

数値海流・波浪予測情報と海運

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・短期気候変動応用予測研究プログラム・ダウンスケール沿海変動予測研究チーム・チームリーダー・宮澤泰正

1. 気象・海象と海運

船舶を安全かつ効率的に運航するにあたり、海上風や波浪など気象・海象情報が極めて重要であることは言うまでもない。気象・海象情報のうち、海流については精緻な数値予測情報の提供がなされていなかったが、最近になって精緻な数値海流予測情報が入手可能となり、船舶運航支援のために活用され始めている。本稿では新しい海象情報である数値海流予測情報について解説するとともに、最近の新しい知見である異常波浪の予測可能性についても紹介したい。

2. 数値海流予測情報の登場

海流は、海水があたかも大河川のように一定の幅をもって一定の向きに流れる現象であり、一日のうちで向きが変わる潮流などとは区別される。浅海域では海流が潮流や河川流などと併存している場合もある。海流の成因は種々あるが、表層海流の大部分は、風成循環と呼ばれる、大規模な海上風系によって直接駆動される海流である。太平洋の西岸側、すなわち日本の東・南岸、アメリカ大陸東岸、オーストラリア大陸東岸等では、海流の効果と風の効果が強め合って強い流れ（西岸境界流）が生じる。黒潮・親潮、湾流、東オーストラリア海流などはこうした西岸境界流の代表であり、強流部では毎秒6ノットを超える流れを有する世界有数の大海流群となっている。風の影響が直接及ぶ表層数十メートル以浅では波浪などの影響もあって海流は複雑なふるまいをしている。また、海流の周りには、反流による渦（再循環）が存在し、また海流の蛇行がちぎれるなどして生じた直径数百 km の暖水渦や冷水渦が浮遊しており、これによる海流変動も無視できない。

海流の大規模な変動は、海流の物理法則と実際の海洋観測データを組み合わせることによって、今は力学的かつ数値的に予測することが可能となっている。海流の時間変化を記述する物理法則をスーパーコンピュータ上のプログラムとして用い予測するのであるが、最初の状態に含まれる微小な誤差が時間とともに増大するので、予測の効果は時間とともに失われてしまう。したがって、データ同化と呼ぶ、観測データによる海況の補正操作を一定期間ごとに加えながら数値海流予測を絶えず更新していく必要がある。

こうしたやり方は数値天気予報とまったく同じものである。現象としては、黒潮などの海流は偏西風などの大規模な風系に、海流の蛇行や中規模渦は高気圧や低気圧の変動におおむね対応している。こうした大気現象の空間的な広がりには数千 km に達するのに対し、

海洋現象は数百 km の拡がりを持つにすぎない。数値海流予測においては、海域を細かな格子に分割し、各格子点の値を計算していくのであるが、海流や渦の構造を解像するためには、格子点の間隔を数値天気予報の場合に比べてさらに細かくする必要がある。一方で大気現象の時間変化は一週間でひと区切りがつくのに対し、海洋現象は数ヶ月で変動傾向が変化することが多い。数値海流予測の場合は、数値天気予報の場合（6 時間毎）に比べて長い間隔（数日毎）でデータ同化を行い状態の補正を行うことが多い。

数値海流予測は、上記の理由から数値天気予報に比べてより多くの計算量を必要とするうえに観測データも少なく、数値天気予報ほど一般から必要とされていなかったため、近年に至るまで実現しなかった。しかし、1990 年代以降、計算機技術および人工衛星などの世界的海洋観測網の劇的な発展により一挙に実現可能となった。海洋研究開発機構において、日本沿海予測可能性実験（JCOPE）グループは 2001 年 12 月から数値海流予測の実現を目指した予測実験を行ってきた。実験の成果として、北太平洋の高解像度数値海流予測システム JCOPE を開発し、13 年ぶりに発生した 2004 年夏の黒潮大蛇行の予測に成功し、その発生の仕組みについても解明する¹⁾等の成果を挙げた。

