
 報 告

現場観測データを用いた 北西太平洋域海洋データ同化システムの流速場の検証

高槻 靖*・広瀬 成章**・碓氷 典久**

要 旨

日本沿岸海況監視予測システムのプロトタイプとして開発した北西太平洋域 4次元変分法海洋データ同化システムによる長期再解析データ FORA-WNP30 について、海洋気象観測船による 100 m 深と 400 m 深の現場観測データと比較することで流速場の再現性を検証した。日本海の 400 m 深を除き流速場は概ね良く再現されており、本州南方、東シナ海、黒潮続流域という西岸境界流を含む海域で特に再現性が良好であった。同化手法及び同化データの異なる再解析データと比較することで、流速、流向とも FORA-WNP30 の再現性が最も良く、個別の観測例でも良好な再現性が示された。これは 4 次元変分法により黒潮・黒潮続流の蛇行や中規模渦など比較的小さな時空間規模の現象の再現性が向上していることを示唆している。再解析データの流速場を海洋変動の再現性の視点で評価すると、黒潮続流域における渦運動エネルギー (EKE) の平均値やその変動は衛星海面高度計データの有無による差が大きい。本州南方海域においては EKE に衛星海面高度計データの有無による明瞭なギャップは見られず、黒潮流路等の再現性の年代による差は小さいものと考えられる。

1. はじめに

気象研究所では、気象庁における沿岸海況の監視・予測情報及び異常潮位などの沿岸防災情報の高度化に資するため、高解像度化及びスキームの高精度化を図った日本沿岸海況監視予測システムの開発を進めている。これまでにプロトタイプとして瀬戸内海監視予測システムを開発し (坂本ほか, 2015)、2016 年 6 月までに本庁において試験運用を開始した。この瀬戸内海監視予測システムは、水平解像度を約 2 km とした瀬戸内海周辺域のモデル (MRI.COM-Seto) と、その側面境界条

件を与える北西太平洋域 4 次元変分法海洋データ同化システム (MOVE-4DVAR/MRI.COM-WNP) により構成されている。日本沿岸海況監視予測システムの開発において新たなターゲットとしている沿岸現象の再現性や予測可能性は、沿岸モデルの特性とともに、その境界条件を与える同化システムにおける海洋変動の再現性にも大きく依存し、異常潮位等をもたらさうる時空間的に小さな規模の変動シグナルが的確に表現されていることが望ましい。平原ほか (2017) は新しい同化システムの解析精度の簡単な検証をしており、従来の

* 気象研究所海洋・地球化学研究部 (現 気象研究所気候研究部)

** 気象研究所海洋・地球化学研究部

(平成 29 年 12 月 25 日発行)

3次元変分法による海洋データ同化システムに比べて、海面水温や表層水温のRMSEが概ね改善していることや、九州東方での黒潮流路の表現の改善例を示している。本稿では、新しい同化システムにより整備した30年を超える長期再解析データの再現性を、流速場に着眼して海洋気象観測船による現場観測データを用いて評価する。

本評価の特徴の一つは、本同化システムで同化していない独立したデータである流速の観測データを比較に用いていることである。また、流速はベクトル量であり、時空間的に変動も大きいので、その再現性の違いが統計結果などに大きく反映されると考えられる。もう一つは、同化される観測データの種類や密度が時間とともに変化している長期間のデータで比較することである。30年を超える再解析の対象期間の間に、衛星海面高度計の運用や中層フロートを全世界の海洋に展開するArgo計画が開始しており、同化されている観測データの種類や密度は、海域や年代によって大きく異なっている。特に、衛星海面高度計データは再解析データへのインパクトが大きいと考えられるため、衛星海面高度計データを同化対象から除外した再解析データも用意した。このインパクト実験結果も含めて海域別・期間別に比較することで、観測システムの変遷が流速の再現性にどのように影響しているかを評価できると期待される。このような評価結果は、現在進めているシステムの開発へのフィードバックに役立つのはもちろん、過去の海洋現象・気候現象の解析に長期再解析データを用いる際に有用な情報となる。

本稿の構成を以下に示す。第2章では用いたデータ及びその比較手法について述べる。第3章では現場観測データとの比較結果を統計及び観測事例により示す。第4章では流速場を海洋変動の再現性により評価し、海洋現象・気候現象の解析への利用可能性とその留意点をまとめる。

2. データと手法

検証対象の解析データとして、MOVE-4DVAR/

MRI.COM-WNPを用いて、海洋研究開発機構との共同研究により整備した海洋長期再解析データ Four-dimensional variational Ocean Re-Analysis for the Western North Pacific over 30 years (FORA-WNP30; Usui *et al.*, 2017) を用いる（以下、FORAと記す）。本稿では再解析期間を2015年まで延長してある。同化手法の違いによるインパクトを評価するため、現在本庁において運用している3次元変分法を用いたデータ同化システム (MOVE/MRI.COM-WNP; 石崎ほか, 2009) の海洋再解析データ（以下、3DVARと記す）を用いた。また、衛星海面高度計データのインパクトを評価するため、1993-2012年の期間についてFORAと同じシステムで衛星による海面高度偏差データを同化対象から外し、現場観測データ及び海面水温データのみを同化再解析する実験を行った（以下、NOSSHと記す）。いずれも、海洋モデルを駆動する外力には大気再解析データである気象庁55年長期再解析JRA-55 (Kobayashi *et al.*, 2015) を使用した。これらの海洋再解析データの概要を第1表に示す。なおMOVE-4DVAR/MRI.COM-WNPの概要と海面水温や黒潮流路変動等の再現性は碓氷・藤井 (2015)、さらに詳しい情報はUsui *et al.* (2015) を参照されたい。

比較検証に用いる現場データとして、気象庁の海洋気象観測船凌風丸及び啓風丸に搭載された表層海流計（以下、ADCPと記す）により航走中に取得されたデータを用いる。観測期間は1990-2015年である。各船の期間ごとのADCP装置の機種と主な設定を第2表に示す。ADCPデータは、5分間ごとのアンサンブル平均を、ハワイ大のE. Firing ほかによって開発されたCODASシステム¹を用いて処理した。ADCP送受波器及び方位センサーの船体への取付け角度等の誤差に起因するアライメント誤差及び送受波器のビームの鉛直角や流速計算に用いる音速等の誤差に起因するスケール誤差 (Joyce, 1989; Pollard and Read, 1989)² は、妥当な補正係数が求められなかった場合を除き補正した。ADCPが直接測定するのは船体に対する

¹ CODAS ADCP Processing (http://currents.soest.hawaii.edu/docs/doc/codas_doc/index.html; 2017年5月8日アクセス)

² 表層海流計の測定誤差については、海洋観測指針 (1999) 第1部付録C.1にまとめられている。

相対流速であり、地球座標系に対する絶対流速は、船位の変化から求めた船体の移動速度を差し引いて求める。ADCP データの誤差をできる限り小さくするには、船体の移動速度を精度よく求めることが重要である。航走中は一般に船首方位や船速の変化が小さく、また、CODAS システムでは前後の区間の船体の移動速度も用いて平滑化しているため、平均期間の船体の移動速度を精度よく求めることができる。そこで、本稿では航走中のデータのみを比較に用いることとし、対地船速 8 kt をしきい値とした。ADCP の観測深度は、設定上は 800 m 以上に達するが（第 2 表）、実際には航走時の泡の発生などによる受信信号低下や雑音のために深層のデータ取得率は低下し、荒天時にはそれが顕著となる。そこで本稿では、深層についてはデータ取得率の低下が比較的小さい 400 m を選んだ。海面付近については、風によって引き起こされるエクマン流の影響を比較から除くため、エクマン層より十分深い 100 m を選んだ。そして、観測層の中心がこれらの 2 つの深度に最も近い層の ADCP データを比較に使用することとした。

ADCP が測定している流れには潮流も含ま

れるが、今回検証する再解析データ作成に用いたシステムでは潮汐は含まれていない。このため、比較にあたっては Egbert and Erofeeva (2002) による順圧潮汐モデルの太平洋域潮汐解（解像度 $1/12^\circ$ ）³ を用いて ADCP 観測時の潮流を推算し、ADCP データから差し引いた。推算された潮流は多くの海域で最大 5 cm/s 未満であるが、琉球列島、千島列島や伊豆 - 小笠原海嶺、トカラ海峡などの浅海域では最大で 20 cm/s を超え（図略）、ADCP で観測される流速に対して無視できない大きさになりうる。内部潮汐・慣性振動などについては適切な推算が困難なため、誤差の一部とみなすことにする。

おおよそ 100 km 以上の空間規模での流れは、海水の密度の分布に対応した地衡流が支配的であり、海況の特徴や水塊の違いにより流速分布の再現性に差があることが予想される。そこで、ADCP データ及び同化に用いた観測データの分布も参考に、日本周辺を東シナ海、本州南方、黒潮続流域、混合水域、親潮域、日本海の 6 つの海域に分けて評価した（第 1 図）。観測海域はあらかじめ定められた観測定線とそこに向かう航路の

第 1 表 比較検証する海洋再解析データの概要

再解析データ略称	同化手法	解析期間	外力	同化するデータ
FORA	4次元変分法	1982.1-2015.12	JRA-55, 日平均	現場水温及び塩分, 海面水温, 海面高度偏差*
3DVAR	3次元変分法	1982.1-2015.12	JRA-55, 3時間平均	現場水温及び塩分, 海面水温, 海面高度偏差*
NOSSH	4次元変分法	1993.1-2012.12	JRA-55, 日平均	現場水温及び塩分, 海面水温

*: 1993.1 以降のみ

以下の項目は、各再解析データで共通である。

数値モデル： MRI.COM ver. 2.4 (Tsujino et al., 2006)

領域： 117°E-160°W, 15°-65°N

日本近海の水平解像度： $1/10^\circ \times 1/10^\circ$

鉛直層数： 54 層

³ OTIS regional Pacific Ocean tidal solution, 2009. (<http://volkov.oce.orst.edu/tides/PO.html>; 2017 年 5 月 8 日アクセス)

周囲にほぼ限られていることと、平成 22 (2010) 年度に海洋気象観測船の観測体制が変更となったことから、東シナ海や日本海における ADCP データは、ほぼ観測体制変更以降の期間に限られていることに留意されたい。先に述べたように、期間によって同化されている観測データの種類や密度が異なることから、衛星海面高度計データを同化しているのが 1993 年以降であることと Argo 計画が 2000 年に開始したことを踏まえて、全期間 (1990-2015 年) での統計に加えて、1990-1992 年、1993-2002 年、2003-2012 年の 3 つの期間の統計も求めた。

