「宮澤泰正, 2007: 海洋変動予測実験とその成果〜海中の数値天気予報〜,検査技術, 12, 45-51. 日本工業出版. 」

海洋変動予測実験とその成果 - 海中の数値天気予報 -

1. はじめに

日本列島の周りには多くの海流が流れており、列島に住む私たちの生活に対して気候や 水産業、海上輸送、地域環境保全などの面から様々な影響を及ぼしている。海の流れはひ とくちに海潮流などとも言われるが、このうち海流は、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。ごく浅海域では海流が潮流や河川から流出する流れなどと併存している場合 もある。このような海流の実態を知ることは船舶による海洋観測が比較的困難であること などの理由により難しかったが、最近になって急速に発達した人工衛星等による観測と、 大容量高速計算機の技術を適切に組み合わせることにより鮮明な描像を再現しその変動を 数値的に予測することが可能になった。ここでは、筆者が海洋研究開発機構(JAMSTEC) で行っている数値海洋変動予測実験(JCOPE: Japan Coastal Ocean Predictability Experiment)⁽¹⁾⁽³⁾の実例について紹介することからはじめ、次に海洋観測との融合という 視点から数値海洋変動予測技術を解説し、さらに成果の応用と今後の展開について述べる。

2. 数値海洋変動予測の例

図 1(a)に日本近海の海面水温分布の人工衛星による観測例を示す。沖縄周辺の東シナ海 から九州の南東方,さらに紀伊半島の南から房総沖にかけて、水温が 20 度を越える暖かい 水が白い帯のように分布しているのが見えるが、これが世界屈指の大海流である黒潮であ る。黒潮は幅 100km 程度、流速が最大で 3m/秒に達する流れであり、現場では黒みを帯び た藍色の海水として見えることからこのような名前が付けられている。図 1(b)には本稿で 紹介する,数値海洋変動予測実験 (JCOPE) で再現された計算機上の仮想的な流れの海面 水温分布を示す。南から北に向かって水温が低くなっている様子や、黒潮流路がよく再現 されていることが確認できる。海面水温の観測結果が観測の都合上雲によって不可視とな る場合があるため 7 日間の平均であり分布が平滑化されているが、計算機の再現結果は瞬 間値であり細かな構造が表現されていることもわかる。また、黒潮の流路は 2004 年夏に 13 年ぶりに大蛇行し1年間持続して話題になったが、数値海洋変動予測技術の進展によっ てこのような流路変動の予測も可能になった(図 2)。

3. 数値海洋変動予測の原理 -観測とモデル-

数値海洋変動予測は,海洋の物理法則(流体力学における非圧縮性粘性流体の方程式と, 水温,塩分の輸送方程式)を記述したプログラムを大容量高速計算機上で操作することに よって行われる。ここでは湾などに比べて空間スケールが大きい外洋の変動予測を扱う。 物理的に外洋の海流を駆動する最も大きな要因は,偏西風や貿易風といった大規模な風系 の存在である。数値海洋変動予測の概念を説明するために,現実の海洋を重い海水層(平 均厚さ H_2 ,密度 ρ_2)の上に軽い海水層(平均厚さ H_1 ,密度 ρ_1)が乗っている状態とし て近似し(図 3),その振る舞いを考えてみる。上層(東西方向流速 u_1 ,南北方向流速 v_1 , 圧力 p_1 ,境界面の平均海面からの水深 h_1),下層(東西方向流速 u_2 ,南北方向流速 v_2 ,圧 力 p_2)での簡略化した流体の運動方程式を以下に示す。 上層の運動方程式

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} - fv_1 = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho_1 H_1}, \quad \frac{\partial v_1}{\partial t} + fu_1 = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho_1 H_1}$$
(1)

下層の運動方程式

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} - fv_2 = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial x}, \quad \frac{\partial v_2}{\partial t} + fu_2 = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial y}$$
(2)

ここで, *f* は地球自転の効果を表す量(コリオリパラメータ)であり赤道でゼロとなり両 極で大きさが最大となる。コリオリパラメータの項は,河川流や風波など身近に目にする 流体現象では意味を持たないほど小さいが,外洋の海流は,より長い時間スケール,より 大きな空間スケールの現象なのでその振る舞いに対しては意味を持つ大きさになってくる。