JCOPE の数値海流予測にとってもっとも重要な観測データは海面の圧力を表す海面水位（海面高度）変動の観測である（図 1）。海面高度の変動は、海流の流路変化や中規模渦変動に伴う海面下の密度の変動によく対応し、衛星赤外センサーによる海面水温観測のように雲によって不可視にならないので定期的に海況を把握するには極めて有用な観測データである。図 1 では海面高度の変動が正負の量で表現されており、実線の正值部分は暖水渦に対応し、点線の負値部分は冷水渦に対応している。海流は海面高度の勾配に沿って流れ、暖水渦の場合時計回りとなり、冷水渦の場合は反時計回りになる。海面高度の勾配が強ければ強いほど海流も強くなる。図 2 は図 1 と同日の JCOPE の海面高度を示す。海面高度の勾配が最も強い場所は黒潮の流軸に対応しており、黒潮の場合は流軸上に冷水渦に対応する負の海面高度変動が重なると流路の蛇行となる。図 2 から、九州南東沖や遠州灘沖では弱い蛇行となっていることがわかる。図 3 a は JCOPE で予測した同日の海面水温と流れ場を示したものである。図 2 の海面高度場に対応する黒潮流路やその周りの渦による海流が表現されており、黒潮が暖かい水を南方から運んでいる様子もわかる。図 3 a の関東近海部分だけ拡大した図 3 b を見ると、黒潮が伊豆諸島の間を通り抜けている様子や島周りのよどみ等が詳細に表現されていることがわかる。基本的に、海流の流路や渦の位置は海面高度データによって決まり、それらの詳しい内部構造は、海底・陸上地形の効果を詳細に組み込んだ海洋大循環モデルによって決まるといってよい。

JCOPE 予測システムの結果は、実験開始以来、様々な観測データを用いて検証されている。最近では JAMSTEC の海底掘削船「ちきゅう」の熊野灘沖掘削業務支援のため、詳細な検証を継続的に行っている。図 4 右は、2009 年 6 月 24 日の掘削点 18 マイル(28.8 キロメートル)以南までの測線における、JAMSTEC 調査船「かいよう」による表面海流速度の観測と JCOPE 数値海流予測の比較である。このときの掘削点は黒潮北縁のすぐ北に位置

していた。予測値は、実測結果に表われている、南側の流軸にむかって増大する黒潮流速の変化を定量的に表現できているといえる。予測値の流速分布（図4左）における強流帯は黒潮を示しているが、海上保安庁による黒潮流路観測位置（黒線）とよく一致している。

3. 数値海流予測情報の利用

海流予測情報を船舶航行の支援に用いる例として、黒潮などの強い海流の流軸を把握し、船舶航行の際の追い流れとして活用するということが考えられる。黒潮は幅が 100km に達する幅をもった流れなので、従来の黒潮情報より詳細な流速分布がわかれば、最も流れが強い流軸上で船を航行させることが可能となるはずである。その場合、定時に近い運行を前提とし、黒潮による追い流れを得るかわりにエンジン出力を落とすことによって、燃費節減と同時に二酸化炭素排出削減が実現できる。黒潮の流軸はしばしば出発地・目的地間の最短距離航路とは乖離してしまうので、運航時間一定という前提で最小燃料航路を探索することになる。

数値海流予測情報の産業利用促進を目的として JAMSTEC の研究者と三菱総合研究所が共同で設立した海流予測情報利用有限責任事業組合は、日本郵船と共同でペルシャ湾岸から日本に向けて航行する大型原油タンカー13 隻を対象として 2006 年から 2007 年にかけてのべ 23 航海の数値海流予測情報利用実証試験を行った。ここでは、各船舶にあらかじめ数値海流情報を視覚的に把握できるソフトウェアを配布しておき、JCOPE によって計算した数値海流予測情報を加工し電子メールで各船舶に送付するという手法で、数値海流情報を船上で利用した。データを集計した結果、黒潮流域を数値海流予測情報に基づいて航行した場合には、従来の海流推測図に基づいて航行した場合にくらべて、当該海域における燃料消費量および CO₂ 排出量を最大 9%削減することが期待できることを確認した²⁾。前述したように、黒潮に相当する大海流は主に大洋の西岸（大陸の東岸）で流れており、現在はそれぞれの大海流について数値海流予測情報が入手可能な状態になっているので、今後は数値海流予測情報の利用によって、船舶航行時の燃費節減等への活用が黒潮に限らず他の海域の海流近傍の航路でも促進されることを期待している。

三菱総合研究所は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託研究「海流予測情報を利用した省エネルギー型船舶運航システムの研究開発」³⁾（平成 19・20 年度）において、JCOPE の数値海流予測情報を漂流ブイによる海流観測で検証するとともに、主要な内航船舶航路について数値海流予測情報を利用した場合に想定される燃費節減効果を取りまとめた。まず、漂流ブイによる海流観測データを用いた JCOPE の海流予測精度の検証から、予測の半分が信用できるとみなした。内航航路のうち、黒潮を使える東京・沖縄間、親潮を使える東京・函館間、対馬海流を使える日本海の福岡・函館間の三航路を対象に、速力一定という前提で、海流のみの影響による到着時間の変化を比較することによって燃費節減効果を推定した。結果として、黒潮を利用した航路では 0.2-5.6%、親潮では 0-0.3%、日本海では 0-1.1%程度の節減効果を見込むことができた。海流の向きによって節減効果が

