

## 平成 18 年度水路技術奨励賞（第 21 回）

- 業績紹介 その 1 -

去る平成 19 年 3 月 16 日に同賞の表彰式があり、4 件 6 名の方々が授与されました（「水路」第 141 号で紹介）。本号から業績内容をご紹介します。ただし共同研究課題の場合、全容をご紹介できないこともあります。

### 数値海流予測技術の展開 黒潮・親潮・インド洋

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター 宮澤泰正

#### 1 はじめに

海流の蛇行や流路の変動、その周辺の中規模渦の移動や海流との合体切離など、海洋中規模現象の詳細な解明と予測は、海洋物理の問題としてそれ自体非常に興味深いものだが、その成果は船舶の運航支援や水産資源の管理など様々な応用の対象ともなる。従来、海洋変動の詳細な観測は大変な時間と手間のかかるものであったが、人工衛星をはじめとする近年の海洋観測網の飛躍的な発展により、外洋の海況変動を現実的に把握することが可能になってきた。これに計算機技術の発展も加わり、詳細な観測に基づいて推定した海況を出発点として海洋の数値モデルを駆動し日常的に海洋中規模現象の予測を行うこと（本稿ではこれを「海中天気予報」と呼ぶことにする）がいま実現しつつある。海中天気予報が本格的に実用化されるならば、海洋の管理はより容易になると考えられる。人類の生存にとって海洋が持つ重要性を考えると、真の意味で各国が協調的に世界海洋を管理するシステムの創成につながる可能性もある。海中天気予報の精度向上は、気候変動予測に用いる大気海洋結合モデルの海洋部分の高度化を一層促すことにもなり、様々な気候変動現象の解明と予測、そしてそれに基づく社会基盤の設計にも貢献することにな

るだろう（山形，2003）。

筆者は、地球環境フロンティア研究センター（海洋研究開発機構）において、海中天気予報の実現を目指し、日本南岸の黒潮流路の予測を最初の目標とした研究計画「日本沿海予測可能性実験」（Japan Coastal Ocean Predictability Experiment）に従事する中で、海流予測システム JCOPE1 を開発し黒潮流路の予測実験を行ってきた（Guo et al., 2003; 宮澤と山形，2003; Miyazawa et al., 2004; Miyazawa et al., 2005; 宮澤，2006; Kagimoto et al., 2007; 宮澤，2007; Miyazawa et al., 2007）。2001 年 12 月の予測システム運用開始以来種々の改良を積み重ね、2004 年夏の黒潮大蛇行の予測に成功するなど一定の成果を挙げた（宮澤他，2005; Miyazawa et al., 2007）。また実験の過程で、解析・予測プロダクトを応用するための様々な共同研究を開始するとともに、さらなる予測の高精度化、高解像度化、高付加価値化を図りつつある（宮澤と早稲田，2005）。最近では JCOPE1 を拡張し、親潮を含む混合水域や、日本東方海域で黒潮につづく黒潮続流の変動予測なども目的とした予測システム JCOPE2 の開発に取り組んでいる。さらに、インド洋の数値海流予測システム FIO (Forecast Indian Ocean) の開発にも取り組むようになった。本稿では、

黒潮だけでなくひろく日本近海を対象とした数値海流予測システム JCOPE2 や、インド洋数値海流予測システム FIO の最新の結果を紹介し、今後の展開について議論したい。

## 2 数値海流予測システム JCOPE2

数値海流予測システム JCOPE2 は、JCOPE1 と同じく Princeton Ocean Model for generalized coordinate of sigma (POMgcs)(Mellor et al., 2002)を基盤とする、北西太平洋 (12-62N,117-180E) を対象とした海洋大循環モデルを用いている。水平解像度は中規模現象を解像するために 1/12 度格子とし、鉛直方向には 45 層の格子分割を行っている。QuikSCAT 衛星海上風格子化データ (12 時間間隔) と NCEP/NCAR 再解析データ (6 時間間隔) における海上気象要素から算出される海表面運動量・熱フラックスによってモデルが駆動される。より正確な予測を行うため、駆動したモデルの結果を現実の観測データによって補正し現況の推定を行う (データ同化)。現況推定結果を初期状態としモデルを月平均気候値の海表面運動量・熱フラックスで駆動することで予測データを作成する。現況推定は、最新の観測データを導入するため週毎に更新している。データ同化には、人工衛星観測による海面高度及び海面水温データと、アルゴフロート・船舶等による現場観測水温塩分データを用いる。本稿では、観測データとデータ同化手法を用いてどれくらい現況が推定できるかということに力点を置いて結果を紹介する。ここでは、2003 年 2 月から 2005 年 2 月までの 2 年間を対象としてデータ同化によって作成した 2 日平均の現況推定データを解析の対象とする。JCOPE1 と JCOPE2 の違いはデータ同化手法にあり、JCOPE1 では多変数最適内挿法が用いられ (Kagimoto et

al, 2007; Miyazawa et al., 2007) , JCOPE2 では海域毎に算出された水温・塩分結合鉛直 EOF モード分解に基づく三次元変分法 (Fujii and Kamachi, 2003) が用いられている。

最初に、JCOPE1/JCOPE2 による黒潮および黒潮続流流軸の現況推定について述べる。流軸の再現性を適切に評価するためには、そのための適切な観測データが必要である、本稿では、漂流ブイ軌跡の長期間のデータセットから求めた表面流の平均場に、衛星海面高度偏差データから地衡流近似によって求めた表面流の変動成分を加えることによって求めた表面流推定データ (Uchida and Imawaki, 2003; Ambe et al., 2004) から、鍵本他 (2007) の流軸推定アルゴリズムを用いて推定した黒潮・黒潮続流の流軸 (本稿では「UI2003 流軸」と呼ぶことにする) を検証に用いることにする。東経 150 度以西については海上保安庁海洋情報部作成の「海洋速報」から読み取った流軸データも参照できるので、UI2003 流軸を海洋速報の流軸と比較して、異なる現況推定データセット間の違いについてまず確認しておく。真の黒潮流軸を把握するべくそれぞれに工夫されたこれらの現況推定データセット間に違いがあればその違いは、数値海流予測システムをこれらの現況推定データセットに近づけるように改良していく際の指標を与えるものと考えられる。例えば、数値海流予測システム現況データと現況推定データセットの値の平均的な残差が、これら現況推定データ値間の平均的な残差程度になる程度に数値海流予測システムを改良していけばよい。

図 1 は、2 年間の UI2003 流軸と海洋速報流軸をそれぞれに重ね合わせて描いたものである。それぞれの現況推定データが、東シナ海から房総沖にかけての黒潮の平均的な流路を表現していることがわかる。2004

年 8 月から約 1 年間持続した黒潮大蛇行流路とその時期以外の非大蛇行流路で表現される流路の二様性もそれぞれよく表現されている。図 2 上は 2 年間の平均的な流路の違いをあらわしたものである。UI2003 に比べ海洋速報が、九州南方の黒潮小蛇行(132E)、遠州灘沖の大蛇行(138E)、そして黒潮続流の第一の谷(145E)をより強調して示す傾向にあるといえる。あるいは UI2003 がこれらの流路変動を過少に評価している可能性があるといえることができる。また、図 2 下から、流路位置の南北方向の残差が最大で 100km 余りあることがわかる。

