. K. Yoshioka, S. Katagiri, Y. Tachibana, and H. Nakamura (2015): Marine atmospheric boundary layer and low-level cloud responses to the Kuroshio Extension front in the early summer of 2012: three-vessel simultaneous observations and numerical simulations. *J. Oceanogr.*, **71**, 511–526.
- Kishi, M. J., M. Kashiwai, D. M. Ware, B. A. Megrey, D. L. Eslinger, F. E. Werner, M. Noguchi-Aita, T. Azumaya, M. Fujii, S. Hashimoto, D. Huang, H. Iizumi, Y. Ishida, S. Kango, G. A. Kantakov, H. Kim, K. Komatsu, V. V. Navrotsky, S. L. Smith, K. Tadokoro, A. Tsuda, O. Yamamura, Y. Yamanaka, K. Yokouchi, N. Yoshie, J. Zhang, Y. I. Zuenko, V. I. Zvalinsky (2007): NEMURO-a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecol. Modell.*, **202**, 12–25.
- Kobayashi S. Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi (2015): The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Kodama T., T. Setou, M. Masujima, M. Okazaki, and T. Ichikawa (2015): Intrusions of excess nitrate in the Kuroshio subsurface layer. *Cont. Shelf Res.*, **110**, 191–200.
- Köhl, A. (2015): Evaluation of the GECCO2 ocean synthesis: transports of volume, heat and freshwater in the Atlantic. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **141**, 166–181.
- Köhl, A., and D. Stammer (2004): Optimal observations for variational data assimilation. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 529–542.
- Kouketsu, S., T. Doi, T. Kawano, S. Masuda, N. Sugiura, T. Toyoda, H. Igarashi, Y. Kawai, K. Katsumata, H. Uchida, M. Fukasawa, and T. Awaji (2011): Deep ocean heat content changes estimated from observation and reanalysis product and their influence on sea level change. *J. Geophys. Res.*, **116**, C03012, doi:10.1029/2010JC006464.
- Krishnamurti, T. N., C. M. Kishtawal, Z. Zhang, T. LaRow, D. Bachiochi, and E. Williford (2000): Multi model ensemble forecasts for weather and seasonal climate. *J. Climate*, **13**, 4196–4216.
- 久野正博, 瀬藤聡 (2015): FRA-ROMSを用いた熊野灘に來遊するモジャコの輸送実験. 黒潮の資源海洋研究, **16**, 83–91.
- Kuragano, T., and M. Kamachi (2000): The Global Statistical Space-Time Scales of Oceanic Variability Estimated From the TOPEX/POSEIDON Altimeter Data. *J. Geophys. Res.*, **105**, 955–974.
- Kuroda, H., T. Setou, S. Kakehi, S. Ito, T. Taneda, T. Azumaya, D. Inagake, Y. Hiroe, K. Morinaga, M. Okazaki, T. Yokota, T. Okunishi, K. Aoki, Y. Shimizu, D. Hasegawa, and T. Watanabe (2016): Recent evolution of Japanese fisheries science by developing an ocean forecast system “FRA-ROMS” in the Kuroshio-Oyashio region —Overview of reproducibility of reanalysis products—. *Open Journal of Marine Science*, accepted.
- Kuroda, H., D. Takahashi, H. Mitsudera, T. Azumaya, and T. Setou (2014): A preliminary study to understand the transport process for the eggs and larvae of Japanese Pacific walleye pollock *Theragra chalcogramma* using particle-tracking experiments based on a high-