3. 現場観測データとの比較

3.1 海域別、期間別の統計による評価

海域別、期間別の流速の平均とその標準偏差、相関係数、回帰係数 (回帰式の傾き)、回帰式の標準偏差、及び流向差の標準偏差の統計を第 3 表

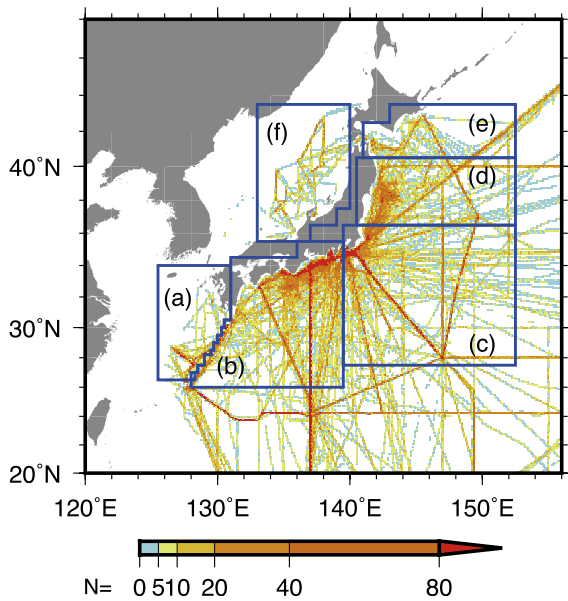
に示す。全般的にみていずれの再解析データでも、平均流速は ADCP データに比べて小さい。日本海の 400 m 深を除き、流速は 99% の信頼度で有意な相関がある。

海域別にみると、いずれの深度でも、本州南方、東シナ海、黒潮続流域では流速の相関が高く、日本海、親潮域では相関は低くなる。相関係数が高い海域ほど回帰係数も 1.0 に近づいており、流速が大きい時の対応が良いことを示唆している。これについては後ほど散布図を用いてさらに検討する。流向差は本州南方と黒潮続流域で標準偏差が小さく、日本海、東シナ海では大きい。全期間 (1990-2015 年) の統計で FORA と 3DVAR を比較すると、100 m 深では本州南方、黒潮続流域、混合水域、日本海において、400 m 深では本州南方、黒潮続流域、混合水域、親潮域において、FORA は 3DVAR に比べて相関係数が高く流向差は小さい。これらの差は 99% の信頼度で有意である。

第 2 表 検証に使用した表層海流計 (ADCP) の期間、機種及び設定等の概要

船名	期間	機種	主な設定			データ収録プログラム
			層厚	層数	観測深度*	
凌風丸II世	1990.11-1993.3	RD-VM 75KHz Narrowband	16m	50層	20-804m	RDI DAS
	1993.4-1995.3	RD-VM 75KHz Narrowband	16m	50層	24-808m	TRANSECT
凌風丸III世	1995.7-2003.10	RDI-VM 75KHz Broadband	16m	50層	29-813m	WinTRANSECT
	2004.4-2010.2	RDI-VM 75KHz Broadband	16m	64層	29-1037m	VmDAS
	2010.7-2015.12	RDI-OceanSurveyer 38KHz	20m	60層	36-1216m	VmDAS
啓風丸II世	2001.1-2007.3	RDI-VM 75KHz Broadband	12m	64層	27-783m	WinTRANSECT
	2007.4-2009.8	RDI-VM 75KHz Broadband	16m	64層	29-1037m	VmDAS
	2009.10-2010.2	RDI-VM 38KHz Broadband	20m	60層	36-1216m	VmDAS
	2010.5-2015.12	RDI-OceanSurveyer 38KHz	20m	60層	36-1216m	VmDAS

*; 深度は層の中央の深さを示す。海面水温の高低などにより、観測深度は若干変化する。なお、海面状態や海洋内部の鉛直密度構造などにより深度ごとのデータ取得率は変化し、データが利用できる最深層は概して設定上の最深層よりも浅くなる。



第 1 図 ADCP データの分布と海域区分

ADCP データ数は、100 m 深で妥当な観測値が得られている 1990-2015 年の全データについて緯経度 0.1 度ごとにカウントした結果を、カラーバーの色で示す。海域 (青枠) は、(a) 東シナ海、(b) 本州南方、(c) 黒潮続流、(d) 混合水域、(e) 親潮域、(f) 日本海の 6 つに区分している。

1993-2002 年、2003-2012 年については、FORA、3DVAR、NOSSH の 3 種類の再解析データが揃っている。同化手法及び同化データの違いによる再現性の違いに着目すると、いずれの期間においても、本州南方、黒潮続流域、混合水域では、FORA の相関係数が最も高く、流向差の標準偏差が最も小さく、NOSSH は最も相関係数が低く、流向差の標準偏差が大きい。黒潮続流域と混合水域では FORA と 3DVAR 及び NOSSH の間の差が大きく、FORA の再現性が際立って高い。親潮域の 1993-2002 年については、いずれの深度でも FORA と 3DVAR の流速の相関係数に統計的な有意な差はない。3DVAR と NOSSH を比較すると、東シナ海及び日本海を除き、概ね 3DVAR の方が流速の相関係数は高く、流向差の標準偏差は小さく、その傾向は黒潮続流域で顕著である。このことから、これらの海域では同化手法の違いよりも衛星海面高度計データの同化の有無の方が同化結果に対するインパクト

が大きいことが示唆される。東シナ海については、どの期間でも 3 つの再解析データ間で有意な差はほぼみられない。

Argo 時代とそれ以前の比較という視点で 1993-2002 年と 2003-2012 年を比べると、本州南方、東シナ海、黒潮続流域ではいずれも後の期間の方が相関係数が高く、流向差の標準偏差は小さいか同程度である。この傾向は FORA、3DVAR、NOSSH に共通していることから、Argo 計画等による現場観測データの増加が再現性の向上に寄与していると思われる。一方、混合水域では、FORA と NOSSH の 100 m 深及び NOSSH の 400 m 深において統計的に有意な差は無く (99% の信頼度)、FORA の 400 m 深においては後の期間の方が相関係数は低い。また、親潮域でも相関係数に統計的に有意な差が無い (99% の信頼度)、後の期間の方が低い (3DVAR の 100 m 深)。このように、これらの海域では Argo 計画等による現場観測データの増加のインパクトはほぼみられなかった。ただし、先述の通り平成 22 (2010) 年度に海洋気象観測船の観測体制が変更となっており、これに伴って混合水域では日本に比較的近い海域の現場流速データが大幅に増えていることなども考えると、比較するデータの地理的分布が変わったことがこの評価に影響している可能性もある。

次に、ADCP データと比較した流速と流向の散布図及び流向差のヒストグラム (第 2 図) により、同化手法及び同化データの違いによる再現性の違いを検討する。黒潮続流域 (第 2 図 a) を見ると、流速 (図上段) はいずれの再解析データでも ADCP より小さい側にやや偏りはあるが $y=x$ の近傍に集まっている。ADCP データで 1.0 m/s 以上の範囲を見ると、FORA は 3DVAR や NOSSH に比べて $y=x$ の近傍のデータ数が多く、また 0.5 m/s 以下のデータは少ない。図中に示された回帰線も、FORA が最も傾きが大きくて原点にも近く、回帰係数の大きさが流速の再現性を示す良い指標となっていることがわかる。NOSSH の回帰線の傾き (回帰係数) が他と比べて小さいのは、ADCP 流速が大きいときに再解析データの流速が小さいことに加え、FORA や 3DVAR と異なって 1.5 m/s を超えるような強い流速がほとんどない

第 3 表 海域別，期間別の各再解析データと ADCP データとの比較結果

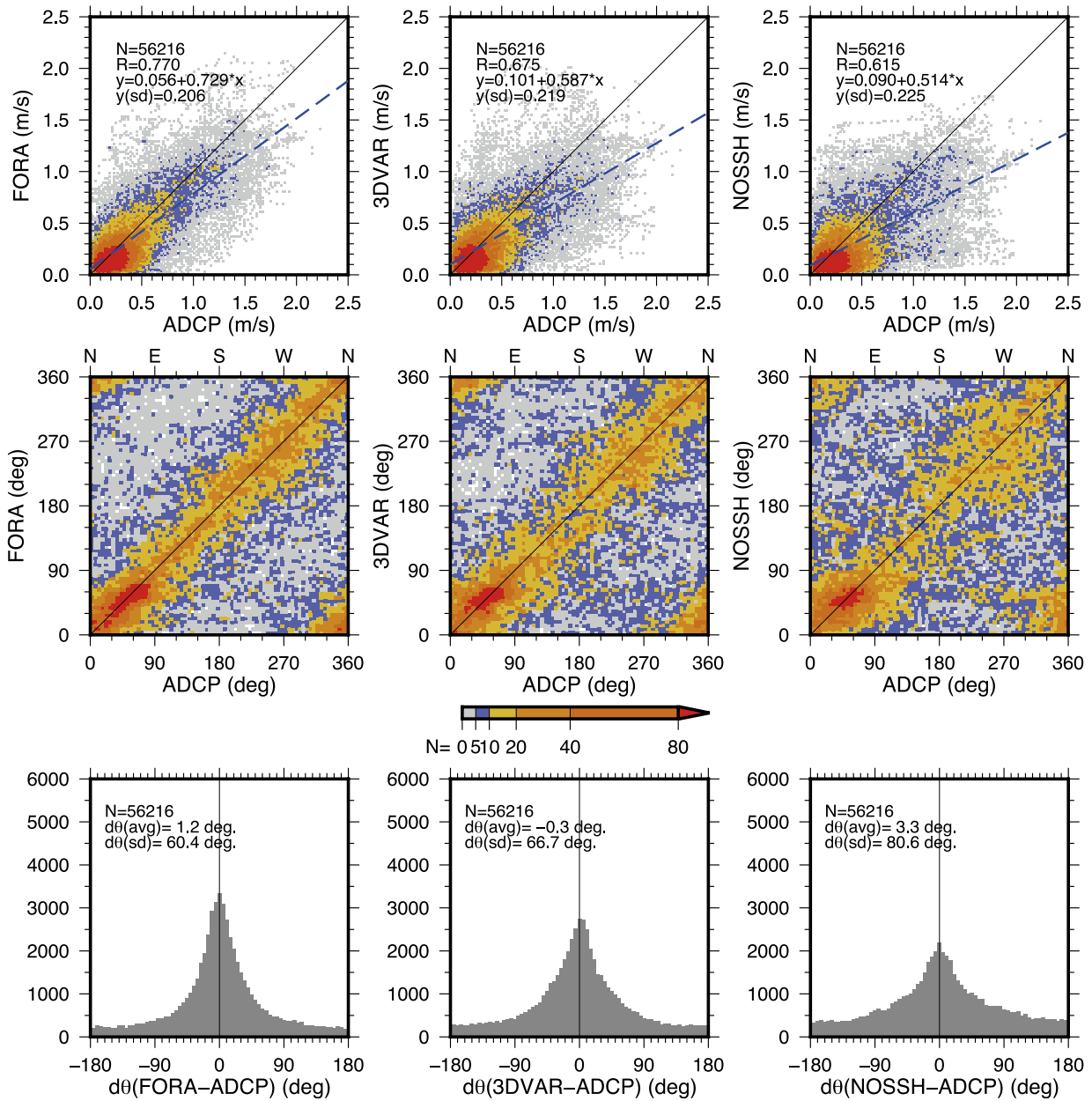
(a) 100 m 深，(b) 400 m 深についての統計結果。流速については，平均流速とその標準偏差（単位：m/s），流速の標準偏差（単位：m/s），流向については，流向差の標準偏差（単位：度）を，データ数と併せて示した。流速の相関係数について，99% の信頼度で有意な場合を太字で示す。また，流速の相関係数と流向差の標準偏差については，他の再解析データと 99% の信頼度で有意な差がある場合，相関係数の高いもの，流向差の小さいものに下線を付している。なお，各区分においては航海数 3 未満の場合は省略した。

