

JCOPE 海洋変動予測システム

宮澤泰正

(みやざわやすまさ：地球フロンティア研究システム)

山形俊男

(やまがたとしお：地球フロンティア研究システム/東京大学大学院理学系研究科)

The JCOPE ocean forecast system

Yasumasa Miyazawa and Toshio Yamagata

要旨

地球フロンティア研究システムでは、日本沿海予測実験計画(JCOPE)の下で日本近海の海洋変動予測実験を行っている。JCOPE 海洋変動予測システムは、衛星や ARGO フロート、船舶観測など多様な種類のデータを高解像度海洋大循環モデルに統合的に同化し、定期的に予測を更新していくシステムである。このシステムは、プロダクトを定期的に出し続ける現業的な側面と、プロダクトの解析を通して研究的な側面を合わせ持つ現業海洋学の展開を意図して 2001 年 12 月より運用している。

1 初めに

我が国は四方を海に囲まれた海洋国家であり、その排他的経済水域は世界第6位の広さを持つ。海は、水産物や資源の宝庫であるとともに高潮や津波などの災害を引き起こすこともあり、私達の生活にとって極めて重要な存在である。しかしながら、海が今どのような状態になっており、今後どのように変わってゆくかということについて、一般の関心は必ずしも高いとは言えない。また海洋では、観測データも少なく、高精度の数値予報モデルも存在しなかったために、現業機関等では経験的な知識に基づく予報のみが行われているのが現状である。しかし近年、地球観測衛星が充実し、また ARGO フロート等の登場により観測データの数も飛躍的に増加してきた。データの流通も円滑になり、これを用いる現実的な海洋数値モデルが急速に発展していて、日常的な海洋変動の数値予報を行うための条件が整いつつある。

地球フロンティア研究システム(海洋科学技術センター)の気候変動予測研究領域では、日本沿海予測実験計画(JCOPE)の下で 2001 年 12 月から海洋変動予測実験を開始しており、定期的に予測を更新しその結果を逐次ウェブで公開している(<http://www.jamstec.go.jp/frsgc/jcope/>)。図1に示すように、日本近海の高解像度海洋大循環モデルに、衛星の海面高度・海面水温データ、ARGO フロートや船舶によって観測される水

温・塩分プロファイルデータ等を統合的に同化して初期値を作成し、予測を更新していくシステムを完成させている。今後は、世界でも屈指の観測密度を誇る水産系の沿岸観測データを取り込むことを期待し、また地球シミュレータを活用してモデルを高解像度化し淡水、潮汐過程を導入することで沿岸海洋のプロダクトの高精度化を図る予定である。また、物質循環や生態系の変動予測にも有効なプラットフォームを提供することになるであろう(図1)。さらに領域大気モデルとの結合によって局所的な大気海洋相互作用も詳細に調べていくことも考えている。こうした、日々の現場データによって検証される精密な海洋変動予測システムの発展は、大気・海洋・陸面過程からなる気候変動現象を理解し予測する上でも必要不可欠になってゆくだろう。

JCOPE 海洋変動予測システムは、数ヶ月スケールの日本南岸の黒潮流路変動を予測対象としている。近年の観測およびモデル研究が示唆するように、日本近海の中規模渦活動は、黒潮流路の数カ月程度の変動に対して大きな影響を及ぼすと考えられている(Mitsudera et al., 2001 など)。黒潮流路変動の予測のためには、黒潮そのものと、中規模渦の双方がモデル内でよく再現される必要がある。最近の私達の研究によれば、十分な空間解像度で密度成層や海底地形を正しく表現することが黒潮流路や中規模渦の再現にとってきわめて重要である(Guo et al., 2003; Miyazawa et al., 2002)。また、一連の予備実験の結果、日本南岸での顕著な黒潮蛇行の発生については2ヶ月程度の予測可能性があることが示唆された。より長期の予測可能性を調べるために、初期値の誤差と生じる蛇行流路の違いとの関連に着目してアンサンブル予報実験も行っている(Miyazawa et al., 2003)。ここでは、JCOPE 海洋変動予測システムの概要を示し、リアルタイム予測実験の現状を報告する。

