

JCOPE 海洋変動予測システム-工学的利用に向けて-

宮澤泰正

(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)

早稲田卓爾

(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/東京大学大学院工学系研究科)

The JCOPE ocean forecast system -Toward engineering applications-

Yasumasa Miyazawa and Takuji Waseda

要旨

地球環境フロンティア研究センターでは、日本近海の海洋変動予測システムを開発し 2001 年 12 月からリアルタイム予測実験を行っている(日本沿海予測実験計画: JCOPE)。数値海況予報プロダクトを有効に利用するためには、各応用分野におけるプロダクトの中間利用を促進することが重要である。ここでは海底掘削などの工学的利用を念頭においたプロダクト解析を紹介するとともに、確率的予測の必要性および実現可能性について議論する。

1 初めに

現在、国内外の海洋研究機関でモデルとデータを統合した統合的なデータセットの作成とモデルによる予測実験が行われている(本誌各論参照)。これには、地球温暖化に代表されるように人間活動の拡大と深化が気候や海洋に与える影響を無視できなくなり、全球的な気候・海洋変動の監視と予測が人類共通の課題となっていることが背景となっている。この動きに伴い、地球観測衛星、船舶、海洋フロート等による世界的な海洋観測網の強化、計算機と通信の能力向上、及び数値モデルの著しい発展がみられ、データ及び予測の高精度化が着々と進められている。

地球環境フロンティア研究センター(独立行政法人海洋研究開発機構)では、日本沿海予測実験計画(JCOPE)の下で<海の天気予報>の実現を目指した海洋変動予測実験を行っている(Guo et al., 2003; Miyazawa et al., 2004; Miyazawa et al., 2005)。実験の一環として、日本近海(12° -62° N, 117° -180° E)の高解像度海洋大循環モデル(POMgcs, 水平 1/12° 格子, 45 層)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 JCOPE 海洋変動予測システムを構築した(宮澤と山形, 2003)。予測は一週間毎に更新されてウェブ上で可視化され、数値 データ そのもの も 一般 に 公開 され 利用 されている (<http://www.jamstec.go.jp/frcgc/jcope/>)。2001 年 12 月の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。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(宮澤他, 2005)。数値漁海況予報の実現を目指した水産総合研究センターとの共同研究においては、現場観測データによるプロダクトの詳細な検証が行われ、予測システムを構成する諸要素のうち、海洋数値モデル改良の必要性が改めて強調される結果となった(小松他, 2005)。

このような海況予測システムのプロダクトはどのように活用したらよいだろうか。予測システムのプロダクトが解像できる現象は、使用しているモデルに依存している。例えば JCOPE システムでは表現できる現象の最小の時空間スケールを 50km, 10 日としている。もしその場その時間の観測値があるならば、その場その時間の現況推定値として観測値にまさるものはあるまい。また、モデルによらず経験的な知識と最新の観測データをもとに作成されるような詳細な海況図(例えば「一都三県漁海況速報」など)は、日々の海況把握のために独自の存在意義を保ち続けるだろう。数値海況予報の最初の主要な利用者は、もしかしたら、極めて小さな時空間スケールの正確な海況情報を必要とすることが多いであろう一般利用者であるよりも、プロダクトの特性を生かしながらさらに解析・加工して新たな付加価値を生み出す中間利用者であるかもしれない。

プロダクトの中間利用の形態としては、まず海洋物理的な解析が典型例としてあげられる。例えば杉浦他(本誌)は、四次元変分法によってモデル力学に整合する海洋再解析データセットを作成しアジョイントモデルによる感度実験も併用しながら水塊解析を行っている。海洋資源解析の例としては、小松(私信)による JCOPE 再解析データをもちいたマアジの卵稚子分布解析がある。こうした中間利用は、利用者側のプロダクト改良の要求を開発側にフィードバックしつつ今後もさらに進められていくだろう。

筆者の一人(早稲田)が所属する東京大学大学院環境海洋工学専攻では、「工学的利用を考慮した仮想海洋環境の統合と利用技術に関する研究(仮想海洋環境プロジェクト)」を実施している。本研究は様々なスケールの大気・海洋モデルの出力を統合し、海洋開発や新航路開発のために必要なデータを提供することを目的のひとつとしており、プロダクトの工学的利用を目指したまさに中間利用者としての研究プロジェクトであると言える。本稿では、「仮想海洋環境プロジェクト」の一環として行われた、南海トラフにおけるメタンハイドレート掘削を想定した JCOPE システムのプロダクトの解析(吉本, 2005)を紹介し、プロダクトの本格的な工学的利用のためには確率的な予測が必要であることを示唆する。次に、確率的予測を必須とする物理的な要因についてのモデル研究(Waseda et al., 2004; Miyazawa et al., 2005)を紹介し、確率的な予測の可能性について論ずる。最後に、プロダクトの工学的利用を目指した中間利用者の立場から、波浪と海流の予測を結合した新たな予測・データ配信システムの可能性について触れる。

2 JCOPE システムのプロダクト解析 -工学的利用の視点から-

日本南岸を流れる黒潮は、流速が速く、変動も激しくまた沿岸域における急潮や異常潮位の原因になるなど、船舶航行や海底掘削など海域での活動に与える影響は非常に大きい。またエネルギー安全保障の観点から代替エネルギーの必要性が叫ばれ、その選択肢の一つとして日本近海

にも多く存在するメタンハイドレートが挙げられるが、最も資源量が多く見込まれ開発が期待されている海域が南海トラフであり、南海トラフ海域に定常的に存在する黒潮の変動や流速構造を把握することは重要である。従来は観測に限られ、海域の流速の立体的な分布の統計的な解析を行うことは困難であった。吉本(2005)はJCOPEシステムのプロダクトの解析を行うことにより、黒潮海域の流速の統計分布を詳細に調べた。

