

海洋モデルとデータ同化を用いた海況予報

蒲地 政文, 碓氷 典久

1. はじめに

オペレーションズリサーチ (OR) は、数学モデル・統計モデルや数学の応用分野である最適化手法のアルゴリズム等を応用して、複雑なシステムの問題を解析し最適な解を求め、意志決定の支援資料を作成することを目的とする学問分野であると筆者は考えている。

海洋・大気の運動を研究する地球科学で、データ同化という研究分野は、(話題を海洋に限って言えば)、現象を再現するための数値スキームと大気からの外力(あるいは境界条件としての大気との間の運動量・熱・水の交換量)に不完全さのある海洋モデルと、(海洋は広く、運動の時間スケールも日々の気象変動に比べてゆったりとしているので観測は困難なため)時間空間で断片的にしか得られない海洋観測とを、“最適に”結びつけるために、最適化法を応用して海洋の4次元データセットを作成したり予報を行ったりする研究分野である。そのような意味でORの一つの研究分野と考えられる。

本稿では、日本近海の海洋状態(海況)の代表例として黒潮を中心にすえて、最適化手法の応用分野であるデータ同化と海洋予報(「海況予報」と呼ぶ)について紹介したい。

毎日、テレビでもインターネットでも天気予報は報道されている。これは1904年にV. ピヤークネスが唱えて以来、気象学者の多大な努力の結果なされるようになったものである。一方、海洋については、日本近海の状況が、沿岸防災、海運、水産、海洋レジャー、気象・気候、あるいは文化の通り道として古来より重要であったにもかかわらず、(現在、波の高さについては日々報道されているが)海洋の中の情報、例えば、水温・塩分・流速の分布の現在の状態や予測値につい

ては、報道されていない。最近、気象庁、海洋研究開発機構、九州大学応用力学研究所や水産総合研究センターでインターネットを通じて、海況予報の結果がようやく公開され始めている段階である。これは、近年の海洋数値モデルの発展、海洋観測(実際に海に行つて測る現場観測と衛星等によるリモートセンシング観測)の拡大・精密化、スーパーコンピュータの大型・高速化、それにデータ同化技術の高度化が相まって、標語的には「海の天気予報」([1][14])と呼ぶことのできる海況予報が行える時代になってきたためである。

その海況予報について簡単に紹介しよう。

2. 日本近海の海の状況：代表例としての黒潮

まず、日本近海の海の状況の例として黒潮について大まかな状況を紹介します。北太平洋の北緯15度あたりを、西に向かって流れる北赤道海流がフィリピン沖で北上し、台湾東方沖から東シナ海に入り、南西諸島を洗いながら、九州南方トカラ海峡を通過して太平洋に入り、四国・紀伊半島から東海地方の沖を流れ、房総半島沖で東に向かう巨大な流れが黒潮である。「流速は速いところでは毎秒2m以上に達し、その強い流れは幅100kmにも及び、輸送する水の量は毎秒5,000万トンにも達します。黒潮流路の動向は船舶の経済運航コースを左右するほか、漁場の位置や沿岸の潮位を変化させる要因の一つとなっています。このため、船舶運航や漁業の関係者などにとって、黒潮流路の変動は大きな関心事となっています。(気象庁ホームページ <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/kaikyo/knowledge/kuroshio.html> より転載)。この流れは古来よりよく知られていた(例えば、[11])。

世界の主な海流図を見てもらえばわかるように、各大洋には西のはずれに平均的に強い流れがあることがわかる。これは海の流れが西岸強化された結果生成したものであり、「西岸境界流」と呼ばれている。この

かまち まさふみ, うすい のりひさ
気象庁気象研究所海洋研究部
〒305-0052 つくば市長峰1-1

古くから知られてきた平均的な流れである「西岸境界流」の理論的な基礎が築かれたのは1940年代後半からである（例えば、[12]参照の事）。その後、西岸境界流の変動、例えば、大西洋では湾流の回りに直径100 km くらいの中規模渦が発生し変動することや、太平洋では、四国・本州南方を流れる黒潮に大きく分けて2種類の安定した流路のパターンがあるという bimodality が研究されてきた。

