

ENSO 予測のための海洋データ同化システムの現状と今後の展開

藤井 陽介 ・ 豊田 隆寛（気象研究所）

1. はじめに

季節予報の成否は、エルニーニョ・ラニーニャ現象、またはエルニーニョ南方振動(ENSO)の予測に強く依存していて、大気海洋結合モデルを用いて ENSO の予測を行うためには、正確な海洋内部の状態を初期値として与えることが必要である。そして、海洋の初期値化のための海洋内部の状態の推定には、海洋データ同化システムが広く用いられる。海洋データ同化システムとは、海洋大循環モデルと観測データから、モデル誤差や観測誤差の統計情報を用いて、現実の海洋変動を推定するシステムである。

気象庁季節予報システムでも、海洋の初期値化のために全球海洋データ同化システムが用いられているが、2015 年 5 月に、季節予報システムの更新と併せて、海洋データ同化システムについても更新が行われる予定である。そこで、本発表は、まず、新しい気象庁季節予報用全球海洋データ同化システムについて紹介する。次に、季節予報用海洋データ同化システムに関連した最近の話題として、熱帯太平洋域の海洋観測データの季節予報に対するインパクトの評価と、気象庁、及び外国機関の海洋データ同化システムで推定された海洋場の相互比較について述べる。最後に、海洋データ同化システムに関する今後の展望について、簡単に述べる。

2. 気象庁季節予報用全球海洋データ同化システムの更新について

気象庁では、気象研究所で開発した MOVE/MRI.COM に基づく、全球海洋データ同化システムを季節予報に用いている。MOVE/MRI.COM は、気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)と海洋データ同化スキーム Multivariate Ocean Variational Estimation (MOVE) を統合したものである。季節予報用のシステムでは、データ同化スキームとして MOVE の 3 次元変分法版を用いている。また、同化ウィンドウを 10 日としている。すなわち、モデル予報値に対する修正量の見積は、10 日に一

回のみで、解析時刻の前後 5 日の観測データを用いて行っている。

2015 年 5 月の更新では、まず、海洋モデルについて、主に以下の改良が行われている。

- ✓ 3 極座標系を用いることにより、従来のシステムに含まれていなかった北極海を解析領域に追加
- ✓ 海氷モデル、海底境界層モデルの導入
- ✓ 風応力の計算に用いる風速を絶対風速から相対風速に変更
- ✓ 移流プロセス、短波吸収プロセスの改良
- ✓ 外力を気象庁 25 年再解析(JRA25)から 55 年再解析(JRA55)へ変更

また、データ同化スキームについては、主に以下の改良が行われた。

- ✓ 月別モデル・観測誤差統計量の導入
- ✓ 観測データと比較するモデル予報値について、観測日の平均値を用いる First Guess at Adequate Time (FGAT)スキーム(Lorenc et al. 2005)の導入
- ✓ バイアス補正スキーム(Fujii et al. 2012)の導入
- ✓ 海面高度計データ同化時の全球淡水量の変化、及び順圧の季節変動に関する補正(Kurgano et al. 2014)を導入

図1は、1997 年 12 月のエルニーニョ期における太平洋赤道東断面的水温、塩分、東西流速場の比較である。水温場を見ると、150°W 付近で、旧システムでは再現されていなかった深さ 10-60m の水温極大が、新システムでは再現されている。塩分場では、海面付近の低塩分水が旧システムでは 180°付近でとどまっているが、新システムでは 140°W まで到達していて、他の研究と整合的である（たとえば、McPhaden, 1999; Toyoda et al. 2009）。また、東西流速をみると、160°E-160°W で、エルニーニョの西風偏差に伴う海面付近の東向流とその下に潜りこむ西向きの南赤道海流が新システムでは再現されている。また、図2は太平洋赤道域で平均した水温の解析インクリメントの比較である。

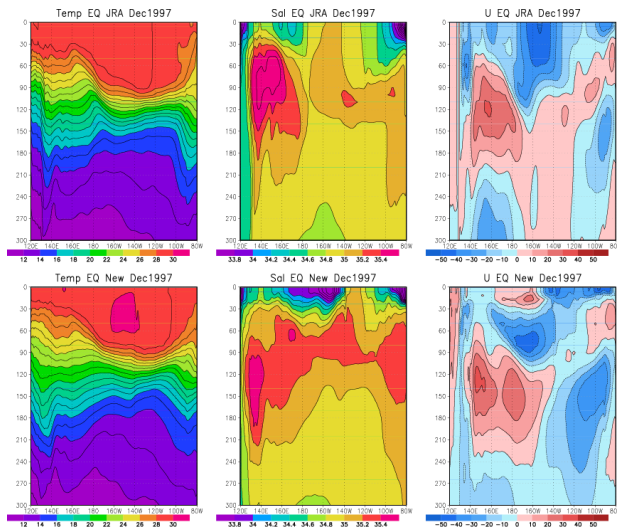


図1：1997年12月エルニーニョ最盛期における太平洋赤道東断(120°E-80°W, 0-300m)の水温(左、℃)、塩分(中)、東西流速(右、cm/s)。上段：旧モデル。下段：新モデル。

