

JAMSTECにおける技術開発 数値海流予測システム JCOPE

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

海には様々な流れがある。船を動かす人々は船に影響する海の流れを「潮(しお)」と呼んでいるようだ。ひとくちに「潮」といっても、その中には、一日のうちに大きく変動し、かつ数 km 程度の場所の違いによって大きく様相が異なる「潮汐流」も含まれれば、黒潮等のように 100 キロに及ぶ幅で同じ方向に長時間流れる「海流」も含まれている。

私たちは過去 10 年来、地球環境フロンティア研究センター・気候変動予測研究プログラムが推進する「日本沿海予測可能性実験」(Japan Coastal Ocean Predictability Experiment; JCOPE)の一環として日本近海の流れを日常的に予測するための研究に取り組み、計算機を用いて数値的に海流を予測するシステム JCOPE を開発した¹⁾²⁾。

私たちの当初の研究目的は、海洋学上の謎であった日本南岸の黒潮大蛇行の形成過程の解明であった。幸いにも本予測システムによって実際に 2004 年 8 月に発生した黒潮大蛇行の予測に成功した³⁾。さらにこの大蛇行形成が、台湾沖に生じた従来まれにみるほど巨大な海洋渦と、黒潮との相互作用に起因することを明らかにした⁴⁾。

研究を重ね、ウェブサイト上で予測結果を可視化して公開(図 1)していくうちに、同予測システムの出力データが、水産業、海上交通、海底開発等様々な分野の研究・産業応用に適用可能であることがわかり、出力データを多くの方々を活用して頂けるようになった。その結果、利用者の方々から出力データの精度に関する意見を数多く頂き、それに基づいて予測システムを改良することで海流予測の精度がさらに向上するという好循環を創り出すことができた。現在では、黒潮のみの予測を主目的とした最初のバージョン(JCOPE1)を抜本的に改変したものとして、日本近海全体の予測を目的とした新たな予測システム JCOPE2 が運用されている⁵⁾⁶⁾。

本稿では数値海流予測システム JCOPE について、海洋観測との連携と、実利用の展開という二つの視点から紹介する。

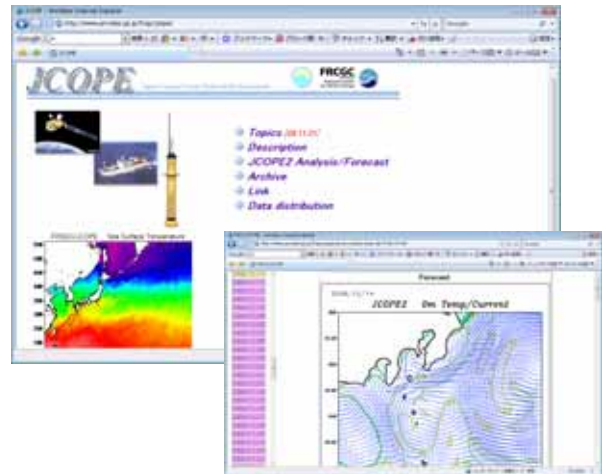


図1. 数値海流予測システム JCOPE のウェブサイト表示例
<http://www.jamstec.go.jp/frcg/jcope/>

2. 数値海流予測システム JCOPE

数値海流予測システム JCOPE の中核は、海流の挙動を支配する物理法則を記述した計算機上のプログラム(海洋大循環モデル)である。海流の主な駆動力は大気から与えられる風による海面応力と、熱・淡水の海表面を通じた出入り(フラックス)である。こうした大気外力の実況値としては、数値天気予報モデルの出力を用いる。大気外力の注入により海水の体積や密度の不均衡が生じ、これに伴って海水の圧力分布が形成され海流を駆動する。特に大陸の西岸では地球の自転と球面の効果により海流の持つ角運動量が蓄積消散する過程を通じて海流が非常に強化される。これらは西岸境界流と呼ばれる大海流であり、太平洋では黒潮、大西洋では湾流といった海流が存在している。

