

## JCOPE 海洋変動予測システムとその展開

宮澤泰正, 鍵本崇, 川尻秀之, 章若潮, 佐久間弘文

(地球環境フロンティア研究センター)

郭新宇

(地球環境フロンティア研究センター/愛媛大学沿岸環境科学研究センター)

山形俊男

(地球環境フロンティア研究センター/東京大学大学院理学系研究科)

## Current and future perspective of the JCOPE ocean forecast system

Yasumasa Miyazawa, Takashi Kagimoto, Hideyuki Kawajiri, Ruochao Zhang, Hirofumi Sakuma,

Xinyu Guo, Toshio Yamagata

### 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)。主に黒潮流路変動に焦点を当て、様々な改良を行った結果、2004 年夏の黒潮大蛇行の予測に成功した。現在、現場観測データによる詳細な検証を通じて一層の予測精度の向上を図るとともに、プロダクトの広範かつ具体的な応用を目指した様々な試みを行っている。

### 1 初めに

大気海洋の変動現象の予測を目指す機運は、1982-1983 年の強いエルニーニョ現象を契機にして高まり、「熱帯海洋と全球大気研究計画」(TOGA, 1984-1994 年)等を経て、現在では大気海洋結合大循環モデルを用いた熱帯の気候変動予測が世界各国の関係機関により行われている。気候変動予測に使われる大気大循環モデルは日々の天気予報に用いられるものと基本的に同じものであり、その精度向上を目指して、気象庁や関連の研究機関において改良が活発に行われている。近年の地球観測衛星等による世界的な海洋観測ネットワークの強化により、中緯度においても海洋変動の数値予報が可能となった。海洋大循環モデルについても、これを用いて海流や水温、塩分濃度等を日常的に予測し(<海の天気予報>)、その成果を社会に還元するとともに、日々、改良に努める広範な努力が必要である(山形, 2004; 山形, 本誌)。<海の天気予報>が実用化するならば、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。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、熱帯域にとどまらず、ゆくゆくは亜熱帯や亜寒帯域の気候変動の解明と予測にも貢献することになるだろう。これは世界の海洋に現れている 10 年スケールの気候変動現象の予測と、それに基づく社会基盤の設計にも有益な効果を生むと考えられる(山形, 2003)。

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 2001 年 12 月から「海の天気予報」の実現を目指したリアルタイム海洋変動予測実験を行っている。我々は 1997 年に JCOPE を開始した当初から、黒潮の流量や流路などを適切に再現するためには海洋大循環モデルを用い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きわめて重要であることを認識していた(Kagimoto and Yamagata, 1997; Guo et al., 2003)。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 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測実験も行った(Miyazawa et al., 2005)。

こうした研究の成果に基づき、日本近海( $12^{\circ}$  -  $62^{\circ}$  N,  $117^{\circ}$  -  $180^{\circ}$  E)の高解像度海洋大循環モデル(POM, 水平  $1/12^{\circ}$  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/>)。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。本稿では、JCOPE 予測システムから見た 2004 年夏の黒潮大蛇行の形成過程と、多様な共同研究を含む今後の展開について報告する。

## 2 2004 年黒潮大蛇行の形成過程

日本南岸の黒潮流路は 1991 年以来非大蛇行流路をとっていたが、2004 年夏より大蛇行流路に移行したと見られる。近年、短期的な黒潮流路変動における中規模渦との相互作用の重要性が指摘されている。類似した過程が、JCOPE 海洋変動予測システムの基盤となった海洋モデルにより行った大循環シミュレーションでも再現されており(Miyazawa et al., 2004)、今回の大蛇行発生と中規模渦の関連も注目される場所である。以下では、JCOPE 予測システムから見た 2004 年夏の黒潮大蛇行への遷移過程について述べる。JCOPE 予測システムのプロダクトは、常に観測データを同化し続けることで現況推定値とみなすことができる再解析データと、一定時間間隔の再解析データを初期値としデータ同化を行わず気候値外力によってモデルを駆動して作成した予測データから成る。まず再解析データによって現象発展の具体的な過程を把握し、それぞれの

局面における力学機構については予測データを調べることで有効な解析の方法である。

再解析データから、2003 年 11 月初めに九州南東沖で生じた小蛇行が 2004 年 4 月には東進を始め、約 4 ヶ月の遷移期間を経て 2004 年 8 月に紀伊半島沖で大蛇行流路に発展した様子が確認できた。こうした遷移の過程は、従来調べられている大蛇行の遷移過程と類似している (Kawabe, 1995)。さらに再解析データを調べると、大蛇行の発生に先立ち、北緯 20 度付近の亜熱帯前線海域において大規模な高気圧性渦が 2 回西進し、それぞれ 2003 年 10 月と 2004 年 4 月には台湾の東方で黒潮に合流する位置に達していることがわかった(図 1)。我々が以前行った大循環シミュレーションは、南西諸島域から伝播した高気圧性渦が四国沖再循環渦を強化し (Kagimoto and Yamagata, 1997), さらに黒潮の蛇行発生に寄与することを示唆しており (Miyazawa et al., 2004) 今回の流路変動におけるこれらの高気圧性渦の振る舞いと大蛇行の関連が注目される。