次に、これらの現況推定データセットのうち黒潮続流までの流軸を含む UI2003 流軸を、数値海流予測システム JCOPE1/JCOPE2 における現況流軸と比較する。図 3 より、JCOPE1(上)と JCOPE2(下)が定性的にみて図 1 と同様な流軸の変動を表現できていることがわかる。ただし、JCOPE1 は黒潮流軸についてはうまく表現できているが、黒潮続流流軸については第一の谷に対応する蛇行が南偏しすぎる傾向を示し第一の谷以東の流路もばらつきが過大になっている。これに付随して黒潮続流の流軸の運動エネルギーも平均的に過小評価になっている(図略)。一方、JCOPE2 ではこれらのバイアスが改善されており(図 3 下)、続流流軸上の平均運動エネルギーも適切に表現されている(図略)。ただし図 4 上を見ると、九州南西沖で北偏する傾向と黒潮続流第一の谷に対応する蛇行がやや過小に評価される傾向がある。図 4 下より、流軸緯度の平均的な残差は東経 150 以西で 100km 以下におさえられており、図 2 下にみられる現況推定データセット間の平均残差にみあうような結果が実現されているといえる。150 度以東では残差がやや大きくなり、150km 弱までの残差となっている。以上より、JCOPE2 が日本南岸の黒潮

にとどまらず、日本の東方の黒潮続流の現況推定も実現しつつあることがわかる。

新しい予測システム JCOPE2 では、水温塩分結合鉛直 EOF モード分解に基づく三次元変分法の導入により、黒潮域に比べて塩分分布が密度構造に及ぼす影響が大きい混合水域での再現性向上がはかられている。これに加え、水産総合研究センターとの共同研究に基づいて水産試験研究機関による混合水域等での豊富な現場観測データを同化しており、同水域での現況再現精度向上への寄与が期待されるところである。現在、同化パラメータ等の感度実験を行いながら再現精度の検証を進めているところであるが、一例として図 5 上に 2004 年 4 月 15-16 日の 100m 深水温(上左)、塩分(上右)分布を示す。図 5 下には参照例として、現場観測水温データを用いて東北海区水産研究所で作成している 2004 年 4 月の月平均水温分布を示す。月平均水温分布には、JCOPE2 で同化されていない自衛隊の現場観測データも含まれていることを注意しておく。図 5 から、親潮第一分枝の南下、津軽暖水、東方に広がる黒潮続流系の水塊などの主要な水塊分布が参照例に類似した形で表現されていることがわかる。また、水温塩分結合鉛直 EOF モードの利用により、水温分布に対応した塩分分布が表現されていることもわかる。鉛直構造をみるため、図 6 には観測定線 A ライン(図 5 上に直線で示している)での水温塩分分布を示した。現場観測結果(図 6 上)では、低温低塩の親潮系水塊が北緯 41 度付近で黒潮系の高温高塩の水塊の下にもぐりこみ、40 度付近で海面に露出する分布が示されている。JCOPE2 の現況推定結果(図 6 下)はこうした特徴をやや弱いながら表現しているようである。また、300m 以深の塩分分布にみられる等塩分線の傾きなどの傾圧的な構造もやや弱いながら表現している。以上で

示唆されたような混合水域での水塊再現性の向上は、図7で示すように親潮第一分枝南限緯度の再現性向上に寄与している。JCOPE1を用いて行われた親潮第一分枝南限緯度の予測実験(Ito et al., 2007)から、JCOPE海洋モデルによる親潮第一分枝の南限緯度の予測がJCOPE1現況推定結果によく追従することが明らかにされているので、今回示した現況推定結果の精度向上が、親潮第一分枝の南限緯度の予測精度向上につながることを期待される。

### 3 インド洋数値海流予測システムFIO

日本近海を対象とした予測システムJCOPE2開発での経験により、JCOPE2開発の方法論が様々な水塊特性をもった多様な海域に適用できる可能性が示唆されたため、最近では筆者は日本近海ではなくインド洋を対象として同様な予測システムFIO(Forecast Indian Ocean)の開発に取り組んでいる。FIOは、JCOPE2と同様にPOMgcsを基盤としており、インド洋(30S-25N,35-120E)を水平1/12度、鉛直49層で分割した格子を用いている。海上風等の海表面外力に対する海洋内部の応答が速い熱帯域をモデル内部に含むため、毎日最新の大気観測データを用いて即時的に作成されている数値天気予報(NCEP Global Forecast System)の海上気象要素を海表面運動量・熱フラックス算出のために用いている。データ同化手法はJCOPE2と同じく、海域毎の水塩分結合鉛直EOFモードを利用した三次元変分法である。図8上に、東部インド洋における2007年1月28日の5m深の日平均海流分布の現況推定結果を示す。赤道付近では海上風に応答し東西方向に卓越した海流がさかんに励起されている様子が見てとれる。検証の一例として、海洋研究開発機構が東インド洋に設置している定点ブイトライトンで観測されている日平均

の10m深海流とFIOの現況推定結果との比較を図8下に示す。南北流(図8下右)の再現精度はやや落ちるものの、東西流(図8下左)は適切に再現されていると言える。インド洋では日本近海に比べて入手可能な観測データが少ないことが数値海流予測システム開発の障害のひとつになっているが、今後は内外の関係観測研究機関等との提携を積極的に進め、精度の検証を本格化させていきたい。

### 4 おわりに

10年ほど前に「あの黒潮大蛇行を数値的に予測したい」という研究者としての比較的単純な(?)欲求から数値海流予測研究に参加した。研究を行ううちに痛感したことは、数値海流予測研究は正確な観測データなしには進まないということである。本稿ではこの観点を強調するために、観測データと数値海流予測システムプロダクトの比較例について紹介した。数値海流予測システム内部の様々なパラメータには任意性があり、適切なパラメータを決めるには海洋観測の結果が必要である。たとえば黒潮流路の予測研究は、流路に関する正確な情報を定期的に提供する「海洋速報」なしではまったく成り立たない。また、豊富な現場観測経験をもつ独立行政法人水産総合研究センターの研究者との共同研究は、現場観測データと数値海流予測データとの丹念な比較検証こそが数値海流予測研究の発展にとって最重要であることを認識させてくれた点できわめて有益であった。このような共同研究者の方々や「海洋速報」を作成している海洋情報部を含め、この場を借りて改めて海洋観測関係者の皆様にお礼を申し上げたい。今後は、数値海流予測の精度をさらに向上させ、海洋観測等にもその結果を少しでも役立てていけたらと考えている。

## 謝辞

UI2003 データは、九州大学の安倍大介氏（現、中央水産研究所）より提供を受けた。海洋速報の流軸読み取りデータおよび水産試験研究機関の現場観測データは、水産総合研究センターと海洋研究開発機構との共同研究「漁海況予測及び水産資源変動予測のための海況予測システムの高精度化と魚類等輸送予測モデルの高度化に関する研究」（平成19年度～平成22年度）に基づき、水産総合研究センターから提供を受けた。図5下の東北海区水温図は東北海区水産研究所ウェブサイトからダウンロードした。図8のトライトンブイデータは地球環境観測研究センター（海洋研究開発機構）ウェブサイトからダウンロードした。インド洋海流予測システムFIOの計算結果は海流予測情報利用有限責任事業組合より提供を受けた。以上の関係者の方々に謝意を申し上げる。

## 参考文献

Ambe, D., S. Imawaki, H. Uchida, and K. Ichikawa, Estimating the Kuroshio axis south of Japan using combination of satellite altimetry and drifting buoys, *J. Oceanogr.*, 60, 375-382, 2004.