西岸境界流は非常に流れが早く、通常 2 - 4 ノットの大きさであり、最速で 7 ノットを超える流れが生じる場合もある。このように流れが早くなると流体の非線形性が無視できなくなり、海流の蛇行や蛇行部からの渦の切離等が頻繁に生じるようになる。数値海流予測システムの予測対象は、現在のところ、こうした海流の蛇行やその周辺の渦の挙動(海洋中規模現象)である。海洋中規模現象の空間スケールは 100km オーダー、時間スケールは 1-2 か月程度である。この時空間スケールは大気の中緯度高低気圧変動の 1000km オーダー、1-2 週間程度の時間スケールに対応するものであり、数値海流予測システムはまさに海中の天気予報を行っていると言えるのである。予測モデルの水平解像度は、中規模現象を十分に解像するべく 1/12 度(10km 弱)としている。海洋中規模現象は、その非線形性から初期状態に対する依存性が強く、わずかな初期状態の違いが 1-2 か月後には相当異なった状態への変化を引き起こす(予測可能性の限界⁷⁾)。ゆえに一定期間ごとに観測デー

タとモデルの予測結果を組み合わせることでモデルの状態を補正しながら予測を更新していく必要がある(データ同化)。これも空の天気予報とまったく同様である。数値海流予測システムの重要な要素として観測データ収集・処理機能と、データ同化機能が必要となる。

図2に2008年11月9日の日本南岸の黒潮域の数値海流予測システムによる現況推定結果と、水産試験研究機関による水温観測データのみによる現況推定結果の比較を示す。

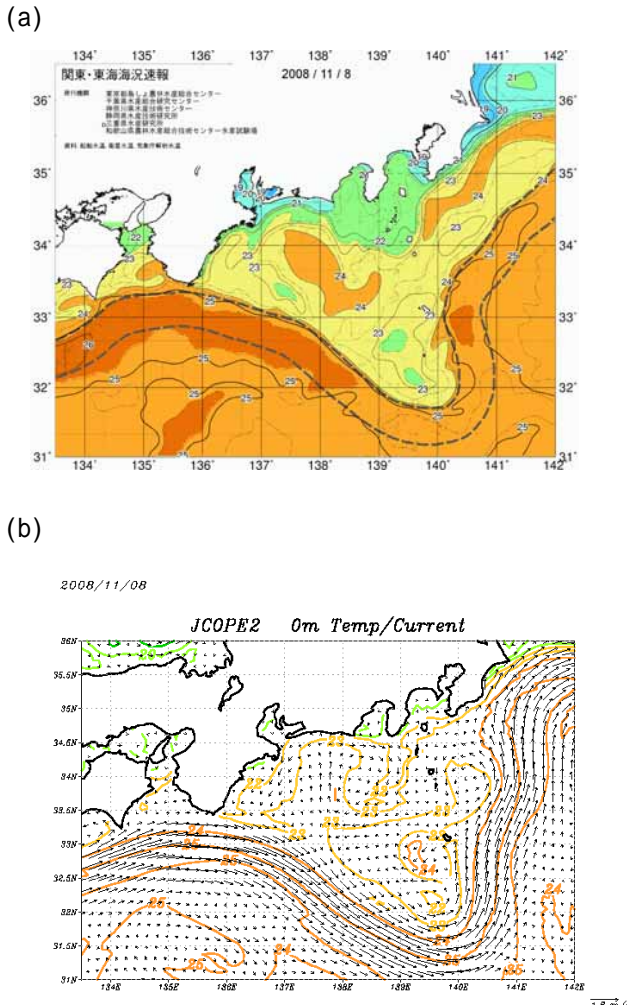


図2. 海面の水温・海流実況図
(a) 関東・東海海況速報⁸⁾ 2008年11月8日
(b) JCOPE2 現況推定結果

図2から、やや蛇行気味の黒潮流路の位置がよく再現されていることがわかる。さらに、黒潮の蛇行流路の内側(黒潮内側域)の冷水・暖水の分布も再現されている。本稿執筆時(2008年12月)には図2の状態から予測した約1カ月後の結果が検証できる(図3)。黒潮流路が伊豆海嶺の東に達する蛇行傾向を維持していること、房総半島に着岸傾向となること、及び周辺の中規模渦の位置はおおむね予測できている。ただ黒潮蛇行の南端がかなり伊豆海嶺の東に張り出している形状の予測はできていないようである。