まず、亜熱帯前線海域の高気圧性渦が下流の黒潮にどのような影響を与えたのか具体的に調べるために、亜熱帯前線海域において高気圧性渦が位置する  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  の矩形領域内の水深 100m の格子点に 1 個ずつ計 576 個の粒子を置き、再解析データの流れ場による粒子の移動を追跡した。2003 年 10 月にこの高気圧性渦が黒潮に合流するまで粒子は高気圧性渦と一体となって移動した。渦が黒潮と合流した後、黒潮や周辺の流れによる移流により粒子は複雑な挙動をする。図 2 左に、2003 年 7 月 1 日の高気圧性渦の位置(図 1 右下参照)から出発した粒子の 4 ヶ月後(2003 年 11 月 1 日)の分布を示す。粒子の一部がトカラ海峡を通り九州南東沖に達しつつあることがわかる。2003 年 10 月 29 日からの予測実験は、この時期にトカラ海峡を通過した高気圧性渦が九州南東沖に進入するとともに黒潮の小蛇行を生じさせることを示唆している(図略)。粒子放流実験は、2003 年 11 月の黒潮の小蛇行発生に関連するとみられる高気圧性渦の起源が 4 ヶ月前の亜熱帯前線海域までたどれることを示している。

黒潮小蛇行はその後振幅の消長を繰り返しながら九州沖に停滞するが、最初に述べたように 2004 年の 4 月以降には東進を開始する。このことと、2004 年 2 月に亜熱帯前線海域で見られた高気圧性渦との関連を調べるために、粒子を 2004 年 2 月 2 日の高気圧性渦の位置(図 1 右上参照)から放流した。粒子の 4 ヶ月後(2004 年 6 月 1 日)の分布(図 2 右)は、粒子の一部がこの時期にトカラ海峡を通過し始めることを示している。この場合 2004 年 5 月 29 日から予測実験を行うと、トカラ海峡を通過した高気圧性渦が黒潮の再循環渦と合体する現象が、黒潮小蛇行の東進及び振幅の増幅と並行して生じた(図略)。このように JCOPE 予測システムのプロダクトは、亜熱帯前線海域を西進する高気圧性渦と黒潮の相互作用が、今回の大蛇行形成に関連していることを示唆している。今後はさらにプロダクトや他の観測データ等の解析を進め、今回の大蛇行発生の機構を詳細に調べていく予定である。

今回の大蛇行については、2004 年 5 月初めからシステムは約 1 ヶ月早めにその発生を予測する傾向があり、振幅の予測においても、1 週間毎に更新する初期値に依存する結果のばらつきがやや見られたが、2004 年 6 月 25 日の初期値から出発した予測からは、ほぼ現況と同様な経過と振幅で蛇行発展を予測できた(図 3)。以降、1 週間毎に更新する 2 ヶ月後の予測は本稿執筆時の 2005 年 1 月末現在に至るまで大蛇行の持続をほぼ安定して予測できている。今回の大蛇行の

予測にみられたような予測誤差を減らし予測の精度をさらに向上させるために、種々の観測データとシステムのプロダクトを詳細に比較し、モデルのバイアス(表現誤差)を減らすためのモデル改良、初期値を作成する際のデータ同化手法の改良、さらには同化する観測データの高精度化を図っていくことが必要である。

### 3 多様な共同研究と今後の展開

JCOPEグループは、2001年12月の予測システム運用開始以来絶えず予測を更新しシステムの改善を進めていく過程で徐々に活動範囲を広げ、海洋変動予測システムが持つ新たな可能性に注目した外部の研究グループと連携して、プロダクトを改良し広範かつ具体的な応用を行うための様々な共同研究を推進することになった。また、成果の社会還元之道を探っていくうちに、海的安全確保や環境保全、漁業、海運などに関する有益な情報を広く社会に提供していく沿岸海況予測情報システム(Coastal Ocean Weather Forecast System:COWFS)を構想し、新たなシステムの開発を行っている。以下ではこうした最近の展開について述べる。

#### 3.1 予測システムの検証と改良

漁海況予報の数値予報化に貢献するために、独立行政法人水産総合研究センターと海洋研究開発機構による共同研究が実施されている(小松他, 2005;本誌, 平井他)。JCOPE 予測システムは、水産総合研究センターが保有する豊富な現場観測データによる詳細な検証を経て改良される。また、共同研究によって水産関係研究機関の観測データを同化することにより、特に沿岸海況の予測精度が向上すると考えられる。さらに、漁海況予報の利用者たる漁業者等の要望も積極的に入れプロダクトを加工することで、より利用者にとって使いやすい海況情報の提供が実現することが期待される。