海域	全期間(1990-2016)						1990-1992						1993-2002						2003-2012					
	流速			流向差			流速			流向差			流速			流向差			流速			流向差		
	平均土標準偏差 (m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差 (m/s)	標準偏差 (度)	平均土標準偏差 (m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差 (m/s)	標準偏差 (度)	平均土標準偏差 (m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差 (m/s)	標準偏差 (度)	平均土標準偏差 (m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差 (m/s)	標準偏差 (度)	平均土標準偏差 (m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差 (m/s)	標準偏差 (度)	平均土標準偏差 (m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差 (m/s)	標準偏差 (度)
本州南方	N=122,230				N=2,787				N=31,664				N=61,204											
	FORA	0.370±0.351	0.856	0.819	0.182	55.7	0.182	0.194	0.360±0.342	0.836	0.794	0.188	55.8	0.397±0.374	0.875	0.852	0.181	53.2						
	3DVAR	0.340±0.328	0.813	0.726	0.191	59.7	0.203	0.203	0.326±0.314	0.814	0.709	0.182	58.7	0.366±0.350	0.830	0.756	0.195	57.1						
	NOSSH								0.325±0.326	0.766	0.694	0.209	69.6	0.372±0.361	0.820	0.771	0.207	63.7						
	ADCP	0.440±0.367				0.432±0.335			0.433±0.360					0.461±0.384										
東シナ海	N=8,988								N=1,369					N=3,142										
	FORA	0.251±0.303	0.840	0.848	0.165	72.4			0.201±0.283	0.819	0.791	0.162	90.2	0.273±0.327	0.899	0.903	0.143	70.8						
	3DVAR	0.242±0.297	0.839	0.831	0.162	73.4			0.194±0.282	0.819	0.790	0.162	88.5	0.253±0.320	0.885	0.871	0.149	73.4						
	NOSSH								0.202±0.293	0.844	0.845	0.157	91.4	0.256±0.317	0.872	0.850	0.155	72.7						
	ADCP	0.360±0.300							0.327±0.293					0.376±0.325										
黒潮領域	N=108,615								N=3,062					N=56,216										
	FORA	0.367±0.325	0.739	0.706	0.219	60.9	0.277	68.7	0.412±0.326	0.708	0.698	0.230	59.9	0.353±0.323	0.770	0.729	0.206	60.4						
	3DVAR	0.344±0.297	0.641	0.559	0.228	68.9	0.248	74.1	0.370±0.291	0.592	0.521	0.234	69.7	0.340±0.297	0.675	0.587	0.219	66.7						
	NOSSH								0.326±0.281	0.540	0.459	0.236	84.5	0.299±0.285	0.615	0.514	0.225	80.6						
	ADCP	0.419±0.340				0.488±0.390			0.454±0.331					0.407±0.341										
混合水域	N=38,997								N=4,758					N=21,477										
	FORA	0.269±0.218	0.616	0.572	0.172	65.0			0.281±0.227	0.612	0.542	0.180	72.8	0.281±0.229	0.633	0.600	0.177	63.2						
	3DVAR	0.254±0.194	0.462	0.382	0.172	76.7			0.289±0.207	0.406	0.327	0.189	83.2	0.256±0.199	0.483	0.398	0.174	72.7						
	NOSSH								0.250±0.171	0.369	0.245	0.159	89.3	0.207±0.149	0.401	0.248	0.136	79.9						
	ADCP	0.320±0.234							0.360±0.257					0.323±0.241										
瀬戸内海	N=12,220								N=3,910					N=5,292										
	FORA	0.189±0.125	0.349	0.243	0.117	71.4			0.200±0.139	0.410	0.473	0.141	70.6	0.188±0.116	0.376	0.233	0.108	70.3						
	3DVAR	0.192±0.143	0.335	0.267	0.135	81.3			0.192±0.143	0.439	0.386	0.131	83.0	0.204±0.154	0.330	0.271	0.145	80.0						
	NOSSH								0.183±0.109	0.273	0.263	0.127	87.3	0.173±0.110	0.244	0.144	0.107	77.9						
	ADCP	0.279±0.179							0.260±0.161					0.291±0.187										
日本海	N=8,900								N=3,477					N=5,292										
	FORA	0.123±0.090	0.438	0.307	0.081	92.0			0.115±0.082	0.419	0.306	0.075	99.4	0.115±0.082	0.419	0.306	0.075	99.4						
	3DVAR	0.130±0.096	0.313	0.234	0.091	95.7			0.131±0.100	0.185	0.164	0.099	99.6	0.123±0.094	0.396	0.328	0.086	97.2						
	NOSSH								0.169±0.128					0.169±0.113										
	ADCP	0.185±0.128																						

第3表 海域別、期間別の各再解析データとADCPデータとの比較結果(続き)

海域	全期間(1990-2016)						1990-1992						1993-2002						2003-2012						
	流速			流向差			流速			流向差			流速			流向差			流速			流向差			
	平均土標準偏差(m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差(m/s)	標準偏差(度)	平均土標準偏差(m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差(m/s)	標準偏差(度)	平均土標準偏差(m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差(m/s)	標準偏差(度)	平均土標準偏差(m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差(m/s)	標準偏差(度)	平均土標準偏差(m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差(m/s)	標準偏差(度)	平均土標準偏差(m/s)	相関係数	回帰式の標準偏差(m/s)	標準偏差(度)	
本州南方	N=99,072				N=2,702				N=21,637				N=50,549				N=2,998				N=45,658				
	FORA	0.241±0.229	0.809	0.135	60.0	0.239±0.211	0.641	0.162	62.9	0.234±0.217	0.763	0.141	61.9	0.256±0.248	0.837	0.136	57.8	0.243±0.240	0.787	0.148	61.3	0.240±0.231	0.782	0.144	67.0
	3DVAR	0.226±0.219	0.750	0.145	63.6	0.212±0.192	0.627	0.149	59.1	0.211±0.199	0.709	0.140	65.1	0.240±0.231	0.782	0.144	67.0	0.240±0.231	0.782	0.144	67.0	0.240±0.231	0.782	0.144	67.0
	NOSSH									0.211±0.205	0.688	0.149	72.7	0.240±0.231	0.782	0.144	67.0	0.240±0.231	0.782	0.144	67.0	0.240±0.231	0.782	0.144	67.0
	ADCP	0.301±0.227				0.305±0.206				0.297±0.219				0.312±0.238				0.312±0.238				0.312±0.238			
東シナ海	N=6,520				N=779				N=14,664				N=2,998				N=45,658				N=45,658				
	FORA	0.138±0.159	0.719	0.111	83.6	0.118±0.159	0.774	0.101	86.2	0.118±0.159	0.774	0.101	86.2	0.145±0.170	0.780	0.106	81.9	0.145±0.170	0.780	0.106	81.9	0.145±0.170	0.780	0.106	81.9
	3DVAR	0.133±0.155	0.731	0.106	79.8	0.117±0.156	0.768	0.100	83.9	0.117±0.156	0.768	0.100	83.9	0.140±0.173	0.795	0.105	74.8	0.140±0.173	0.795	0.105	74.8	0.140±0.173	0.795	0.105	74.8
	NOSSH					0.121±0.168	0.765	0.108	75.9	0.121±0.168	0.765	0.108	75.9	0.141±0.163	0.789	0.100	79.8	0.141±0.163	0.789	0.100	79.8	0.141±0.163	0.789	0.100	79.8
	ADCP	0.228±0.163				0.214±0.149				0.214±0.149				0.232±0.173				0.232±0.173				0.232±0.173			
黒潮領域	N=91,004				N=2,968				N=14,664				N=45,658				N=45,658				N=45,658				
	FORA	0.231±0.196	0.665	0.147	65.7	0.232±0.192	0.542	0.161	74.3	0.281±0.208	0.572	0.170	67.0	0.213±0.188	0.702	0.134	65.0	0.213±0.188	0.702	0.134	65.0	0.213±0.188	0.702	0.134	65.0
	3DVAR	0.222±0.190	0.564	0.157	74.2	0.212±0.167	0.555	0.138	74.7	0.251±0.191	0.443	0.171	78.2	0.213±0.184	0.615	0.145	73.1	0.213±0.184	0.615	0.145	73.1	0.213±0.184	0.615	0.145	73.1
	NOSSH					0.216±0.170	0.395	0.156	88.0	0.216±0.170	0.395	0.156	88.0	0.174±0.157	0.542	0.132	84.1	0.174±0.157	0.542	0.132	84.1	0.174±0.157	0.542	0.132	84.1
	ADCP	0.281±0.200				0.311±0.221				0.328±0.220				0.266±0.191				0.266±0.191				0.266±0.191			
混合水域	N=34,206				N=3,388				N=18,744				N=18,744				N=18,744				N=18,744				
	FORA	0.158±0.113	0.439	0.101	73.3	0.157±0.112	0.539	0.094	87.2	0.157±0.112	0.539	0.094	87.2	0.169±0.119	0.436	0.107	69.6	0.169±0.119	0.436	0.107	69.6	0.169±0.119	0.436	0.107	69.6
	3DVAR	0.155±0.107	0.289	0.240	84.3	0.173±0.114	0.245	0.206	91.7	0.173±0.114	0.245	0.206	91.7	0.159±0.113	0.308	0.257	81.7	0.159±0.113	0.308	0.257	81.7	0.159±0.113	0.308	0.257	81.7
	NOSSH					0.155±0.098	0.274	0.199	100.1	0.155±0.098	0.274	0.199	100.1	0.132±0.087	0.287	0.185	84.3	0.132±0.087	0.287	0.185	84.3	0.132±0.087	0.287	0.185	84.3
	ADCP	0.196±0.129				0.220±0.136				0.220±0.136				0.201±0.135				0.201±0.135				0.201±0.135			
親潮域	N=11,172				N=3,023				N=5,253				N=5,253				N=5,253				N=5,253				
	FORA	0.124±0.087	0.310	0.226	74.3	0.141±0.095	0.317	0.248	69.6	0.141±0.095	0.317	0.248	69.6	0.118±0.080	0.317	0.202	76.4	0.118±0.080	0.317	0.202	76.4	0.118±0.080	0.317	0.202	76.4
	3DVAR	0.132±0.103	0.279	0.241	89.8	0.131±0.106	0.305	0.265	89.1	0.131±0.106	0.305	0.265	89.1	0.140±0.109	0.266	0.232	87.3	0.140±0.109	0.266	0.232	87.3	0.140±0.109	0.266	0.232	87.3
	NOSSH					0.127±0.083	0.213	0.146	91.5	0.127±0.083	0.213	0.146	91.5	0.112±0.077	0.255	0.155	84.7	0.112±0.077	0.255	0.155	84.7	0.112±0.077	0.255	0.155	84.7
	ADCP	0.193±0.119				0.199±0.122				0.199±0.122				0.200±0.126				0.200±0.126				0.200±0.126			
日本海	N=6,835				N=6,835				N=6,835				N=6,835				N=6,835				N=6,835				
	FORA	0.030±0.020	-0.029	0.020	151.0	0.030±0.020	-0.029	0.020	151.0	0.030±0.020	-0.029	0.020	151.0	0.028±0.019	-0.003	0.019	134.5	0.028±0.019	-0.003	0.019	134.5	0.028±0.019	-0.003	0.019	134.5
	3DVAR	0.032±0.023	0.038	0.020	143.6	0.032±0.023	0.038	0.020	143.6	0.032±0.023	0.038	0.020	143.6	0.035±0.026	0.049	0.027	144.0	0.035±0.026	0.049	0.027	144.0	0.035±0.026	0.049	0.027	144.0
	NOSSH					0.032±0.023	0.038	0.020	143.6	0.032±0.023	0.038	0.020	143.6	0.035±0.026	0.049	0.027	144.0	0.035±0.026	0.049	0.027	144.0	0.035±0.026	0.049	0.027	144.0
	ADCP	0.074±0.044				0.074±0.044				0.074±0.044				0.075±0.046				0.075±0.046				0.075±0.046			