異なるので往路と復路で効果の違いがあり、また黒潮が東海沖で離岸しているかどうか、海流が強いかわかり、結果は異なっており、正確な海流予測の重要性を示唆する結果である。

船舶を運航するにあたっては、当然のことながら海流だけでなく、海上風や波浪の影響も考慮して十分に安全かつ効率的な航路を設定する必要がある。海上技術安全研究所は、NEDO からの受託研究「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」⁴⁾（平成18-20年度）の一環として、海象・気象情報を活用し、数理計画的な手法により海象・気象情報の不確実性をも考慮しながら最適な航海計画を立案する研究を行った。それによると、航路および航海時間を固定し、気象・海象条件に応じて船速を変化させることによって得られる燃費節減効果は、釧路・東京航路、あるいは宇部・名古屋航路といった典型的な航路で1%以下であったが、主に海流を利用して航路を変化させた場合には節減量が5-11%に増加するという結果を得ている。さらに、3時間ほどの沖待ち時間も航海時間に組み入れて航路最適化を行った場合は30%以上の節減効果が期待できるという結果を得た。ただし、こうした顕著な節減効果は気象・海象の予測精度に大きく依存するものであり、正確な予測情報の提供がより一層強く求められているといえる。

4. 海流予測と波浪予測

波浪は風によって生ずる海の波であり、安全な船舶航行をするために必要な情報である。波浪については、波浪エネルギーの時間変化を表わす方程式を数値的に解くことによって得られた波高・周期の予報が船舶運航時に用いられている。波浪予報でよく使われている指標は、有義波高・有義波周期と呼ばれる、ある一定時間で観測される波のうち波高が高い上位1/3の個数の波をとって平均した波高と周期である。最近、異常波浪と呼ばれる、有義波高の2倍以上の波高をもつ波の発生と予測についての研究が急速に進展しつつある。異常波浪は通常の波浪でもごく稀に生ずる可能性があり、およそ3000波に1波は有義波高の2倍以上の波が生じてもおかしくないとされている。最近の水槽や数値実験の結果から、特定の方向かつ特定の周期に波浪エネルギーが集中すると、異常波浪の発生頻度が通常の頻度より高くなる場合があることがわかってきた。一方で、実際の海、とくに外洋では様々な方向と周期の波浪が混在し、海流によっても絶えず波浪が変形しているので、特定の方向かつ特定の周期に波浪エネルギーが集中する条件（フリークな波浪条件）は稀であると考えられる。しかし、JAMSTEC の JCOPE グループと東大新領域創成科学研究科の共同研究チームは、海流影響を考慮し、波浪どうしの相互作用を高い精度で計算する手法を導入するなどして新しく開発した数値波浪モデルを用いて、過去の船舶遭難事故時の波浪場を再現し、現実の海にフリークな波浪条件が存在しうることを初めて示した⁵⁾。具体的には、遠い場所の風によって生じた波浪（うねり）が、その場所の風で生じた波浪（風浪）と相互作用しわずか4時間ほどで非常に方向性の狭いうねりが急速に成長していたことがわかった。このことから、従来の有義波高・有義波周期に加え、フリークな波浪条件における

波浪エネルギーの分布の特徴を表す指標を予報すれば、異常波浪遭遇の回避に有効となる可能性があるといえる。ただし、解析の対象とした過去の船舶遭難事故で異常波浪が実際に生じていたかどうかはいまだに不明なので、今後は異常波浪を実際に観測して気象・海象条件を詳しく解析し、そのときにフリークな波浪条件となっていたことを確認する必要がある。JAMSTEC と東大の共同研究チームは、2009 年 9 月には日本東方海域に設置している海洋観測ブイ K-TRITON に波浪計を設置し、異常波浪観測拠点として整備を進めていく予定である。また、フリークな波浪条件の出現の様相は、海流を考慮するか否かによってかなり変わってくることがわかっており、今後、海流と波浪の相互作用についても詳しく研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) Miyazawa, Y., T. Kagimoto, X. Guo, and H. Sakuma, 2008: The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system, J. Geophys. Res., 113, C10015, doi:10.1029/2007JC004226.
- 2) 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.
- 3) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (委託先) 株式会社三菱総合研究所: 海流予測情報を利用した省エネルギー型船舶運航システムの研究開発、平成 19 年度～平成 20 年度成果報告書、平成 21 年 5 月.
- 4) 加納敏幸、小林充、鳥海重喜: 環境対応型航海支援システム、独立行政法人海上技術安全研究所報告、p425-462、2008 年 3 月.
- 5) Tamura, H., T. Waseda, and Y. Miyazawa, 2009: Freakish sea state and swell-windsea coupling: Numerical study of the Suwa-Maru incident, Geophys. Res. Lett., 36, L01607, doi:10.1029/2008GL036280.