2 JCOPE 海洋変動予測システム

JCOPE 海洋変動予測システムは、高解像度海洋大循環モデル、観測データ(外力・同化データ)の取得と解析のシステム、データ同化システムの必須三要素から構成されている。限られた人的及び計算資源の範囲内で定期的なオペレーションを遂行できるように、上記三要素のバランスに注意してシステムを設計した。観測データの取得にはインターネットを最大限に活用しており、システムはUNIX上で各種のスクリプトを逐次実行することによって簡潔に操作される。予測結果は自動的にウェブに転送され、可視化されるようになっている。現在は、1週間毎に直前の土曜日の状態を初期値としてその都度2ヶ月の予測を行っている。観測データ収集の時間的な遅れを補完するために、初期値となる日から1ヶ月遡って同化再解析を行いながら予測を毎週更新している。

海洋大循環モデルは主に沿岸海洋の数値モデルとして発展してきた Princeton Ocean Model (POM)の基盤の上に構築した。日本周辺で中規模渦を解像する格子間隔を確保し、かつ太平洋スケールの気候変動が日本沿岸にもたらす影響を再現するために、北太平洋(東経100度-西経70度、南緯30度-北緯62度)を対象とする低解像度モデル(水平1/4度以上、鉛直21レベル)に、日本近海(東経117度-東経180度、北緯12度-北緯56度)を対象とする高解像度モデル(水

平 1/12 度, 鉛直 35 レベル)を入れ子状に組み込んでいる。高解像度モデルの側面境界条件は、低解像度モデルの計算結果から線形補間したものを与える。海表面の風応力は、QuikSCAT 衛星海上風データから算出している。衛星海上風データの活用によって風応力を高解像度化(水平 1/2 度, 12 時間間隔)することが可能になった。海表面熱フラックスは、NCEP/NCAR 再解析データの海上気象要素(水平約 2.5 度, 6 時間間隔)と衛星海上風データを組み合わせてバルク法によって算出する。2 ヶ月の予測の際は、海表面の風応力及び熱フラックスが数日で月平均気候値に移行するようにしている。塩分濃度の海面境界条件は、月平均の塩分気候値に緩和させる形で与えている。

同化するデータは、衛星海面高度(Jason-1, GFO, ERS-2)、衛星海面水温(NOAA/AVHRR)と、水温・塩分の鉛直プロファイルデータ(GTSPP)である。まずモデルによって再現すべき現象の最小時空間スケールを 10 日及び 50km として、一定期間に観測された各同化データに対して統計解析を行い、時空間スケールと雑音/信号比を算出した。算出した統計パラメータを用いて、時空間最適内挿法(Kuragano and Kamachi, 1999)により、週平均データを作成する。これにより、モデルの特性に適合した時空間スケールの現象をデータから取り出して同化することが容易になる。データ同化は本来これを系統的に行う技術であるが、上記のようにデータに前処理を施すことで、より少ない計算コストでこうしたデータ同化の特性を実現すべく努めている。

次に各鉛直コラムにおいて、モデルの予測値と週平均データから水温・塩分解析値を作成する。多種類のデータを統合的に同化するために、各鉛直コラム内で多変数最適内挿法を適用する。その際の予報誤差共分散行列は、モデルとデータのそれぞれの誤差の重みの無次元パラメータ、同化無しのシミュレーションと週平均データとの残差の分布と、シミュレーション結果から統計的に算出した変数間の回帰係数との組み合わせによって近似する。モデル及びデータ誤差の重みパラメータは、解析時におけるモデルの予測値とデータとの残差についてカイ 2 乗検定(Menard et al., 2000)を行うことで決めた。事前に行った感度実験の結果、一定期間を通じて平均的に検定に適合する重みづけを得ることができた。このことは、同化する現象の時空間スケールにおいて平均的な誤差の成長の程度が期間を通じてほぼ一定になっていることを意味している。