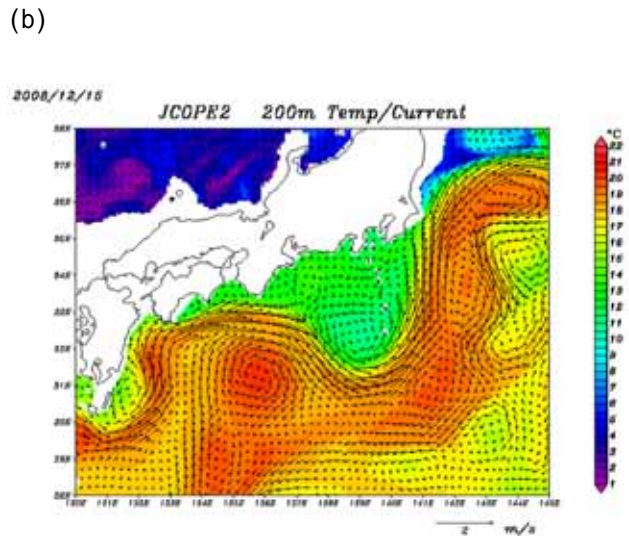
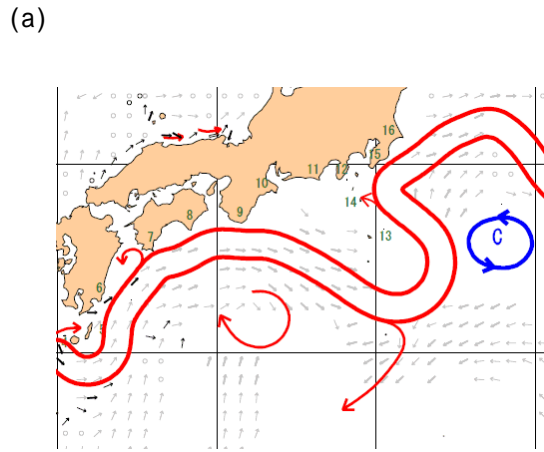


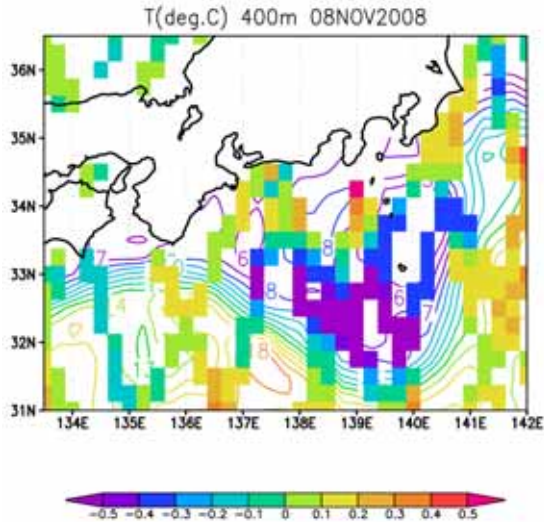
図3. 2008年12月15日の黒潮流路
(a) 海洋速報(海上保安庁海洋情報部)
(b) 図2bの状態を初期状態として予報した200m深の水温と流れ。