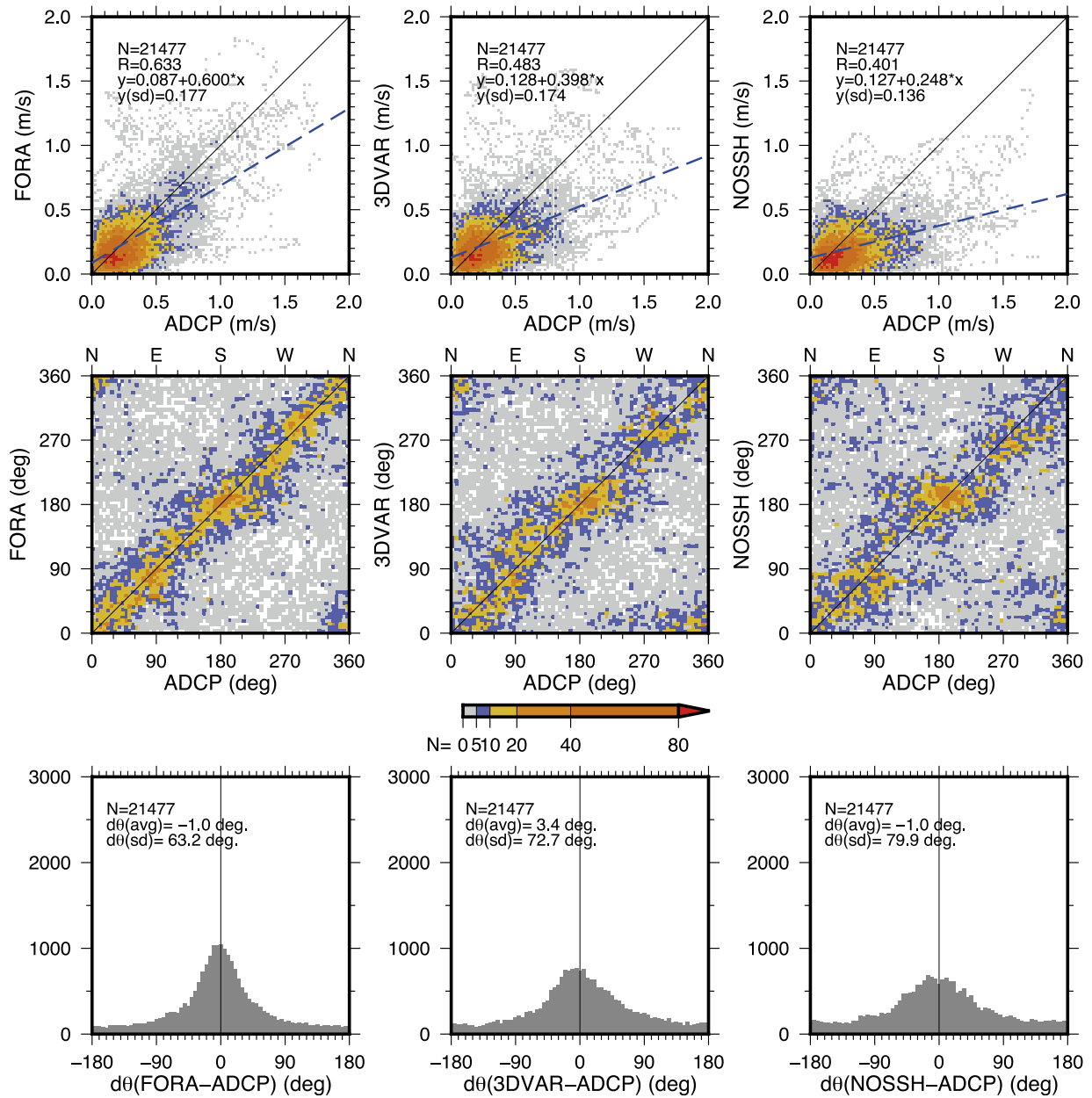
(a) 黒潮続流域 (100 m, 2003-2012)



第2図 各再解析データと ADCP データとの海域別比較結果

FORA (左列), 3DVAR (中列), NOSSH (右列) の3種類の再解析データと ADCP データとの比較結果. 流速の散布図 (上段), 流向の散布図 (中段) 及び流向差のヒストグラム (下段) を示す. 散布図でのデータ数は, 流速は 0.02 m/s ごと, 流向は 5 度ごとにカウントしてカラーバーの色で表している. 流速の散布図の青点線は一次回帰線を表す. (a) 黒潮続流域, 2003-2012 年, (b) 混合水域, 2003-2012 年. 海域の範囲は第1図を参照のこと.

(b) 混合水域 (100 m, 2003-2012)



第2図 各再解析データと ADCP データとの海域別比較結果 (続き)

ことにもよると考えられる。後者は、現状の現場観測データの空間分布は、強い流れをもたらす水平勾配の大きな密度フロントを解像するには粗いことを示唆している。

流向差のヒストグラム（図下段）はいずれも0付近に峰があって差が大きくなるほど八の字型に頻度が減少している。FORAが最も峰が高く、NOSSHは峰が低く差が大きくなるにつれての頻度の減少も他に比べてゆるやかである。流向の散布図（図中段）で流向別に見ると、いずれの再解析データも北東から東向きでADCPデータとよく揃っており、黒潮続流の再現性が良いことを示唆している。FORAはそれ以外の流向でも $y=x$ の近傍によく集まっているが、3DVARではややばらつきが大きくなり、NOSSHではばらつきが大きく特に南東から南向きで顕著である。

一方、黒潮や黒潮続流のような強い海流のない混合水域（第2図b）では、流速0.5 m/sよりも強い流速でのADCPデータとの対応はFORAが最も良いことが明瞭にわかる（図上段）。また、およそ0.5 m/s以下についても注意深く見れば3DVARとNOSSHはADCPデータに比べて流速頻度が弱い側に偏っている。流向の散布図（図中段）をみると、いずれの再解析データでも南向きがやや卓越していてADCPデータとの対応が良い。南向き以外では、FORAは $y=x$ の近傍に集まっていて偏りが少ないが、3DVAR及びNOSSHとも流向によって差があり、3DVARではADCPの流向（グラフの横軸）でおよそ南西や北西向きで、NOSSHではさらに南東から東向きについてもばらつきが大きい。流向については、本州南方においてもFORAは流向によらずADCPデータとの対応が良いが、3DVARとNOSSHでは南向きと北向きでの流向のばらつきが大きくなっている（図略）。このようなFORAと3DVAR及びNOSSHとの違いは、異なる期間（1993-2002年）や深度（400 m深）でも同様の傾向であった。