水温・塩分解析値をモデルに適切に導入するために Incremental Analysis Update (IAU, Bloom et al., 1996)を用いる。IAU は、モデルの水温・塩分計算値に対し、解析時のモデルの予測値と解析値の時間一定な差分を 1 解析周期(ここでは 1 週間)にわたって与え続ける手法である。IAU は、1 解析周期より短い周期の変動を雑音として取り除く質の良いローパスフィルターとして作用する。これにより、予測値を同化の際に生ずる慣性重力波などの雑音によって汚染しにくくすることが可能になる。

2002 年 9 月から 2003 年 5 月にかけて同化実験を行った結果、400m 深までの水温・塩分プロファイルデータに対してそれぞれ約 1 度かつ 0.2psu の平均残差プロファイルを得た。時空間最適内挿法によって推定されるデータの内挿誤差(図略)の大きさと比較して、再現すべき現象の時空間スケールの範囲内でほぼ妥当な残差である。一例として図 2 に 200m 深の塩分データの

残差の分布を示す。同化によって黒潮-黒潮続流の変動に伴う残差が減少していることがわかる。この水深では水温データの残差も同様な傾向を示している。北緯 20 度以南の残差は、モデル内での表層の高塩分水の再現に問題があるとみられ、海表面の塩分濃度の境界条件の改善などの検討が必要である。図 2 で残差の分布がみられない部分は、同化期間中に観測データが取得されなかった海域であるが、ARGO フロートの一層の展開によってこのようなデータ空白域が解消されていくことを期待している。一方、海表面では、塩分データの場合に縁辺海での残差が大きいことが特徴的である(図略)。同化でもある程度この残差は減少するが、モデルに淡水過程を導入することがより効果的であろう。

3 黒潮流路の予測実験

黒潮は 2001 年秋以降非大蛇行接岸流路をとっているが、2003 年の前半には九州南東沖から伊豆諸島にかけて小蛇行の伝播現象がみられるなど、かなり変動している。以下では、JCOPE 海洋変動予測システムにおける 2003 年前半の黒潮流路の予測結果を紹介する。図 3 に、日本南岸の黒潮流域における海面高度偏差予測結果の観測値との残差平均の時間発展を示す。予測開始後残差が増加するが、どの予測結果でもほぼ 1 ヶ月で一方向的な残差の増加が止まり、同化しない状態での残差の変動と似た状態に移行する。すなわち、約 1 ヶ月は有意な予測であると言える。

串本-浦神の水位差と八丈島の水位でみた黒潮流路の予測結果を図 4 に示す。太い点線で示した同化結果はほぼ観測(図略)を再現している。2 月末以降、3-5 月にかけて串本-浦神の水位差は約 10cm 下がっている(図 4 左)。これは、3 月から 5 月にかけて小蛇行が東進するのに伴い、黒潮が紀伊半島から離岸した現象に対応している。2 月初めを開始日とした予測は串本-浦神の水位差の下降を予測できないが、3 月初めを開始日とした予測は同水位差の下降の予測に成功している。この違いには、2 月中に生じた何らかの変動が小蛇行の東進に寄与していることが考えられ興味深い。その後 4, 5 月は水位差が小さい状態が続き、モデルはその状態を予測している。観測では 6 月になると小蛇行は伊豆海嶺の東側に移動して減衰し、それに伴って水位差が約 10cm 上昇するが(図略)、モデルはこれをうまく予測していない。以上から、モデルは小蛇行の伊豆海嶺西側までの東進を予測できるが、その後の伊豆海嶺東側への移動を予測できないことが示唆される。このことは八丈島の水位の予測結果(図 4 右)により明瞭である。八丈島では小蛇行の伊豆海嶺東側への移動に伴って 6 月以降に 50cm 以上も水位が下降しているのが観測されたが(図略)、モデルはこれを予測していない。今後は、モデルと同化システムをさらに改良してこうした問題点を克服すると共に、発端となった小蛇行の発生機構と流路変動の詳細な過程を明らかにしたい。