 τ_x, τ_y は海上風応力のそれぞれ東西,南北成分である。海洋は水平方向の巨大なスケール(数

百 km 以上)に比べて鉛直方向の空間スケール(すなわち水深)は高々数 km と小さいので 鉛直方向の運動を簡略化して考えることが可能であり(静水圧平衡)流体の圧力はその位 置より上にある海水の重さで近似することができる。第 1 層内の平均海面からの水深 z_1 で の圧力は重力加速度を g とすると $p_1 = \rho_1 g(\eta + z_1)$ となり,第 2 層内の平均海面からの水深 z_2 での圧力は $p_2 = \rho_1 g(\eta + h_1) + \rho_2 g(z_2 - h_1)$ となる。これを(1)(2)式に代入すると,運動 方程式は

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} - fv_1 = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho_1 H_1}, \quad \frac{\partial v_1}{\partial t} + fu_1 = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho_1 H_1}$$
(3)
$$\frac{\partial u_2}{\partial t} - fv_2 = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2} g \frac{\partial h_1}{\partial x}, \quad \frac{\partial v_2}{\partial t} + fu_2 = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2} g \frac{\partial h_1}{\partial y}$$
(4)

となる。海洋では表面で与えられる風応力や熱及び淡水の移動が主な駆動源なので上層で は運動がさかんに生ずるが、下層では、上層での運動の結果により生ずる海洋特有の波動 効果により境界面 h_1 が変動し下層の運動をうち消すように働く(アイソスタシーの成立)。 例えば図 3 は暖かく比較的小さな密度の水塊上の海面が盛り上がることで下層の運動を打 ち消すような構造になっている状態を表している。このような近似により $u_2 = v_2 = 0$ とし て(4)式に代入するとそれらの左辺はゼロになり、

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\Delta \rho}{\rho_2} \frac{\partial h_1}{\partial x}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{\Delta \rho}{\rho_2} \frac{\partial h_1}{\partial y}$$
(5)

と表わせて $(\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1)$ 上層の運動方程式

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} - fv_1 = -g'\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho_1 H_1}, \quad \frac{\partial v_1}{\partial t} + fu_1 = -g'\frac{\partial h_1}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho_1 H_1} \tag{6}$$

のみを考えればよくなる ($g' = \frac{\Delta \rho}{\rho 2}g << g$ であり, 逓減重力と呼ぶ)。この場合, 上層の連

続の式は

$$\frac{\partial}{\partial t}h_1 = H_1(\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y}) \quad (7)$$

となる。式(6)(7)から、風応力によって流れが生じ、流れの収束発散によって上層厚さ h_1 が変化し、それによって生じた圧力勾配にバランスするように流れが変化していく様子が見てとれる。実際の海洋を観測すると、そのような変化はかなりゆっくり生じており、第ゼロ近似的には($\frac{\partial u_1}{\partial t} = \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{\tau_x}{\rho_1 H_1} = \frac{\tau_y}{\rho_1 H_1} = 0$ と近似すると)おおむね

$$u_1 = -\frac{1}{f}g'\frac{\partial h_1}{\partial y}, \quad v_1 = \frac{1}{f}g'\frac{\partial h_1}{\partial x}, \quad \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0$$
 (8)

となっている。(8)式は海洋表層の流れが密度成層の傾きによって生ずる圧力勾配とバラン スするように生じていることを示しており(地衡流平衡),密度成層の水平分布がどのよう になっているかわかれば流れもおおむね分かることを示している。そして,(5)式により表 面の海面の高さ(海面高度) η が観測できれば $h_1 = \frac{\rho_2}{\Delta\rho}\eta + C(C$ は定数)という関係によっ て密度成層の深さ h_1 がわかり,(8)式により流れもわかるということになる。図2からもわ かるように数値海洋変動予測においても海面高度の変動が表現されている。

実際の数値海洋変動予測には、非線形移流や粘性拡散の項を加えるなど、(1)-(4)の式等を さらに精緻化した方程式をプログラムにしたもの(海洋大循環モデル)が用いられている。 海洋大循環モデルは現実的な地形データを備え、一定の水平・鉛直格子間隔で離散化され ている。また、外力としては人工衛星によって観測される海上風や、数値天気予報データ から推算される表面での熱交換(海表面熱フラックス)等が与えられる。こうした精緻な 数値モデルと現実的な外力のほかに重要な要素として、予測を始める最初の状態(初期値) を知る必要がある。数値海洋変動予測においては、直接の外力というより初期値に依存す る状態の時間発展が極めて重要であり、かつ初期値に含まれている誤差が非線形効果によ って増大し予測精度が時間とともに失われるからである。そのため、予測精度を損なわな いうちに定期的に観測データから海洋の状態(例えば密度成層の深さ h₁)をその都度推定 し、初期値を補正していく必要がある(データ同化)。こうした予測の仕組みは空の天気予 報と同様であり、海中の数値天気予報とも呼ぶべき技術である。この技術を実現するにあ たり,最も重要なことは*h*₁を知るために有用な海面高度ηの高精度観測が1990年代から人工衛星によって定期的に行われるようになったことであった。従来から行われている海面 水温の衛星観測も表面近くの成層の状態を推定することに用いられている。さらに,数は 少ないが船舶等による水温と塩分の現場観測値も初期値補正に用いられている。

