

全球結合予測のための海洋データ同化システムの開発

藤井陽介・石川一郎・豊田隆寛・浦川昇吾（気象研）
杉本裕之（気象庁）

1. はじめに

大気海洋結合モデルによる現業的なエルニーニョ予測は、1995年に米国環境予測センター（NCEP）で開始され（Ji et al., 1995）、2000年以降には、結合モデルの予測結果を直接用いる季節予報が多くの現業機関で実施されるようになった。それに伴い、結合モデルの海洋部分を初期値化するため、全球（もしくは準全球）海洋データ同化システムが現業機関で広く利用されている。さらに、2018年には、カナダ気象環境予測センター（CCMEP）やヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）において、決定論的数値天気予報システムへの結合モデルの利用が始まり（Smith et al., 2018; Buizza et al., 2018）、海洋データ同化システムの重要度がますます大きくなっている。

気象庁でも、1999年にエルニーニョ予測を開始して以来、全球海洋データ同化システムの利用、及び、改良を継続的に行っている。現在現業運用されている全球海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM-G2（以後 G2）は、NCEP が主導しているリアルタイム海洋再解析相互比較においても、太平洋熱帯域の表層水温場が、他の現業機関のシステムと比べて、マルチシステムアンサンブル平均に近いなど、その性能が高く評価されている（Xue et al., 2017）。また気象庁では、現在、次期システムとして、G2 で用いる 3 次元変分法（3DVAR）に代えて、4 次元変分法

（4DVAR）を用いた全球海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM-G3（以後 G3）の開発を行っている。本稿では、G3 の概要及び、性能評価のための再解析実験の結果について紹介する。

2. G3 の仕様

G3 は水平解像度（経度方向×緯度方向）が $1^{\circ} \times 0.3\text{-}0.5^{\circ}$ の解析モデル G3A と $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ の予報モデル G3F から構成される。G3A では、4DVAR による水温・塩分場の最適化と同時に、海氷密度(SIC)データの同化も行っている。4DVAR スキームは G2 で用いられていた水温・塩分鉛直 EOF モードを利用した 3DVAR（Fujii et al., 2003; 2005）を拡張したものであり、北西太平洋長期再解析データセット FORA-WNP30（<http://synthesis.jamstec.go.jp/FORA/>）でも利用されている（Usui et al., 2017）。G3A は 10 日の解析サイクルを持ち、後半 5 日間の観測データを用いて、前半 5 日間の水温・塩分場に対して与えるインクリメントを最適化している。計算効率を上げると同時に、4DVAR がうまく働かない場合でも 3DVAR の結果を得られるようにするため、まず初めに 3DVAR による最適値を求めた後、それを初期推定値として 4DVAR を実行する。同化するデータは、アルゴフロートや船舶などによる水温・塩分観測プロファイルと気象庁海面水温解析データ MGDSST、衛星海面高度計の軌道直下データである。また、SIC については、上記と