4 終わりに

地球フロンティア研究システムにおいて、日本沿海予測実験計画(JCOPE)の下で行っている日本近海での海洋変動予測実験について紹介した。JCOPE 海洋変動予測システムは、衛星や

ARGO フロート、船舶観測などからの多様な種類のデータを統合的に高解像度海洋大循環モデルに同化し定期的に予測を更新していくシステムである。このシステムにより、2003 年前半の黒潮流路変動をある程度予測することができた。このシステムは、ARGO 観測システムと同様にプロダクトを定期的に出し続ける現業的な側面と、プロダクトの解析からなる研究的な側面を合わせ持った現業海洋学の展開を意図している。2001 年を海洋予報元年(山形, 2001)とすべく、2001 年 12 月に開始して以来絶えず予測を更新し続けてきたが、この間に学んだことは、予測プロダクトを出し続けその検証を続けることが、モデル、データ解析システム及びデータ同化システムの改善を著しく促進するということである。また、こうした新しい動きの社会への啓蒙活動(東京新聞記事, 2003 等)も重要なことであると認識している。今後は、ARGO フロートなど多様な観測計画との緊密な協力関係を構築することにより現業海洋学の底上げを図ると共に、「予測する海洋科学」(山形, 2003)の確立に寄与していくように努めていきたい。

参考文献

- [1] Bloom, S. C. et al., 1996: Data assimilation using Incremental Analysis Updates, Mon. Wea. Rev., 124, 1256-1271.
- [2] Guo, X. et al., 2003: A triply nested ocean models-Roles of horizontal resolution on JEBAR-, J. Phys. Oceanography, 33, 146-169.
- [3] Kuragano, T. and M. Kamachi, 1999: Global statistical spacetime scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/POSEIDON altimetry data, J. Geophys. Res., 105, 955-974.
- [4] Menard, R. et al., 2000: Assimilation of stratospheric chemical tracer observations using a Kalman filter. Part II: χ^2 -validated results and analysis of variance and correlation dynamics. Mon. Wea. Rev., 128, 2672-2686.
- [5] Mitsudera, H. et al., 2001: Anticyclonic eddies and Kuroshio meander formation, Geophys. Res. Lett., 28, 2025-202.
- [6] Miyazawa, Y. et al., 2002: Roles of meso-scale eddies in the Kuroshio meandering, submitted to J. Phys. Oceanogr.
- [7] Miyazawa, Y. et al., 2003: Impact of ensemble forecasts of predictability of the Kuroshio meandering, in preparation.
- [8] 東京新聞 5 月 15 日夕刊記事, 2003.
- [9] 山形俊男, 2001: 表層循環とその変動のモデリング, 月刊海洋, 9, 608-611.
- [10] 山形俊男, 2003: 予測海洋科学の誕生に向けて, 学術月報, 5, 8-12.