3. 海洋観測と数値海流予測

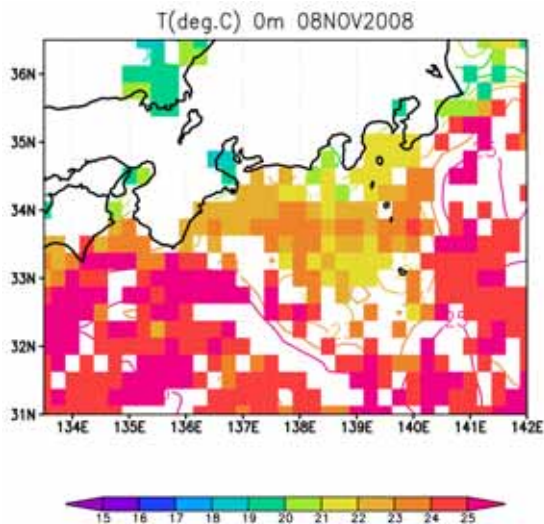
2節で述べたように非線形性に富む黒潮の初期状態を正しく推定するためには観測データが絶対に必要である。ここでは図2の初期状態を推定するにあたってどのような観測データが用いられているのか具体的に紹介する。JCOPE2数値海流予測システムは、衛星海面高度データ、衛星海面水温データ、及び現場水温塩分データを同化している。

図4に各データの水平分布図を示す。衛星海面高度データ(図4a)は数値海流予測を可能にするために最も重要なデータである。これによって海面の圧力分布を知ることができる。海面の圧力分布から、海面下1000m程度までの密度構造を相当程度推定することができる。海面高度観測衛星は10日程度の周期で全球をくまなく観測するので、定期的な予測を実現するために不可欠である。1992年に海面高度衛星の本格運用が開始されたが、現在では常に複数の衛星が運用されているので、データ密度は運用当初に比べてさらに拡充されている。

(a) SSHA



(b) SST



(c) T100m

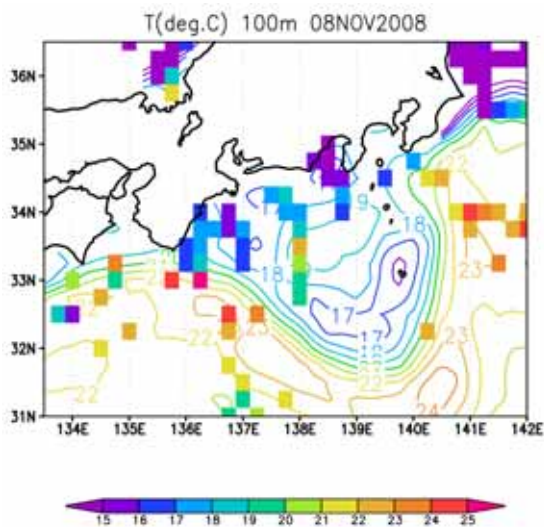


図4. 2008年11月8日における水温実況と、実況推定に用いられた観測データ点の分布。

(a) 衛星海面高度偏差データ。観測期間：2008年10月

30日～2008年11月16日。

(b) 衛星海面水温データ。観測期間：2008年11月4日～2008年11月12日。

(c) 100m深現場水温塩分データ。観測期間：2008年11月1日～2008年11月15日。実況推定に用いるデータの観測期間は各データの特성에応じて選定されている。

海面高度は、黒潮域では数百m深程度にある主温度躍層の水温塩分分布の推定に対して最も有効なデータである。図4aには海面高度そのものではなく海面高度の平均値からの偏差が図示されている。負値は平均より水温が低いことを示しており、正値は水温が高いことを示している。海面高度偏差データが黒潮流路の位置をほぼ決めていることがわかる。

衛星海面水温(図4b)もデータ密度に優れており、黒潮の内側域の冷水域がやや低めの水温分布になっていることがわかる。海面高度に比べると、海面水温は主温度躍層より浅い季節躍層の水温塩分分布の推定に有用である。