- resolution ocean model. *Fish. Sci.*, **80**, 127–138.
- Lindsay, R. W., and J. Zhang (2006): Assimilation of ice concentration in an ice–ocean model. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **23**, 742–749.
- Lindsay, R. W., C. Haas, S. Hendricks, P. Hunke, N. Kurtz, J. Paden, B. Panzer, J. Sonntag, J. Yungel, and J. Zhang (2012): Seasonal forecasts of Arctic sea ice initialized with observations of ice thickness. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L21502, doi:10.1029/2012GL053576.
- Lindsay, R. W., M. Wenshanan, A. Schweiger, and J. Zhang (2014): Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic. *J. Climate*, **27**, 2588–2606.
- Maes, C., and S. Belamari (2011): On the Impact of Salinity Barrier Layer on the Pacific Ocean Mean State and ENSO. *SOLA*, **7**, 097–100, doi:10.2151/sola.2011–025.
- Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, J. P. Matthews, T. Toyoda, Y. Kawai, T. Doi, S. Kouketsu, H. Igarashi, K. Katsumata, H. Uchida, T. Kawano, and M. Fukasawa (2010): Simulated Rapid Warming of Abyssal North Pacific Waters. *Science*, **329**, 319–322.
- Masuda, S., J. P. Matthews, Y. Ishikawa, T. Mochizuki, Y. Tanaka, and T. Awaji (2015a): A new approach to El Niño prediction beyond the spring season. *Scientific Reports*, **5**, 16782, doi:10.1038/srep16782.
- Masuda, S., S. Osafune, N. Sugiura, and T. Doi (2015b): Toward an Optimal Design of Profiling Float Network. *Annual report of the Earth Simulator*, Apr2014–Mar 2015, 59–61.
- Menemenlis, D., I. Fukumori, and T. Lee (2005): Using Green’s functions to calibrate an ocean general circulation model. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1224–1240.
- Miyama, T., and Y. Miyazawa (2013): Structure and dynamics of the sudden acceleration of Kuroshio off Cape Shionomisaki. *Ocean Dynamics*, **63**, 265–281.
- Miyazawa, Y., X. Guo, S. M. Varlamov, T. Miyama, K. Yoda, K. Sato, T. Kano, and K. Sato (2015): Assimilation of the seabird and ship drift data in the north-eastern sea of Japan into an operational ocean nowcast/forecast system. *Scientific Reports*, **5**, 17672, doi:10.1038/srep17672.
- Miyazawa, Y., Y. Masumoto, S. M. Varlamov, and T. Miyama (2012b): Transport simulation of the radionuclide from the shelf to open ocean around Fukushima. *Cont. Shelf Res.*, **50–51**, 16–29.
- 宮澤泰正, 美山透 (2016) : 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. 地球シミュレータ年報, 151–154.
- 宮澤泰正, 美山透, 郭新宇, S. M. Varlamov (2015) : 外洋から沿岸に向けたモデリングの取り組み. 沿岸海洋研究, **52**, 131–137.
- Miyazawa, Y., T. Miyama, S. M. Varlamov, X. Guo, and T. Waseda (2012a): Open and coastal seas interactions south of Japan represented by an ensemble Kalman Filter. *Ocean Dynamics*, **62**, 645–659.
- Miyazawa, Y., H. Murakami, T. Miyama, S. M. Varlamov, X. Guo, T. Waseda, and S. Sil (2013): Data assimilation of the high-resolution sea surface temperature obtained from the Aqua-Terra satellites (MODIS-SST) using an ensemble Kalman filter. *Remote Sensing*, **5**, 3123–3139.
- 宮澤泰正, 早稲田卓爾 (2010) : 数値海流予測 : 現状と将来の展望. 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, **10**, 93–96.
- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu (2009): Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J. Oceanogr.*, **65**, 737–756.