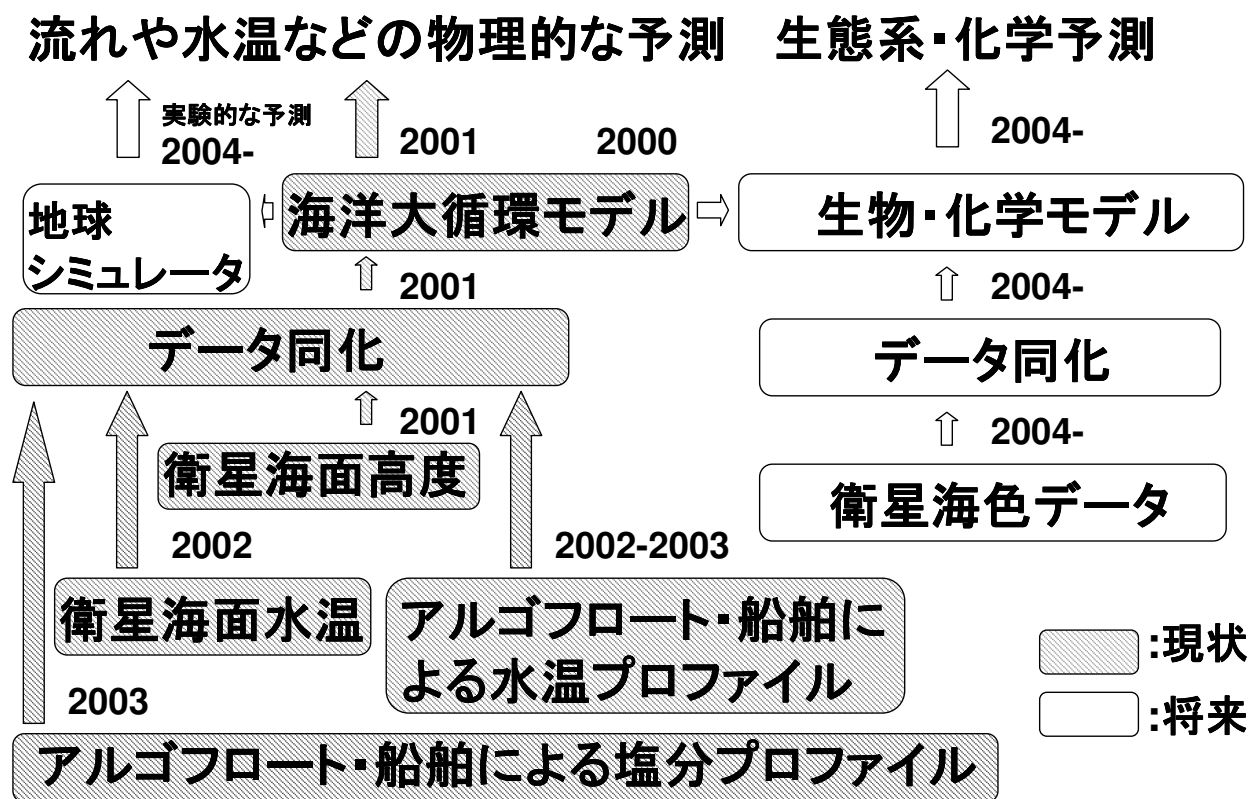


図 1: JCOPE 海洋変動予測システムの現状と将来

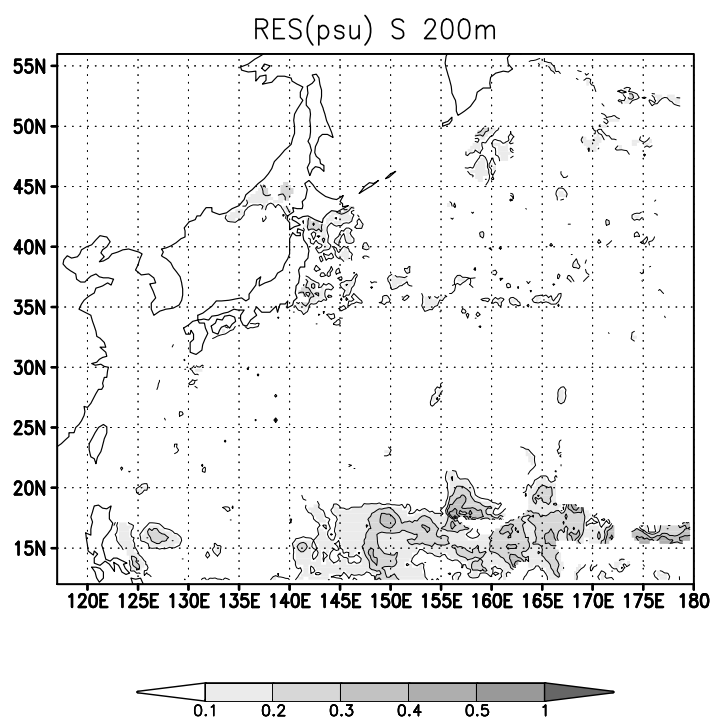