図4cには図4a,bのような遠隔測定ではなく現場で直接測定取得されている水温データの分布が示されている。2000年代以前は、外洋の現場データは、観測機関によるものの他は、篤志船による航路上で取得されるものが主であった。2000年代以降は、温暖化等の気候変化や ENSO 等の気候変動を対象とした全海洋の監視を目的として海面下自動昇降フロート(ARGOフロート)が展開されて外洋の現場観測網が強化された。図4cにおいて黒潮流路の沖側にみられる観測点はARGOフロートであろう。ただ、ARGOフロートは常に浮遊しているため、流れの強い黒潮等西岸境界流の観測には向いていない。これを補完しているのが、日本においては地方自治体等の水産試験研究機関による定線観測である。図4cにも黒潮の内側域など沿岸に沿って定線状の水産試験研究機関によるデータの分布が見られる。海面高度偏差データは沿岸に近いほど精度が落ちてくることを考慮すると、こうした定線データは黒潮内側域のうち沿岸に近い部分の海況推定のために有効であると言える。

上記の観測データはインターネット上に常時最新のものアップロードされ、随時利用可能になっており、このことが海流予測の即時性確保に役立っている。現場の水温塩分データは、世界気象通信網(GTS)に通報されているものが利用可能である。図4cに見られた地方自治体等水産試験研究機関によって取得されたデータは最近までGTSに通報されおらず利用しにくい状態であったが、独立行政法人水産総合研究センターとJCOPEグループが共同研究を行い、水産試験研究機関には数値海流予測情報を提供し、同機関が予測精度向上のためにGTSに手持ちのデータを即時的に通報するという枠組み(利益還元システム)を確立したため、即時に利用可能な状態となった⁹⁾。このように数値海流予測にとって

海洋観測は不可分の関係にあり、今後も連携を各所で深めてゆきたいと考える。また、より多くの観測データを有効利用するためにはデータ同化手法のさらなる改良も必要である。

4. 数値海流予測の実利用とスケール間相互作用

現在、数値海流予測は、漁海況予報や大型クラゲの浮遊予測⁹⁾、あるいは原油タンカー・遠洋漁船団等運航時の海流利用による燃費・CO₂削減等に活用されている¹⁰⁾。特に、日本郵船株式会社はJCOPE 数値海流予測システムの産業応用を促進するために設立された「海流予測情報利用有限責任事業組合」と共同で原油タンカーの黒潮利用実証試験を2006年10月から2007年2月にかけて行い、2日の航路で最大9%の燃費・CO₂削減を確認した¹¹⁾。この結果を受けて、同社による積極的な数値海流予測利用が開始され、さらに効果の検証を進めているところである。

海洋研究開発機構でも、海底掘削船「ちきゅう」の熊野灘沖での掘削の際にJCOPE2による予測情報が利用されている。図5は、2007年～2008年にかけて実施された「南海トラフ地震発生帯掘削計画第314-316次研究航海」において利用された黒潮流路の予測例である。このような黒潮の直接影響下で掘削を遂行した関係者の努力には頭が下がる思いである。2009年にも再び熊野灘沖での掘削が予定されている。今後も引き続きモデルの高解像度化など予測精度向上の努力を継続し、これを有効に利用して頂ければと考えている。