#### 3.2 双方向ネスティングによる高解像度化

現状のモデルの水平分解能(水平  $1/12^\circ$  (10km 程度))は、黒潮そのものの変動機構を理解するには十分であるが、沿岸変動起源の九州南東沖小蛇行発生や、急潮など黒潮の分枝流あるいは暖水フィラメントが沿岸域に及ぼす影響を調べるには不十分な分解能である。このような小規模の現象を理解するためには現在用いている北西太平洋域モデルの分解能を高めなければならないが、現有計算機資源の都合上きわめて困難である。現在 JCOPE 予測システムで用いている単方向ネスティングでは細格子のモデルの結果は粗格子のモデルには反映されない。したがって細格子モデルの対象となる黒潮内側域における小規模現象と粗格子モデルの対象となる黒潮及び黒潮再循環系との相互作用を理解するためには、単方向ネスティングではなく双方向ネスティングが必要となる。現在、互いに独立な水平解像度の異なるモデル同士を円滑に接合するネスティング・モジュールを開発しており(鍵本他, 2005)、これを用いて水平  $1/36^\circ$  (3km 程度)の高解像度モデル(図4)と現状の  $1/12^\circ$  モデルの双方向ネスティングを実現する予定である。

### 3.3 沿岸海況予測情報システムの開発 -JCOPE から COWFS へ-

黒潮など外洋域の海流変動等を対象とする JCOPE 予測システムの開発は、従来は取り入れることができなかった外洋影響を含む沿岸域の海況変動の予測を可能にするだろう(図 5 にそのイメージを示す)。その第一段階として、沿岸の人口密度が高く、海況予測の重要度が高いと思われる東京湾、相模湾、駿河湾を含む関東近海(図 4, 水平  $1/108^\circ$  (1km 程度)格子)の海況予測システムの開発を始めている(川尻他, 2005)。開境界は、 $1/36^\circ$  高解像度モデルの計算結果をネスティングすることで、外洋の影響を考慮し従来に無い特徴を持ったリアルタイム予測システムとする予定である。このシステムでは潮汐、河川・降水など沿岸で顕著な物理過程が導入され、高精度化した海上風データを入力する波浪モデルとも結合されて、よりきめ細かな海況情報の提供が図られることになる。さらに、低次生態系モデル等と結合することで、関東沿岸域の生態系変動を客観的に評価する一助とすることも考えられる。

### 3.4 島嶼域、縁辺海モデリングへの適用

南西諸島におけるサンゴ礁等の浅海生態系保全に向けて科学的な指針を与えるために、東京工業大学の灘岡らは JCOPE 予測システムのプロダクトを側面境界条件として多重ネスティングによる南西諸島域の詳細なモデリングを行っている(灘岡と波利井, 2004)。南西諸島域においても黒潮等外洋の流れの影響が大きいためネスティングが有効である。開発した多重ネスティングモデルに粒子追跡法を適用し、鈴木(2005)は外洋性の流れや潮汐、風の輸送による慶良間諸島からのサンゴ幼生の供給が沖縄本島のサンゴ再生に寄与する可能性を示した。

一方、北海道大学の内本ら(2005)は、未だにその詳細が未知のままとなっているオホーツク海の循環構造を明らかにするために JCOPE システムのプロダクトを側面境界条件として亜寒帯循環・オホーツク海モデルを開発している。モデルではオホーツク海全体の大まかな循環に加え、宗谷海流起源と見られる中規模渦などが観測に似た形で再現されている。今後、海氷モデルが導入され再現精度の向上が図られる予定である。

上記の共同研究はともに詳細化したモデルを現場での観測と密接に(時として実時間で)連動させつつ推進されており、JCOPE が持つオペレーショナル海洋学の特徴をよく生かすものであると言える。

### 3.5 海上構造物設計・船舶航行等におけるプロダクトの活用

現行の予測システムのプロダクトの具体的な応用も行われている。現在、海洋研究開発機構の海底掘削船「ちきゅう」の掘削地点選定にあたって、JCOPE システムの流速データが活用されている。また、沿岸域で活動する内航船の推進機関が改良され柔軟な速度調節が可能になってきたため(加納他, 2004)、海流を利用して効率的に航路を選ぶ技術も研究されている。将来には、海洋変動予測システムの流速データが波浪情報等と組み合わせられ海洋ブロードバンド通信(大津, 2004)を通じてネットに接続された各地の船舶の航行に即時的に活用されることもありうるだろう。

う。さらに船舶航行への適用結果が間接的な流速の観測データとして予測システムに同化されることもあるかもしれない。その他、大型の海藻類を栽培する藻場を日本近海に浮遊させCO<sub>2</sub>を吸収させることで地球温暖化防止に貢献する構想において、藻場の浮遊環境の評価や挙動の予測に海洋変動予測システムを応用することも検討されている(研究産業協会, 2005)。