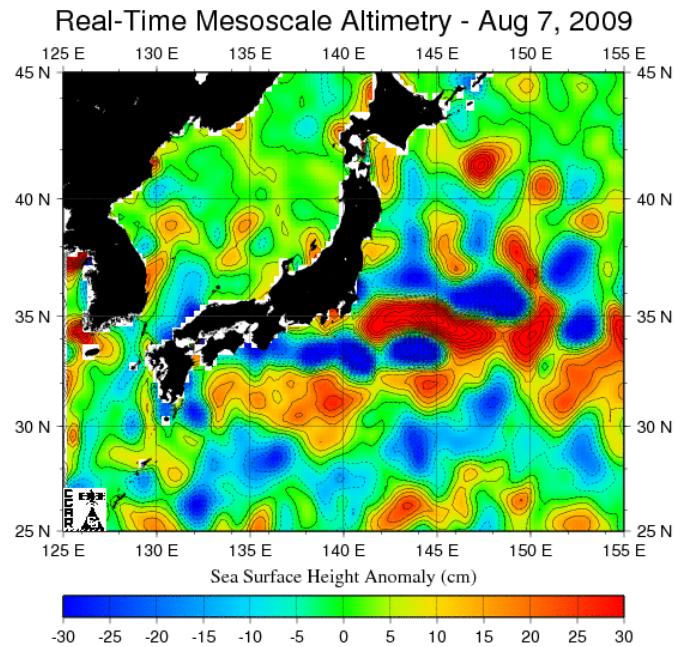


図1．2009年8月7日における海面高度偏差の観測(コロラド大学ウェブサイトより)。

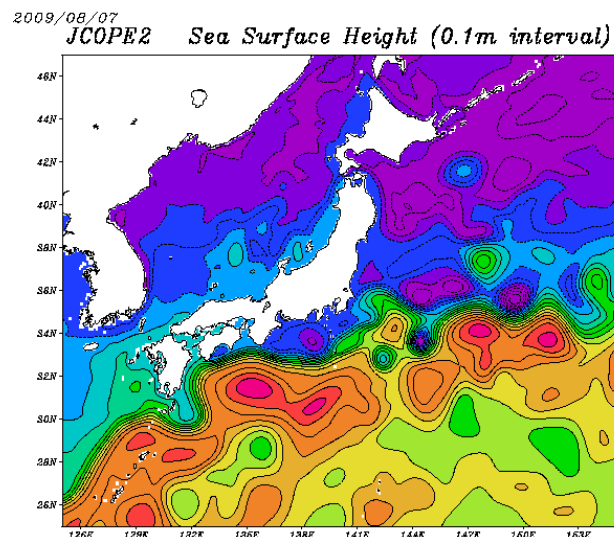
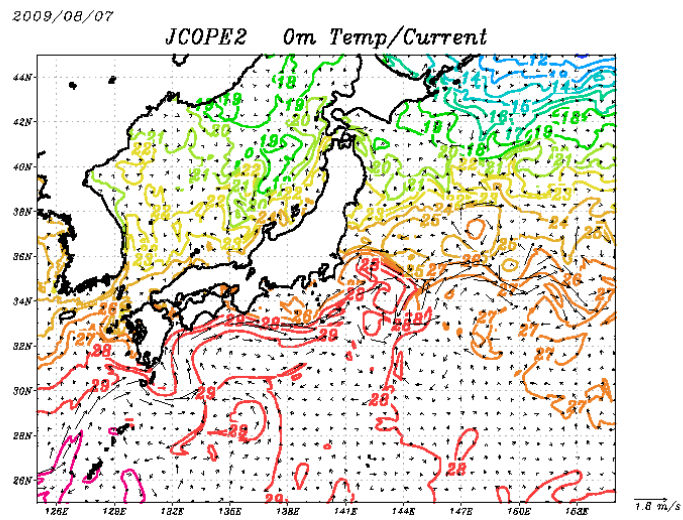