Fujii, Y., and M. Kamachi, A reconstruction of observed profiles in the sea east of Japan using vertical coupled temperature-salinity EOF modes, *J. Oceanogr.*, 59, 173-186, 2003.

Guo, X., H. Hukuda, Y. Miyazawa, and T. Yamagata, A triply nested ocean models -Roles of horizontal resolution on JEBAR-, *J. Phys. Oceanography*, 33, 146-169, 2003.

鍵本崇, 宮澤泰正, 植原量行, 数値計算手法と黒潮続流の予測可能性, 日本海洋学会春季大会要旨集,

292, 2007.

Ito, S., S. Kakehi, Y. Miyazawa, T. Setou, K. Komatsu, M. Shimizu, A. Kusaka, K. Uehara, Y. Shimizu, A. Okuno, and H. Kuroda, Operational ocean prediction model in the Northwestern Pacific: its verification and improvements in the mixed water region, in preparation, 2007.

Kagimoto, T., Y. Miyazawa, X. Guo, and H. Kawajiri, High resolution Kuroshio forecast system -Description and its applications-, in *High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, W. Ohfuchi and K. Hamilton (eds), Springer, New York, in press, 2007.

Mellor, G. L., S. Hakkinen, T. Ezer and R. Patchen, A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids, In: *Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications*, N. Pinardi and J. D. Woods (Eds.), Springer, Berlin, 55-72, 2002.

宮澤泰正, 山形俊男, JCOPE 海洋変動予測システム, 月刊海洋, 12, 881-886, 2003.

Miyazawa, Y., X. Guo, and T. Yamagata, Roles of meso-scale eddies in the Kuroshio paths, *J. Phys. Oceanogr.*, 34, 2203-2222, 2004.

宮澤泰正, 鍵本崇, 郭新宇, 川尻秀之, 佐久間弘文, 山形俊男, JCOPE 海洋変動予測システムとその展開, 月刊海洋, 37, 263-269, 2005.

宮澤泰正, 早稲田卓爾, JCOPE 海洋変動予測システム 工学的利用に向けて, 月刊海洋, 37, 644-655, 2005.

Miyazawa, Y., S. Yamane, X. Guo, and T. Yamagata, Ensemble Forecast of the Kuroshio meandering, *J. Geophys. Res.*, 110, C10026, doi:10.1029/2004JC002426, 2005.

宮澤泰正, 海流予測情報とその利用, *Captain*, 375, 52-58, 日本船長協会, 2006.

宮澤泰正, 海洋変動予測実験とその成果～海中の数値天気予報～, *検査技術*, 12, 45-51, 日本工業出版, 2007.

Miyazawa, Y., T. Kagimoto, X. Guo, and H. Sakuma, The Kuroshio large meander

formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system, submitted, 2007.

Uchida, H. and S. Imawaki, Eulerian mean surface velocity field derived by combining drifter and satellite altimeter data. *Geophys. Res. Lett.*, 30(5), 1229, doi:10.1029/2002GL016445, 2003.

山形俊男, 2003: 予測海洋科学の誕生に向けて, *学術月報*, 56, 452-456.

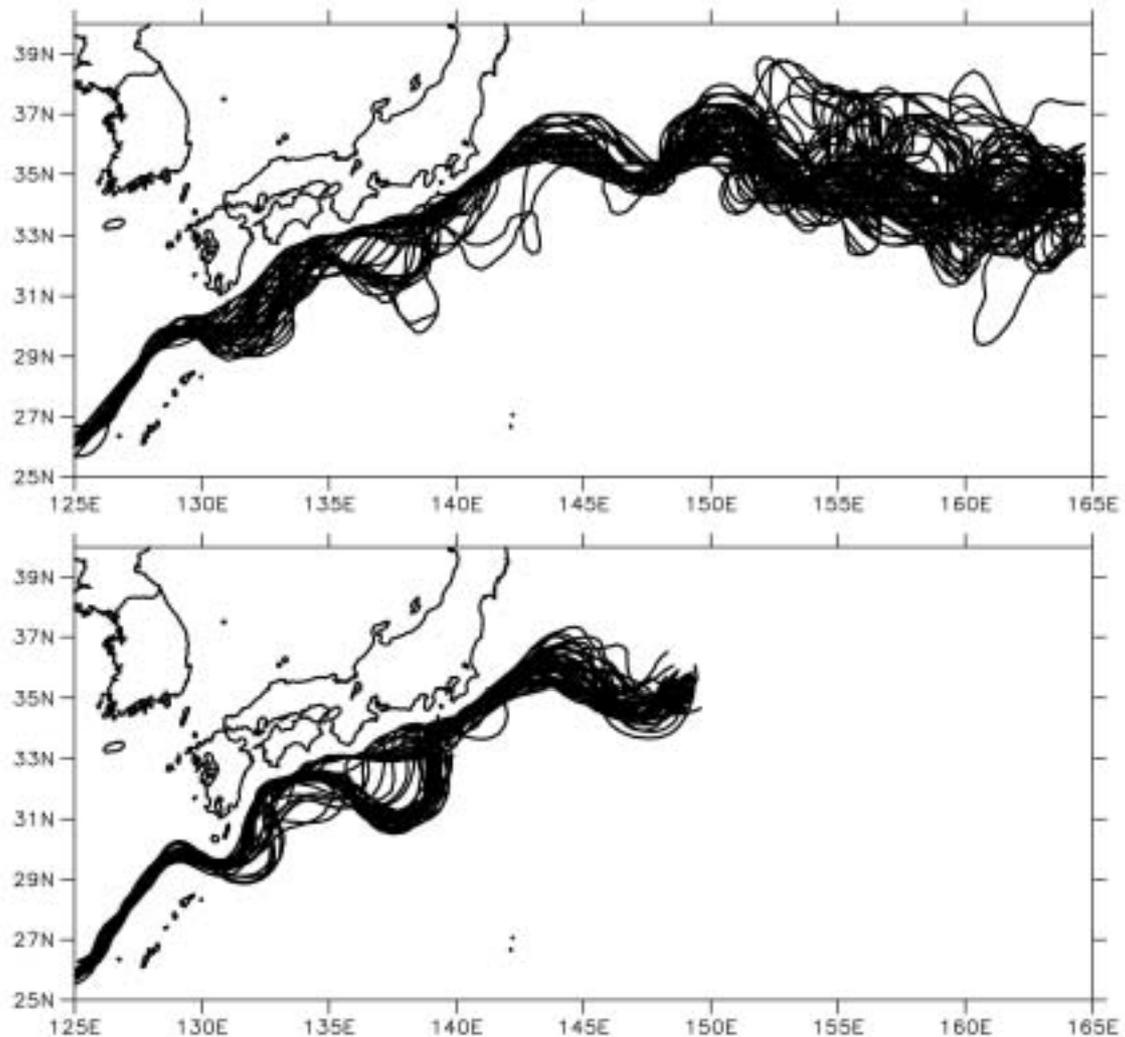
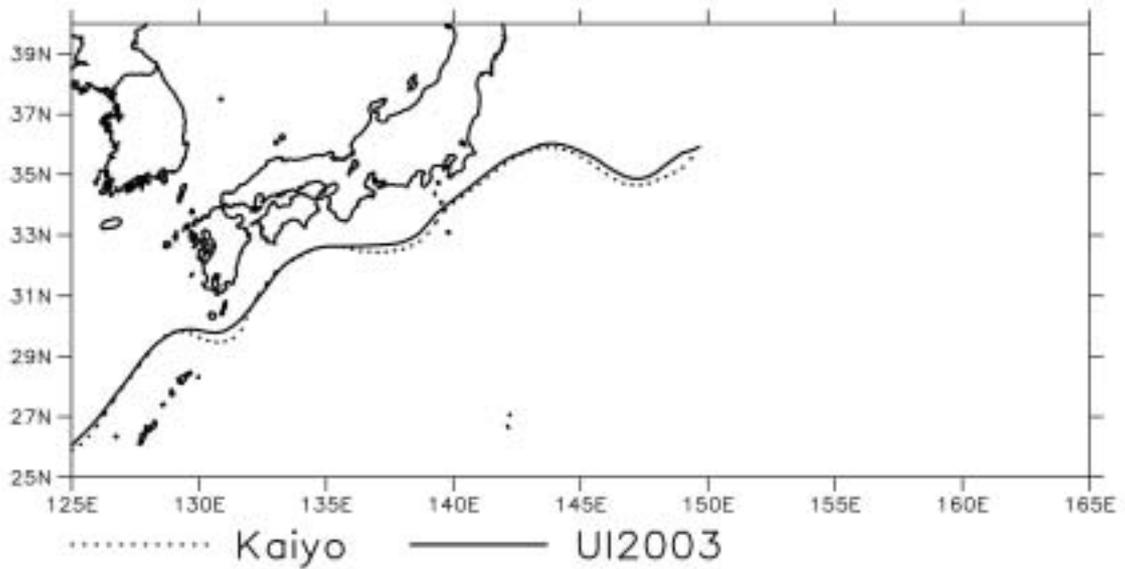