#### 4 終わりに

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の最近の展開について紹介した。大事なことは、着実に研究の成果をまとめつつプロダクトを丁寧に検証し、その結果を観測データ、データ同化手法、数値モデルというシステム三要素の改良にバランス良く反映させ再びプロダクトを検証するという好循環を実現し維持するように努めることである。予測システムのプロダクトは、現実そのものではなく本質的にモデルの力学を反映したものであり、必ずしもピンポイントで利用者の要求に応えるものではないので、特色を生かした活用法を考え実践していくことが必要である。プロダクト改良の好循環を維持するためにもこのことは留意されるべきである。

研究を進めていくうちに思いがけず多くの方々と共同し議論する中で海洋変動予測システムの持つ多様な可能性が開けてきたように思う。最後に、JCOPEに関心を寄せ様々な形で関わってくださっている共同研究者の方々にお礼を申し上げたい。

#### 参考文献

- [1] 山形俊男, 2004: 海の「天気予報」の実用化に向けて, Ship & Ocean Newsletter, 93, -2.
- [2] 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.
- [3] Kagimoto, T. and T. Yamagata, 1997: Seasonal transport variations of the Kuroshio: An OGCM simulation, J. Phys. Oceanogr., 27, 403-418.
- [4] 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.
- [5] Miyazawa, Y., S. Yamane, X. Guo, and T. Yamagata, 2005: Ensemble Forecast of the Kuroshio meandering, submitted to J. Geophys. Res.
- [6] 宮澤泰正, 山形俊男, 2003: JCOPE 海洋変動予測システム, 月刊海洋, 12, 881-886.
- [7] Miyazawa, Y., X. Guo, and T. Yamagata 2004: Roles of mesoscale eddies in the Kuroshio paths, J. Phys. Oceanogr., 34, 2203-2222.
- [8] Kawabe, M., 1995: Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander, J. Phys. Oceanogr., 25, 3103-3117.
- [9] 小松幸生, 瀬藤 聡, 宮澤泰正, 秋山秀樹, 清水 学, 渡邊朝生, 廣江 豊, 斉藤 勉, 植原量行, 伊藤進一, 平井光行, 2005: 水産総合研究センターにおける海況予測モデルの開発, 黒潮の資源海

洋研究, 印刷中.

[10] 鍵本崇, 宮澤泰正, 郭新宇, 川尻秀之, 佐久間弘文, 2005: 日本近海予報のための双方向ネスティング, 2005 年度日本海洋学会春季大会要旨集

[11] 川尻秀之, 宮澤泰正, 章若潮, 鍵本崇, 郭新宇, 佐久間弘文, 2005: 関東近海における潮汐シミュレーション, 2005 年度日本海洋学会春季大会要旨集

[12] 灘岡和夫, 波利井佐紀, 2004: サンゴ幼生の広域分散と海水流動物理過程, 海洋と生物, 26, 232-241.

[13] 鈴木庸彦, 2005: 多重ネスティングモデル開発による琉球列島沿岸域の海水流動解析およびサンゴ・オニヒトデ浮遊幼生後期輸送特性の解明, 東京工業大学院情報理工学研究科修士論文

[14] 内本圭亮, 三寺史夫, 宮澤泰正, 2005: オホーツク海南西部の時計回りの渦について, 2005 年度日本海洋学会春季大会要旨集.

[15] 加納敏幸, 南佳成, 石原泰明, 川並康剛, 2004: 次世代内航船(スーパーエコシップ)の研究開発, 日本造船学会平成 16 年度連合講演会.

[16] 大津皓平, 2004: 海洋ブロードバンドプロジェクトについて, 次世代海洋ブロードバンドシンポジウム.

[17] 社団法人研究産業協会, 2005: エネルギー・地球環境委員会成果報告書 -マリンバイオマス由来の再生可能エネルギー社会の実現に向けて-.