JCOPEシステムのプロダクトには、データ同化を継続して行い作成した再解析データと、再解析データを初期値として予測計算を行った予測データの2種類がある。この研究では流速分布の実態を把握することが目的なので再解析データを用いた。期間は2003年の1年間であり、2日平均値を解析した。1度間隔の格子内でそれぞれ表面流速の頻度分布を調べた結果(図1)、黒潮の影響は正規分布としてよく近似され、黒潮以外の中規模渦や風などによるとみられる流れの影響はレイリー分布としてよく近似されることがわかった(図2)。このことは、黒潮近傍海域の流速頻度分布が、黒潮流軸の存在確率により大きく変わることを示しており、黒潮流域で海上活動を展開するには黒潮流軸の予測が重要となることを示唆している。すなわち、黒潮が定在的に存在する海域では正規分布、黒潮流路から離れた海域ではレイリー分布となり、それ以外の海域では、黒潮存在確率にしたがって正規分布とレイリー分布との重ね合わせとして表される。黒潮が卓越する海域においては、流速頻度分布は鉛直方向にもあまり変化せず、深い構造を持った強い流れ場の変動の結果であることがわかる。その黒潮流軸近傍の流量鉛直分布を調べた。図3aは、ASUKAラインによる流量鉛直分布の観測結果(内田と今脇, 2004)を示し、図3bは同じ場所のJCOPE再解析データの結果(2003年)を示す。時期は異なるものの、両者はおおむね一致していると言える。一方、黒潮流軸から離れた海域では、流速の鉛直方向の相関は明確でなく、表層近傍におけるエクマン流と比較的深い構造を持つ中規模渦などの影響が混在している可能性がある。なぜレイリー分布になるかということの検討、モデルバイアスの可能性の検討、及び観測との比較は今後の課題である。ただし、得られたレイリー分布は、海域によらないロバストなものとなることが、JCOPE再解析データからわかった。

吉本(2005)は、南海トラフでのメタンハイドレート掘削を紀伊半島沖でSPAR型プラットフォーム(直径30m, 喫水160m)により行うことを想定し、プラットフォームにかかる流れによる抗力をJCOPE再解析データの流速鉛直分布(図4)を用いて求めた(ただし、円柱構造を仮定しているの、実際のトラス構造では、抗力の絶対値は小さくなる)。図4右に示すように、黒潮流軸をはさんで沖合側と沿岸側では海底地形の影響を受けて流速の鉛直構造が異なる。これにより、表面流速がほとんど同じで、お互いに20km程度しか離れていない2点であっても沖合側で受ける抗力は沿岸側より約2倍大きくなることがわかった。このことは、同じ黒潮流軸近傍であっても流軸そのものとの微妙な位置関係によって海面下の構造物が受ける流体力がかなり違うことを意味しており、黒潮流軸の正確な予測が重要となることを示唆している。

3 確率的予測に向けて

前節で示したように、黒潮流軸の予測は黒潮域における海底開発等にとって極めて重要であ

るが、黒潮の流路は非線形な力学に支配され、予測を行うにあたり外力や予測の初期値の不確実性の影響を受ける。したがって工学的利用に資するためには確率的な予測情報の提供が必須になるだろう。以下では、外力あるいは初期値の不確実性が黒潮流路に及ぼす影響を調べたモデル研究 2 例(Waseda et al., 2005; Miyazawa et al., 2005)を紹介し、黒潮流路の確率的な予測の可能性について議論したい。

3.1 外力の不確実性

Waseda et al. (2005)は、POM を基盤として構築した高解像度黒潮・親潮システムモデル(三寺ら, 1997)を用いて、外力の高周波成分が黒潮流路変動に及ぼす影響を調べた。図 5 に、黒潮域の点(30° N, 135° E)における風応力カールの時間変化を示す。日平均データには前線や温帯低気圧の通過に伴う擾乱による間欠的な変動が頻繁に見られるが、月平均データでは間欠的な変動はすべて平滑化されている。風応力カールの間欠的な変動の大きさはおおよそ $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ と見積もられる。これに伴うエクマン収束の大きさは $O(10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$ であり、水平流速で考えると $O(10^{-1} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$ である。すなわち、こうした間欠的な変動は黒潮や中規模渦(流速 $O(10 - 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$)に対して 1/100-1/1000 の大きさの擾乱として作用するとみなせる。

黒潮流路変動を数値モデルで表現するために、黒潮・親潮システムモデルを 35sv 一定の黒潮流量、Hellerman-Rosenstein(1983)の年平均気候値風応力で静止状態から始めて 26 年間駆動した。このとき内部の力学により 7 年目に黒潮流路は直進から蛇行へと遷移し、14 年目に再び直進に遷移しそれが 25 年目の積分終了まで持続した(図 6)。ここで、14 年目の最初から QuikSCAT 日平均風応力データに外力を変更する感度実験を行った。この場合図 6 に見られるように、直進流路は 14 年目以降再び蛇行流路に遷移した。現象を詳しくみるために海面高度のスナップショットを図 7 に示す。QuikSCAT 日平均データで駆動した場合(図 7 左列)は、九州南方沖の高気圧性渦の挙動が Hellerman-Rosenstein の年平均気候値で駆動した場合(図 7 右列)と異なり黒潮と相互作用しつつ蛇行を引き起こしていることがわかる。また、再循環域に入った高気圧性渦が黒潮再循環の強度に大きな影響を与えていることもわかる(図 6 上)。同じ QuikSCAT データでも月平均値で駆動した場合は Hellerman-Rosenstein データで駆動した場合とほとんど変わらず(図 7 中列)、高気圧性渦の挙動が、風応力の 1 ヶ月以下の時間スケールの成分によって大きく変化したことがわかる。さらに、どの場所の風の高周波成分の効果が大きいかわかるために、月平均にするか日平均にするかを 140° E 以西と以東に分けて実験を行ったところ、渦の挙動変化に与えた効果は 140° 以西の局所的な風の高周波成分によるものであることが確認された。

今までの研究(Waseda et al., 2002)によれば、再循環域の高気圧性渦の移動は渦の不安定によって生ずる順圧的な渦対によって支配され、温度躍層の比較的小さな変化によって移動の様相が大きく変わりうることを示されている。以上の結果から、このような渦の挙動は風応力の高周波成分による擾乱に敏感であり、さらには黒潮と渦の相互作用による流路変動も敏感となりうることを強く示唆される。数値モデルによる黒潮流路の予測を考える際には、誤差が決して小さ