海洋の現況を知るためには、観測データと海洋大循環モデルの予測値を組み合わせて最 適な推定値を求め海洋大循環モデルの初期値として与える必要がある。データとモデルの 値の双方に含まれる誤差をともに無視できないからである。このため、線形不偏最小分散 推定理論⁽⁵⁾をもとにした推定を行っている。実際には海面下の密度構造を決める水温、塩分 濃度鉛直分布の推定を行っているが、ここでは簡単のために密度成層の深さ**h**、を推定する

ものとして解説する。 h_l^o を観測データ、 h_l^f をモデルによる予測値として、未知の真の値 h_l^t

により近い最適な推定値 $h_l^a = w^o h_l^o + w^f h_l^f$ を求めるものとし、重み付け w^o, w^f を決める

ことを考える。まず h_1^o, h_1^f の期待値< $h_1^o >, < h_1^f >$ はともに真値の期待値< $h_1^t >$ に等しいと仮定する。

$$< h_1^{o} > = < h_1^{f} > = < h_1^{t} >$$
 (9)

推定値の期待値をやはり h_1^t に等しくするため、

 $h_1^a >= w^o < h_1^o > + w^f < h_1^f >$ より

$$1 = w^o + w^f \tag{10}$$

となる (不偏推定)。さらに、データの誤差 $\varepsilon^{o} = h_{1}^{o} - h_{1}^{t}$ 、モデルの誤差 $\varepsilon^{f} = h_{1}^{f} - h_{1}^{t}$ として推定値の誤差の分散の期待値を求めると(10)式を用いて

$$<(h_1^a - h_1^t)^2 >= w^{o2} < \varepsilon^{o2} > + w^{f2} < \varepsilon^{f2} > + 2w^o w^f < \varepsilon^o \varepsilon^f >$$

となる。ここで、データの誤差とモデルの誤差が無相関である(< $\varepsilon^{o}\varepsilon^{f}$ >=0)という仮定 をおき再び(10)式を用いると

$$<(h_1^a - h_1^t)^2 >= w^{o^2} < \varepsilon^{o^2} > +(1 - w^o)^2 < \varepsilon^{f^2} >$$

となるので最小誤差分散とするべく

$$\frac{\partial}{\partial w^{o}} < (h_{1}^{a} - h_{1}^{t})^{2} >= 2w^{o} < \varepsilon^{f^{2}} > -2 < \varepsilon^{f^{2}} > +2w^{o} < \varepsilon^{f^{2}} >= 0$$

とすれば

$$w^{o} = \frac{\langle \varepsilon^{f^{2}} \rangle}{\langle \varepsilon^{o^{2}} \rangle + \langle \varepsilon^{f^{2}} \rangle}$$

と表わすことができる。したがって, 推定値は

$$h_{1}^{a} = h_{1}^{f} + \frac{\langle \varepsilon^{f^{2}} \rangle}{\langle \varepsilon^{o^{2}} \rangle + \langle \varepsilon^{f^{2}} \rangle} (h_{1}^{o} - h_{1}^{f}) \quad (11)$$

上述した原理に従い,数値海洋変動予測実験JCOPEでは,スーパーコンピューター(NEC SX-5/SX-8)上に日本近海(北緯 12度~北緯 62度,東経 117度~東経 180度)を対象と する高解像度(水平 1/12度格子間隔,45層)海洋大循環モデルを構築し,人工衛星による 海上風データ(NASA QuikSCAT)と日々の数値天気予報データ(NCEP/NCAR Reanalysis)によってモデルを駆動している。さらに1週間毎にデータ同化によってモデ ル予測値の補正を行い,直前の土曜日時点の補正値を出発点とする2ヶ月後までの予測を1 週間毎に更新している。データ同化には,前述した衛星海面高度データ(NASA/CNES Jason-1とUS Navy Geosat-Follow On),衛星海面水温データ(NOAA/NAVOCEANO MCSST),水温塩分現場観測データ(GTSPP)を組み合わせて用いている。図4にモデル 予測値の補正結果(現況推定値)と観測結果との比較を示す。黒潮が大蛇行し冷水塊が御 前崎沖に分布している様子が再現されている様子がわかる。図4に示すような実際の補正 においては,海面高度等の観測が海流の流路やその周辺の渦の大まかな位置を決め,海流 や渦の詳細な内部構造はモデルによって表現されるといった役割分担におおよそなってい る。