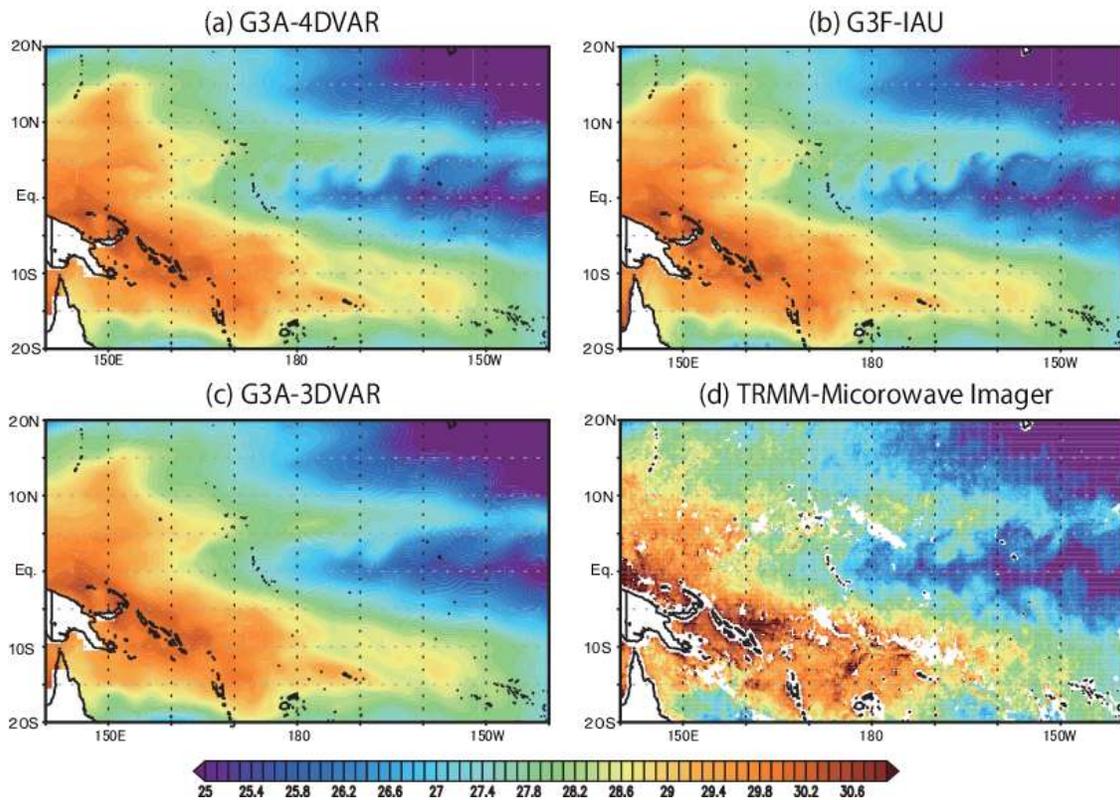


図 1 : 熱帯太平洋西部・中央部における 2012 年 1 月 1 日の (a) G3A-4DVAR, (b) G3F-IAU, (c) G3A-3DVAR の SST 解析値、及び、(d) TRMM マイクロ波イメージャーによる SST 観測値のスナップショットの比較。

は別に、MGDSST とセットになっている SIC データを 3DVAR により同化している (Toyoda et al., 2016)。

G3F では、5 日サイクルの Incremental Analysis Updates (IAU) を用いて予報の初期値を作成する。まず 5 日間の予報を行い、その水温・塩分場の 5 日平均値を G3A の 5 日平均解析値から差し引き、それを時間ステップの数で割ったものをインクリメントとし、もう一度同じ期間の予報計算を行う際に毎ステップ水温、塩分場に足し込む。また海氷については、G3A と同様に 3 次元変分法で解析し、IAU によりモデル場を修正する。G3F の海洋モデルは、次期季節予報システム用大気海洋結合モデルで用いている海洋モデルと同一になっており、その

同化結果がそのまま予報のための結合モデルの初期値として用いられる。

3. 再解析実験と検証

G3 の性能評価のための再解析実験を、2010 年から 2015 年の期間について実施した。ここでは、4DVAR、及び、海氷 3DVAR を用いて水温・塩分・SIC データを G3A に同化した解析場を G3A-4DVAR とし、IAU で G3A の解析場を与えることにより作成した G3F の解析場を G3F-IAU とする。また、比較のため、同化手法を 3DVAR に変更したこと以外は G3A-4DVAR と同等の再解析実験 G3A-3DVAR も併せて実施した。

図 1 に、上記の再解析で掲載された熱帯

太平洋西部・中央部における 2012 年 1 月 1 日の海面水温 (SST) 分布のスナップショットを、TRMM 衛星のマイクロ波イメージャーで観測された分布と併せて示す。

TRMM のデータを見ると、赤道上を冷水が東から西へ波打つように伸びている様子がわかる。この様子は G3A-3DVAR では明瞭には再現されない。これは、3DVAR ではモデルの力学を用いずに単に空間相関を用いた内挿を行うので、一般にスムージングの効果が働くためである。最適内挿法にも同様の性質があり、それを用いた MGDSST でもこの波ははっきりとは再現されない

(図は省略)。一方、4DVAR では数値モデルに基づく力学内挿を行うため、力学に従う波動パターンが G3A-4DVAR では比較的良く再現されている。さらに、G3F-IAU では、G3A-4DVAR の情報をより高解像度のモデルに反映させることにより、例えば TRMM で見られる 150-160°W の冷水の北側のストリーマが、良く再現されていることがわかる。このように、4DVAR とより高解像度のモデルの採用により、G3 では従来のシステムに比べて、SST の詳細な分布の再現性が向上している。