くないであろう外力の高周波成分がもたらす予測の不確実性は無視できないだろう。言いかえると、黒潮流路の変動に直接関与したのは渦の挙動であり、微小な擾乱がその渦の挙動を通して増幅されたのである。渦の挙動は風以外の擾乱によっても影響され、例えば躍層の構造の誤差によっても影響を受ける。本実験は、このように非線形性の強い場における初期値の影響を明示した一例であると考えても良いだろう。

3.2 初期値の不確実性

一方、Miyazawa et al. (2005)は、黒潮流路の短期(3 ヶ月以下)予測をするにあたり、初期値の不確実性が予測に与える効果を調べるために、1999年10月～11月に生じた現実の直進から蛇行への流路遷移を対象としJCOPEモデルを用いて予測実験を行った。1999年7月末から9月始めまで10日毎にTOPEX/POSEIDON衛星海面高度偏差を同化して初期値を作成した。9月7日から固定した海表面外力及び側面境界条件のもとで予測を行った。最初の予測は、図7左列と同様に九州近傍の高気圧性渦が黒潮と合流し相互作用しながら予測開始後50-60日後に蛇行を引き起こす過程をうまく予測できたが、予測開始80日後には、実況に比べれば振幅も小さく、蛇行の位置も東寄りになった(図8)。現実の黒潮流路は、振幅の大きな非大蛇行離岸流路に遷移した。

初期値の違いによる予測の感度を調べるために、海面高度データに5cmの誤差を想定し、ブリーディング法(Toth and Kalnay, 1993)により摂動を加えた10個のアンサンブルメンバーの初期値を用いて同様に予測実験を行った。このとき図8に示すように、大蛇行型(八丈島の西に蛇行が存在し、串本-浦神の水位差が低く蛇行の振幅が大きい)と非大蛇行型(八丈島の東に蛇行が存在するか、あるいは串本-浦神の水位差が高く蛇行の振幅が小さい)に流路の予測が分岐した。流路の分岐は予測開始以降50日目以降に始まり、渦の挙動に伴う予測可能性の限界を示唆する。分岐が始まると、図9に示すように、基本的に強い高気圧性渦が初期値にあるメンバーは大蛇行に発展し、弱い高気圧性渦が初期値にあるメンバーは非大蛇行型となった。このとき、上流の黒潮流量や四国海盆全体の運動エネルギーと位置エネルギーなど、基本的な場の強さはアンサンブルメンバー間で違いがないことを確認しており、引き金となる高気圧性渦の強さの比較的小さな違いにより顕著な流路の違いが生じたことがわかった。

高気圧性渦の強度は、海面高度の摂動の大きさとして指定した5cmあまりの範囲で変化している。変動の大きい黒潮域では、初期値化に用いる海面高度データの内挿誤差は、特に観測軌道の間などで5cm程度になることもあり、初期値の誤差が黒潮流路の予測にもたらす影響は無視できないだろう。また、黒潮流路のように顕著な二様性をもつ現象の予測の場合は、二つの安定状態の混合となったときに物理的な解釈が難しくなるアンサンブル平均(例えば、図8の太線参照)よりも、予測の確率分布に対応する各アンサンブルメンバーの特徴に着目していくべきだろう。

アンサンブル予測の応用可能性として、アンサンブルメンバーから得られる空間的な流軸の確率分布を利用することが考えられる。すなわち、アンサンブル予報から得られる、ある海域における流軸の存在確率から、2節で紹介した正規分布とレイリー分布の比率を確定し、既に格子毎に統計的に求めている分布のパラメータを用いて流速の頻度分布を予測することである。この

手法の画期的なことは、比較的少ないアンサンブル実験の結果から、流速の頻度分布が時々刻々変化する予報値の一つとして求まる点である。実用化に際しては、それぞれの海域における流速頻度分布をもとに、海洋資源開発プラットフォームへの影響を推算しその海域からの待避警告の指標などとして考えることができる。

4 終わりに

JCOPE 海洋変動予測システムを題材とした、数値海況予報プロダクトの工学的利用に向けた解析結果を紹介した。日本南岸の黒潮海域では、黒潮本流による流れとその他の流れによって流れの頻度分布が異なり、なおかつ黒潮流軸のごく近傍でも海面下の流速の鉛直構造の違いにより構造物が受ける流体力に顕著な違いが生ずることがわかった。このことは黒潮域での海上・海底活動には流れの予測が重要であることを示唆する。一方、非線形な力学が支配する黒潮流路の予測は、用いる外力や初期値の不確実性により、確率的な取り扱いが必須になる。数値海況予報は経験的あるいは統計的な予報に比べ、常にモデルスキルの限界を伴うという特徴をもつ点で異なるが、確率的な予測に自然に拡張できる点で優れていると言える。工学的利用など本格的に応用する場合は、引き続きモデル等の改良を行うとともに、確率的な予測を実行し、エラーバー付きのプロダクトを各応用分野の中間利用者に提供できるか否かが重要になるだろう。

プロダクトの中間利用を促進するためには、膨大な容量のプロダクトを中間利用者が自在に解析できることが必要である。一連のデータフローをモジュール化しまったく異なるアプリケーションに対応できるようにすることにより、より汎用性の高い、工学的利用を目的とした予測システムの実用化が可能となるだろう。具体的には、予測データからのデータの切り出し、加工、配信などの指示を GIS ベースでインタラクティブに行う事などがあげられる。各国、各研究機関に分散したデータを一括管理することを可能にする分散型データサーバーシステムの活用も必要となってくるだろう。

最後に、高解像度海洋変動予測が実現化することによる様々な可能性について述べたい。空間解像度が数キロメートル程度になると、海流による表層の波浪への影響を、これまでにない精度で推算することができるようになる。波浪が海流の影響で屈折し、そのレンズ効果でエネルギーを収斂させることは良く知られているが、その効果を推算するための海流データはこれまで存在しなかった。JCOPE プロダクトの活用の一つの方向性として、波浪モデルに対する外力とすることが期待される。一方、そのような波浪エネルギーの詳細な分布がわかると、波浪による表層乱流の生成過程、海面粗度の変動による大気境界層への影響など、広く大気海洋結合系に対する影響も、詳細に推算することができるだろう。こうして得られた、高解像度の海流、波浪、風の情報が、工学的な利用価値が高いことは言うまでもない。