黒潮流路のパターンのひとつは紀伊半島・遠州灘沖で南へ大きく迂回して流れる「大蛇行流路」、もうひとつは四国・本州南岸にほぼ沿って流れる「非大蛇行流路」と呼ばれるものである。「非大蛇行流路」には、遠州灘から伊豆諸島で小さく蛇行する「非大蛇行離岸流路」と、四国・本州の南岸近くを直進する「非大蛇行接岸流路」がある（図1）。黒潮が大蛇行流路となって流れている状態を、黒潮大蛇行と呼んでいる。「黒潮大蛇行が発生すると、蛇行した黒潮と本州南岸の間に下層の冷たい水が湧き上がり、冷水塊が発生します。この冷水塊も漁場の位置に影響を与えることから、漁業関係者はその動向を注目しています。黒潮がいったん大蛇行流路となると、多くの場合1年以上持続します。1967年以降、黒潮大蛇行は5回発生しています。最近では2004年7月～2005年8月に発生しています。（前述の気象庁ホームページより）」。

このような海の平均的な状態の再現や、変動の予測を海洋モデルと観測データを用いて行うことに筆者のグループは長年取り組んできた。

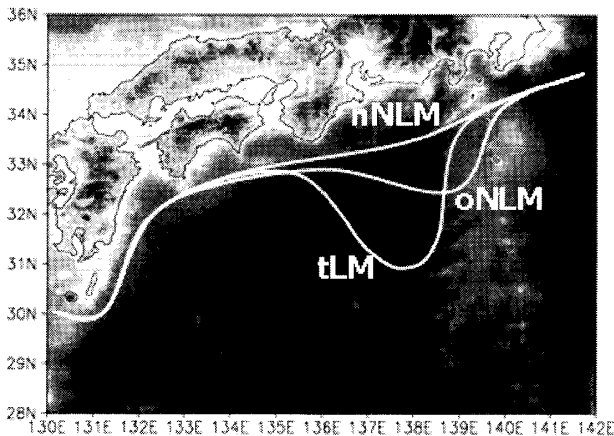


図1 日本南岸での黒潮の3種類の流路。nNLM：非大蛇行接岸流路 (nearshore Non-Large Meander). oNLM：非大蛇行離岸流路 (offshore Non-Large Meander). tLM：大蛇行流路 (typical Large Meander)

3. 海洋モデル・データ同化とは

ここで簡単に海洋モデルと呼んでいるものは、海洋の物理的な変数（水温・塩分・流速・海面水位）の時間空間4次元構造と変動を記述する為に、流体力学と熱力学の基礎方程式（非線形の連立微分方程式）を初期条件と（大気や陸域との間の運動量・熱・水フラックスに関する）境界条件のもと数値的に解くものである。このモデルは、決定論的、非線形、離散形のモデルといえる。そのモデルの次元は最近では10の7~8乗のオーダーにもなり、益々巨大化したモデルが使用されつつある。

この海洋モデルにより、流体力学と熱力学の基礎方程式の解から海洋の平均的な状態や変動を記述できる。しかし、その問題点は、有限差分法等の数値的なスキームを用いて解くときの格子点以下のサブグリッドスケールの現象の拡散・混合過程のモデルへの取り込み方（パラメタリゼーションと呼んでいる）や、外力（大気・海洋間の境界条件）の不確かさにより、現実とは異なる平均場や変動場が求まったりすることである。この海洋モデルは、米国や欧州でいくつかのグループが開発し、世界中に公開されてきた。筆者の所属する気象研究所海洋研究部では、主に東京大学とカリフォルニア大学ロサンゼルス校の両方で開発されたモデルの長所を取り入れ、さらに日本の海洋学者が作成したスキームや欧米で随時報告されてきた種々のスキームを取り入れて発展させてきた。現在、気象研究所共用海洋モデル（MRI.COM）という愛称で呼ばれている[6]。

データ同化とは、第1節でも述べたが、観測データと数値モデルの解の双方に共通な情報を取り出して、統計的・力学的に組み合わせる一連の手続きである。このデータ同化は、天気予報を行うための数値モデルの最適な初期条件を作成する手法として気象・海洋学者には知られてきた。しかしながら、大気・海洋・気候における予測の初期値を求めるだけでなく、以下のような目的にこのデータ同化は利用できることが最近ではわかってきている（例えば、[10]参照）：