図1. 上: 表面流現況推定データ U12003 (Uchida and Imawaki, 2003) から推定された黒潮・黒潮続流流軸。2003年2月12日～2005年2月2日。7日間隔。下: 「海洋速報」(海上保安庁海洋情報部)から読み取られた黒潮・黒潮続流流軸。2003年2月10日～2005年2月1日。約7日間隔。



BIAS:17.6009 RMSE:39.3959 UI2003.Kaiyo

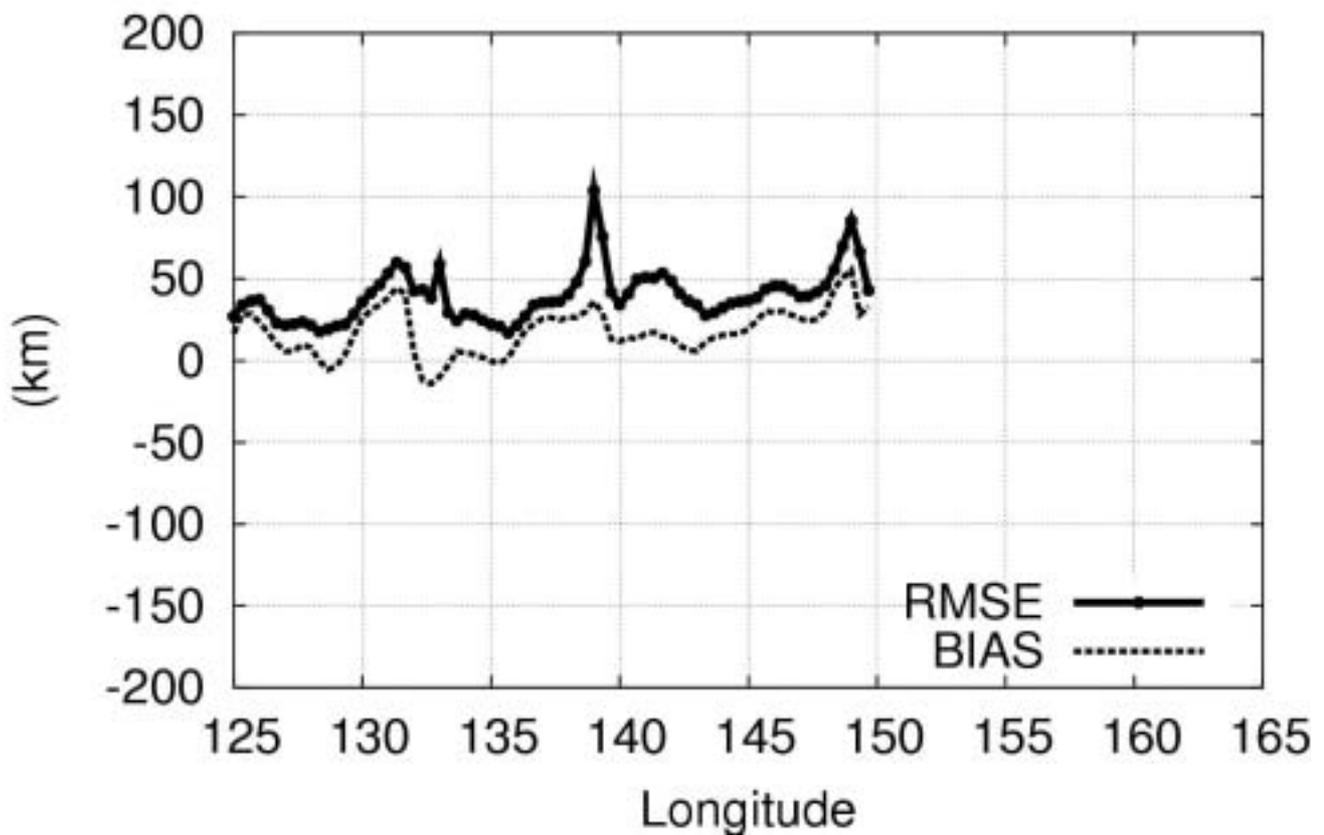


図2 . 上：表面流現況推定データ（図1上）から推定された黒潮・黒潮続流流軸の時間平均位置（実線）と、「海洋速報」から読み取られた同流軸の時間平均位置（点線）。下：表面流現況推定データの「海洋速報」に対する流軸位置の平均二乗残差（RMSE、実線）と平均残差（BIAS、点線）。