参考文献

- [1] Guo, X., H. Hukuda, Y. Miyazawa, and T. Yamagata 2003: A triply nested ocean models -Roles of horizontal resolution on JEBAR-, J. Phys. Oceanography, 33, 146-169.
- [2] Miyazawa, Y., X. Guo, and T. Yamagata 2004: Roles of mesoscale eddies in the Kuroshio paths, J. Phys. Oceanogr., 34, 2203-2222.
- [3] Miyazawa, Y., S. Yamane, X. Guo, and T. Yamagata, 2005: Ensemble Forecast of the Kuroshio meandering, accepted by J. Geophys. Res.
- [4] 宮澤泰正, 山形俊男, 2003: JCOPE 海洋変動予測システム, 月刊海洋, 35, 881-886.
- [5] 宮澤泰正, 鍵本崇, 郭新宇, 川尻秀之, 佐久間弘文, 山形俊男, 2005: JCOPE 海洋変動予測システムとその展開, 月刊海洋, 37, 263-269.
- [6] 小松幸生, 瀬藤聡, 植原量行, 宮澤泰正, 伊藤進一, 日下彰, 寛茂穂, 鹿島基彦, 清水学, 平井光行, 2005: 水産関係機関の現場データによる JCOPE の検証—数値漁海況予報を目指して—, 本誌.
- [7] 吉本吾郎, 2005: 日本南岸沖における海洋予測データの解析とその工学的利用, 東京大学工学部システム創成学科卒業論文.
- [8] Waseda, T., H. Mitsudera, B. Taguchi, and K. Kutsuwada, 2005: Significance of high-frequency forcing in modeling the Kuroshio, J. Oceanogr., 61, 539-548.
- [9] 内田裕, 今脇資郎, 2004: 四国沖の黒潮の流量の時系列データ, 月刊海洋 / 号外, 37, 22-29.
- [10] 三寺史夫, 吉川泰司, 田口文明, 中村啓彦, 1997: 高解像度黒潮・親潮システムモデル: 序報, 海洋科学技術センター試験研究報告, 36, 147-155.
- [11] Hellerman, S., and M. Rosenstein, 1983: Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. J. Phys. Oceanogr., 13, 1093-1104.
- [12] Waseda, T., H. Mitsudera, B. Taguchi and Y. Yoshikawa 2002: On the eddy-Kuroshio interaction: Evolution of the mesoscale eddy, J. Geophys. Res, 10.1029/2000JC000756:01.
- [13] Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations, Bull. Amer. Meteor. Soc., 74, 2317-2330.

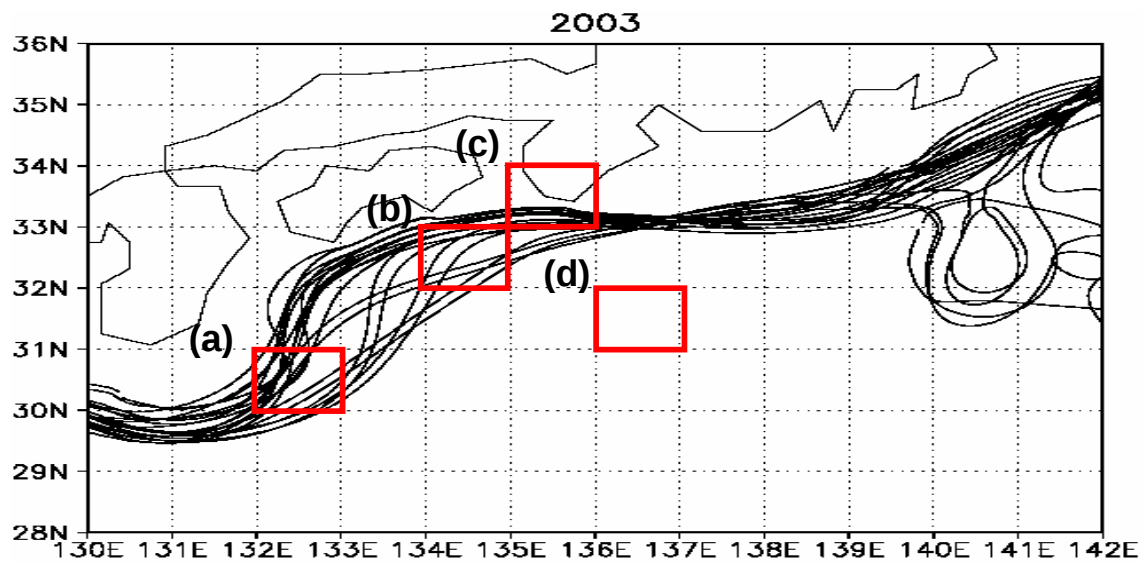


図 1: JCOPE 再解析データから推定した 2003 年の黒潮流軸分布。黒潮流軸は海面高度 0.3-0.4m の範囲として定義した。矩形部は図 2 において流速の頻度分布を示した範囲を示す。