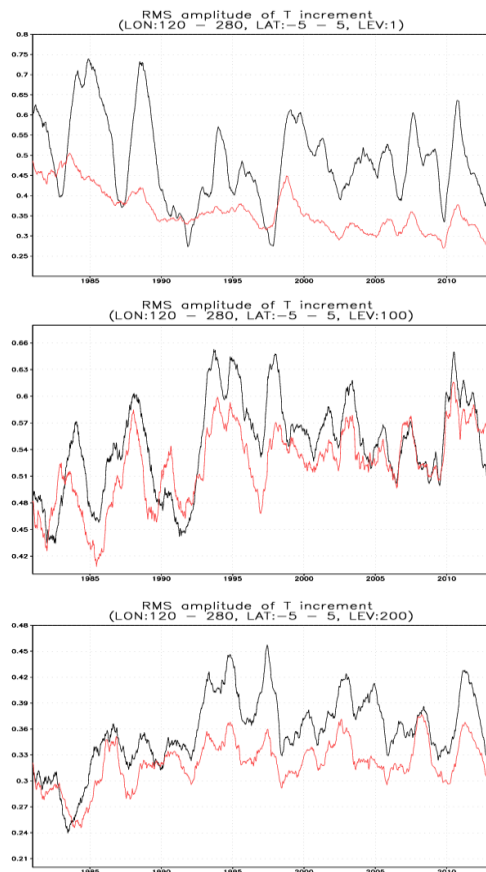


図2：太平洋赤道域(5°S-5°N, 120°E-80°W)で平均した水深1m(上段)、100m(中段)、200m(下段)水温(℃)の解析インクリメントの時間変化。

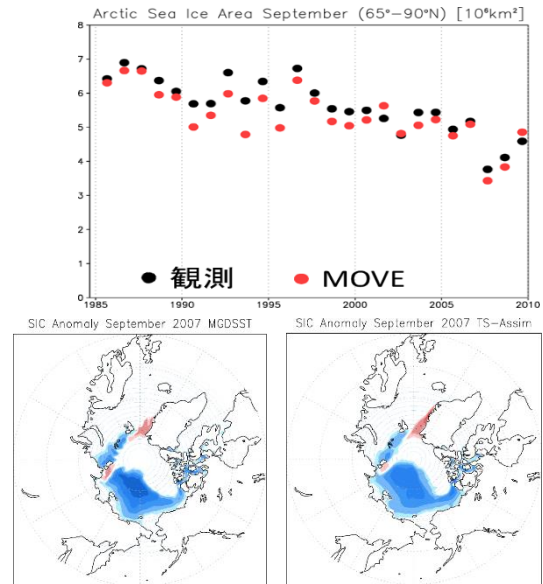


図3：(上段)北極海の9月の海氷域面積(10⁶km²)の経年変動。黒：MGDSST(観測)。赤：新システム。(下段)2007年9月の海氷密度偏差の分布。左：新システム。右：MGDSST。

図から1981年から2012年のほぼすべての期間について1m、100m、200mでインクリメントが新システムで旧システムに比べて減少しており、水温の精度が全体的に改善していることが示唆される。

新システムにおける北極海の海氷の再現性については、図3に示す。9月の海氷域面積の経年変動を見ると、新システムにより、変動が概ね表現できていることがわかる。また、海氷域面積が史上最低を記録した2007年9月の分布を見ると、太平洋側で海氷が例年より少なく、グリーンランドの東岸で海氷が多い海域があるなど、この月の分布の特徴がよく捉えられている。

3. 観測システム評価と海洋解析の相互比較

海洋データ同化システムにより、海洋内部の状態を再現するためには、海洋観測データを欠くことができず、それ故、季節予報システムにとっても、海洋観測データは必要不可欠である。一方、海洋観測データから、一般社会で役立つプロダクトを作成するには、海洋データ同化システムの利用が有効であり、そのため、海洋データ同化システムの精度に対する海洋観測データのインパクトは、その観測データの一般社会に対する貢献度の一つの指標となる。さて、社会が観測プラットフォ