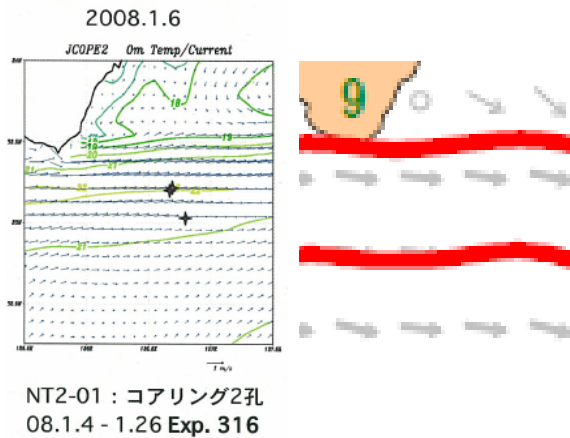


図5. 左図: 2007年11月上旬に予測した2008年1月6日における熊野灘沖の海面の流れと水温。

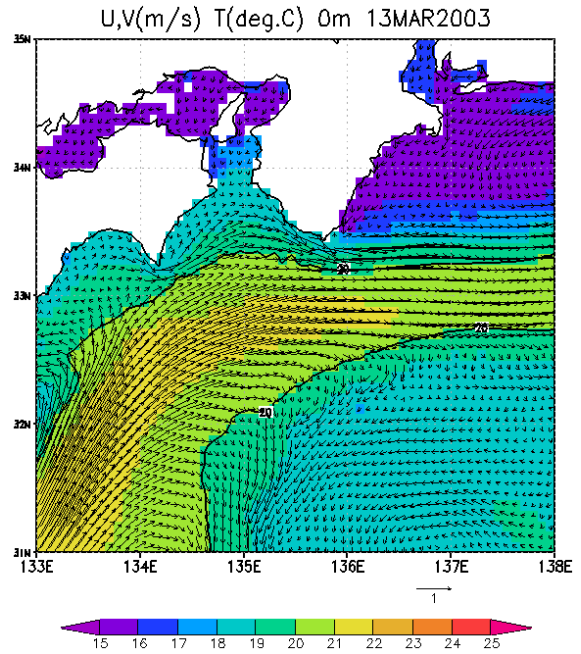
印は掘削点NT2-01、+印は掘削点NT1-03を示す。

右図: 2008年1月6日における黒潮流路の実況 (海上保安庁海洋速報)。

現在、JCOPE2 予測システムの水平解像度は1/12度(約10km)であるが、「ちきゅう」掘削業務支援のため、熊野灘沖では最小で1/108度(約1km)までの高解像度モデル開発を実施している¹²⁾。図6は水平1/12度の現行モデルと水平1/36度(約3km)の次期モ

デルの比較の一例である。水平1/12度格子モデルにおける黒潮は一様な帯状の流れであるが、水平1/36度格子モデルでは黒潮水と沿岸水の境界部分(黒潮前線)に沿って小さな渦(黒潮前線渦)が生じていることがわかる。黒潮前線渦の水平スケールは10kmオーダーであり、黒潮の蛇行やその周辺の中規模渦といった100kmオーダーの空間スケールをもつ中規模(メソスケール)現象よりさらに小さいスケール(サブメソスケール)の現象である。

(a)



(b)