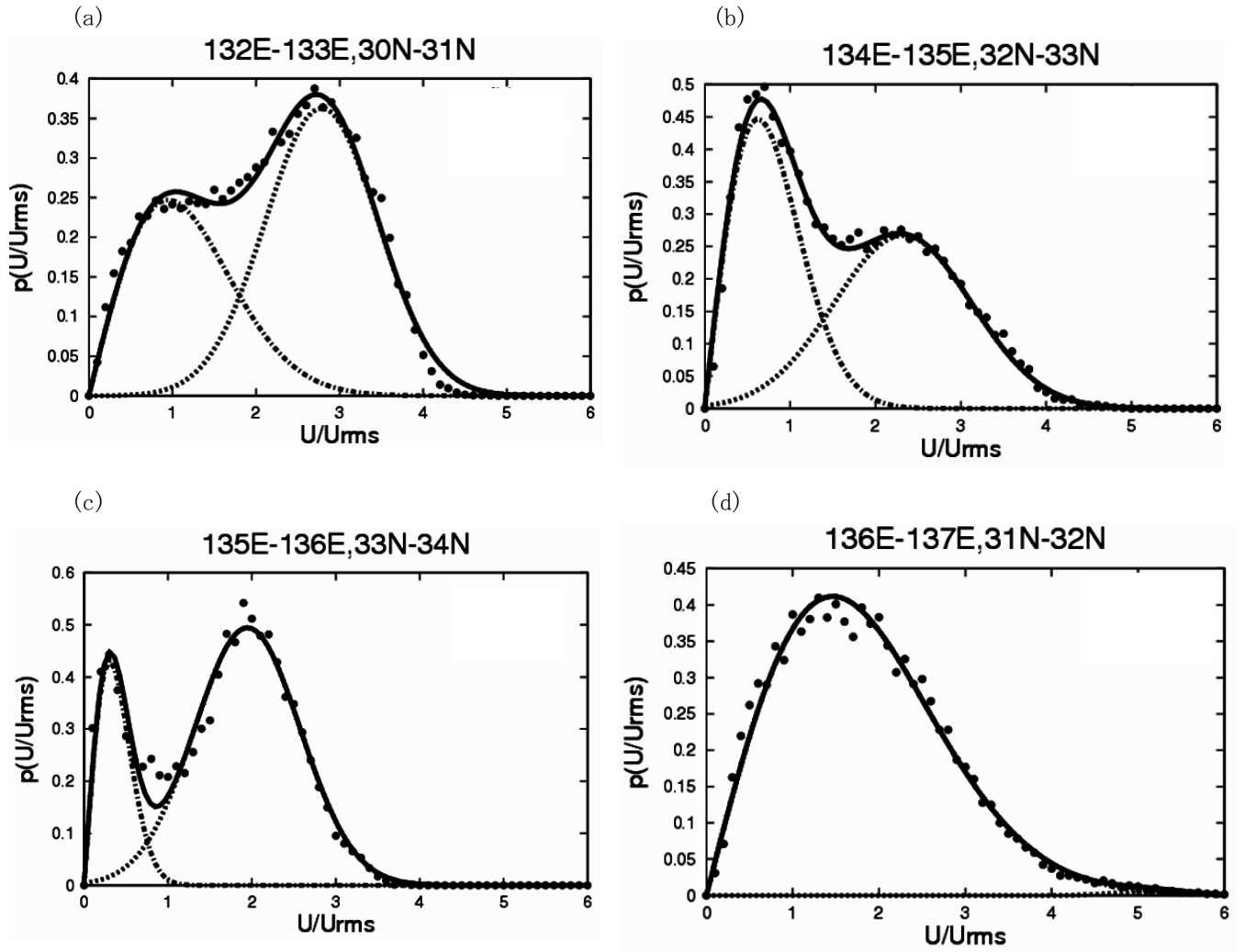


図2: 2003年のJCOPE再解析データから算出した表面流速の頻度分布(黒丸)。縦軸は頻度を表し、横軸は正規化した流速の大きさを表す。一点鎖線: レイリー分布曲線。点線: 正規分布曲線。実線: レイリー分布と正規分布を組み合わせた曲線。(a) 30-31° N, 132-133° E (b) 32-33° N, 134-135° E (c) 33-34° N, 135-136° E (d) 31-32° N, 136-137° E

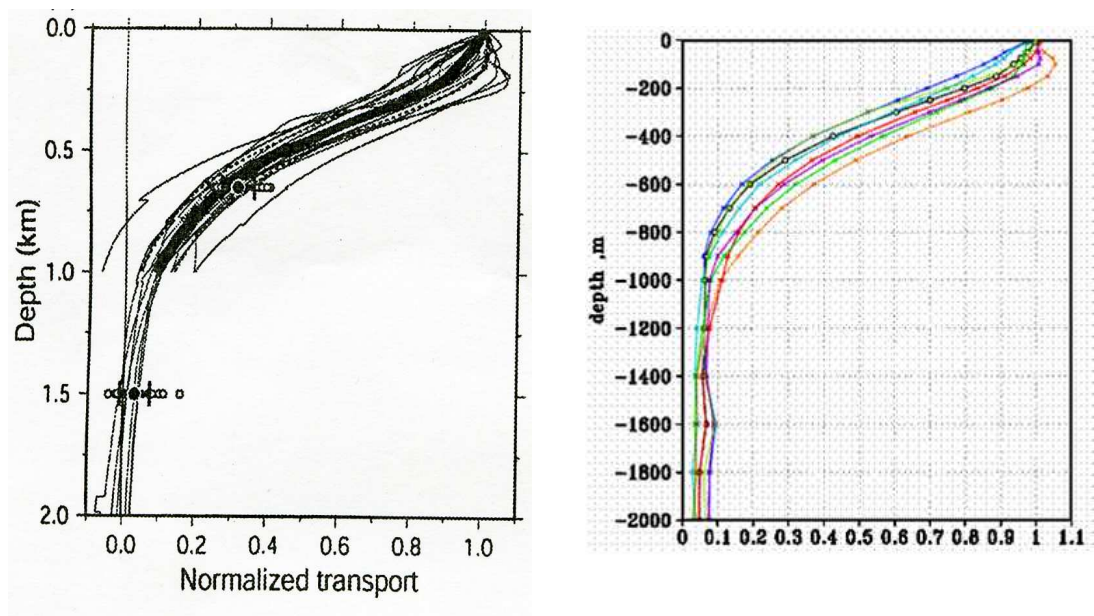


図 3: ASUKAラインでの流量(表面の流量で正規化した)分布。左図: 観測データ(1993 年 10 月～1995 年 11 月(内田と今脇, 2004))。右図: JCOPE 再解析データ(2003 年)。