なお詳細は略するが、海洋の健康診断表で提供されている50 m深で同様に流速・流向差の統計値を求めると、100 m深での統計値とほぼ同じ結果となった。

3.2 観測事例による再現性の比較

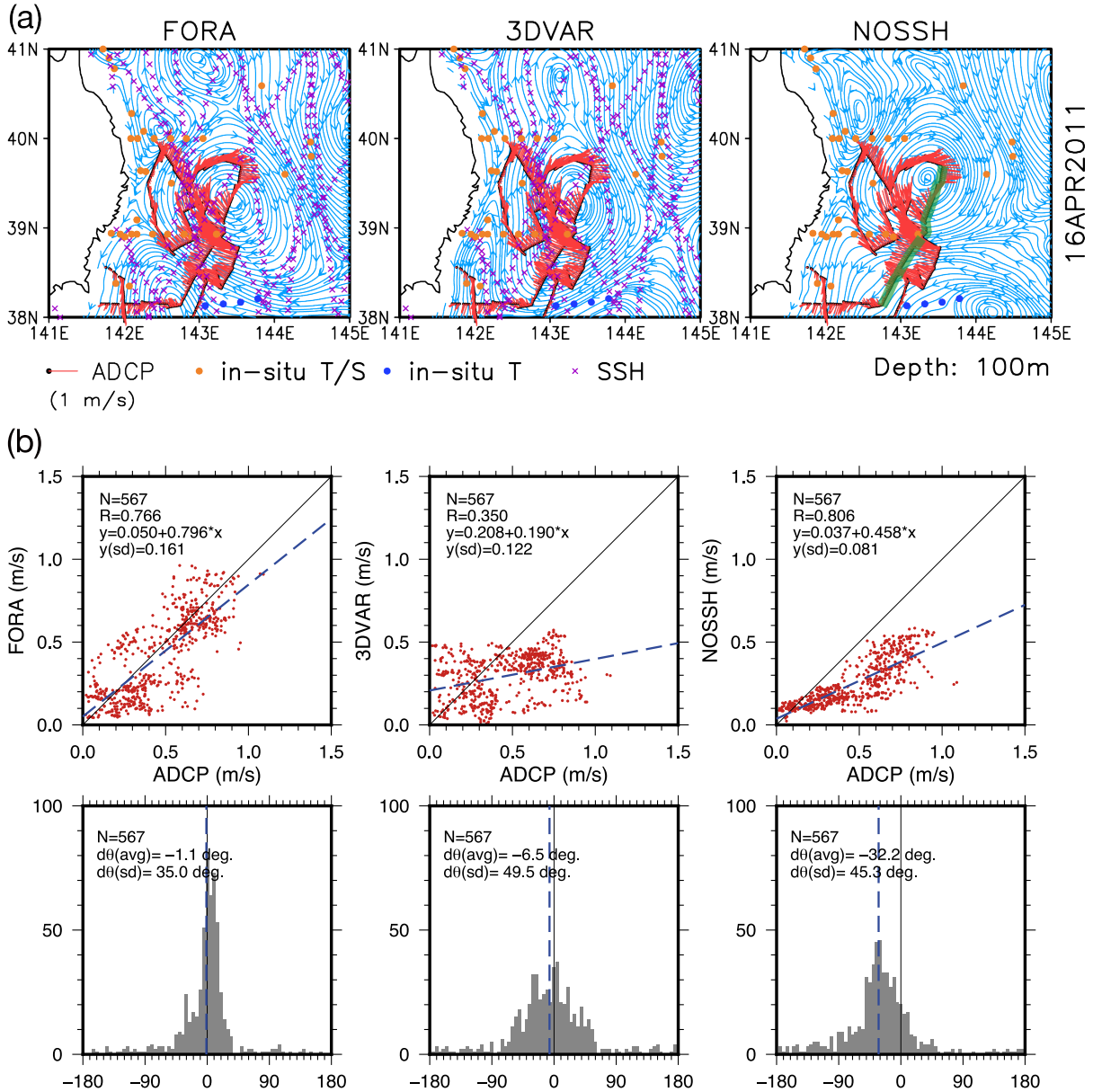
比較的小規模なスケールでの再現性の違いをみるため、個別の観測事例により各再解析データを比較する。海洋気象観測船は主に海盆規模の海流を横切るように設定された定線に沿って観測を実施しているため、短期間に水平方向に広がりを持ってADCP観測が実施される例は多くない。ここでは比較的狭い海域で面的にADCP観測を実施していた2011年4月三陸沖における啓風丸KS11-03航海のデータによる比較結果を示す。気象庁の旬平均表層水温解析によれば三陸沖の39°N, 143°E付近に約100 kmの大きさの暖水渦があり、啓風丸はちょうどこの渦の周辺で海底地震計の回収作業を実施していた。第3図aに100 m深の流速分布、第3図bに第3図aの範囲のデータについての流速の散布図と流向差のヒストグラムを示す。また、第4図に143°E付近の南北方向の航跡（第3図a右パネル中の太緑線）に沿った流速の鉛直断面を示す。いずれの再解析データでも三陸沖の暖水渦が表現されているが渦の中心位置や形状はやや異なっており、平面分布ではFORAがADCP観測結果と最も良く合っている。3DVARは渦の中心位置はFORAとほぼ同じだが、この渦の南から南西部でADCPの流向との差が大きい。FORAは流速の相関が高く、回帰線の傾きも約0.8と大きく、流向差も0の近傍に集中している。FORAによる流速の鉛直断面もADCP観測結果と分布が良く似ており、この例では流速場を非常によく再現していることがわかる。NOSSHは、流速の相関は高いが回帰線の傾きが小さく、流向差のヒストグラムの峰は高いが偏りも大きかった。

3.3 現場観測データとの比較結果のまとめ

前項までの評価結果は以下のようにまとめられる。1) いずれの再解析データにおいても流速場は日本海の400 m深を除き概ね良く再現されていて、本州南方、東シナ海、黒潮続流域という西岸境界流を含む海域で特に再現性が良好である。このような海域による違いは海況の特徴による差が大きいと考えられ、密度の変化に水温が支配的である黒潮・黒潮続流についてはFORA、3DVAR、

NOSSH のいずれにおいても非常に良く再現できていることを示している。一方、日本海の約 300 m 以深では水温や塩分などがほぼ均質な日本海

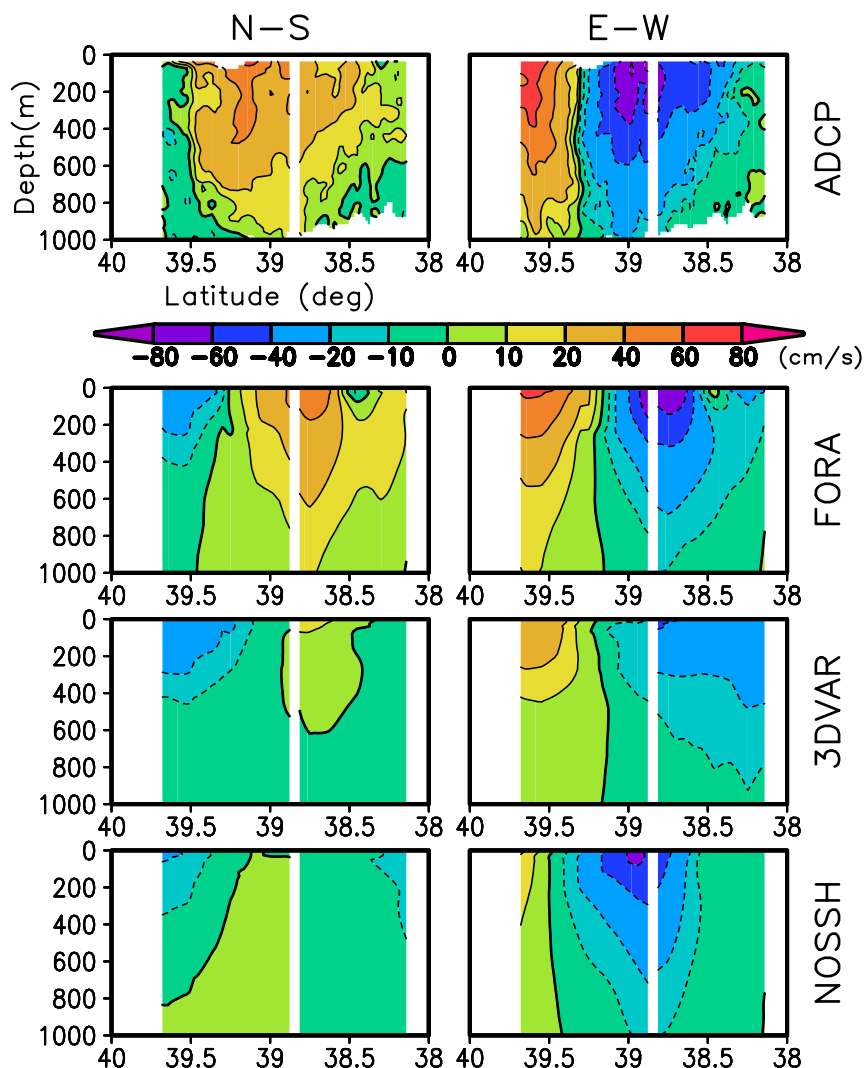
固有水で占められていて、海面高度で推定できる表層の地衡流とは異なる力学バランスで流れが決まっているために FORA, 3DVAR, NOSSH のい



第3図 各再解析データと啓風丸 KS11-03 航海における ADCP 観測結果との比較

(a) 100 m 深での ADCP 流速ベクトル (赤棒線, 黒丸が船位を表す), と FORA (左), 3DVAR (中), NOSSH (右) の3種類の再解析データによる流線(青). ADCPの観測期間は2011年4月11-20日, 再解析データは4月16日の日平均. データ同化に用いられた2011年4月11-20日の観測データの位置(オレンジの丸:現場水温及び塩分, 青丸:現場水温, 紫の斜め十字:衛星による海面高度偏差)を併せて示してある. 第4図の断面図の位置を, NOSSHのパネルの太緑線で示す.

(b) FORA (左列), 3DVAR (中列), NOSSH (右列) の3種類の再解析データと ADCP データとの比較結果. ADCPの観測期間は2011年4月11-20日, 再解析データは, ADCP観測点を取り囲む4つの格子点での日平均値を直線内挿した. 流速の散布図(上段)の青点線は一回帰線, 流向差のヒストグラム(下段)の青点線は流向差の平均を表す.



第4図 各再解析データ及び啓風丸 KS11-03 航海における ADCP 観測による流速の鉛直断面図

143° E 付近の南北方向の航跡 (第3図 (a) 右パネル中の太緑線) に沿った海面から 1000 m 深までの流速の鉛直断面図. 北側は 2011 年 4 月 13-14 日, 南側は 18 日に観測しており, 上から ADCP 観測結果, FORA, 3DVAR, NOSSH について示す. 左パネルは南北成分, 右パネルは東西成分を示す.

ずれにおいてもこの深度での流速場の再現はほぼ困難なことを示している. 2) 3つの再解析データ間でその再現性を比較すると, 流速, 流向とも FORA の再現性が最も良く, 特定の流向への偏りも少ない. 個別の観測例でも FORA の良好な再現性が示された. これは, 4次元変分法により黒潮・黒潮続流の蛇行や中規模渦など比較的小さな時空間規模の現象の再現性が向上していることを示していると考えられる. 東シナ海及び日本海を除き, 概ね 3DVAR の方が NOSSH よりも流速の相関係数が高く流向差の標準偏差が小さいことから, 同化手法の違いよりも衛星海面高度計データ

の同化の有無の方が同化結果に対するインパクトが大きいのと考えられる. 3) 1993-2002 年と 2003-2012 年を比較すると, 本州南方, 東シナ海, 黒潮続流域においてはいずれも後の期間の方が相関係数が高くなっていた. これらの海域では Argo 計画等による現場観測データの増加が再現性の向上に寄与していると思われる. 4) 東シナ海においては3つの再解析データ間に有意な差はほぼみられなかった. 東シナ海では水深が浅い海域が多いため, いずれの再解析データでも海面高度計データが同化されているのはほぼ沖縄トラフ周辺に限られている. また黒潮は大陸棚縁辺に沿って流

れていて流路の変動が小さく、衛星海面高度計データは、例えば TOPEX/Poseidon や Jason シリーズでは 1 サイクル 10 日間で中緯度での経度方向の軌道間が約 250 km、と時空間的に疎であることから、東シナ海での細かな流路の変動を捉えきれていないと推測される。さらに、FORA 及び NOSSH の作成に用いた 4 次元変分法スキームでは、モデルの解像度と物理過程が沿岸域では不十分であることを考慮して、東シナ海の大陸棚等の水深が浅い海域では観測時刻を同化ウインドウの初期時刻とみなして同化している。これにより 3 次元変分法で同化した場合と同等の同化修正がなされることになる。したがって、東シナ海の大陸棚上においてはいずれの再解析データも同化手法に実質的な差がない。これらのために、3 つの再解析データ間の差が小さくなったと考えられる。