4. 数値海洋変動予測の展開と応用

数値海洋変動予測実験 JCOPE は 2001 年 12 月より開始された⁽⁶⁾。2002 年 7 月からはそ の予測結果がウェブで公開され (http://www.jamstec.go.jp/frcgc/jcope/), さらに 2003 年 10 月から実験のプロダクトである現況推定データの頒布が開始され⁽⁷⁾, 主として研究用に 多くの利用者を得てきた。2004 年 4 月からは,漁海況予報への適用を目的として,独立行 政法人水産総合研究センターとの共同研究を開始した⁽⁸⁾。この共同研究は,従来流通してい なかった水産試験研究機関の現場観測データの流通を促進するとともに,同データを JCOPE の初期値作成に導入して予測精度の改善を図ることを目的としている。最近は, JCOPE の結果を重要浮魚類の卵・稚仔魚や浮遊生物の分布予測に用いるなどの応用研究を 開始している。一例として図5に2006年夏の大型クラゲの来遊予測の結果を示す⁽⁹⁾。2004 年以降,大型クラゲが夏から秋にかけて日本海や太平洋の沿岸に到来し漁業被害をもたら しており,その来遊予測は対処方針を定めるうえで重要な情報となる。2006年にも黄海の フェリー観測で大型クラゲの分布が確認されたが(図5の矩形部分),それらが日本沿岸に 来遊してくるかどうかについて予測するため,2006年7月8日を予測開始日とするJCOPE の海面下10mの海流予測を用いてクラゲに相当する粒子を仮想的に放流した。図5は2006 年8月10日の予測結果を示すが,実際に2006年8月11日までに島根県沖への大型クラ ゲの到達が確認されており,しかも対馬海峡の西水道のみを通じた来遊予測結果である点 も実際の目撃報告と一致している⁽¹⁰⁾。

水産への応用のほかに,海流予測情報を船舶航行の支援に利用する試みも始めている。 従来にない詳細な海流予測情報を船舶航路選定に用いれば,追い流れ効果等により航行時 間や燃費の節減につながる可能性がある。こうした海流予測情報の実利用を促進するため に,JAMSTECの研究者らと株式会社三菱総合研究所は共同で2006年5月24日に「海流 予測情報利用有限責任事業組合」を設立した⁽¹¹⁾。同組合は海洋研究開発機構が研究開発し た知的財産を普及し活用する意義を有するため,海洋研究開発機構のベンチャー支援第一 号として認定を受けている⁽¹²⁾。同組合は海流予測情報を数値データとして電子メールに添 付し,衛星通信を通じて航行する船舶等に直接配信するなどの海流予測情報提供事業を開 始した。図6には同組合で開発した,海流予測情報を船上で確認するためのビューワーの 表示例を示す。現在,複数の船会社に試行利用を実施して頂く準備を進めているところで ある。

このように数値海洋変動予測実験の成果を応用するべく様々な試みを開始しているとこ ろであるが,詳細な予測の検証を通じて,上述したような海表面物質輸送過程には海流だ けではなく風による直接の輸送,波浪による輸送などが複雑に寄与しており⁽¹³⁾,こうした 現象は従来モデルの水平解像度よりさらに小さな空間スケールで相互作用していることが 示唆されている。将来的には日本近海の高解像度海洋・大気・波浪結合モデルを構築し, 有害生物や有害物質の日本沿岸への来遊・漂着予測等の高精度化をはかっていく方向性が ありうるだろう。また,式(9)と(11)で示したように,モデルと観測の一層の精度向上とそれ らの誤差に関する正確な情報把握をする努力を続けていく必要がある。海流予測情報の高 精度化とその利用は表裏一体,車の両輪のようなものであり,このような試みがうまく行 けば海洋学の発展にも大きく貢献することだろう。

謝辞

図2の一部は海上保安庁海洋情報部ウェブサイトより入手した。図4,5は独立行政法人水 産総合研究センターの小松幸生氏,瀬藤聡氏より提供を受けた。小松幸生氏には原稿をお 読み頂き貴重なご意見を頂いた。合わせて御礼を申し上げる。

参考文献

(1) 宮澤泰正, 山形俊男: 月刊海洋, 33 (2003) 881-886.

