

衛星データを用いる海況予測情報の産業適用

～内航海運に対する潮流海流予測情報の普及を一例として～

株式会社フォーキャスト・オーシャン・プラス 海洋情報部 山形 宏介

当社は（国研）海洋研究開発機構アプリケーションラボ発のベンチャーとして海洋予測研究の最先端の成果である「JCOPEシリーズ」のアウトプットをベースに、海運業や水産業、国内外の海底資源開発事業等に携わる海事関係者の皆様のニーズに沿ったソリューションサービス事業を推進しています。

JCOPE予測モデルは世界の海洋を対象に海表面から海底に至る任意の海域の海流、潮汐流、水温、塩分濃度を数か月先まで詳細な解像度で予測できます。

一般的に“海流予測情報”と呼ばれるこの種の情報は、おそらく読者の皆様に聞きなれないものと思いますが、本稿では人工衛星（海面高度計衛星、赤外・マイクロ波放射計衛星）から得られるデータも用いてシミュレーションにより作成される情報を基にサービスを提供する私たちの活動の一端と今後の展望についてご紹介します。

1. 海洋予測モデルについて

時を遡ること冷戦時代、米ソの覇権争いは地上、宇宙空間のみならず、海中においても熾烈なせめぎ合いが続いていました。

旧ソ連邦は、米国と競り合いながら新型核弾道ミサイルの開発・配備を進めると共に、多数の潜水艦を米国東岸に蝟集させる戦術を採用することで沖合からのミサイル攻撃の刃をニューヨークを始めとする大都市の喉元に突き付けていました。当然、米海軍においても常時多数の対潜部隊を哨戒監視活動に充当しつつ、その捕捉に努めていました。

当時の対潜部隊においては、海底に敷設したケーブルや、艦艇・航空機が装備する音響装置をはじめとする各種の探査機器、偵察衛星を含むその他の情報源をもとに敵潜水艦の位置情報の把握に努めていましたが、いわば物量に頼る探知手法は多大な負担をオペレーションに強いていました。

その頃、ハーバード大のアラン・ロビンソン教授は、AXBT（Airborne EXpendable Bathy

Thermograph）を航空機から大量に海洋に投入し、そのデータを数値シミュレーションに同化することで、敵潜水艦の探知を困難にしていた海洋渦の挙動を予測することが可能となること、それによって哨戒オペレーションの大幅な効率化が可能となることを提唱したのです（Harvard Ocean Prediction System）。そして幾多の試行錯誤を重ねながら、このシステムは正式に米国海軍に採用されました。

この功績について故ピーター・クラッシー海軍少将は

“ I can state . . . that Professor Robinson's contributions were essential to our national defense and a key component of the successful conclusion of the cold war.”

と述べており、この予測システムの完成が国防に大幅な効率化をもたらし、冷戦の終結に大きく貢献したことを認めています。

現代においては、海洋予測モデルは海洋先進国において軍事用途のみならず、民生用途を含めた様々な開発・改良が進められてお

り、現場観測データとともに衛星観測データがデータ同化に必要不可欠になっています。

2. 海洋予測モデル運用の仕組み

世界の表層海流は地球自転の影響を受ける流れであり、貿易風や偏西風などの風の応力によって駆動されています。風成循環といわれるゆえんです。風成循環ではコリオリ力の緯度方向の変化により海盆の西方（大陸の東方）に偏った強い流れ（西岸境界流）が生じますが、これが黒潮やメキシコ湾流に代表されるものです。一方で、潮汐流は月や太陽の引力に起因する流れであり、半日から1日程度の短い周期で流向が変化します。

地球規模スケールの海流や沿岸域の潮流の変動を現実的に予測することが可能になったのは海洋学の歴史では比較的最近のことで、これには観測網の充実と海洋大循環モデル及びデータ同化の研究の進展、そしてスーパーコンピュータの進化が大きく寄与しました。

海面は直径が数百キロ程度の中規模渦に伴う凹凸で満ちていることが衛星による海面高度観測によって確認されています。海面の凹凸（海面高度）は、海流構造を反映することから、これを衛星により観測することで表層