- Mochizuki, T., H. Igarashi, N. Sugiura, S. Masuda, N. Ishida, and T. Awaji (2007): Improved coupled GCM climatologies for summer monsoon onset studies over Southeast Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L01706, doi:10.1029/2006GL027861.
- Mochizuki, T., S. Masuda, Y. Ishikawa, and T. Awaji (2016): Multiyear climate prediction with initialization based on 4D-Var data assimilation. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 3903–3910, doi:10.1002/2016GL067895.
- Mochizuki, T., N. Sugiura, T. Awaji, and T. Toyoda (2009): Seasonal climate modeling over the Indian Ocean by employing a 4D-VAR coupled data assimilation approach. *J. Geophys. Res.*, **114**, C11003, doi:10.1029/2008JC005208.
- Moon, J. H., N. Hirose, and A. Morimoto (2012): Green’s function approach for calibrating tides in a circulation model for the East Asian marginal seas. *J. Oceanogr.*, **68**, 345–354.
- 西田芳則, 鹿又一良, 田中伊織, 佐藤晋一, 高橋進吾, 松原久 (2003) : 津軽海峡を通過する流量の季節・経年変化. 海の研究, **12**, 487–499.
- Nishikawa, S., Y. Ishikawa, S. Masuda, Y. Hiyoshi, Y. Sasaki, and H. Igarashi (2015): Argo data assimilation and its effect on climate state estimation and forecasting in the western North Pacific using a coupled model. *J. Geophys. Res. Oceans*, **120**, 2636–2654, doi:10.1002/2014JC010095.
- 奥西武, 長谷川大介, 寛茂穂, 黒田寛, 瀬藤聡, 安倍大介, 清水勇吾, 高橋正知, 米田道夫 (2016) : FRA-ROMS 利用によるマサバ加入料予測と今後の展望. 黒潮の資源海洋研究, **17**, 4–5.
- Osafune, S., S. Masuda, N. Sugiura, and T. Doi (2015): Evaluation of the applicability of the Estimated State of the Global Ocean for Climate Research (ESTOC) data set. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 4903–4911, doi:10.1002/2015GL064538.
- Oschlies A. (2001) : Model-derived estimates of new production: New results point towards lower values. *Deep Sea Res., Part II*, **48**, 2173–2197.
- Philander, S. G. H. (1990) : *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego and London, 293pp.
- Picaut, J., F. Masia, and Y. du Penhoat (1997) : An advective-reflective conceptual model for ENSO. *Science*, **277**, 663–666.
- Ricci, S., T. Weaver, J. Vialard, and P. Rogel (2005) : Incorporating state-dependent temperature constraints in the background error covariance of variational ocean data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 317–328.
- Sakamoto, T. (2016) : Reproducing migration history of Japanese sardine using otolith $\delta^{18}\text{O}$ and a data assimilation model. Master thesis, University of Tokyo, 89 pp.
- 齊藤誠一 (2014) : 漁況・海況予測のこれから. 水産海洋学入門 海洋生物資源の持続的利用. 水産海洋学会編, 講談社, 303pp.
- 酒井光夫, 一井太郎, 田中博之 (2006) : Pinger 追跡によるアカイカ科イカ類の行動—アカイカの3次元空間行動パターンと今後の課題—. 日本バイオロギング研究会第2回シンポジウム 2006 要旨, 19–20.
- Schartau, M., and A. Oschlies (2003) : Simultaneous data-based optimization of a 1D-ecosystem model at three locations in the North Atlantic: Part I—Method and parameter estimates. *J. Mar. Res.*, **61**, 765–793.
- Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams (2005) : The Regional Ocean Modeling System (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model. *Ocean Modelling*, **9**, 347–404.
- Shigemitsu, M., T. Okunishi, J. Nishioka, H. Sumata, T. Hashioka, M. N. Aita, S. L. Smith, N. Yoshie, N. Okada, and Y. Yamanaka (2012) : Development of a one-dimensional ecosystem model including the iron cycle applied to the Oyashio region, western subarctic Pacific. *J. Geophys. Res.*, **117**, C06021, doi:10.1029/2011JC007689.