1. 予測のための最適な初期条件を求める。
2. 数値モデルへの最適な境界条件を求める。
3. 数値モデルのパラメタリゼーションの改良またはパラメーターの評価を行う。
4. 同化結果（4次元の時間空間で均一なデータセット）を用いたデータ解析により現象を解明す

る。

5. 感度解析により観測システムの評価・設計を行う。

これらの目的に応じて種々のデータ同化手法の考案や同化システムの構築がなされている。また、その同化システムが扱う海洋現象の時空間スケールに応じて、現象の再現・理解・予測の仕方も変わってくる。

海洋でのデータ同化手法には、大別して最小分散推定を基礎とするカルマンフィルターの系列と、最尤推定に基礎をおく変分法と呼ばれる系列に分かれる。ここでは気象研究所で用いている変分法について主に題材としたい（カルマンフィルター系列の海況予報への最近の応用については、[5]を参照されたい）。

筆者のグループでは、MOVE/MRI.COM システムと呼ばれる多変量の3次元変分法を用いている[13]。このシステムでは、水温・塩分・海面水位の観測データと海洋モデルMRI.COMを用いて海況を再現・予測する。その手法は以下のようにまとめられる。

まず、評価関数を次のように定義する。

$$J = (\mathbf{x} - \mathbf{x}^f)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^f) / 2 + (\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}) / 2$$

ここで、 \mathbf{x} 、 \mathbf{x}^f 、 \mathbf{y} は、推定すべき変数（ここでは水温・塩分値であり解析値と呼ぶ）、その初期推定値（海洋モデルの値をよく使用する）、および水温・塩分の観測値をそれぞれ縦に並べた列ベクトルである。行列 \mathbf{B} と \mathbf{R} は予報誤差（あるいは背景誤差）分散共分散行列と観測誤差分散共分散行列であり、前者はモデルの次元、後者は観測の個数の次元をもつ行列である。 $\mathbf{H}(\cdot)$ はモデルの格子点から観測データがある場所・深度および他の変数を算出（水温から塩分や、水温・塩分から海面水位へ変換）する演算子であり、しばしば観測演算子と呼ばれる。評価関数 J の第1項と第2項はそれぞれ、解析値とその初期推定値とのずれ、解析値と観測値とのずれ、の2乗に比例する項であり、これらの各項の和、つまり J が最小になるような \mathbf{x} が最適な海洋の状態である。行列 \mathbf{B} はモデルの次元を1辺とする巨大な行列であるため種々の工夫を行って小さな行列に変換して使用する。筆者のグループでは経験直交関数展開し低次のモードのみ使用している（詳しくは[3][13]）。

上述の評価関数を、最適化したい変数である（初期値であったり海洋モデルのパラメーターであったりする）制御変数に関する勾配を求める。その評価関数の値と勾配を降下法に用いて、最適な制御変数を求める。

評価関数の式からわかるように、背景誤差分散共分散行列の逆行列を求める必要がある。この行列は巨大な行列であるため、その逆行列を直接計算せず（できず）、近似的に求める方法が提案されてきた。なかでも海洋データ同化では改良された共約勾配法[2]や準ニュートン法[4]を用いている。

4. データ同化と海況予報の例

気象庁と気象研究所では1994年から共同で海洋データ同化・予測システムの開発とそのシステムを用いた同化・予測実験を行ってきた。2004年夏に黒潮は13年ぶりに大蛇行し、社会に大きなインパクトを与えたので、この黒潮の流れについて同化結果と予測結果を簡略に紹介しよう。

2003年12月に九州東方で黒潮が岸から約100 km離れた沖合を少し回り込むように流れる、いわゆる小蛇行が発生した。この小蛇行は徐々に東に移動し、2004年4月上旬に足摺岬、4月下旬から5月上旬にかけて室戸岬に達した。気象庁で現業運用されている海況データ同化・予測システムCOMPASS-K（MOVE/MRI.COMはこの次に現業化されるシステム）を用いて2004年5月上旬から行った予測の段階では、この小蛇行が発達して夏には大蛇行するという結果が得られたので、2004年5月11日に報道発表して、各海洋関係の官署や一般に注意を呼びかけた。