の海流を知ることができます。そのため海面高度の計測値は海流変動予測において非常に有用な情報源となります。

海面高度計は自機の直下にマイクロ波のパルスを発射し、海面で反射した電波を受信した際の伝達時間を計測することで衛星と海面間の距離を計測する測機ですが、衛星の軌道高度を別途求め、計測した衛星と海面間の距離との差をとることで海面の高さ（海面高度）に変換できます。

さらに地球の重力場で生じる海面の凹凸を除き、風波や潮汐などの変動成分を分離することによって、海流に伴う海面の凹凸成分（海面力学高度）の分布を求めることができます（図1）。

表層海流は海面力学高度の勾配に沿って流れ、勾配が強ければ強いほど海流も速くなる点は気象分野の気圧勾配と風との関係と同様です。

海流を捉えるには、衛星観測による海面水温の情報も重要です（図2）。海面水温の情報は衛星海面高度よりも前、1980年頃から利用できるようになりました。

海面水温分布は暖流、寒流、あるいは暖水、冷水塊の影響を受けるので、これらに関係す

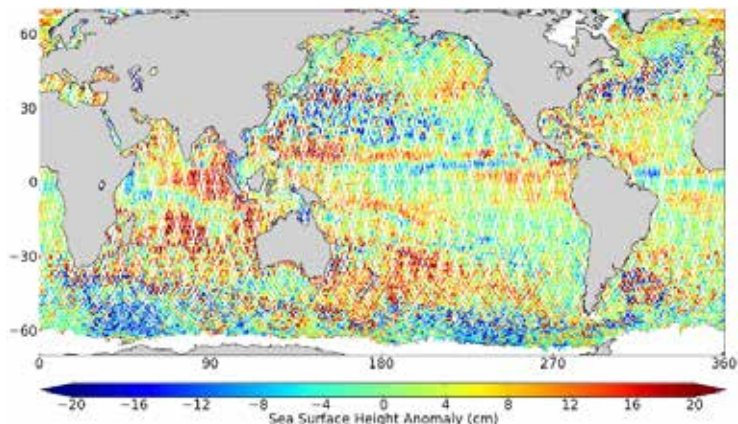


図1 衛星海面力学高度の例（Jason, Saral）. 出典：米国NASA/ジェット推進研究所.

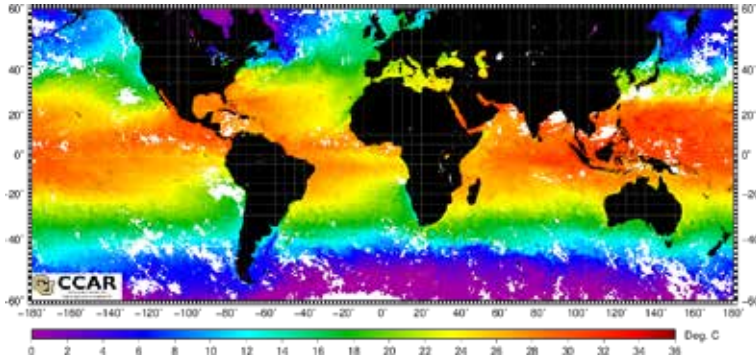


図2 衛星海面水温の例 (Aqua/MODIS) . 出典：米国コロラド大学/天体動力学研究センター.

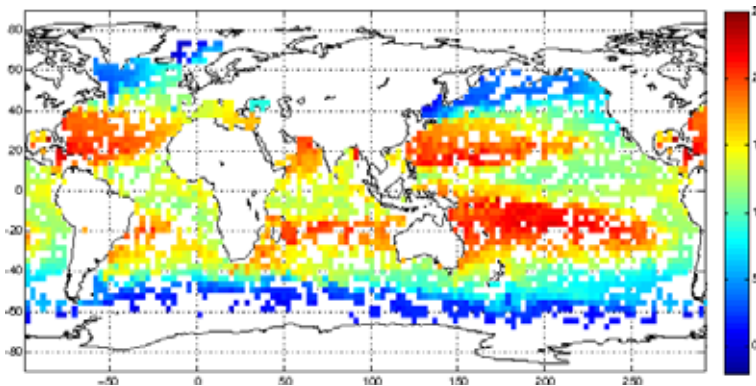


図3 200m深水温の例 (Argo現場観測の3x3° 格子月平均) . 出典：米国ハワイ大学.