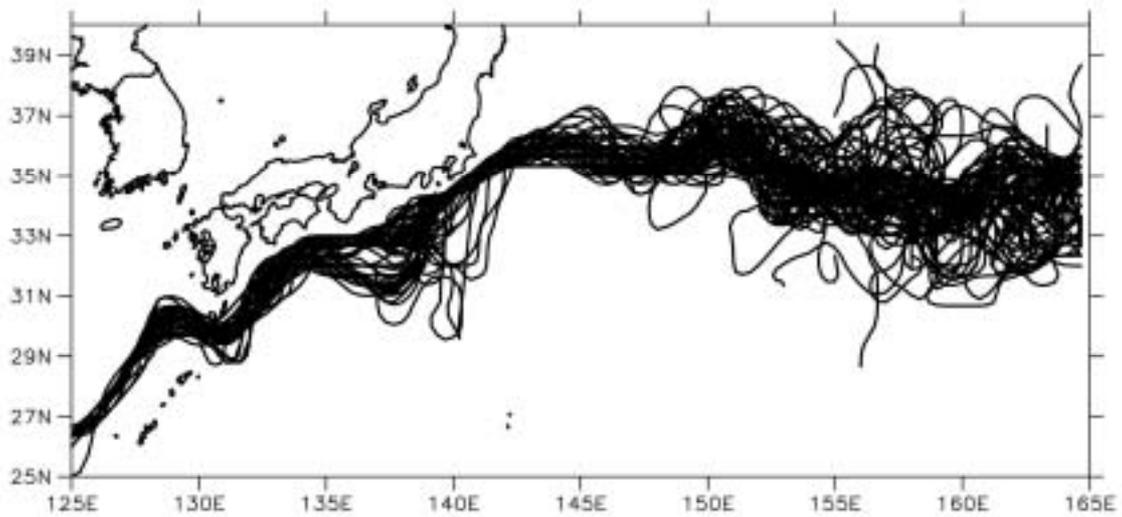
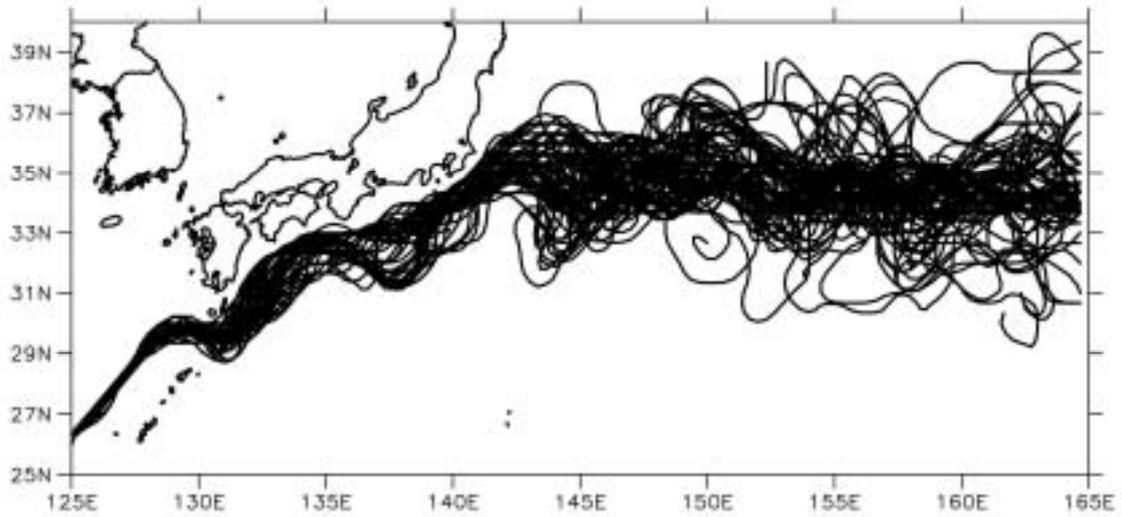
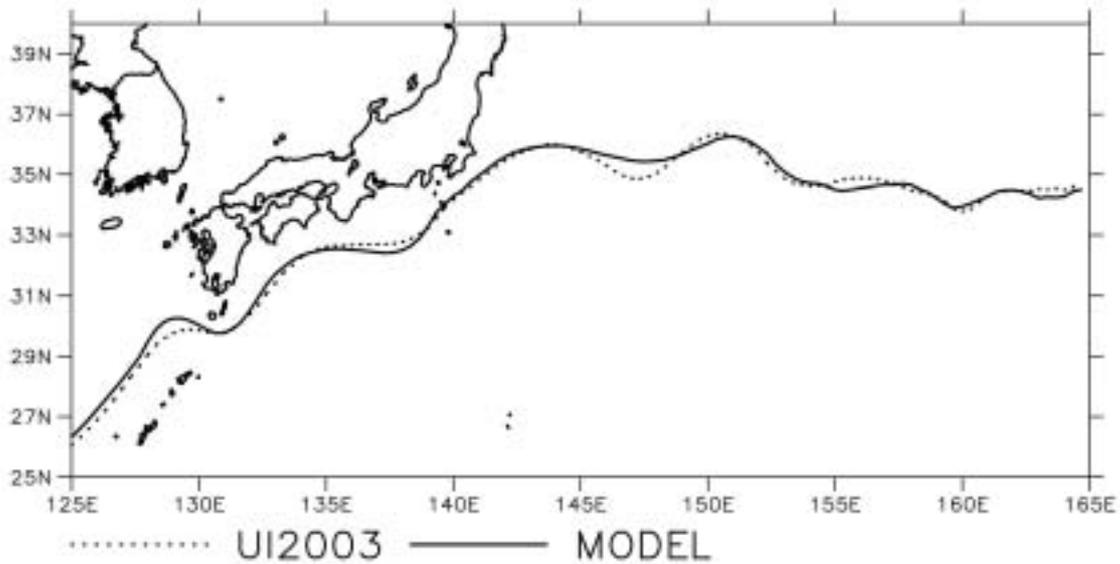


図3 .上: 数値海流予測システム JCOPE1 の表面流現況推定データから推定された黒潮・黒潮続流流軸。2003年2月12日~2005年2月2日。7日間隔。下: 上図と同様に数値海流予測システム JCOPE2 の表面流現況推定データから推定された黒潮・黒潮続流流軸。