2004年7月上旬と8月上旬の代表的な海洋表層の流れの状況をMOVE/MRI.COMを用いて行った同化・予測実験結果から紹介しよう。図2は、データ同化による2004年7月上旬（10日平均）の深さ200 mの水平流速分布である。紀伊半島沖の黒潮が少しふくらんでいるのがわかる。図3は、2004年7月1日を

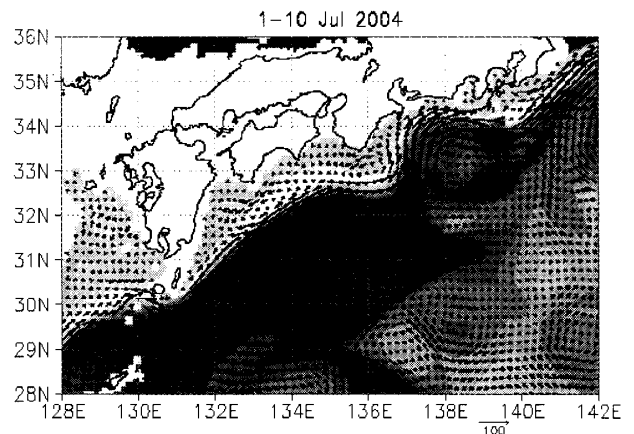


図2 2004年7月上旬の深さ200 mの水平流速の分布（同化結果）

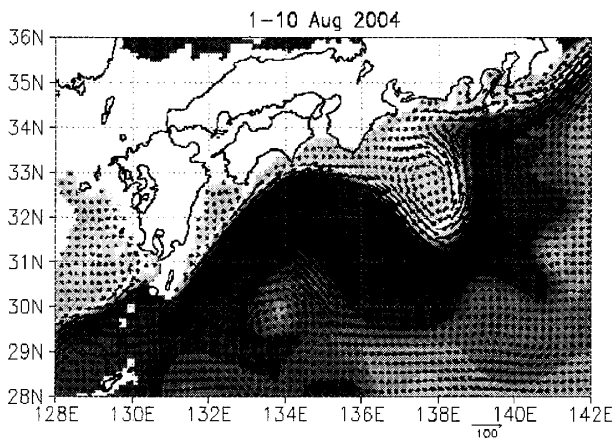


図3 2004年8月上旬の深さ200mの水平流速の分布(予測結果)

初期値として8月上旬を予測した結果(8月上旬10日平均の深さ200mの水平流速分布)である。紀伊半島沖で大きく迂回する大蛇行が予測されているのわかる。この予測結果は、8月の観測で追認されている(図省略)。

5. 今後の方向性

今後の海況予報の方向性はいくつか考えられるが、大まかなところでは、カルマンフィルター系列の同化手法との融合、確率的な予測(あるいはアンサンブル予報)、下記に述べるアジョイント法の採用、感度実験による最適な観測システムの設計等が挙げられる。

第3節で述べた同化手法は3次元変分法と呼ばれる手法であり、観測とモデルの値を用いた空間的な(同時刻の)最適化を行っている。この手法に海洋モデルを制約条件として満たすように解く手法を4次元変分法あるいはアジョイント法と呼んでいる(例えば[7])。この手法は、制約条件付き非線形最適化問題であるので、ラグランジュの未定乗数法を用いることにより制約条件のない非線形最適化問題として解くものである。このときラグランジュの未定乗数についての支配方程式系が導かれ、それをアジョイント方程式(それを数値的に解くアジョイントモデル)と呼んでいる。このアジョイント方程式の特徴は、海洋モデルと観測値の差を強制項として持ち、時間を逆に解かねばならないことである。海洋モデルとそのアジョイントモデルを解くことにより、評価関数の制御変数に関する勾配が求められる。あとは、準ニュートン法等の降下法を用いて最適化すればよい。詳しくは文献を参照していただくことにして、この手法では、モデルにより誤差の伝搬を行えるので、3次元変分法より精度