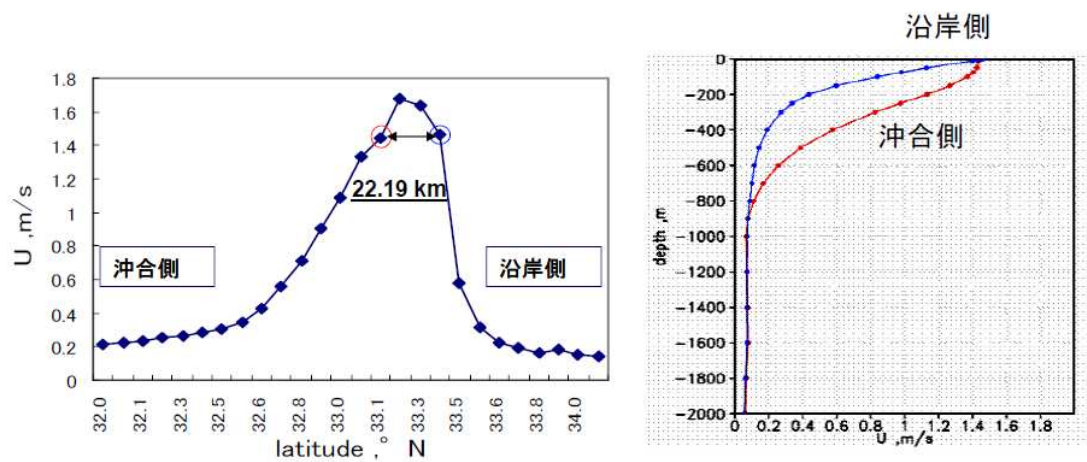


図 4: 紀伊半島沖(136° E)での黒潮の表面の流速水平分布(左)と、沖合側及び沿岸側(左図の丸で囲んでいる点)の平均流速鉛直分布。

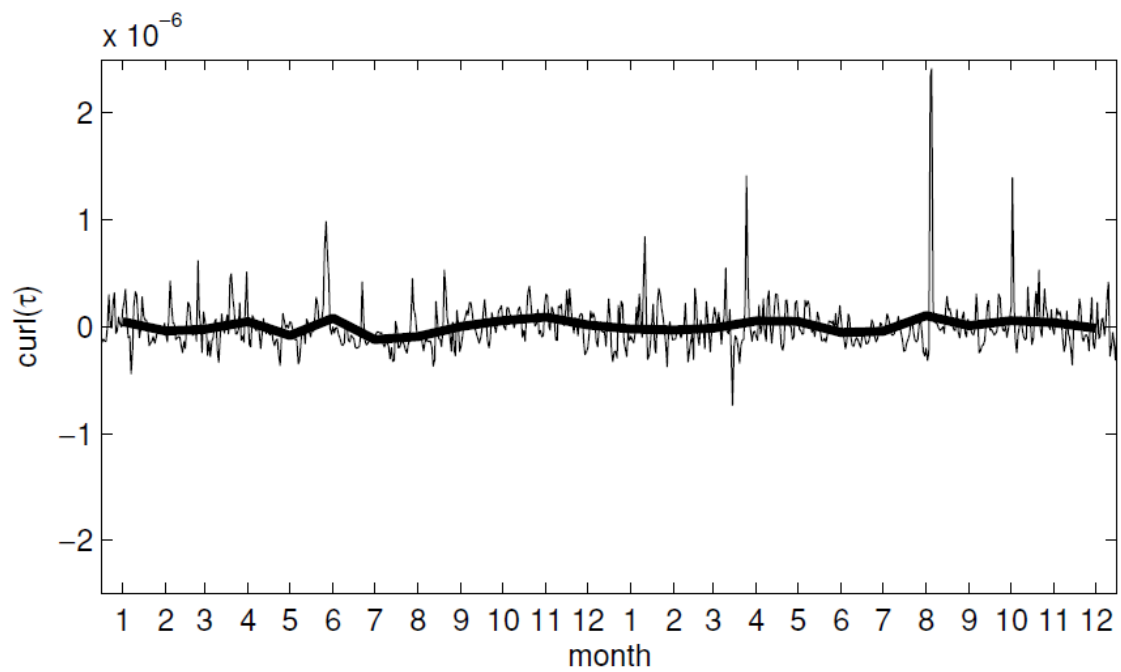


図 5: 2000 年 1 月から 2001 年 12 月までの期間における 30° N, 135° E での風応力カールの時間変化。風応力は QuikSCAT 海上風観測値から求められた 1° 格子データ (J-OFURO) を用いた。細線は日平均を表し、太線は月平均を表す。