- 清水学, 小松幸生, 植原量行, 伊藤進一, 角田智彦, 瀬藤聡, 日下彰, 寛茂穂, 宮澤泰正, 秋山秀樹 (2007): FRA-JCOPE データ流通および利益還元システム. 黒潮の資源海洋研究, **8**, 35–40.
- Sugiura, N., T. Awaji, S. Masuda, T. Mochizuki, T. Toyoda, T. Miyama, H. Igarashi, and Y. Ishikawa (2008): Development of a 4-dimensional variational coupled data assimilation system for enhanced analysis and prediction of seasonal to interannual climate variations. *J. Geophys. Res.*, **113**, C10017, doi:10.1029/2008JC004741.
- 水産総合研究センター (2005): 数値シミュレーションモデルで大型クラゲの来遊を予測. プレスリリース (2005年8月15日発表, <https://www.fra.affrc.go.jp/pressrelease/pr17/170825/kurage1.htm>)
- Toole, J. M., R. A. Krishfield, M.-L. Timmermans, and A. Proshutinsky (2011): The Ice-Tethered Profiler: Argo of the Arctic. *Oceanography*, **24**, 126–135.
- Toyoda, T., T. Awaji, S. Masuda, N. Sugiura, H. Igarashi, Y. Sasaki, Y. Hi-yoshi, Y. Ishikawa, S.-I. Saitoh, S. Yoon, T. In, and M. J. Kishi (2013): Improved state estimations of lower trophic ecosystems in the global ocean based on a Green's function approach. *Prog. Oceanogr.*, **119**, 90–107.
- Toyoda, T., T. Awaji, N. Sugiura, S. Masuda, H. Igarashi, Y. Sasaki, Y. Hi-yoshi, Y. Ishikawa, T. Mochizuki, T. T. Sakamoto, H. Tatebe, Y. Komuro, T. Suzuki, T. Nishimura, M. Mori, Y. Chikamoto, S. Yasunaka, Y. Imada, M. Arai, M. Watanabe, H. Shioyama, T. Nozawa, A. Hasegawa, M. Ishii, M. Kimoto (2011): Impact of the assimilation of sea ice concentration data on an atmosphere–ocean–sea ice coupled simulation of the Arctic Ocean climate. *SOLA*, **7**, 37–40, doi:10.2151/sola.2011-010.
- Toyoda, T., Y. Fujii, T. Kuragano, M. Kamachi, Y. Ishikawa, S. Masuda, K. Sato, T. Awaji, F. Hernandez, N. Ferry, S. Guinehut, M. J. Martin, K. A. Peterson, S. A. Good, M. Valdivieso, K. Haines, A. Storto, S. Masina, A. Köhl, H. Zuo, M. Balmaseda, Y. Yin, L. Shi, O. Alves, G. Smith, Y.-S. Chang, G. Vernieres, X. Wang, G. Forget, P. Heimbach, O. Wang, I. Fukumori, and T. Lee (2016a): Intercomparison and validation of the mixed layer depth fields of global ocean syntheses. *Clim. Dyn.*, in press, doi:10.1007/s00382-015-2637-7.
- Toyoda, T., Y. Fujii, T. Yasuda, N. Usui, K. Ogawa, T. Kuragano, H. Tsujino, and M. Kamachi (2016b): Data assimilation of sea ice concentration into a global ocean–sea ice model with corrections for atmospheric forcing and ocean temperature fields. *J. Oceanogr.*, **72**, 235–262.
- Tsujino, H., N. Usui, and H. Nakano (2006): Dynamics of Kuroshio path variations in a high-resolution GCM. *J. Geophys. Res.*, **111**, C11001, doi:10.1029/2005JC003118.
- Uchiyama, Y., D. Miyazaki, R. Kanki, and Y. Miyazawa (2014): Oceanic Downscaling Effects on the circulations in Japan Sea with a JCOPE2-ROMS System. *J. Jpn. Soc. Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, **70**, I_451–I_455.
- Usui N., Y. Fujii K. Sakamoto, M. Kamachi (2015): Development of a four-dimensional variational assimilation system for coastal data assimilation around Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 3874–3892.
- 碓氷典久, 今泉孝男, 辻野博之 (2010): MOVE/MRLCOM への海水密度同化の導入に向けて—オホーツク海を対象とした予備調査と簡易同化実験—. 測候時報, **77**, S71–S82.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, and M. Kamachi (2011): Improving strategies with constraints regarding non-Gaussian statistics in a three-dimensional variational assimilation method. *J. Oceanogr.*, **67**, 253–262.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda, and M. Kamachi (2006): Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Adv. Spa. Res.*, **37**, 806–822.
- Usui, N., H. Tsujino, Y. Fujii, and M. Kamachi (2008a): Generation of a trigger meander for the 2004 Kuroshio large meander. *J. Geophys. Res.*, **113**, C01012, doi:10.1029/2007JC004266.
- Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, and Y. Fujii (2008b): Formation process of the Kuroshio large meander in 2004. *J. Geophys. Res.*, **113**, C08047, doi:10.1029/2007JC004675.
- Usui, N., T. Wakamatsu, Y. Tanaka, N. Hirose, T. Toyoda, S. Nishikawa, Y. Fujii, Y. Takatsuki, H. Igarashi, H. Nishiakwa, Y. Ishikawa, T. Kuaragano, and M. Kamachi (2016): Four-dimensional Variational Ocean Reanalysis: A 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). *J. Oceanogr.*, in press.
- Varlamov, S. M., X. Guo, T. Miyama, K. Ichikawa, T. Waseda, and Y. Miyazawa (2015): M2baroclinic tide variability modulated by the ocean circulation south of Japan. *J. Geophys. Res. Oceans*, **120**, 3681–3710, doi:10.1002/2015jc010739.
- Varlamov, S. M., J.-H. Yoon, N. Hirose, H. Kawamura, and K. Shiohara (1999): Simulation of the oil spill processes in the Sea of Japan with regional ocean circulation model. *J. Mar. Sci. Technol.*, **4**, 94–107.
- 早稲田卓爾, A. Webb, 清松啓司, 藤本航, S. Varlamov, 堀内一敏, 藤原敏文, 谷口友基, 松田和宏, 吉川潤 (2016): 初期検討・FSに資する海洋再生可能エネルギー資源量推定—波浪・海流・潮流・温度差発電エネルギーポテンシャル—. 日本船舶海洋工学会論文集, **23**, 189–198.
- Wunsch, C., and P. Heimbach (2013): Dynamically and kinematically consistent global ocean circulation and ice state estimates, p. 553–579. In *Ocean Circulation and Climate: A 21st Century Perspective*, edited by G. Siedler, S. Griffies, J. Gould, and J. Church, Academic Press, London.
- Xue, Y., C. Wen, A. Kumar, M. Balmaseda, Y. Fujii, O. Alves, C. Desportes, M. Martin, G. Vecchi, G. Verniers, T. Lee, I. Ishikawa, and D. De Witt (2016): A Real-time Ocean Reanalyses Intercomparison Project in the Context of Tropical Pacific Observing System and ENSO Monitoring. *Clim. Dyn.*, accepted.
- Zhang, J., D. R. Thomas, D. A. Rothrock, R. W. Lindsay, Y. Yu, and R. Kwok (2003): Assimilation of ice motion observations and comparisons with submarine ice thickness data. *J. Geophys. Res.*, **108**, 3170, doi:10.1029/2001JC001041.
- Zhao, N., A. Manda, and Z. Han (2014): Frontogenesis and frontolysis of the subpolar front in the surface mixed layer of the Japan Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, **119**, 1498–1509, doi:10.1002/2013jc009419.
- Zhu, J., and M. Kamachi (2000): The role of time step size on numerical stability of tangent linear models. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1562–1572.