が向上すると考えられているが、海洋モデルとアジョイントモデルを解く必要があり多大な計算時間を要する。最近のスーパーコンピュータの発達に伴い巨大な海洋モデルと共にその使用が現実味を帯びてきており、国内外の研究機関で海況予報用の開発が進んでいる。

このアジョイントモデルは誤差の情報を時間を遡って計算していくため、同化・予測だけでなく、第3節の同化目的5番の感度実験による観測システムの評価・設計に使用できる。すなわち、(例えば黒潮大蛇行に例をとれば)どこで大蛇行の種が発生しているのかが同定できる。そのことは、大蛇行発生メカニズム解明に大きな情報を与えるし、また一方では、その種になる海域を時期を選んで観測すれば、予測精度は向上すると考えられる。このような研究については(黒潮関連ではないが)例えば、[10]を参照して頂きたい。

本稿で簡略に紹介したORの応用と考えられる海況予報は、世界の主立った現業機関と研究所でしのぎを削って研究されており、国際研究計画「全球海洋データ同化実験(GODAE: Global Ocean Data Assimilation Experiment)」として進展している。詳しくは、[8]参照またはホームページ<http://www.bom.gov.au/bmrc/ocean/GODAE/>を訪問して頂きたい。この計画では、同化・予測システムについてだけでなく、観測システムや社会への情報公開まで含めて議論している。

本稿で紹介した海況予報が毎日一般の方々の目に触れる日が来るようにしたいと考えている。

参考文献

- [1] 淡路敏之, 蒲地政文: “海洋観測とモデルの統合化—現状と今後の戦略的推進—,” 月刊「海洋」, Vol. 37 (2005), 631-634.
- [2] J. D. Derber and A. Rosati: “A global oceanic data assimilation system,” *Journal of Physical Oceanography*, 19 (1989), 1333-1347.
- [3] Y. Fujii and M. Kamachi: “Three dimensional analysis of temperature and salinity in the equatorial Pacific using a variational method with vertical coupled temperature-Salinity empirical orthogonal function modes,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108 (C9): 3297, doi: 10.1029/2002 JC 001745, (2003).
- [4] Y. Fujii and M. Kamachi: “A nonlinear quasi-Newton method without inversion of a first-guess

- covariance matrix in variational analyses,” *Tellus*, Vol. 55 A (2003), 450-454.
- [5] 広瀬直毅, 万田敦昌: “日本海循環データ同化モデル,” 統計数理, Vol. 54 (2006), 247-264.
- [6] 石川一郎, 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 安田珠幾, 石崎廣: “気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) 解説,” 気象研究所技術報告, 第 47 号 (2005).
- [7] 蒲地政文: “変分法による随伴方程式を用いたデータ同化作用について,” 日本流体力学会誌 「ながれ」, 第 13 卷, (1994), 440-451.
- [8] 蒲地政文: “GODAE 計画の国際的な動向,” 月刊 「海洋」, Vol. 37 (2005), 635-640.
- [9] 蒲地政文, 倉賀野連, 杉本悟史, 吉田久美, 桜井敏之, 碓氷典久, 藤井陽介, 辻野博之: “気象庁・気象研究所における海況予報システムの現状,” 月刊 「海洋」, Vol. 37 (2005), 257-262.
- [10] 蒲地政文, 藤井陽介, 石崎士郎, 松本聡, 中野俊也, 安田珠幾: “熱帯太平洋での気候変動に関連した海洋データ同化の最近の発展,” 統計数理, Vol. 54 (2006), 223-245.
- [11] 川合英夫: “黒潮遭遇と認知の歴史,” 京都大学出版会, (1997), 355.
- [12] H. Stommel: “*The Gulf Stream*,” University of California Press, (1976), 248.
- [13] Y. Usui, Y. Fujii, S. Ishizaki, H. Tsujino, T. Yasuda and M. Kamachi: “Introduction of the Meteorological Research Institute Multi-Variate Ocean Variational Estimation System (MOVE-System),” *Advances in Space Res.*, Vol. 37 (2006), 806-822.
- [14] 山形俊男: “海の天気予報が拓く新時代,” 月刊 「海洋」, Vol. 37 (2005), 237-238.