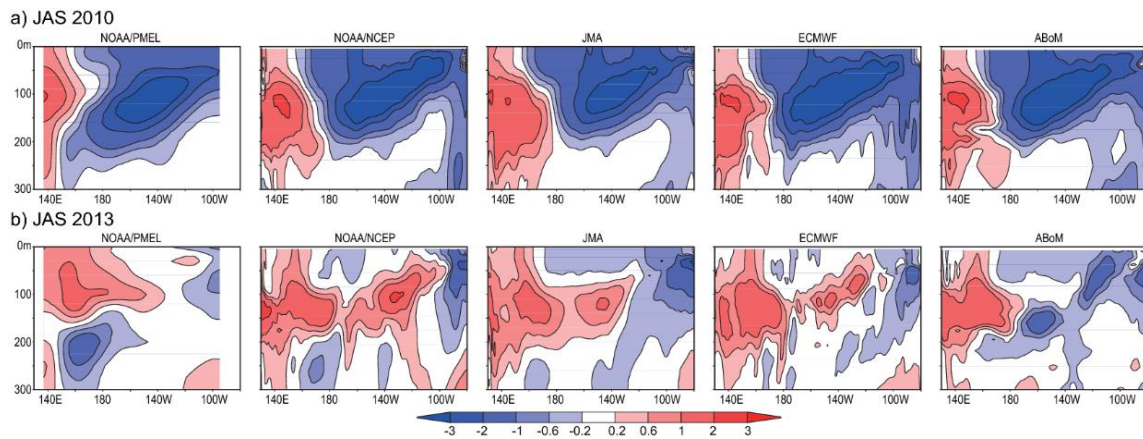


図4：世界各国の現業機関における太平洋赤道域鉛直断面(2°S-2°N 平均)の2010年と2013年の夏(7-9月)の平均水温偏差分布(単位:°C)。なお、NOAA/PMELは、TAO/TRITONアレイの観測データのみを用いた客観解析。その他は、海洋データ同化システムによる解析結果。

ームに資金を拠出するとき、ほとんどの場合は、それに見合った社会への貢献を期待しており、その貢献がはっきりしない場合、維持管理の予算を削減する方向への圧力を受けることになる。そのため、観測データの貢献を常に社会に対して明確に示す必要があり、データ同化システムに対する観測データのインパクト評価、すなわち、観測システム評価は、その有効な手段である。

さて、2012年以降、米国大気海洋庁(NOAA)の予算不足等により、TAOアレイによる観測データ量が著しく減少するという事態が発生した。図4にその影響を端的に示す。観測データの減少が始まる以前の2010年の夏(7-9月)の太平洋赤道域鉛直断面上の水温偏差分布については、世界各国のどの現業機関のものを見ても、概ね一致している。しかしながら、観測データの減少が始まった2012年の夏についてみると、各国の現業機関の間で、分布のばらつきがおおきくなっていることがわかり、観測データの減少の効果が明らかに示されている。

この事態を受けて、2014年には、TPOS2020ワークショップが開かれ、気象研究所でも、季節予報システムにおけるTAO/TRITONアレイとアルゴフロートのインパクトに関して、観測システム実験を通して評価を行った。その結果については、他の機関による観測システム評価と併せて、ワークショップの白書としてまとめられている(Fujii et al. 2014)。なお、TAOアレイの観測データの減少は、2014年秋頃に概ね解消しているが、これは

NOAAが一時的に予算を手当てしたためであり、また、JAMSTECもTRITONブイの削減を始めている。今後、太平洋熱帯域で安定的に観測プラットフォームを維持していくためには、効率的な観測システムへの改変や継続的な観測システム評価が必要である。

また、上記ワークショップの中で、今後、ルーチン的に観測データのインパクトをモニターすることの必要性について議論され、その結果、気象庁、米国環境予測センター(NCEP)、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)間で、太平洋熱帯域の水温場について、リアルタイムの相互比較を行うプロジェクトを立ち上げることが合意され、現在その他のいくつかの機関を加えて、その結果をウェブページで公開している(http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS/multiora_body.html)。

図5に一例を示す。図5は、太平洋赤道域における2013年10月から2014年10月にかけての水温20°C水深(温度躍層の深さの指標)のホフメラー図である。2014年の1月から2月にかけては、太平洋赤道域の西部で強い西風バーストが発生し、温度躍層も深くなり、その影響はケルビン波として5月には東部へと伝わっている。この頃、各現業機関では、大きなエルニーニョ現象が発生するのではないかと予測していたが、3月以降、西太平洋では、温度躍層の深さが負偏差に転じ、そのシグナルが6月頃までに東部に伝わることによって、上記の予測とは異なった時間経過を示した。しかし、7