る海流分布を直接的ではないものの推定できます。最近ではマイクロ波による観測と組み合わせて雲の影響を除去した高品質の海面水温データが作成されるようになっていきます。

衛星観測データとともに重要な観測データとして、自動昇降型の無人観測機「Argoフロート」や船舶による定線の水温・塩分の観測があります。観測ポイントの数は衛星と比較すると少ないのですが、直接的に海面下の水塊分布についての情報を入手できる点で重要なデータとなっています。

Argoフロートのデータは、2000年以降に利用できるようになりましたが、ほぼ海洋全体に均一に分散（2018年8月時点で3951フロート、世界の海を300km四方で区切るとそのマスに1基ずつ投入されている計算）し、多大な資金を要する船舶による海洋観測の空白域

を埋める点でも画期的な観測システムとなっています（図3）。

海流運動を推算するための海洋大循環モデルは、流体の運動を記述する方程式（ナビエ・ストークス方程式）や水温・塩分の輸送方程式などからなる計算プログラムで構成されています。

地球規模の表層海流は、主に大気の流れによって駆動され（風成循環）、海水温を決める熱収支については海面からの熱フラックスとして海洋大循環モデルに入力されます。海上風、気温、湿度などの値は数値天気予報の予報データを用いることが多いのですが、海上風については近年の衛星散乱計観測データの数値天気予報への同化によって精度が特に向上しています。

海洋変動は非線形現象のため、観測値から出発して計算を開始しても、外力や初期値、計算式の特性に起因する僅かな誤差が徐々に拡大して計算結果を歪めます。そこで予測値を定期的に観測データによって補正し、その都度予測していくデータ同化と呼ばれる手法がこの分野で開発されました。

数百キロ程度の水平スケールをもつ渦や蛇行などの中規模現象の予測可能な期間は、その時間変動スケールを反映し1-2カ月程度であることが知られていますが、データ同化による初期値の補正は週1回程度の頻度で行われています。ちなみに天気予報の限界は1、2週間ですから、海洋予報はより長期の予報が可能です。

海洋研究開発機構アプリケーションラボでは、その前身である地球フロンティア研究システムプロジェクト発足当時の1997年に、その当時、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や後述する急潮現象の予測を目的として「日本沿海予測可能性実験：Japan Coastal Ocean Predictability

Experiment (JCOPE)」を開始し、その一環として数値海流予測システムJCOPEの開発を始めました。2001年12月にプロトタイプの子測システムが完成し、以来、国内外に予測情報を発信してきましたので、既に20年近い実績を持っています。

近年では、日本周辺海域を対象に海洋モデルを更に水平解像度3kmまで詳細化したネストモデルにJCOPEの予測結果を境界条件として与え、潮汐や主要河川の淡水流入も外力として導入したモデル(JCOPE-t)を開発しました。このモデルでは1時間毎の予測情報を1週間先まで計算しています。

この潮流海流予測モデルの実行においては、海表面の海流は外力の影響を直接受けるため、毎日更新される数値天気予報のデータを入力することで、潮流予測情報を更新し、予測精度維持に配慮しています。