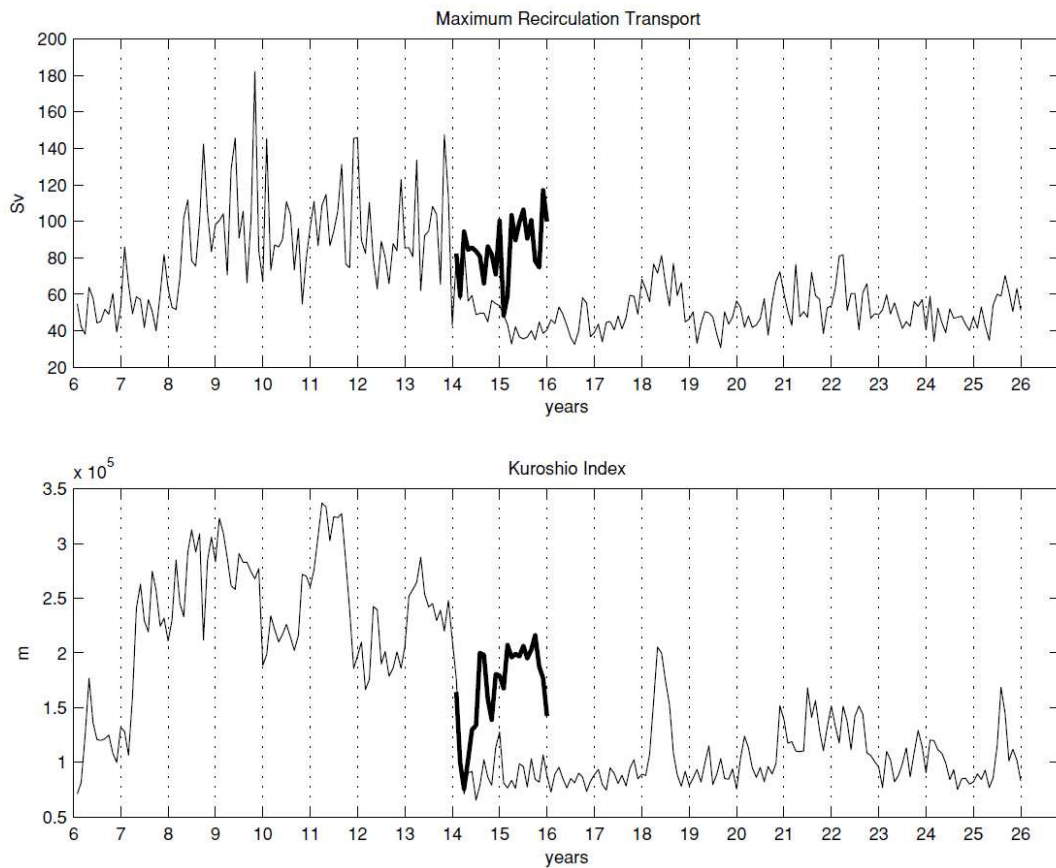


図 6: 上) 黒潮・親潮システムモデル実験における四国沖再循環の強度の時間変化。再循環の強度は、図 7 左上に示す領域での流量流線関数値の最大値で定義した。下) 同実験における黒潮の紀伊半島から房総半島にかけての平均的な離岸距離の時間変化。黒潮の位置は海面高度が 0.7m の線で定義した。細線は Hellerman-Rosenstein による年平均気候値風応力により駆動したコントロールラン。太線は、QuikSCAT 日平均風応力(J-OFURO)により駆動した結果。

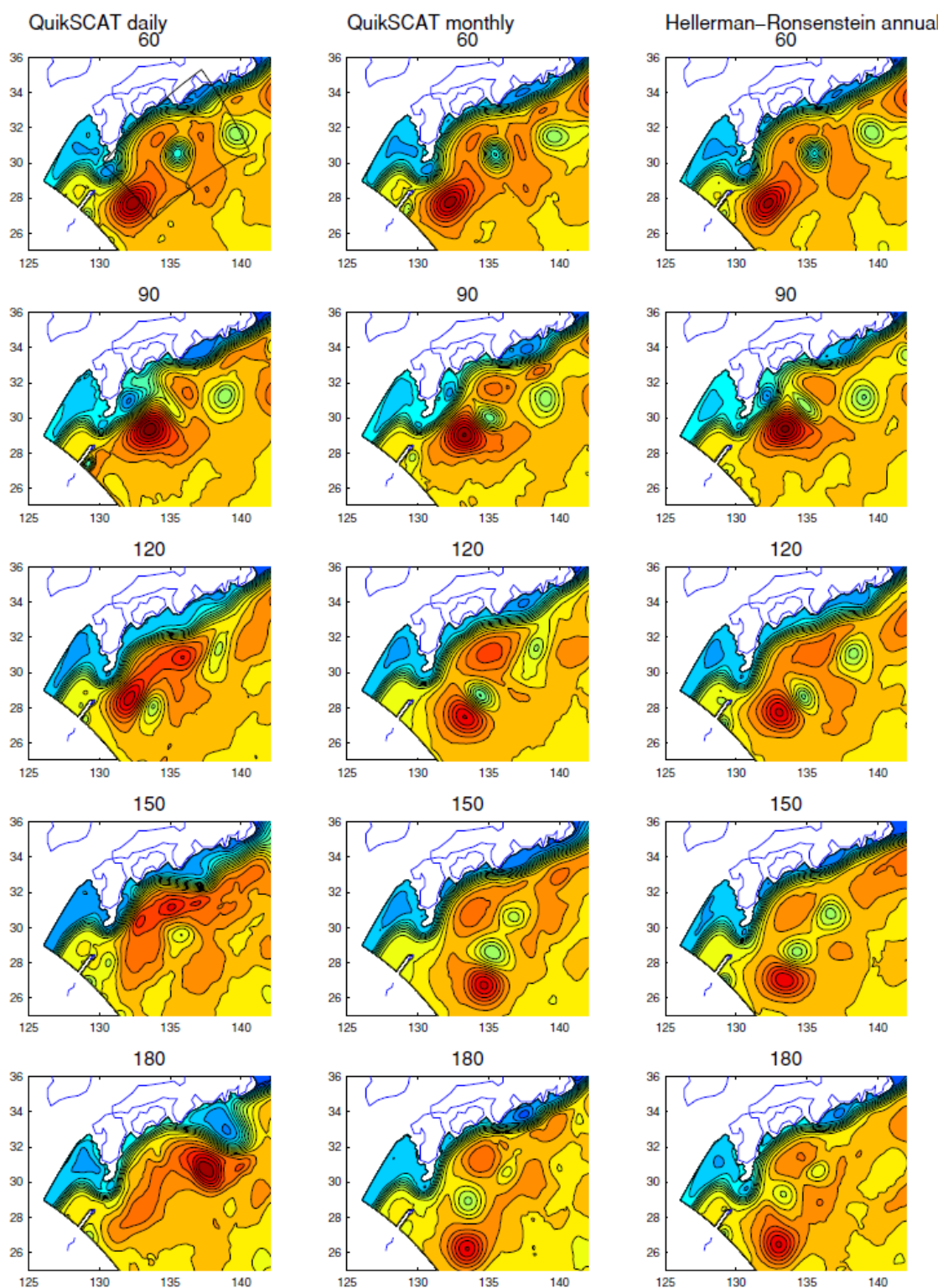


図 7: 黒潮・親潮システムモデル実験における黒潮流路の変動を示す日平均海面高度場。右) Hellerman-Rosenstein 年平均気候値風応力で駆動したコントロールランの 14 年目 60 日目から 180 日目までの結果。中) コントロールランの 14 年目 60 日目から QuikSCAT 月平均風応力で駆動