BIAS:7.54367 RMSE:77.1463 RA27.50m

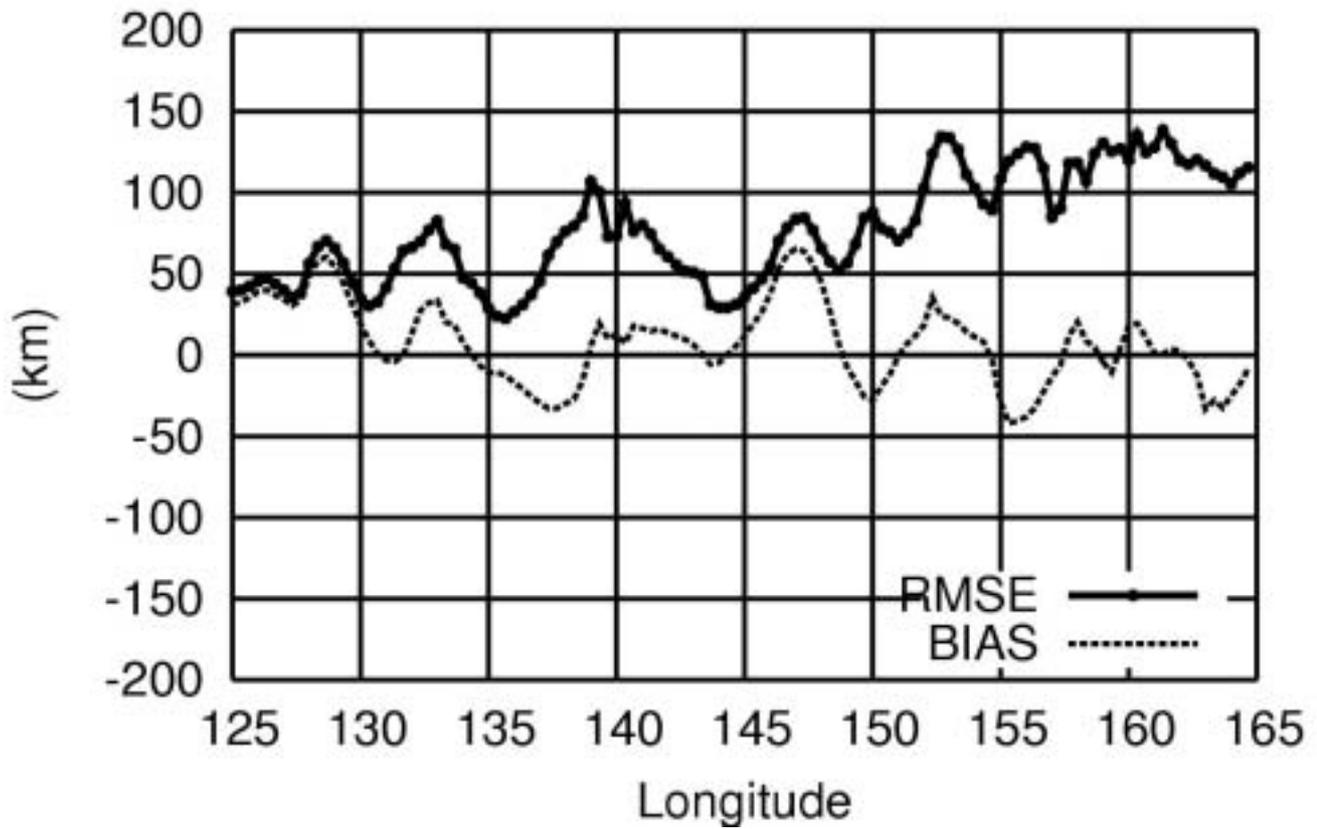


図4 .上: 数値海流予測システム JCOPE2 から推定された黒潮・黒潮続流流軸(図3下)の時間平均位置(実線)と、表面流現況推定データ UI2003 から推定された流軸(図1上)の時間平均位置(点線)。下: JCOPE2 の UI2003 に対する流軸位置の平均二乗残差(RMSE、実線)と平均残差(BIAS、点線)。

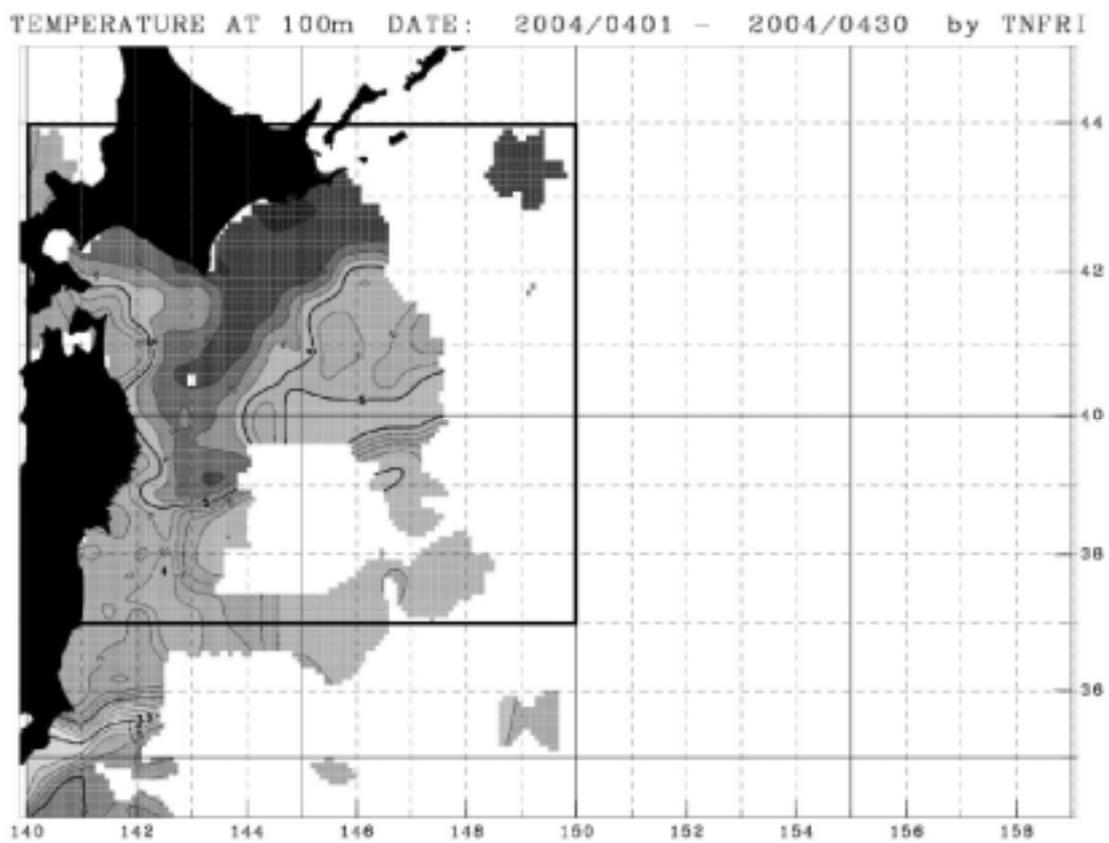
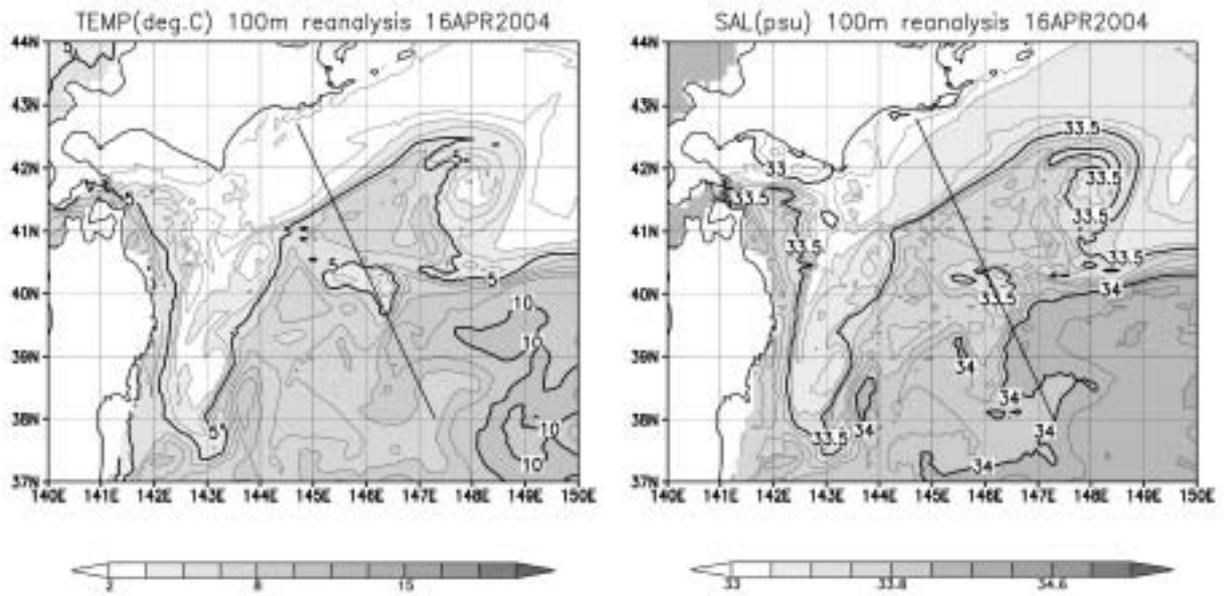