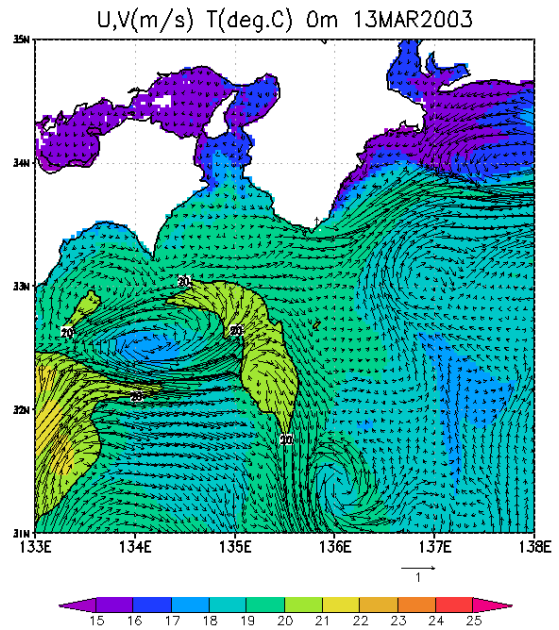


図6. 数値海流予測システムJCOPE2による2003年3月13日における海面の流れと水温の現況推定結果。

(a) 水平1/12度格子モデル

(b) 水平1/36度格子モデル

図6を見てさらに興味深いのは、黒潮は一様な帯状の流れではなく、実際にはサブメソスケールの渦の集合体である可能性が見てとれることである。サブメソスケールの渦がどのような物理機構を通してメソスケールの現象である黒潮として組織されるのか、いわゆる「スケール間相互作用」の問題として海洋物理的にきわめて面白い課題である。同じ観測データを同化しているにもかかわらず、水平1/36度モデルの海面水温は水平1/12度モデルに比べて海面水温が低くなっているが、強い鉛直流を伴うサブメソスケールの渦を解像することによって鉛直混合過程が変化した結果、このような違いとして現われていると解釈することもできそうである。「スケール間相互作用」の一典型としての黒潮という物理的描像は、高解像度衛星海面水温データの解析から既に先駆的に指摘されている¹³⁾ことであるが、数値モデルを用いればこうした海面水温変動の要因も具体的かつ詳細に解析することが可能になる。

数値海流予測の実利用経験からいうと、従来メソスケールの海流情報さえ存在していなかったため、数値海流予測の登場が実利用において画期的であった面があったが、実利用の局面で真に重要なのはメソスケールよりさらに小さなサブメソスケール以下の現象であると考えられる。「ちきゅう」における南海掘削でも、現状の数値海流予測技術では解像できないような1日以下の短い周期での激しい流速変動が観測された。JCOPE 海流予測データを用いた、マイワシの卵稚仔魚を想定した粒子の海面輸送過程の解析においても、黒潮の蛇行・非蛇行といったメソスケールの現象よりも、黒潮前線の変動といったサブメソスケールの現象のほうが粒子の輸送過程(ある意味ではマイワシの資源変動)に直接影響するという興味深い結果が最近得られている¹⁴⁾。数値海流予測技術の活用により、実利用の拡大深化と並行して海洋現象の新たな物理的描像が明らかになるという応用と基礎科学の幸福な結合を実現することを夢みて、今後の研究開発を進めていきたい。

5. 謝辞

図5左図は地球深部探査センター作成資料から抜粋したものであり、本稿での掲載に際しお礼申し上げます。

6. 参考文献

- 1) 宮澤泰正, 山形俊男, JCOPE 海洋変動予測システム, 月刊海洋, 33, 881-886, 2003.
- 2) 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, 2008.
- 3) 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.
- 4) Miyazawa, Y., T. Kagimoto, X. Guo, and H. Sakuma, The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system, J. Geophys. Res., 113, C10015, doi:10.1029/2007JC004226, 2008.
- 5) 宮澤泰正, 小松幸生, 瀬藤聡, 数値海況予測システム JCOPE2 による黒潮・親潮混合域の再現性, 海と空, 84, 85-91, 2008.
- 6) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu, Water mass variabilities in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, Submitted, 2008.
- 7) 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.
- 8) 謝旭輝, 岩田静夫, 根本雅生, 長島秀樹, 黒潮水域を中心とした高精度海況日報の作成手法, 水産海洋研究, 70, 122-130, 2006.
- 9) 小松幸生, 瀬藤聡, 吉成浩志, 清水学, 宮澤泰正, FRA-JCOPE グループ, 海況予測システムFRA-JCOPEでの利用による Argo データの水産資源変動研究への効果, 月刊海洋, 39, 7, 465-472, 2007.
- 10) 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.
- 11) 日本郵船株式会社, 「海流予測情報の効果検証を実施, 黒潮流域で最大9%の燃料消費量・CO2排出量削減を確認」, 報道発表, 2008年3月13日.
- 12) 清松啓司, 宮澤泰正, 角田智彦, 高解像度版 JCOPE モデルの開発, 日本海洋学会 2008 年度秋季大会要旨集, 233, 2008.
- 13) 西村司, 畠山祐二, 杉村俊郎, 田中聡太郎, 黒潮研究への渦運動論的アプローチ, 日本リモートセンシング学会誌, 6, 57-70, 1986.
- 14) Kiyomatsu, K., T. Waseda, and Y. Miyazawa, Laval dispersion of the Japanese sardine including impacts of meso- and decadal-scale SST variations, 2008 Ocean Sciences Meeting, Orlando, 2008.