した結果。左) コントロールランの14年目60日目からQuikSCAT日平均風応力で駆動した結果。
左上図の四角部分は、四国沖再循環の強度を調べた領域(図6上参照)。

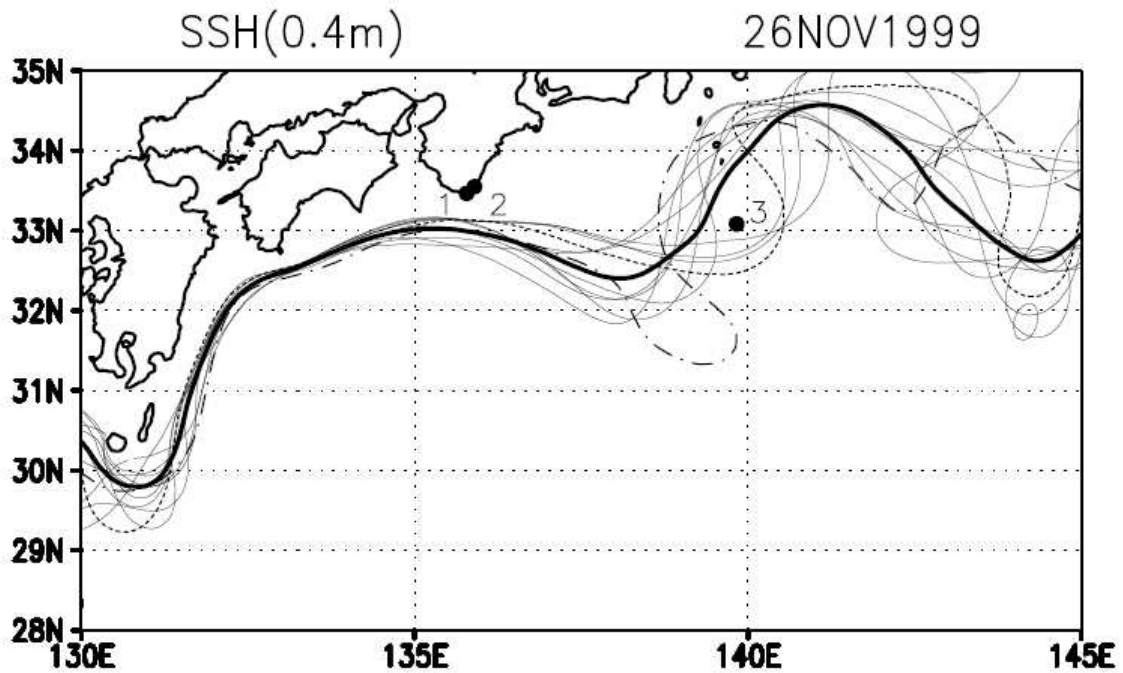


図8: JCOPEモデルにおける1999年9月7日の状態を初期値とした1999年11月26日の黒潮流路(海面高度0.4mの線)ハインドキャスト実験結果。点線:摂動なしの予測。一点鎖線:データ同化による実況。細線:摂動を加えて生成した10個のアンサンブル予測メンバー。太線:アンサンブル平均。1. 串本。2. 浦神。3. 八丈島。

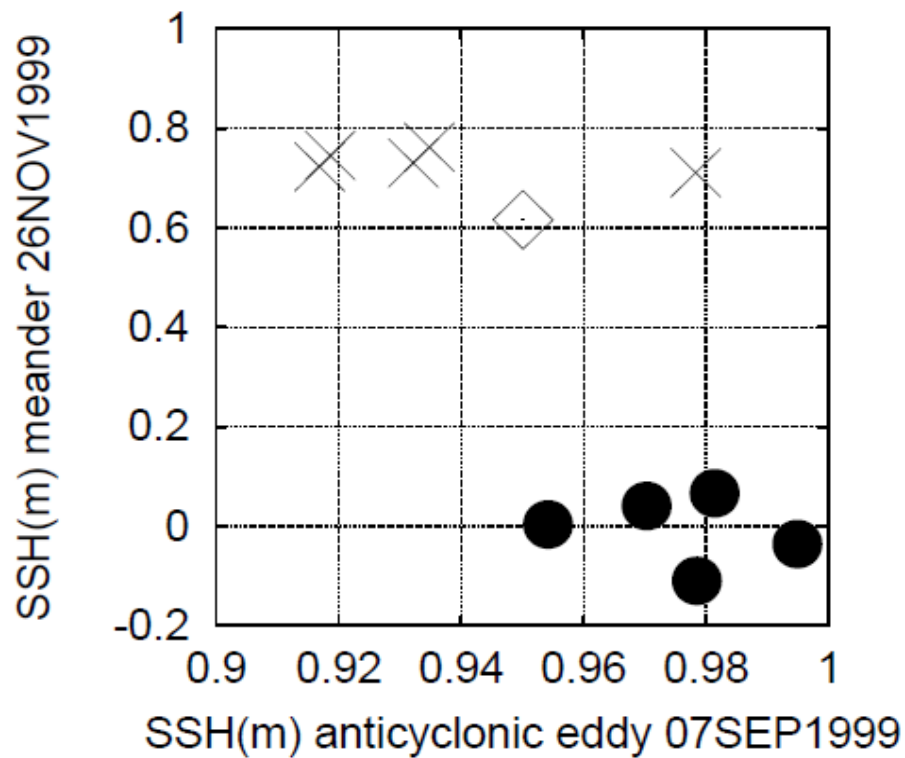


図 9: 引き金となった初期値(1999 年 9 月 7 日)の高気圧性渦の強さ(28° - 32° N, 130° - 136° E において海面高度が 0.9m 以上の領域での平均海面高度。横軸)と, 予測開始後 80 日後(1999 年 11 月 26 日)の蛇行の強さ(32.5° N, 138° E における海面高度。値が小さいほど蛇行が強い。縦軸)の関係。黒丸は大蛇行型のアンサンブルメンバー, ×点是非大蛇行型のアンサンブルメンバー, △点は摂動なしの予測を表す。