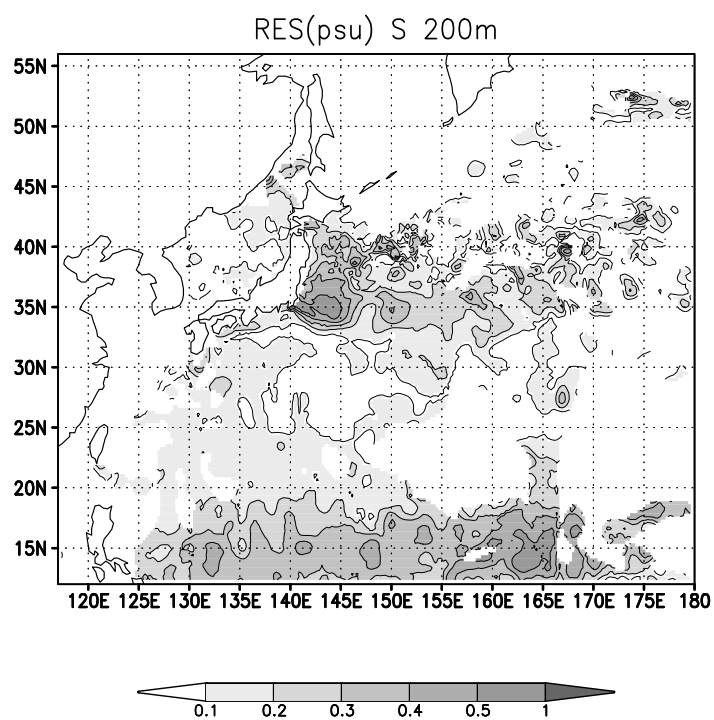


図 2: 200m 深の塩分濃度の同化結果と観測値の残差 (左: 同化前、右: 同化後)