この予測モデルによって、紀伊水道の「振り分け潮」や豊後水道の「急潮」等の再現性の向上が確認されました(図4)。

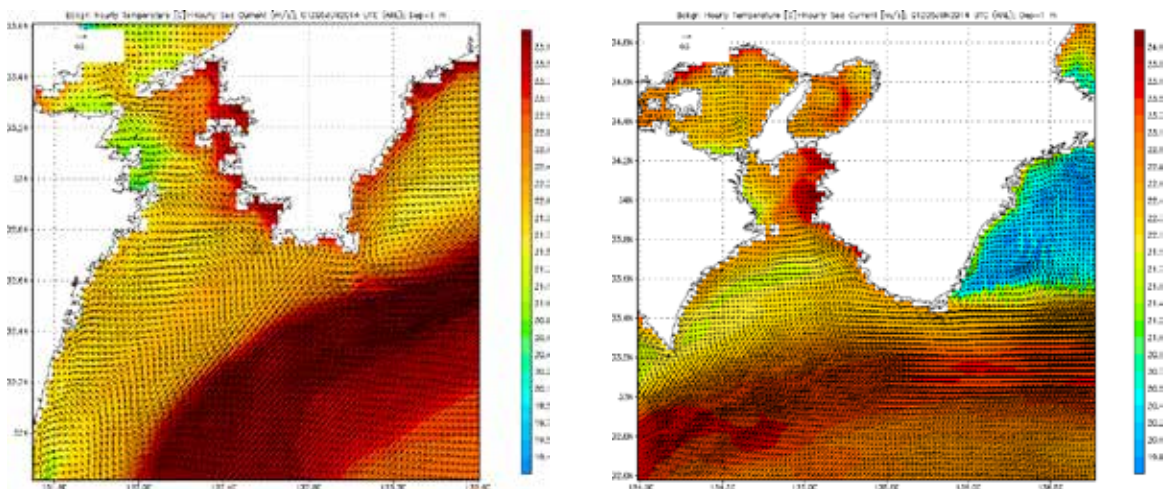


図4 領域潮流予測システムの出力例. 左は豊後水道、右は紀伊水道。ベクトルは流向、濃淡は強度を表す。

「振り分け潮」は、潮岬の西側で北西向きの流れと黒潮前線に沿って南東方向に向かう流れが分岐する海流変動現象です。また、「急潮」は、黒潮の暖かい水塊が突如として沿岸域に侵入し、強い沿岸流と水温上昇を伴う現象です。相模湾では古くからブリの豊漁をもたらす現象として知られていました。豊後水道でもこの現象の後に漁獲量が増加すると言われており、詳細な予測モデルの登場により、人間社会の活動に影響を与える現象を事前に把握することが可能となってきました。

3. 内航海運分野に対する適用

近年、海流変動予測情報は水産業はもちろんですが、海洋資源開発、海運等の分野における活用が実用化されつつあります。以下では当社の手がけるいくつかの事業のうち内航（海運）船舶を対象とする分野についてご紹介いたします。

内航海運とは、国内の港湾間を結んで主に石油や鉄鋼などに代表される産業基礎資材を輸送する運送業であり、トンキロベースの輸送シェアでは国内物流の約4割を占める日本の屋台骨を支えている基幹産業のひとつです。

標準的な船型は499GT型と呼ばれるサイズで、全長は75m程、載貨重量は約1,600t、一般的に5名で運航されています。このタイプだけでも国内では優に1000隻以上が登録されています。航海速度は通常11knot（約20km/h）程です。

先ほどご紹介した最新のJCOPE-t潮流海流予測モデルでは、これらの船舶が航行する日本沿岸部の様々な海域において頻繁に2knot、強いときには3knot程度の流れが生じていることが示されていることから、このような流況が船舶運航に対して、運航スケジュール面でも省エネの実現に対しても及ぼす影響は小さくないものと予想しました。