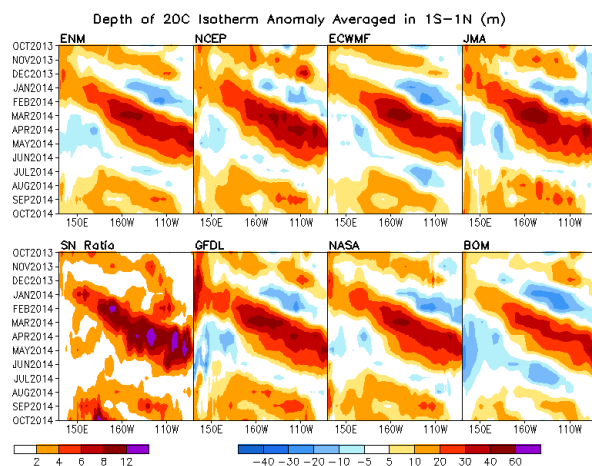


図5：各国機関のデータ同化赤道域(1°S–1°N)の水温20℃水深(m)のホフメラー図。なお、ENMはアンサンブル平均、SN Ratioは、シグナル/ノイズ比である。リアルタイム相互比較のウェブページ（本文参照）より。

月以降、再び太平洋赤道域全体で温度躍層が深い傾向となり、弱いエルニーニョ現象の発生に近い状態になりつつある。このような傾向は、概ねどの機関の結果でも表現されていて、アンサンブル平均にもよく表れている。また、シグナル/ノイズ比を見ると、2月から5月にかけて伝播する正偏差や7月以降の正偏差については各期間の計算結果が良く一致しているが、3月から7月にかけて伝播する負偏差については、ばらつきがあることがわかる。この相互比較プロジェクトでは、このような図をルーチ的にモニターすることにより、観測データ数の変動による影響などを監視するとともに、データ同化システム間の系統誤差や特性の違いなどの解析にも利用される予定である。

4. 今後の展望

海洋データ同化システムの今後の展望としては、まず、新しい種類の観測データの同化が期待される。特に海面塩分については、2011年8月に打ち上げられた Aquarius 衛星などにより観測が行われていて、全球海洋データ同化システムで同化した場合のインパクトなどについても研究が始まっている。今後、面的な観測が可能となる海面高度計衛星の打ち上げも計画されていて、より高解像度の海面高度計データの同化による高精度化が期待されている。その他、海氷密接度データ

の同化についても多くの研究が進行中であり、今後の海水変動の再現性の向上が期待される。

また、大気海洋結合モデルに、直接、大気と海洋の観測データを同化する結合同化システムの開発も多くの研究機関で進行している。大気と海洋の初期値を、大気同化システム、及び、海洋同化システムで別個に作成して結合モデルで予測する手法は、結合ショックによる予測精度の低下が懸念される。しかしながら、結合モデルに大気と海洋両方の観測データを同時に同化し、大気海洋間のバランスがとれた初期値から結合モデルによる予報を開始することにより、上記のような問題が解消し、予報精度が向上することが期待される。

参考文献

- Fujii, Y., Kamachi, M., Matsumoto, S., and Ishizaki, S., 2012: Barrier layer and relevant variability of the salinity field in the equatorial Pacific estimated in an ocean reanalysis experiment. *Pure Appl Geophys* **169**, 579–594.
- Fujii, Y., 他計15名, 2014: White Paper #5 – Evaluation of the Tropical Pacific Observing System from the data assimilation perspective. Report of the Tropical Pacific Observing System 2020 Workshop (TPOS2020). Volume II –White Papers. *GCOS Rep.* **184/ GOOS Rep.** **206/ WCRP Rep.** **6/2014**, 102–129.
- Kuragano, T., Fujii, Y., Toyoda, T., Usui, N., Ogawa, K., and Kamachi, M., 2014: Seasonal barotropic sea surface height fluctuation in relation to regional ocean mass variation. *J. Oceanogr.*, **70**, 45–62.
- Lorenc, A. C., and Rawlins, F., 2005: Why does 4D-Var beat 3D-Var? *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 3247–3257.
- McPhaden, M. J., 1999: Genesis and evolution of the 1997–98 El Niño. *Science*, **283**, 950–954.
- Toyoda, T., 他計8名, 2009: A possible role for unstable coupled waves affected by resonance between Kelvin waves and seasonal warming in the development of the strong 1997–1998 El Niño. *Deep-Sea Res.*, **156**, 495–512,