次に、海水データ同化の効果を確認する

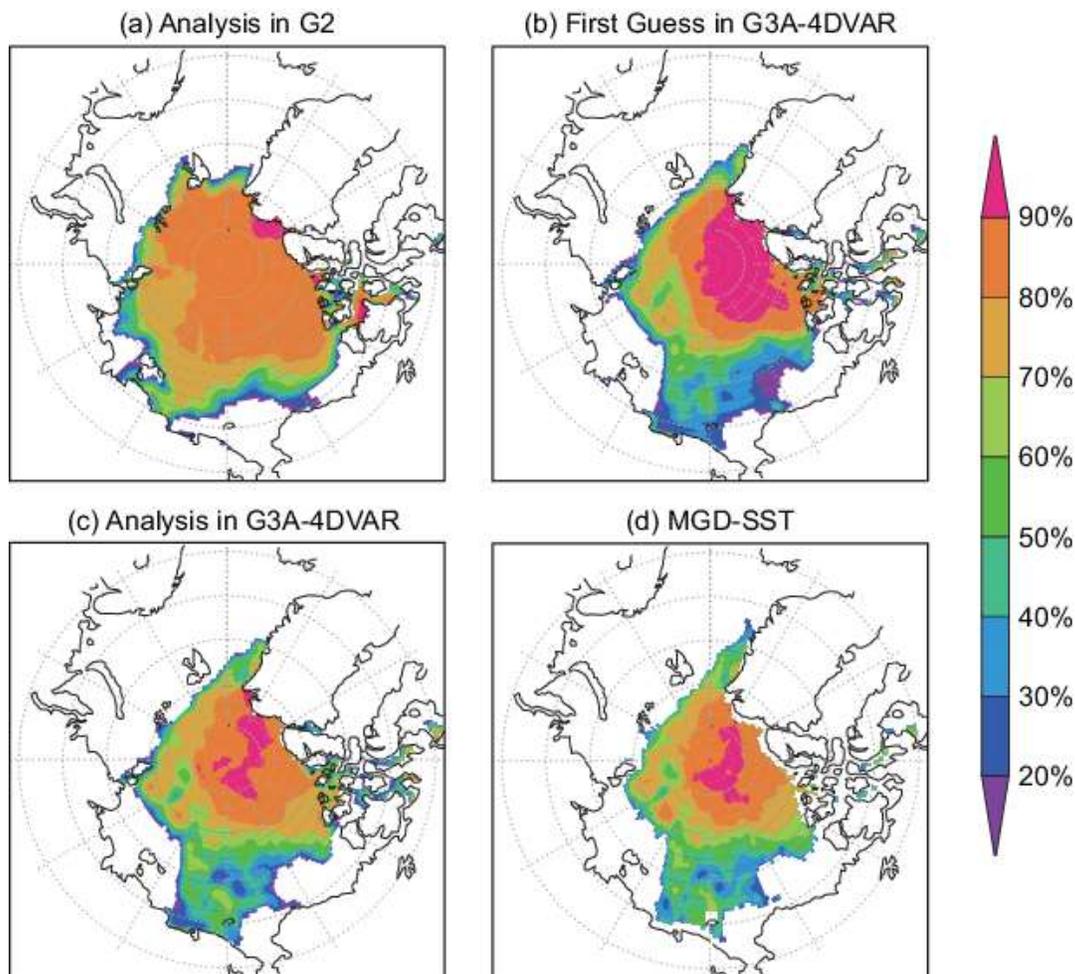


図 2 : 2012 年 7 月 30 日からの 5 日間平均の北極海周辺の SIC の分布。(a) 現業版 G2 の解析場、(b) G3A-4DVAR の初期推定場、(c) G3A-4DVAR の解析場、(d) MGD-SST の SIC 分布。

ため、2012年7月30日からの5日間の北極海周辺のSICの分布を図2に示す。まず、現行のG2ではSICデータを同化していないため、MGDSSTのSIC分布とは大きく違っている。しかし、G3A-4DVARでは、SICデータを同化した効果により、初期推定場（前同化サイクルからのモデル予報値）については、例えばロシア側への海水の張り出し方がMGD-SSTにかなり近づいており、解析場では、90%以上の海域などが、さらに修正されていることがわかる。このように、G3A-4DVARではSICの分布についても海水データ同化の導入により、現行のバージョンに比べ、より現実的に再現されるようになった。

4. おわりに

前節で述べたように、G3では現行のG2に比べて、水温・塩分や海水密度の分布の再現性向上が確認されている。今後は現業化に向けて、大気海洋結合モデルのシミュレーションを行いながらIAUを用いてG3Aの解析場を結合モデルの海洋場に反映させる、簡易的な結合データ同化手法の導入や、結合モデルによるアンサンブルデータ作成手法の開発などにより、システムのさらなる高度化を図っていく予定である。

参考文献

- Buizza, R., G. Balsamo, and T. Haiden (2018). IFS Upgrade brings more seamless coupled forecasts. *ECMWF Newsletter*, **156**, 18-22.
- Fujii, Y., and M. Kamachi (2003). Three-dimensional analysis of temperature and salinity in the equatorial Pacific using a variational method with vertical coupled temperature-salinity empirical orthogonal function modes. *J. Geophys. Res.*, **108**(C9), 3297.
- Fujii, Y., S. Ishizaki, and M. Kamachi (2005). Application of nonlinear constraints in a three-dimensional variational ocean analysis. *J. Oceanogr.*, **61**, 655-662.
- Ji, M., A. Leetmaa, and J. Derber (1995). An ocean analysis system for seasonal and interannual climate studies. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 460-480.
- Smith, G.C., J.M., Bélanger, and coauthors (2018). Impact of Coupling with an Ice-Ocean Model on Global Medium-Range NWP Forecast Skill. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1157-1180.
- Toyoda T., Y. Fujii, and coauthors (2016). Data assimilation of sea ice concentration into a global ocean-sea ice model with corrections for atmospheric forcing and ocean temperature fields. *J. Oceanogr.*, **72**, 235-262.
- Usui, N., T. Wakamatsu, and coauthors (2017). Four-dimensional variational ocean reanalysis: a 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). *J. Oceanogr.*, **73**, 205-233.
- Xue, Y., C. Wen, and coauthors (2017). A Real-time Ocean Reanalyses Inter-comparison Project in the Context of Tropical Pacific Observing System and ENSO Monitoring. *Clim. Dyn.*, **49**, 3647-3672.