図5では四国沖における潮流海流予測情報（JCOPE-t）の表示例を示しました。

本稿の時点（2018年10月）では、約12年ぶりに黒潮の大蛇行現象が生じていることから、ここで示す黒潮流路は一般的な流路とは異なることを注意します。

この図では四国沖合を流れる黒潮や、黒潮が土佐湾に入り込んで左回りの渦を巻いている様相、豊後水道における潮汐流などもはっきりと読み取ることができると思います。

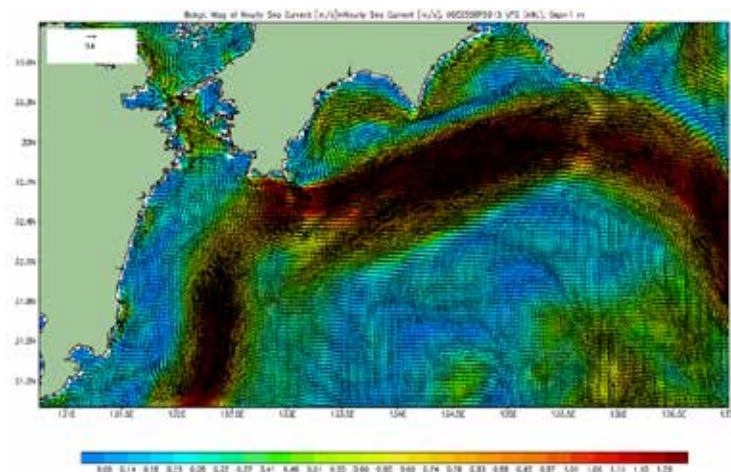


図5 四国沖における潮流海流情報の一例（単位：m/s）



波をかき分け航行する499GT型



甲板から船首方向を望む（篤志船）

沿岸部でも2knot以上の流れが生じている海域もあり、仮にこの情報が正しく流況を示しているならば、対向する流れに乗ってしまった船舶は11knotの巡航速力から2knot以上減速させられているはずです。

一般的に船舶の燃料消費量は大変多いことから、2knotの減速（つまり約18%の燃費低下及び航海時間の増加）は運航上非常に非効率な状況が発生しているといえます。

そこで、私たちは本情報が果たして船舶の実際の運航に供し得る、海技者が実際に洋上で信頼に値する情報であるかを確認するため、実際に社員が複数隻の篤志の貨物船に同乗させていただきながら国内の様々な航路を、延べ1年近くの期間をかけて検証のための便乗航海を実施しました。

その結果、情報を利用いただいた複数の船長に対するヒアリングから、船舶の省エネの実現はもとより、海流や潮流に起因する入港予定時刻のズレの推定に対する有用性（本船の到着に備え、陸上では荷役担当の作業者達が集まるが、事前により正確な入港予定時刻を陸上担当者へ通知できるようになることにより陸側は待ちぼうけを避けることができ、結果的に船長の精神的な負担も軽くなる）、また、一部の船舶においては潮流海流予測情報を用いた効率的な航路選定により、入港地

に早めに到着できることで乗員の休憩時間が増加する（船舶は目的港に早めに到着すると錨泊を行い、その間、乗員は休息することができる）等、省エネ実現以外の実用面においても情報の有用性が高いことが認められました。特に省エネの効果については、ご協力いただいた船社では、京浜・四国間で3%程度の省エネ効果があるとの評価を得ることができました。

このように潮流海流予測情報を用いた航路選定を船社のご協力のもと篤志船に実施していただくなかで、従来の内航船舶の運航方法（特に航路選定）に対して一石を投じ得る様々な発見がありましたが、ここでは紙面の都合上一例だけご紹介したいと思います。

図6は篤志船に搭載されている航海機器の画面上に私たちが提供した潮流海流予測情報を重畳表示したものです。

この時、篤志船は北海道南東岸の十勝港で穀物を搭載し津軽海峡経由で北海道北西岸の小樽港に入港する予定でした。

航海計画では依頼元が指定した期限に入港するために29.5時間の所要を予定したものの、これまでの経験から実際に時間内に到着できる可能性は低いと船側では判断していました。

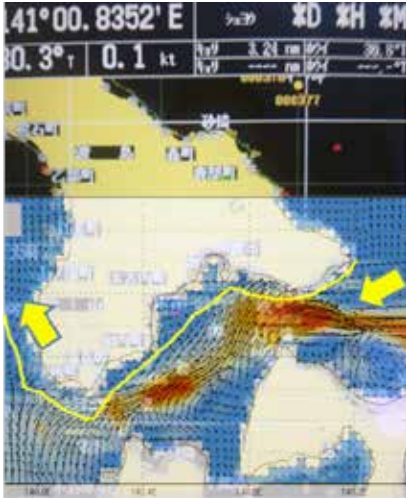


図6 流況を考慮した航路選定の実際の軌跡
(津軽海峡)

津軽海峡は常に東に流れる強い海流が生じており、その海峡を西に向かう本船は効果的に逆潮を避けた航路選定に取り組むことによって指定期限までの入港を試みることになりました。

本航海では、海峡内では極力逆潮の弱い海域を航行し、日本海側に出た際にはなるべく追い潮を有効利用することによって結果的に28時間強（元々実現可能性が低いと思われていた航海計画よりも更に約1時間早着）の所要で小樽港に入港することができました。