4. 海洋変動の再現性

本節では、再解析データを海洋現象・気候現象の解析に用いる際の参考となるよう、流速場の変動と関連の深い海洋変動の再現性を、3 つの再解析データを比較することで評価する。

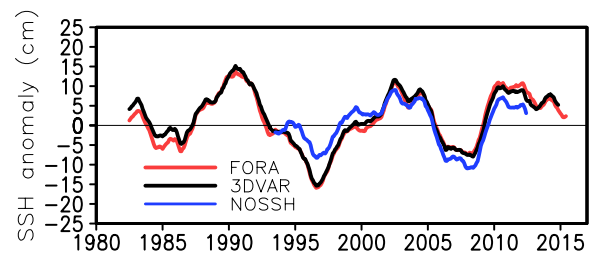
4.1 黒潮続流域における変動の再現性

黒潮続流域の流速場はどの再解析データでも観測データとの相関が高い一方、再解析データ間の差も大きかった。以下、流速場と関連の深い海洋変動の指標などを比較することでデータ間での再現性の違いについて考察する。

黒潮続流域は、北太平洋で中規模渦の活動度が最も高いとともに、年々から十年規模での変動も大きい特徴がある。衛星海面高度計データやモデルの結果を用いた研究により、黒潮続流とその南側の再循環から構成される黒潮続流システムは十年規模で安定期と不安定期の間で変動していることが明らかになっている (Qiu and Chen, 2005, 2010; Taguchi *et al.*, 2007 など)。安定期には黒潮続流の東向き流量は増加して流路は北偏し南

側の再循環が強化して渦運動エネルギー (Eddy Kinetic Energy⁴; 以下 EKE と記す) は減少し、不安定期にはこれらが逆の傾向となる。また、このような長周期の変動は太平洋中央域の風応力の十年規模変動によってもたらされていることが示されている (Qiu, 2003; Taguchi *et al.*, 2007 など)。

Qiu *et al.* (2014) は黒潮続流の南側の再循環域にあたる 31°-36° N, 140°-165° E の領域平均海面高度偏差が、上述の黒潮続流システムの十年規模変動をよく示す指標となることを示した。この指標の極大 (極小) 期は、黒潮続流システムの安定 (不安定) 期に対応する。この指標を 3 種類の再解析データにより求めた結果を第 5 図に示す。FORA と 3DVAR による時系列は 1987 年頃以降ほぼ一致している。平均した領域の空間規模では同化している衛星海面高度計のデータによって海面高度場の変動がよく再現されているためと考えられる。衛星海面高度計データを含まない NOSSH は 2001 年頃までは他のデータと差が大きいが変動傾向はよく合っており、期間全体で極大年 / 極小年は一致している。2001 年頃まで差が大きい理由には、現場観測データの数や分布の変化が考えられる。黒潮続流域において海洋内部のプロファイルが得られている現場観測データの数の推移 (第 6 図) を見ると、日本列島に近い 150° E



第 5 図 黒潮続流域における海面高度偏差

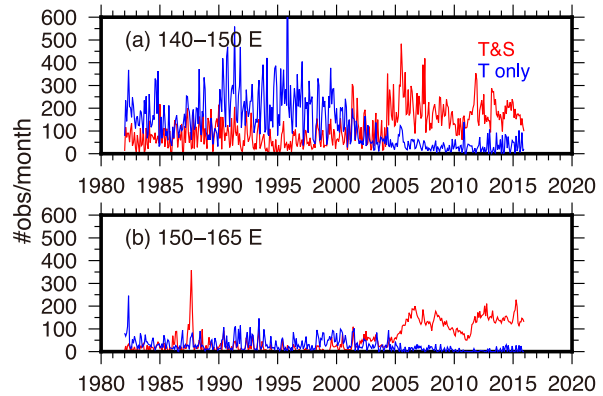
黒潮続流の再循環域 (31°-36° N, 140°-165° E; 第 7 図左下図の点線枠内) で領域平均した海面高度偏差の時系列 (赤: FORA, 黒: 3DVAR, 青: NOSSH)。偏差はそれぞれの 1993-2012 年平均からの差である。なお月平均値を 13 か月移動平均して平滑化した。

⁴ 流速の平均からの差により求めた運動エネルギー。すなわち、 $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$ であるとき、 $EKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2)$ である。本稿では、 \bar{u} , \bar{v} に 1993-2012 年の 20 年間平均を用いた。

以西のデータはどの期間も比較的多いが、150° E 以東になるとかなり少なく 2004 年頃によく増加している。塩分を含むデータもこの時期から増加しており、2000 年に開始した Argo 計画によって東方の海域で観測数が増加していることがわかる。Argo 計画以前の現場観測データは海洋観測船や篤志観測船による航路沿いに集中していたが、Argo フロートによる観測データは面的にばらけていることから、NOSSH のように衛星海面高度計データ無しでも近年は領域平均海面高度偏差の変動をよりよく再現できるようになったと考えられる。

領域平均海面高度偏差（第 5 図）の極大期である 1990 年、2002 年、2011 年と、極小期である 1984 年、1996 年、2007 年の黒潮続流の流路と海面高度偏差の各再解析データによる分布を第 7 図に示す。極大期には黒潮続流の流路は北偏して流路変動は小さく続流南側の海面高度は正偏差となる一方、極小期には流路変動は大きく続流南側の海面高度は負偏差となるという、それぞれ安定期と不安定期の特徴をよく示している。NOSSH の海面高度偏差の分布は FORA 及び 3DVAR とよく似ているが、続流南側の偏差の絶対値は小さい傾向がある。また、流路については、2007 年には大きな差は見られないが、1996 年は FORA 及び 3DVAR と比べて流路は北側に偏っていた。これは 1996 年には現場観測が少なく黒潮続流の蛇行や続流南側を西進する中規模渦まで解像することは難しかったものが、2007 年には Argo 計画の進展により海盆規模で現場観測データが増加しかつ遍在するようになったことで、これらをよく特定できるようになったためと考えられる。

2003-2012 年の十年平均での EKE の水平分布（第 8 図）を再解析データ間で比較すると、3DVAR は FORA に比べて黒潮続流域の 30°-40° N, 140°-160° E でパッチ状に小さい海域が多くそれ以东ではやや大きい傾向があるが、これ以外の海域では大きな差は見られない（第 8 図 e）。3DVAR では同化により 5 日間の平均場の差が小さくなるよう修正しているため、流路の蛇行や西進してくる中規模渦のように時空間的に小さな現象がやや平滑化されてしまうことが差の要因の一つとし



第 6 図 現場観測のデータ数の時間推移

黒潮続流域の (a) 30°-40° N, 140°-150° E 及び (b) 30°-40° N, 150°-165° E における月ごとの現場観測データ数（赤：水温及び塩分，青：水温のみ）。ただし、観測深度が 400 m を超えるものに限った。

て考えられる。一方、NOSSH では FORA に比べて明らかに黒潮続流域全体にわたって EKE は小さく、さらに台湾東方から琉球列島東方にかけての琉球海流系周辺、20° N に沿った亜熱帯反流域、カムチャッカ半島南方から千島列島東方にかけての海域でも明瞭に小さくなっている（第 8 図 f）。これらは平均的な海流は弱いが中規模渦などによる変動が大きい海域であろう。10 年平均 EKE の黒潮続流域での極大域である 32°-38° N, 141°-153° E について、領域平均の時系列（第 9 図 a）を見ると、FORA と 3DVAR はいずれも 1993 年以降について Qiu *et al.* (2014) が衛星海面高度計データにより特定した黒潮続流流路の安定期に EKE が大きい傾向が明瞭である。しかし NOSSH では安定期とそれ以外の差は明瞭ではない。また同化される衛星海面高度計データの無い 1983-1992 年の FORA の 10 年平均場（第 8 図 d）は NOSSH の 2003-2012 年の 10 年平均場（第 8 図 c）とよく似ている。黒潮続流域での領域平均 EKE も、1992 年以前の変動幅は 1993 年以降に比べて小さく NOSSH と同程度である（第 9 図 a）。

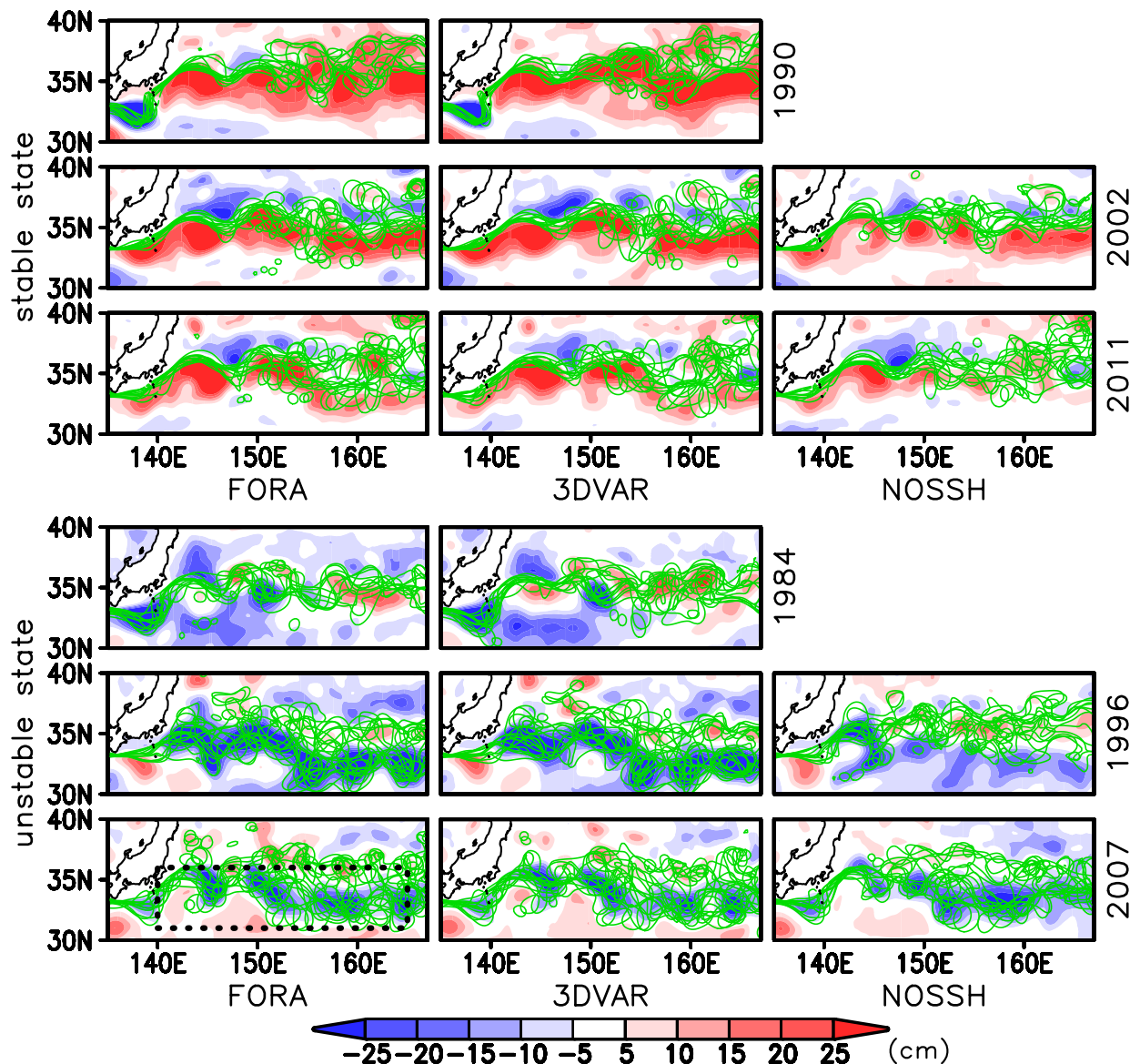
以上の結果から、いずれの再解析データでも Qiu *et al.* (2014) に従った領域平均海面高度偏差を指標とすることで黒潮続流システムの十年規模変動をよく捉えることができること、Argo 計画の進展による現場観測データの充実により現場観