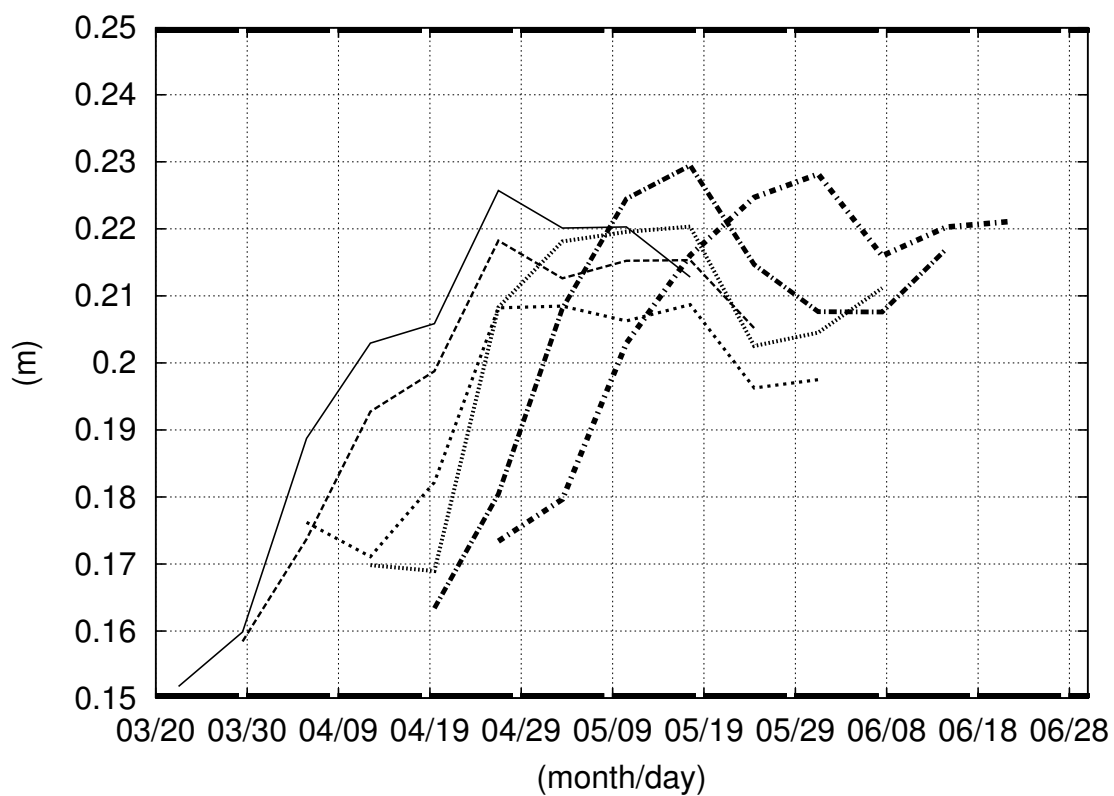


図 3: 黒潮流域 (140°E-150°E, 28°N-35°N) における海面高度偏差の予測値と観測値の残差の平均 (2003/03/22-2003/06/21)

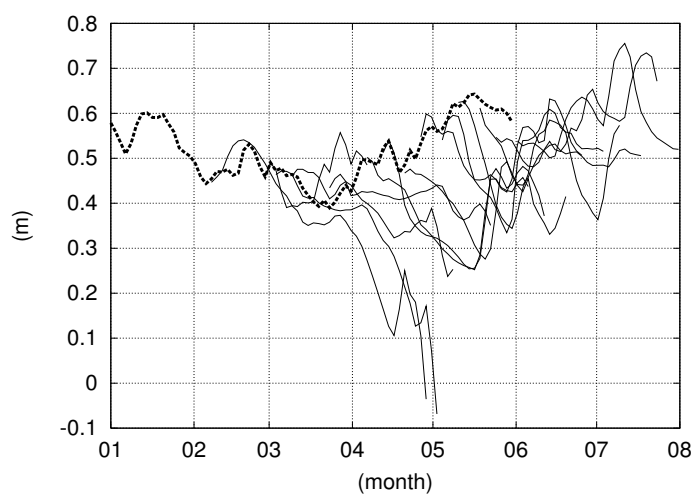
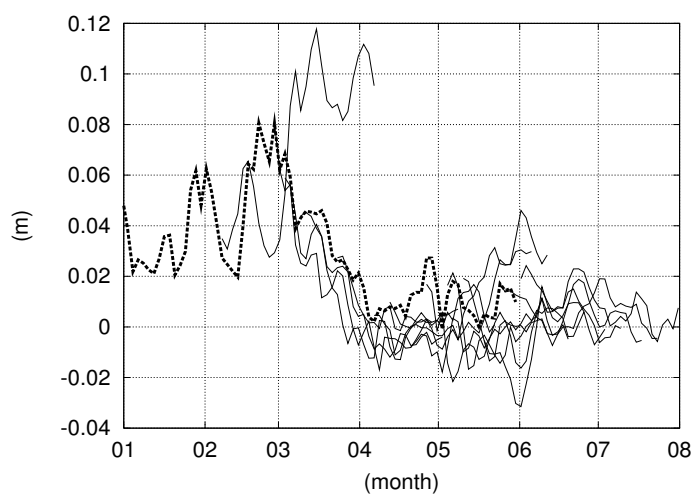


図 4: 黒潮流路の予測結果 (左: 串本と浦神の水位差、右: 八丈島の水位、太点線は同化を続けた計算の結果、2003/01-2003/08)