図2．JCOPE 数値海流予測システムが予測した 2009 年 8 月 7 日の日本付近の海面高度。

a)



b)

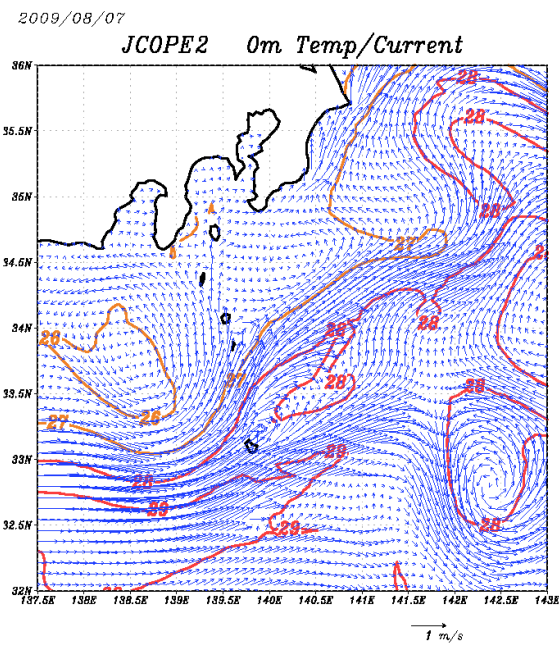


図3. JCOPE 数値海流予測システムが予測した 2009 年 8 月 7 日の海表面水温（線）と流れ（矢印）。a: 日本近海。b: 関東近海の拡大図

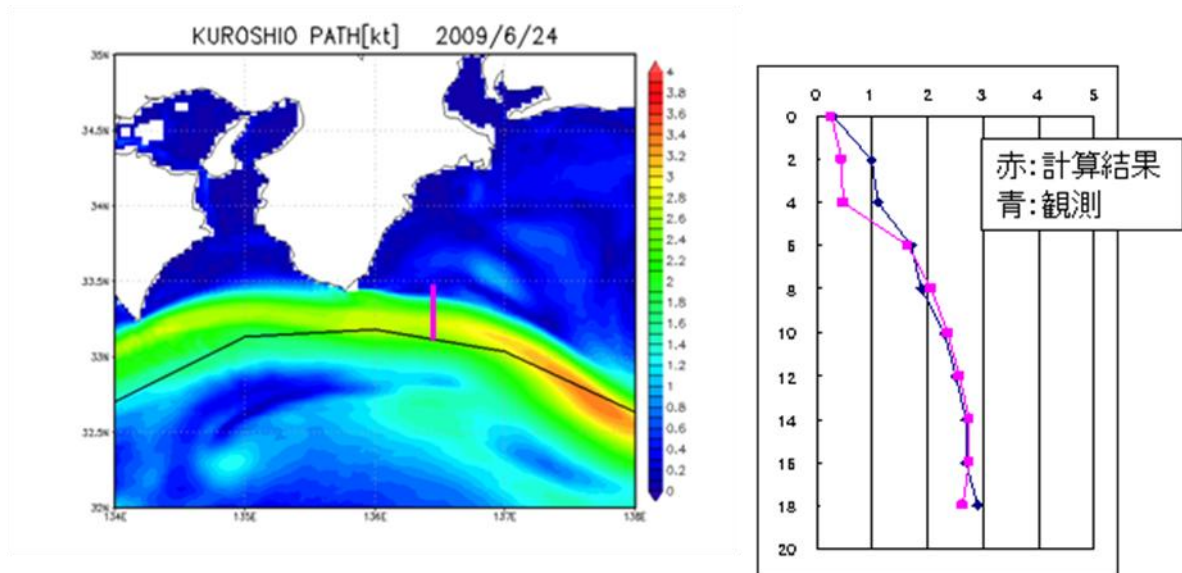


図4．左：JCOPE 数値海流予測システムが予測した 2009 年 6 月 24 日の表面の海流強度（ノット）。黒線は同日の海上保安庁提供による黒潮流軸観測位置。右：海流強度の観測値と JCOPE 数値海流予測結果の比較。縦軸（左図の縦線に対応）の単位はマイル（0 マイルが掘削点）。横軸の単位はノット。