測データのみでも黒潮続流不安定期の流路変動をよく表現できるようになってきたことがわかった。しかし、EKEの平均値やその変動については、近年現場観測データが充実してきたとはいえ、衛星海面高度計データの有無による差が大きかった。これは現在の観測密度の現場観測データでも捉えられない小さな時間・空間規模の変動を衛星海面高度計が捉えていることを示している。1992

年以前の黒潮続流域のデータを用いるときには、EKEや中規模渦などの再現性が1993年以降とは異なっていることに十分留意する必要がある。

4.2 本州南方域における変動の再現性

本州南方では、黒潮続流域に比べると再解析データ間の差は小さく、いずれの再解析データでも観測データとの相関が非常に高い(第3表)。本



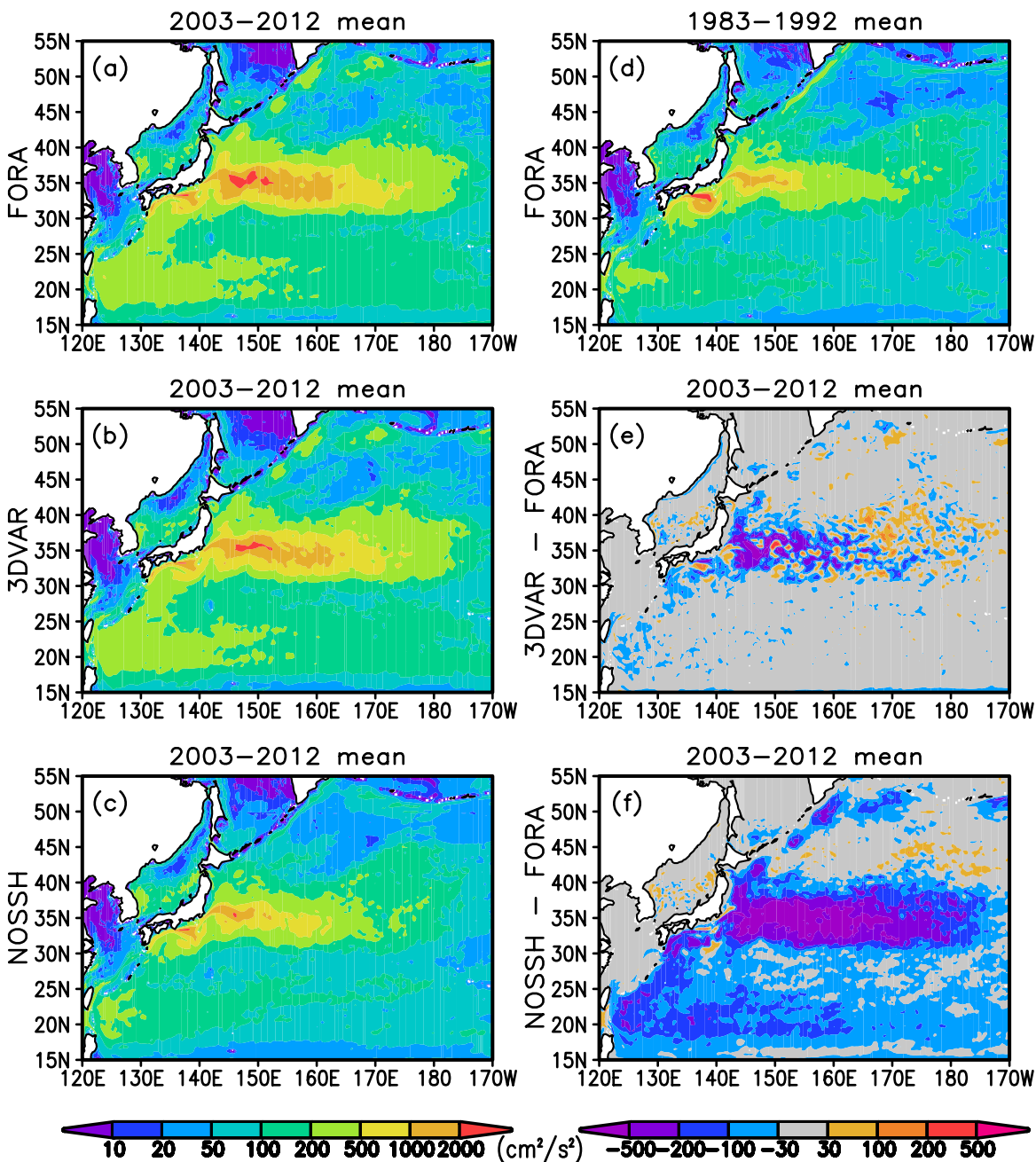
第7図 黒潮続流の流路と海面高度偏差

月平均黒潮続流の流路を緑線で、年平均海面高度偏差を陰影で示す。黒潮続流流路の安定期(1990, 2002, 2011年)及び不安定期(1984, 1996, 2007年)の例。偏差はそれぞれの1993-2012年平均からの差である。安定期と不安定期の分類は第5図を参照して判断した。

州南方における黒潮の流路は大蛇行型と非大蛇行型の2つに大別され、それぞれ1年から十年規模で持続する (Kawabe, 1987). 非大蛇行流路から大蛇行流路への移行は、九州南東方で生じた小蛇行が発達しつつ東進することによってなされる. このような流路の変動は日本南岸の潮位に影響を

及ぼし、特に大蛇行期間には東海から関東地方沿岸で潮位の上昇がみられることから、異常潮位によって沿岸の低地で浸水などの被害が生ずる可能性が高くなる.

流路の変動による流速場の変動を比較するため、30°-34° N, 131°-140° E の領域平均 EKE を各



第8図 渦運動エネルギーの水平分布

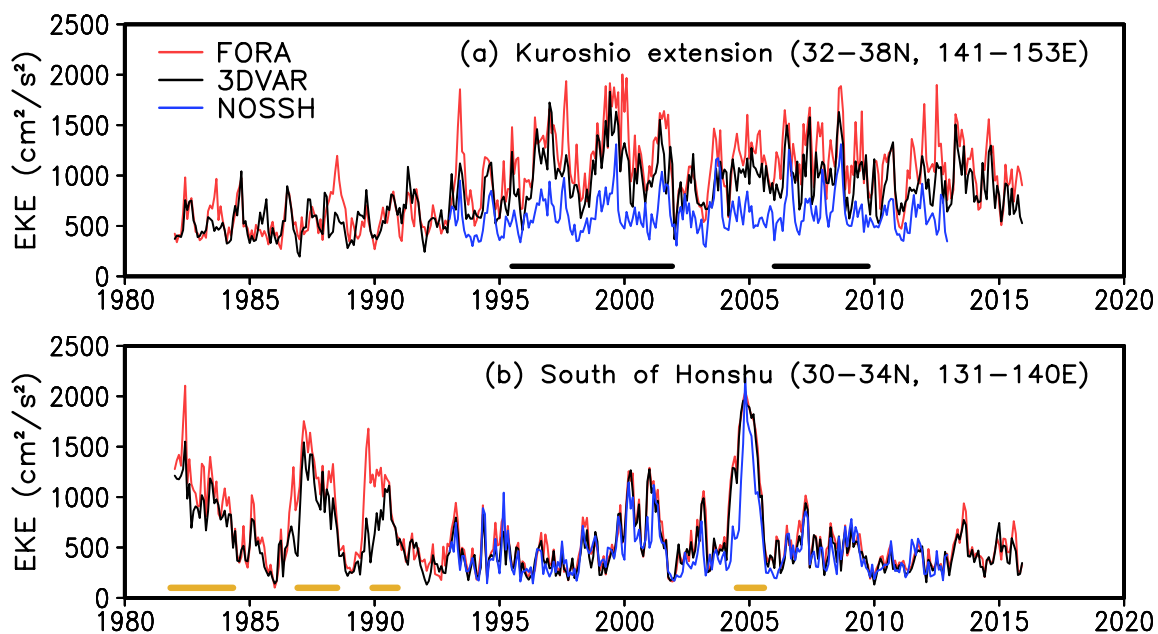
再解析データの月平均海面流速から求めた渦運動エネルギー (EKE, 単位: cm^2/s^2) の10年平均値. EKEの算出には各格子点での流速の1993-2012年平均からの偏差を用いた. 平均期間は(d)は1983-1992年, それ以外は2003-2012年. (a)及び(d)FORA, (b)3DVAR, (c)NOSSH, (e)3DVARとFORAの差, (f)NOSSHとFORAの差.

再解析データで求めた (第 9 図 b). どの再解析データでも黒潮大蛇行期間には EKE が大きい. これは, 本州南方では黒潮の流路や四国沖の再循環の位置の変動は小さいことから通常 EKE は小さく, 黒潮の蛇行などが生じた場合に流速の平均からの差が大きくなって EKE が大きくなることを示している. 黒潮続流域とは異なって, EKE の極大期の大きさに衛星海面高度計データの同化の有無による顕著な差は見られない. 大蛇行への移行期には再解析データ間でややばらつきがあるが, どのケースでも FORA が最も EKE の増加が早い. これは, 非大蛇行接岸流路から大蛇行流路への移行をもたらす, 九州南東で発生した小蛇行の東進と東海沖での発達, 再解析データでの再現性の違いを示している可能性がある. 一方, 大蛇行から非大蛇行への移行期には再解析データ間の差は小さい. 個々の細かなピークは FORA が最も大きいことが多いがその差は小さい. 再解析データ間の差が小さいのは, 黒潮続流域に比べて黒潮流路の南北変動は限られていることや, 日本近海では現場観測データがどの期間でも多く

(Usui *et al.*, 2017 の Fig. 3 参照), 現場観測データのみでも流路変動をよく捉えられているためと考えられる.