Japanese studies of ocean data assimilation: milestones over the past 20 years and future perspectives

Yosuke Fujii^{1*}, Masafumi Kamachi², Naoki Hirose³, Takashi Mochizuki², Takashi Setou⁴, Toru Miyama², Nariaki Hirose¹, Satoshi Osafune⁵, Sooyeon Han³, Hiromichi Igarashi², Yasumasa Miyazawa², Takahiro Toyoda¹, Yasuhiro Hoshiba⁶, Shuhei Masuda⁵, Yoichi Ishikawa², Norihisa Usui¹, Hiroshi Kuroda⁷ and Katsumi Takayama³

Abstract

In 1995, the World Meteorological Organization (WMO) Second International Symposium on Assimilation of Observation in Meteorology and Oceanography was held in Tokyo, which initiated the Japanese Summer School on Data Assimilation. Over the past 20 years, the ocean data assimilation research community in Japan has accomplished remarkable achievements, including the successful prediction of the Kuroshio large meander and the development of a coupled atmosphere-ocean four-dimensional variational data assimilation system, which is the only one in the world. Ocean data assimilation systems are now operationally used to monitor and forecast the ocean state, and their products, or ocean reanalysis datasets, are broadly provided for oceanographic and climate studies, fisheries management, the prevention of oceanic disasters, and the maintenance of coastal areas. This paper provides a summary of the achievements of the research community, the current status of ocean data assimilation products, and ongoing research subjects in the community. Additionally, the requirements for successful progress in this research areas are discussed from a future perspective.

Key words : Ocean Data Assimilation, Ocean Reanalysis, Ocean Forecasting, 4DVAR Coupled Atmosphere-Ocean Data Assimilation System, Japanese Summer School on Data Assimilation

(Corresponding author's e-mail address : yfujii@mri-jma.go.jp)

(Received 11 November 2016 ; accepted 12 December 2016)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2017)

1 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1 Nagamine, Tsukuba, 305-0052, Japan

2 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-0001, Japan

3 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-Koenm Kasuga, 816-8580, Japan

4 National Research Institute of Fisheries Science, Japan Fisheries Research and Education Agency, 2-13-4 Fukuura, Kanazawa-ku, 236-8648, Japan

5 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15, Natsushima, Yokosuka, 237-0061, Japan

6 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8564, Japan

7 Hokkaido National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 116 Kasturakoi, Kushiro, 085-0802, Japan

* Corresponding author : Yosuke Fujii

Tel : +81298538658, FAX : +81298551439

e-mail : yfujii@mri-jma.go.jp