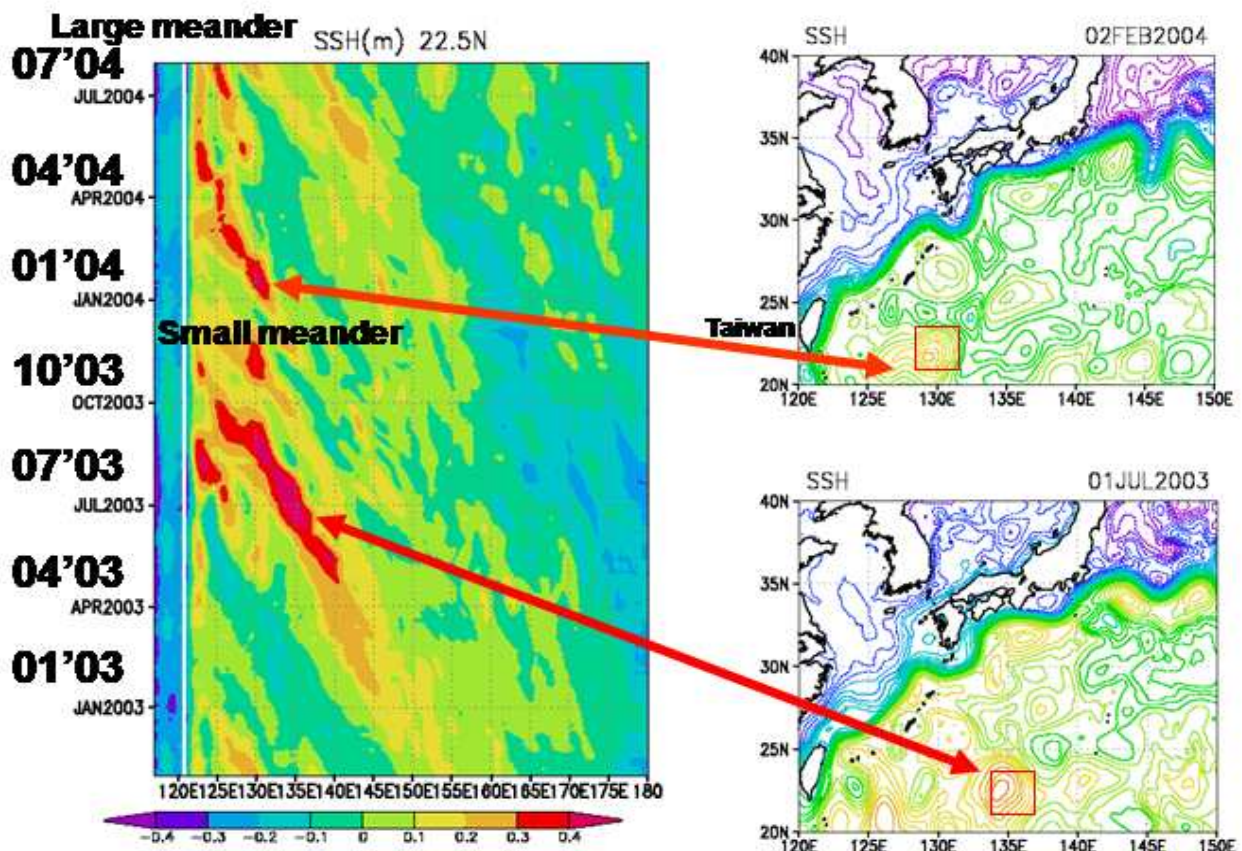


図1. 左: 22.5°Nにおける海面高度再解析値の経度-時間変化。右上: 2004年2月2日の海面高度再解析値。右下: 2003年7月1日の海面高度再解析値。矩形領域は粒子放流実験の初期位置を示す。