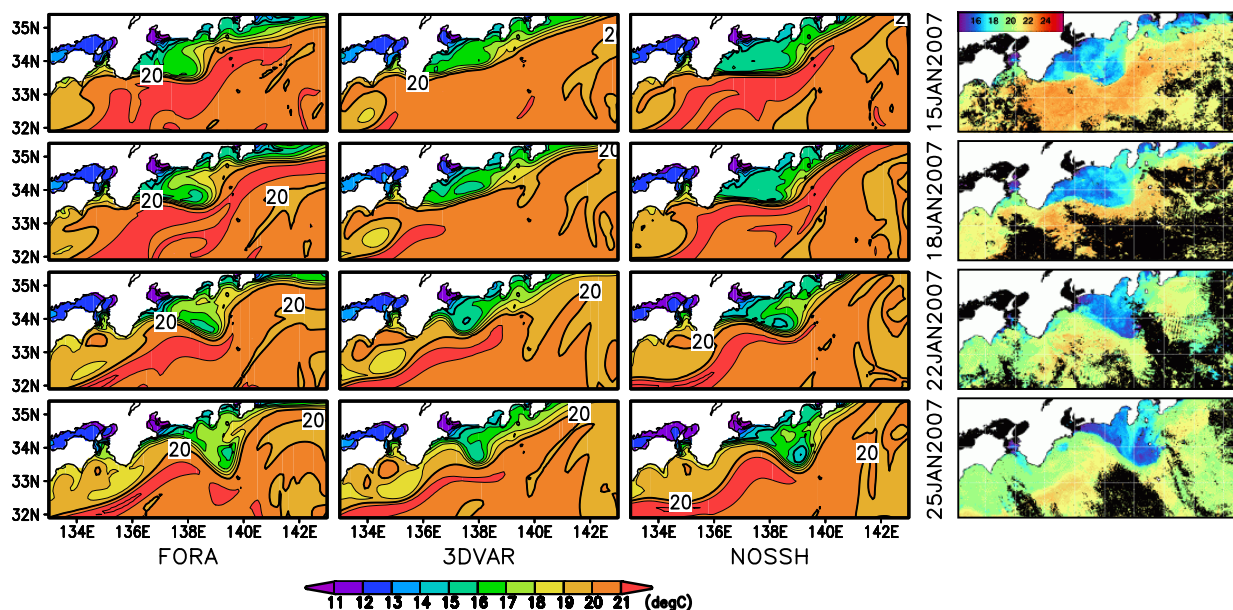
次に, 本州南方での流路の細かな変動の再現性をみるため, 衛星による海面水温分布と比較した. ここでは 2007 年 1 月の例を第 10 図に示す. 衛星海面水温分布図によれば, 1 月中旬に東海沖にあった冷水域が黒潮の小蛇行の東進に伴って 2 月上旬には伊豆海嶺東側に移動していた (第 10 図右列). FORA と NOSSH はこの状況をよく再現している (第 10 図左列と中右列) が, 3DVAR では 1 月 18 日時点でも小蛇行の発生ははっきりせず, その後の谷の位置は東寄りで東進も明瞭ではなかった (第 10 図中左列). 同化した現場データはそれほど多く無いにもかかわらず (図略), 衛星海面高度計データが同化されていない NOSSH でもこのような変動をよく再現できていたのは, 短周期変動の再現性向上に対する 4 次元変分法の有効性を示す好例の一つと言える.

以上のように, 本州南方では黒潮続流域とは異なって衛星海面高度計データの有無による明瞭な



第 9 図 黒潮続流域及び本州南方における渦運動エネルギーの時間推移

FORA (赤), 3DVAR (黒), NOSSH (青) の月平均海面流速から求めた渦運動エネルギー (EKE, 単位: cm^2/s^2). EKE の算出方法は第 8 図と同じ. (a) 黒潮続流域は $32^\circ\text{--}38^\circ\text{N}$, $141^\circ\text{--}153^\circ\text{E}$, (b) 本州南方は $30^\circ\text{--}34^\circ\text{N}$, $131^\circ\text{--}140^\circ\text{E}$ の範囲の平均値. (a) には Qiu *et al.* (2014) が衛星海面高度計データにより特定した黒潮続流流路の安定期を黒太線で, (b) には気象庁の定義による黒潮大蛇行期間を黄色線で示した.



第10図 東海沖における小蛇行に伴う海面水温の時間推移

左から、FORA、3DVAR、NOSSH及び衛星による日別海面水温の分布。衛星による海面水温分布図は、神奈川県水産技術センターのNOAA人工衛星画像データベース (<http://www.agri-kanagawa.jp/suisoken/noaa2/noaa2.asp>) から取得した黒潮域の1日合成画像。

ギャップは見られなかった。黒潮流路等の再現性の期間による差は小さいものと考えられる。大蛇行への移行期には再解析データ間でややばらつきがあり、FORAが最もEKEの増加が早いことから、大蛇行への移行をもたらす小蛇行の東進と発達をFORAが最もよく捉えて再現していることを示唆している。今後、個々の事例について詳しく検討することが望ましい。また、東海沖の例では、4次元変分法を採用したことで時空間的に小規模な流路の細かな変動まで再現性が向上していることが示された。これらから、1992年以前のデータも1993年以降と大きな区別なしに利用できそうである。さらに、異常潮位の現象は1970年代にも発生しており、日本周辺の現場観測データは1970年代も1980年代と比較して遜色ない程度あることから、日本周辺海域に関してはFORAよりも期間をさかのぼって再解析することも有用であることが示唆される。

5. まとめ

瀬戸内海監視予測システムの一部となる北西太平洋域4次元変分法海洋データ同化システムによ

って作成した長期再解析データFORAについて、その流速場の再現性を海洋気象観測船による100m深と400m深の現場観測データと比較することで検証した。日本海の400m深を除き再解析データの流速場は概ね良く再現されていて、本州南方、東シナ海、黒潮続流域という西岸境界流を含む海域で特に再現性が良好であった。同化手法や同化データの違う再解析データと比較することで、流速、流向ともFORAの再現性が最も良く、特定の流向への偏りも少ないこと、個別の観測例でもFORAの再現性が良好であることが示された。これは、4次元変分法により黒潮・黒潮続流の蛇行や中規模渦など比較的小さな時空間規模の現象の再現性が向上していることを示していると考えられる。ただし、東シナ海においては比較した3つの再解析データ間に有意な差はほぼみられなかった。

流速場の再現性が高いが再解析データ間の違いが大きかった黒潮続流域での十年規模変動は、いずれの再解析データでもQiu *et al.* (2014) に従った領域平均海面高度偏差を指標とすることでよく捉えることができていた。しかし、EKEの平均

値やその変動については、近年現場観測データが充実してきたとはいえ、衛星海面高度計データの有無による差が大きかった。1992年以前の黒潮続流域のデータを解析に用いるときには、EKEや中規模渦などの再現性が1993年以降とは異なっていることに十分留意する必要がある。一方、本州南方海域では黒潮続流域とは異なって衛星海面高度計データの有無による明瞭なギャップは見られず、黒潮流路等の再現性の年代による差は小さいものと考えられる。また、4次元変分法を採用したことで時空間的に小規模な流路の細かな変動まで再現性が向上していることが示された。

謝辞

検証に用いた海洋気象観測船の表層海流計データは本庁海洋気象課海洋観測グループから、本庁運用の3次元変分法を用いたデータ同化システムによる再解析データは本庁海洋気象課海洋気象情報室海況班から、それぞれ提供いただいた。前者については、長年にわたり現場観測にあたられてきた海洋気象観測船の乗組員・観測員の皆さまにも深く感謝する。また、第4.2項で比較に用いた衛星による海面水温分布図は、神奈川県水産技術センターのNOAA人工衛星画像データベース (<http://www.agri-kanagawa.jp/suisoken/noaa2/noaa2.asp>) から取得したものである。

参考文献

- Egbert, G.D. and S.Y. Erofeeva (2002) : Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 183-204.
- 平原幹俊・檜垣将和・桜井敏之・小林健作・小林熙 (2017) : 瀬戸内海監視予測システムの概要. *測候時報*, **84**, 33-59.
- 石崎士郎・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲地政文 (2009) : MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築. *測候時報*, **76**, 特別号, S1-S15.
- Joyce, T. M. (1989) : On in situ "Calibration" of shipboard ADCPs. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **6**, 169-172.
- Kawabe, M. (1987) : Spectral properties of sea level and time scale of Kuroshio path variations. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **43**, 111-123.
- 気象庁 (1999) : 海洋観測指針 (第1部), 129pp.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, 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, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Pollard, R., and J. Read (1989) : A method for calibrating shipmounted acoustic doppler profilers and the limitations of gyro compasses. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **6**, 859-865.
- Qiu, B. (2003) : Kuroshio Extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: Responses and potential feedback. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 2465-2482.
- Qiu, B. and S. Chen (2005) : Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal timescales. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 2090-2103.
- Qiu, B., and S. Chen (2010) : Interannual-to-decadal variability in the bifurcation of the North Equatorial Current off the Philippines. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 2525-2538.
- Qiu, B., S. Chen, N. Schneider, and B. Taguchi (2014) : A coupled decadal prediction of the dynamic state of the Kuroshio Extension system. *J. Climate*, **27**, 1751-1764.
- 坂本圭・山中吾郎・辻野博之・中野英之・浦川昇吾・碓氷典久・平原幹俊・小川浩司 (2015) : 日本沿岸海況監視予測システムに向けた瀬戸内海モデルの開発. *測候時報*, **82**, 特別号, S55-S66.
- Taguchi, B., S.-P. Xie, N. Schneider, M. Nonaka, H. Sasaki, and Y. Sasai (2007) : Decadal variability of the Kuroshio Extension. Observations and an eddy-resolving model hindcast. *J. Climate*, **20**, 2357-2377.
- Tsujino H, N. Usui, and H. Nakano (2006) : Dynamics of Kuroshio path variations in a high-resolution GCM. *J. Geophys Res* **111**:C11001. doi:10.1029/2005JC0031180.
- Usui, N., Y. Fujii, K. Sakamoto, and M. Kamachi (2015) : Development of a four-dimensional variational

assimilation system toward coastal data assimilation around Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 3874-3892, doi:10.1175/MWR-D-14-00326.1.

Usui, N., T. Wakamatsu, Y. Tanaka, N. Hirose, T. Toyoda, S. Nishikawa, Y. Fujii, Y. Takatsuki, H. Igarashi, H. Nishikawa, Y. Ishikawa, T. Kuragano, and M. Kamachi (2017) : Four-dimensional variational ocean reanalysis: a 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). *J. Oceanogr.*, **73**, 205-233, doi:10.1007/s10872-016-0398-5.

碓氷典久・藤井陽介 (2015) : 現業化に向けた MOVE-4DVAR の高度化. *測候時報*, **82**, 特別号, S43-S53.