図6に白っぽく引かれたラインが当時の航跡を示しています。逆潮を避けた航路を選択していることが見て取れると思います。

なお、同日ほぼ同時刻に全く同じ航路を航行した別の499トン型内航船舶（積載量もほぼ同じ）は指定時刻に対して約1時間の遅着（篤志船と比較すると2時間の遅れ）となり、港湾荷役の終業時間に間に合わなかったことから小樽港外での沖止め（翌朝の荷役開始時まで沖合で錨泊）となったとのことでした。

篤志船船長からは2時間の差というのは明らかに潮流海流予測情報活用成果であるとのコメントがあり、大変有用な情報であると

の評価を得ました。また、本航海の成功により入港地での友人との会合に出席できた船長からは、1ダースもの小樽ビールが当社宛に送られたことから船長の驚きと喜びが大きかったものと思料しています。

本事例は詳細な潮流海流予測情報を用いて大幅な運航効率化を実現した国内初の事例となりました。

本事例を含め、実船舶における潮流海流予測情報の有効活用事例が国内の多数の海域で確認されたことで、本情報の内航海運分野への普及が業界の発展と船舶乗員の福利面の向上、そして温室効果ガス排出削減に貢献するところが大きいと判断し、普及に向けた活動を本格的に開始するに至りました。

このような内航海運分野に対する情報普及の可能性について模索的活動を実施していた2014年当時、詳細な潮流や海流の予測情報を洋上航行する内航船舶に対して提供可能なシステムは当然存在していませんでした。

当初、通信回線を介したパソコンを通じて本船への情報提供を行うシステムの構築を検討したものの、実際の運航に携わる方々から、起動に手間がかかり煩雑なキーボード操作を要するパソコン設置は歓迎できないとの意見が多く寄せられており、情報提供方式の選定は本船上での利便性を確保する上でも注意を要する事項でした。

その際に着目したのは当時急速に市場に普及していたタブレット端末です。アンドロイドアプリを通じたビューワー及び、管理・セキュリティシステムを構築し、洋上においては一番電波の受信率が高いと言われるNTTドコモの通信網を利用することにより、タッチパネル式の簡便で利便性の高いシステムを本船に提供する可能性が見出されたのです。



図7 本船に搭載された潮流海流予測情報表示端末

図7は、完成したアンドロイドアプリを用いたビューワーシステムが本船のブリッジに搭載されている図です。運航に要する気象・海象予測情報を必要な時に網羅的且つ、手軽に取得できる仕組みとなっており、当社の提供する独自の潮流海流予測情報コンテンツと併せることで、本船の安全で効率的な運航の実現を可能とする画期的なシステムとなっています。

(本システムは(一財)旧海洋政策研究財団(現笹川平和財団海洋政策研究所)のご支援のもと構築させていただきました。また、端末の普及に際しては(株)NTTドコモのご支援をいただいています。)

4. おわりに

我が国の歴史において、古くは古事記、日本書紀はもとより、枕草子においても船に関連する記述が数多くなされています。古来から船舶運航において最も重要な気象情報は事故や遭難に直結し得る波浪や風に関するものであり、それは現在においてもいささかも変わりはありません。

しかし現代においては、地球環境保護のための温室効果ガス排出削減といった、かつては地球環境に対する知見不足から重視されていなかった概念も、未来世代に向けて実現すべき重要な規範として認識されるようになりました。

当社が提案する詳細な潮流、海流の予測情報利用は実用性を充足した、船舶の省エネ実現、運航コストの削減に繋がる科学技術イノベーションの成果といえると思います。

2018年10月現在、国内では既に200隻弱に及ぶ内航船舶がこの情報を用いた運航効率化に努めつつあり、このような情報が船舶運航上当たり前のものとして扱われる時期もそう遠くないものと考えられます。

私たちは引き続き、海洋予測モデルの研究開発と共に更なる商品力強化に向けた取り組みを関係企業の皆様と続けていくことで、船舶の省時間、省エネ、温室効果ガス排出削減に向けた取り組みを業界に率先して続けて参りたいと考えています。