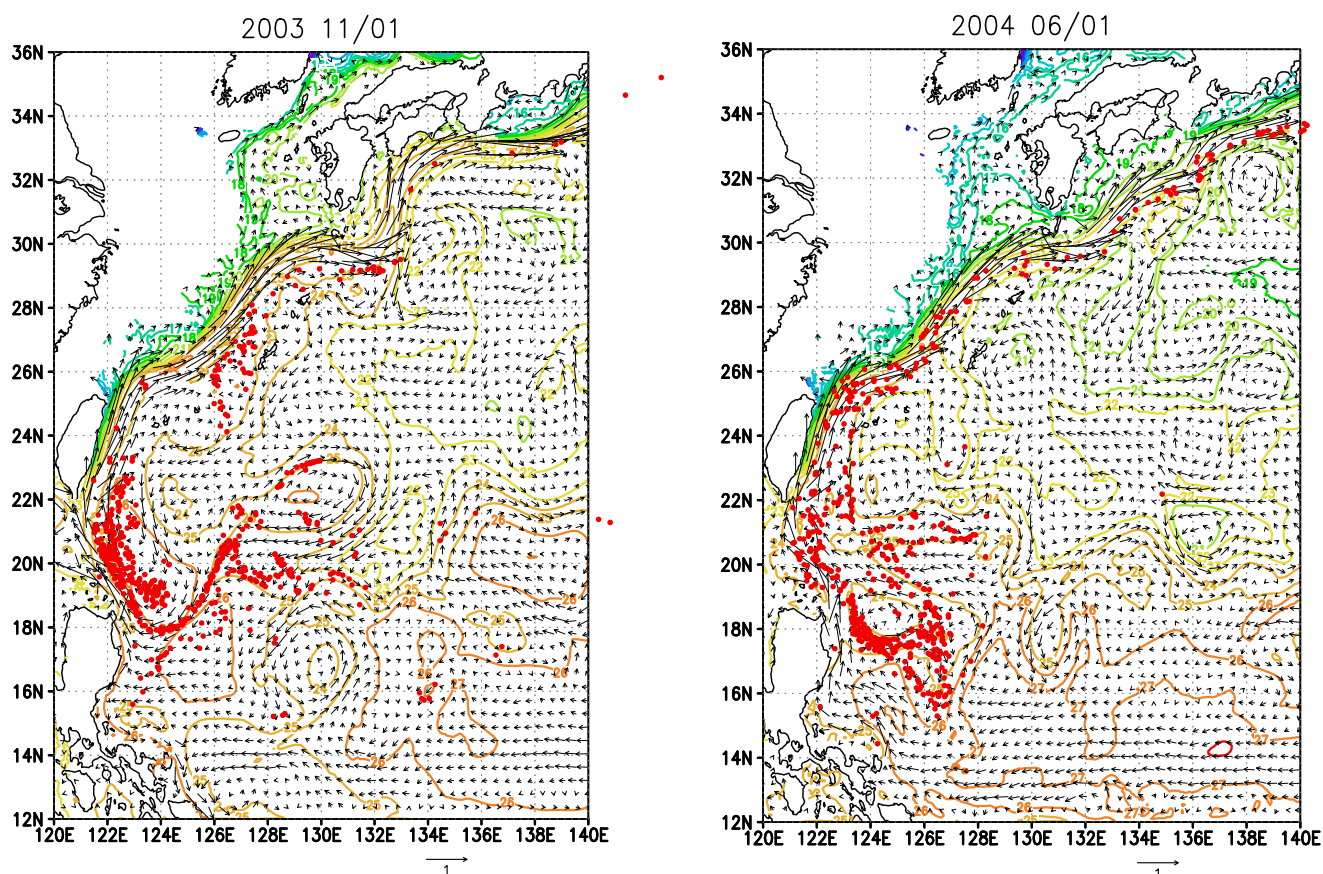


図2. 粒子放流実験の結果。再解析値の水深100mにおける流れと水温分布を合わせて示す。左: 粒子の初期分布を図1右下の矩形範囲として2003年6月1日に放流した場合の2003年11月1日の分布。右: 粒子の初期分布を図1右上の矩形範囲として2004年2月2日に放流した場合の2004年6月1日の分布。