図5 . 上：数値海流予測システム JCOPE2 によって推定された2日平均100m深水温（上左）、塩分（上右）分布。2004年5月15-16日。斜線は現場観測定線Aラインを示す。下：東北海区水産研究所が作成した2004年5月の100m深水温図（「東北海区水温図」）。

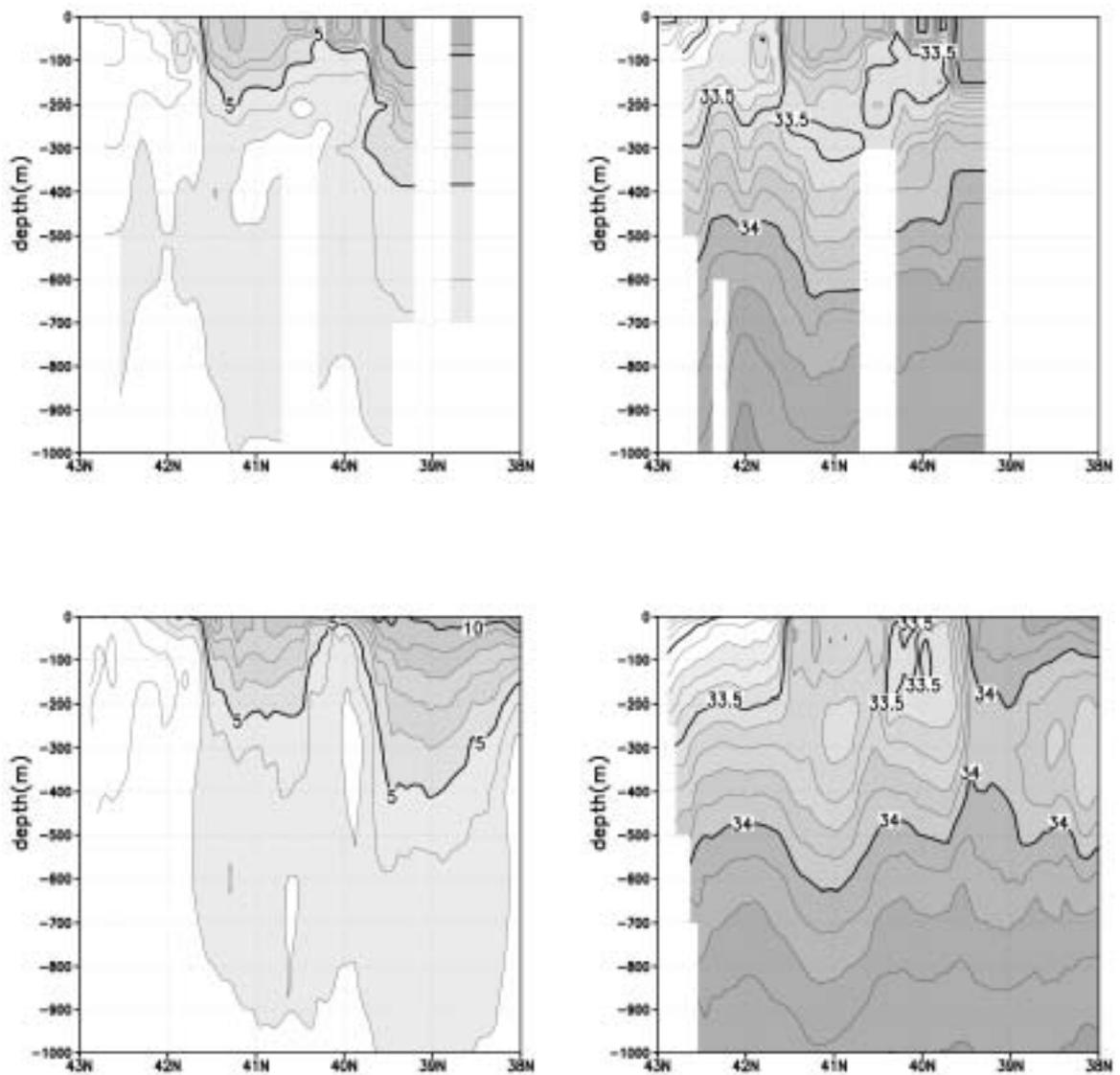


図6 . 上 : 現場観測定線 A ラインにおける観測水温 (上左) および塩分 (上右) 断面。2004 年 5 月 12-19 日。下 : 数値海流予測システム JCOPE2 によって推定された 2 日平均水温 (下左) および塩分 (下右) 断面。2004 年 5 月 15-16 日。