(2) 宮澤泰正, 鍵本崇, 郭新宇, 川尻秀之, 佐久間弘文, 山形俊男: 月刊海洋, 37 (2005) 263-269.

(3) 宮澤泰正, 早稲田卓爾: 月刊海洋, 37 (2005) 644-655.

(4) 小倉義光: 気象力学通論, 東京大学出版会, (1978).

(5) Bennett. A.F.: Inverse Methods in Physical Oceanography. Cambridge University Press. (1992).

(6) 宇宙開発事業団,海洋科学技術センター:報道発表,2001年12月20日.

http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/PR/0112/1220/

(7) 海洋科学技術センター,宇宙航空研究開発機構:報道発表,2003年10月30日.

http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/PR/0310/1030/

(8) 小松幸生, 瀬藤 聡, 植原量行, 宮澤泰正, 伊藤進一, 日下 彰, 筧 茂穂, 鹿島基彦, 清水 学, 秋山秀樹, 平井光行: 月刊海洋, 37 (2005) 656-665.

(9) 社団法人漁業情報サービスセンター,全国漁業協同組合連合会,独立行政法人水産総合 研究センター:報道発表,2006年7月12日.

http://www.jafic.or.jp/kurage/data/20060712press.pdf

(10) 社団法人漁業情報サービスセンター大型クラゲ被害防止緊急総合対策事業ウェブサイ
ト <u>http://www.jafic.or.jp/kurage/</u>

(11) 海流予測情報利用有限責任事業組合ウェブサイト http://forecast-ocean.com/

(12) 独立行政法人海洋研究開発機構:報道発表, 2006年6月1日.

http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/PR/0606/0601/

(13) K. Komatsu, Y. Miyazawa, T. Setou : Second Workshop of PEACE (Program of the East Asian Cooperative Experiments), Nov. 25-26 (2004) Fukuoka, Japan.

2006/03/18



2006/03/18



図 1: 日本近海の海面水温分布。(a): 人工衛星 NOAA によって観測された水温の週平均。 2006 年 3 月 15 日~2006 年 3 月 21 日。(b): 海流予測システム JCOPE によって再現され た水温のスナップショット。 2006 年 3 月 18 日。(JCOPE ウェブサイト http://www.jamstec.go.jp/frcgc/jcope/ より)

(a)









(b)



図 2: 日本南岸の黒潮流路の比較。左列は海上

保安庁による観測(海流速報)。右列は海流予測システム JCOPE が算出する海面高度(間隔は 5cm)。海面高度の勾配が強い部分が黒潮流路を表す。(a)は 2004 年 5 月末時点の状態を初期値として予測を行い 8 月初めの大蛇行発生を予測したことを示し,(b)は 2005 年 6 月初め時点の状態を初期値として予測を行い 8 月初めの大蛇行終息を予測したことを示す。



図 3:2層で近似した海洋の概念図。H1:上層の平均厚さ,ρ1:上層の密度,z1:上層で圧 力 p1 を考える位置の水深。 H2:下層の平均厚さ,ρ2:下層の密度,z2:下層で圧力 p2 を考える位置の水深。η:海面高度,h1:上層の厚さ。



図4:御前崎沖(東経138度)の水温(左図),塩分断面(右図)の比較。上図:数値海洋変動予測JCOPEの2004年8月28-29日の2日平均現況推定。下図:水産総合研究センター中央 水産研究所の漁業調査船蒼鷹丸による2004年8月29日~9月3日の観測結果。(観測結果は水 産総合研究センター瀬藤聡氏の提供による)



図5:2006年8月10日の大型クラゲの来遊予測結果。2006年7月11日に矩形部分にクラゲに相 当する粒子を0.5度x0.5度(約60km x 約60km)の格子に100個の割合で投入し,数値海洋変 動予測JCOPEによる海面下10mの流れで仮想的に放流した。(水産総合研究センター,小松 幸生氏の提供による)



図6: 海流予測情報を船上で確認,利用するためのビューワーの表示例。2006年3月30-31日 の平均の表面の海流予測を表示している。(海流予測情報利用有限責任事業組合ウェブサイ ト <u>http://forecast-ocean.com</u>/より)