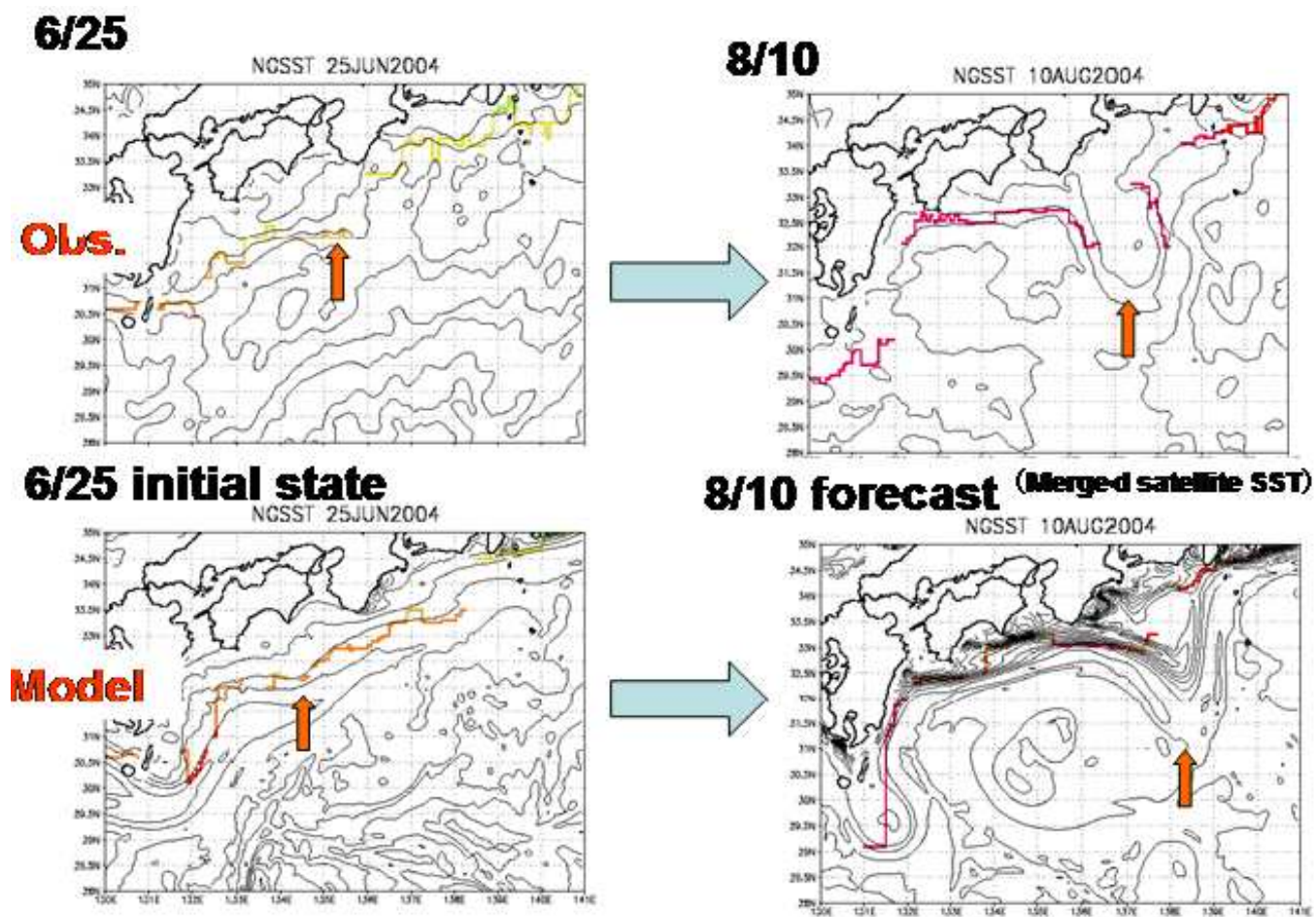


図3. 海面水温場による黒潮北縁フロントの比較(2004年6月25日と2004年8月10日)。矢印は黒潮蛇行の位置を示す。上:「外洋域新世代海面水温」データ(<http://www.ocean.caos.tohoku.ac.jp/merge/sstbinary/actvalbm.cgi>)。下: JCOPE 海洋変動予測システムの初期値と予測結果。