Oyashio 1st Branch BIAS:1.3099670E-02 RMSE:1.142476

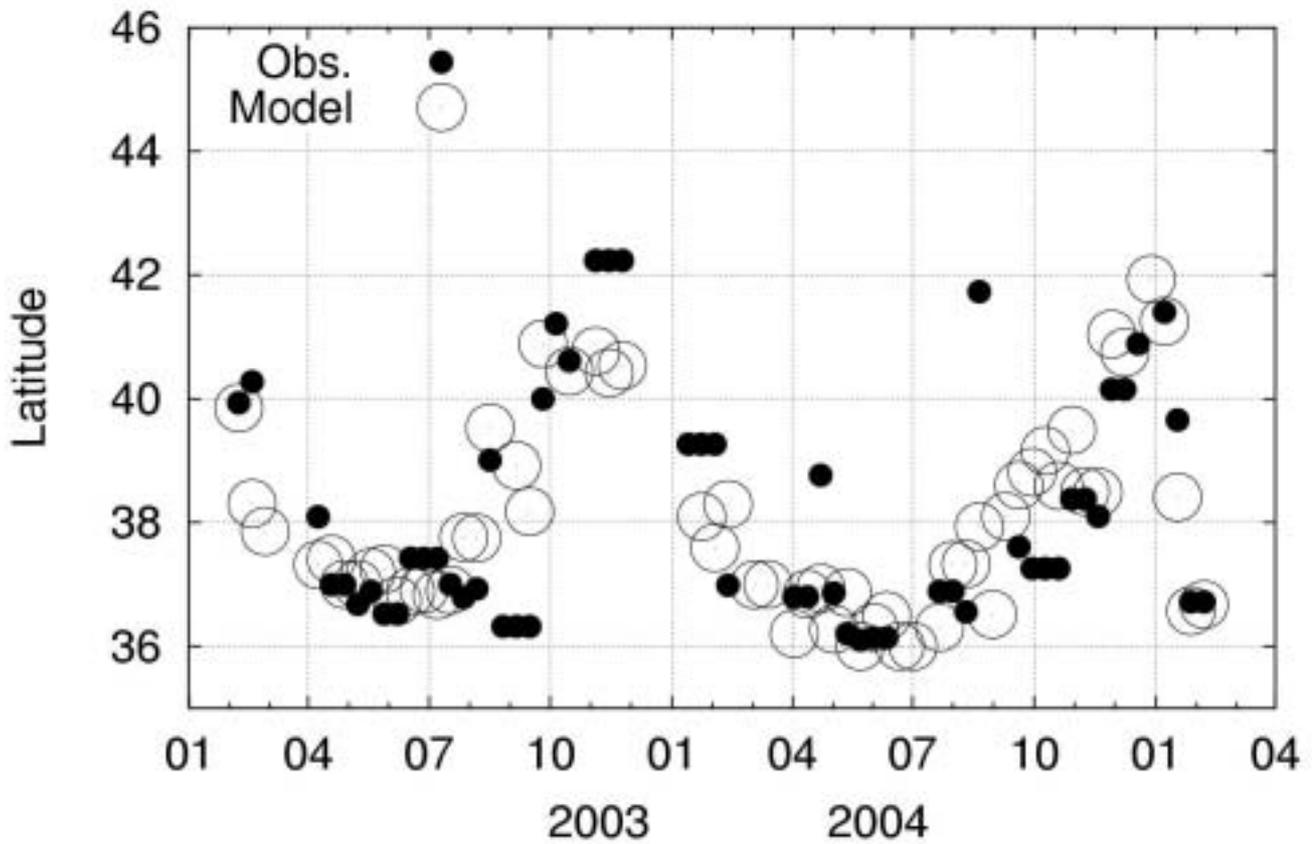


図7．数値海流予測システム JCOPE2 によって推定された親潮第一分枝南限緯度の現況推定結果（黒丸）と観測データから推定された同緯度（白丸）の時間変化。親潮第一分枝南限緯度は、現場観測点における 100m 深 5 度等温線の南限緯度として定義している。

reanal.w1.5 5m 28JAN2007

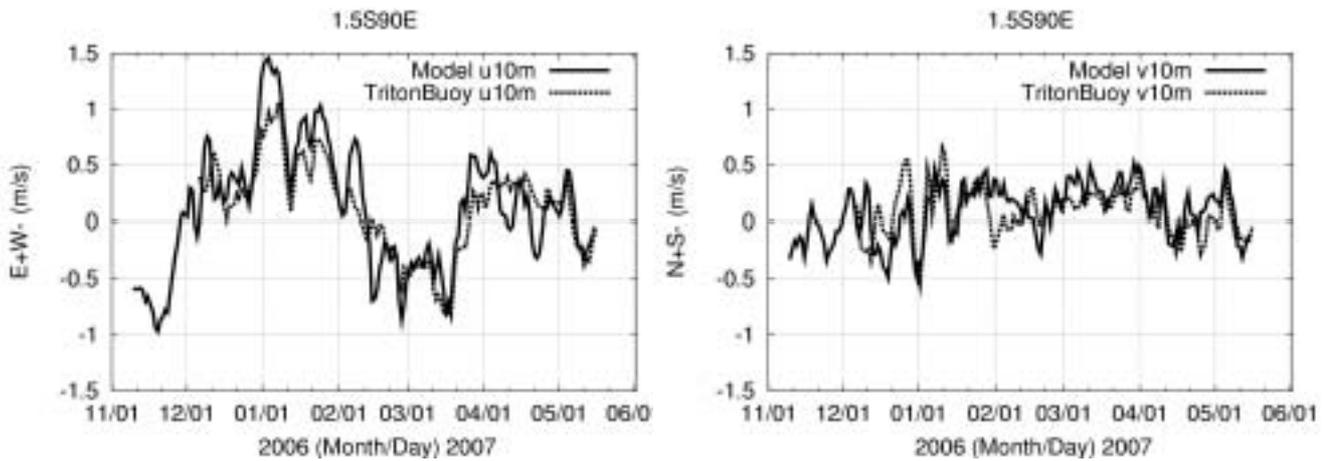
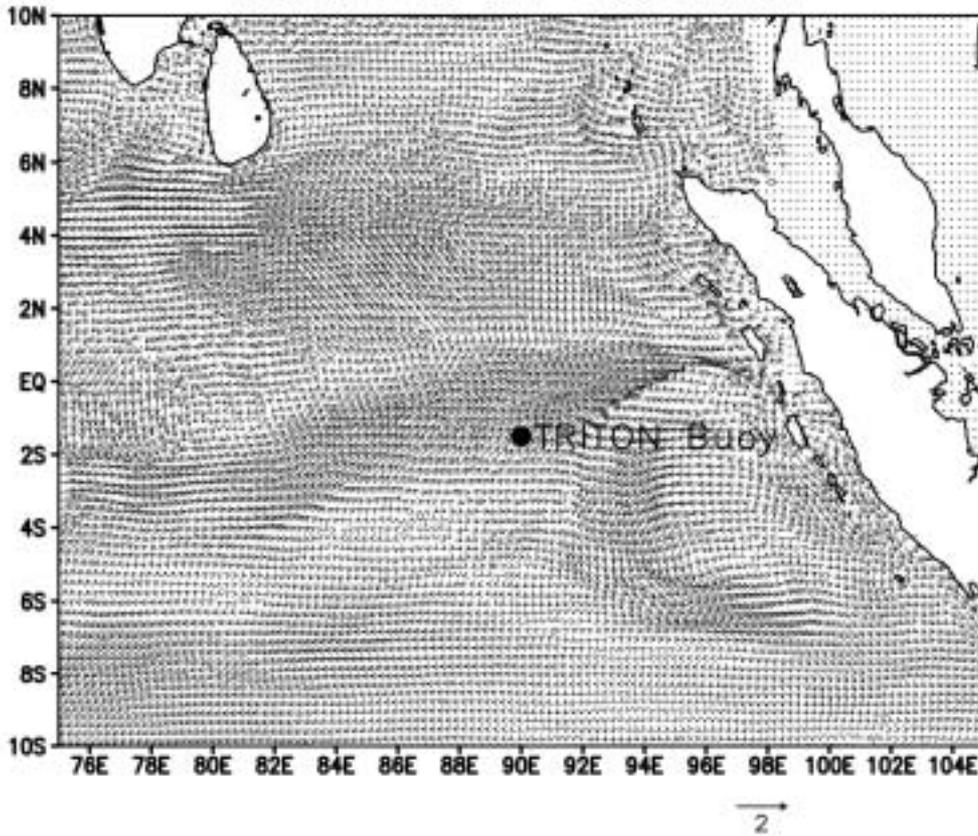


図8 . 上：数値海流予測システムF10によって推定された東インド洋における1日平均の5m深海流。2007年1月28日。黒丸はトライトンブイの位置を示す。下：数値海流予測システムF10によって推定された10m深海流（実線）とトライトンブイ観測データ（点線）の時間変化。左図は東西流、右図は南北流を示す。