# JCOPE-COWFS

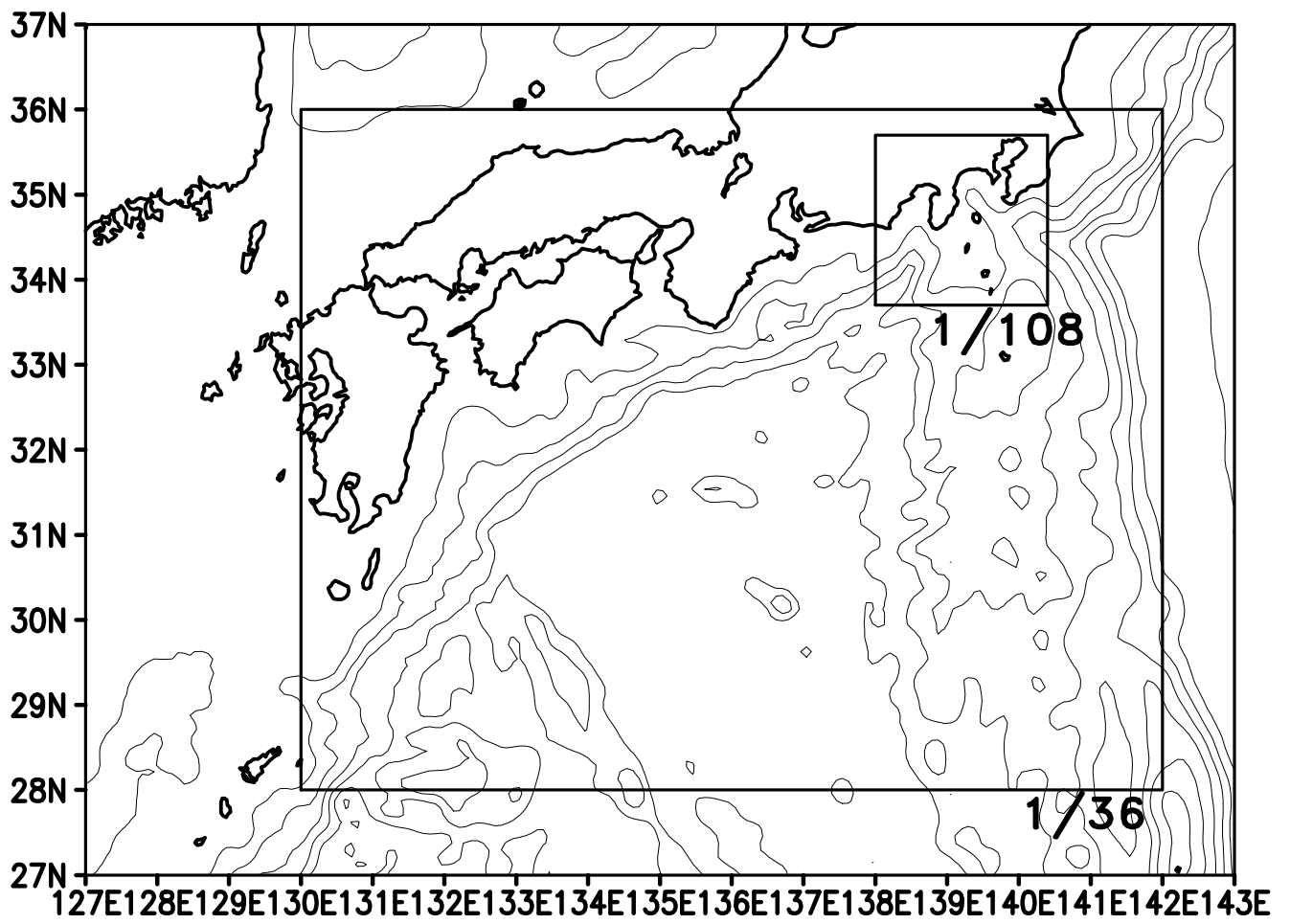


図4. 1/36 °モデルと 1/108 度モデルの範囲。コンターは 1000m 間隔毎の水深を示す。

temp.(deg.C) 0m 21JAN2005

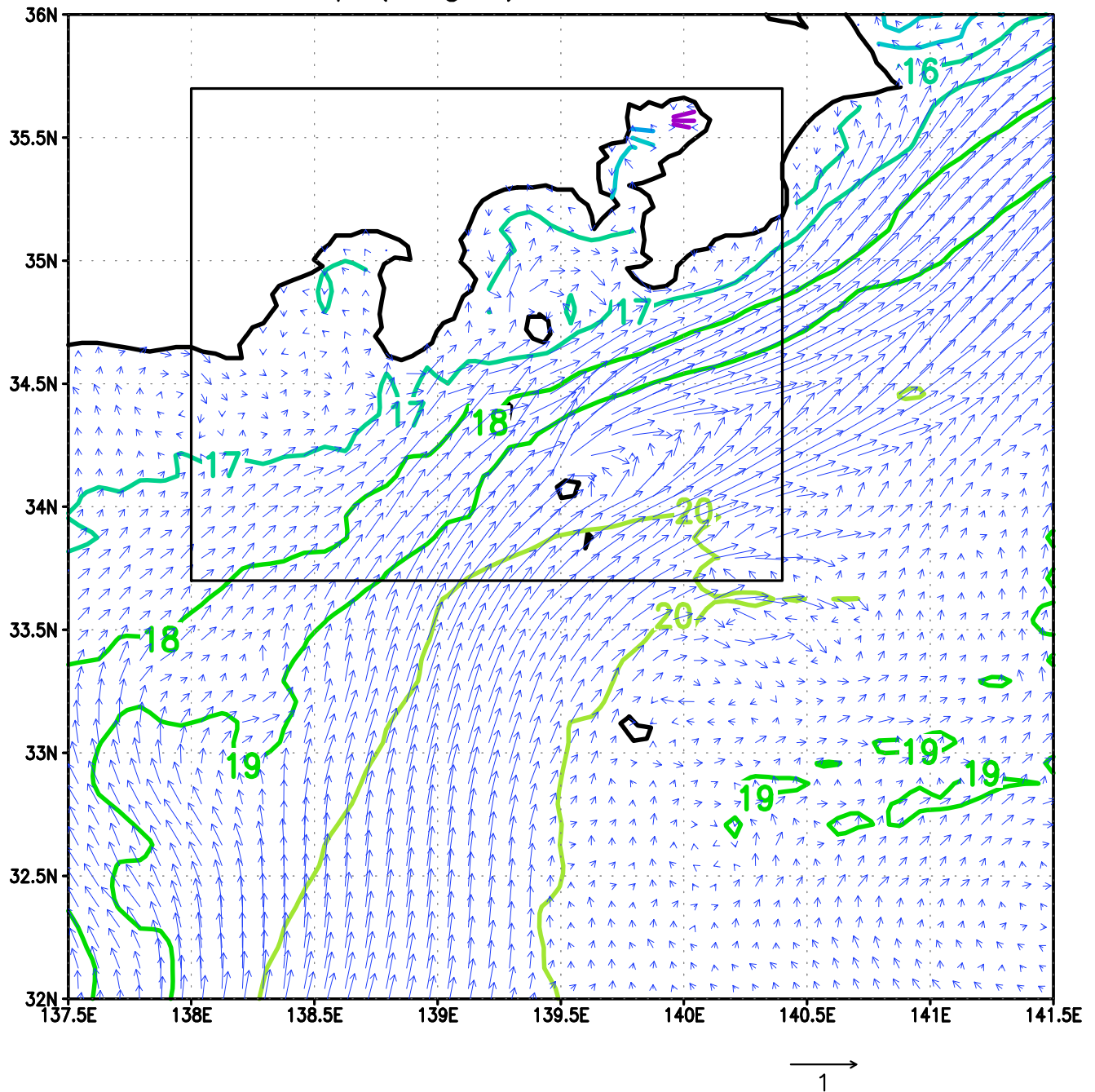


図5. 2005年1月21日の海表面の流れと水温の現況推定。矩形領域は1/108度モデルの範囲を示す。