

# 海洋観測データを融合した確率論的な数理季節予測システムの開発

課題責任者

Swadhin Behera 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

著者

土井 威志<sup>\*1</sup>, Swadhin Behera<sup>\*1</sup>, 山形 俊男<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

数ヶ月から数年スケールで発生する気候変動の理解ならびにその予測可能性研究のため、SINTEX-F 大気海洋結合大循環モデルを日欧研究協力に基づき開発および改良してきた。1 週間程度の未来の気象を予測する天気予報と違って、季節予測においては、大きな熱容量を持つ海洋の存在が重要になる。海洋現象と大気現象が結合したエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象は世界各地に異常気象や極端現象を引き起こす気候変動現象であり、その発生予測に関して SINTEX-F1 季節予測システムは世界最先端の精度を誇っている。そのリアルタイムの季節・経年変動予測実験の計算やその社会応用研究は別課題”リアルタイム-APL モデルアンサンブル季節予測とその応用可能性について”で行い、本課題では更なる気候予測可能性研究と、高度化（高解像度化や海水モデル導入など）させた第二版 SINTEX-F2 システムの開発を中心に実施した。

本年度は従来の海表面水温ナッジング法に加えて、海洋 3 次元の水温・塩分の観測データを初期値にとりこむ新しい初期化スキーム（3DVAR）を搭載した SINTEX-F2 季節予測システムで 1982-2015 年の過去再予測実験を実施した。熱帯インド洋や熱帯大西洋の季節予測精度が、新しい初期化スキームでは飛躍的に改善されていることを確認した。

キーワード：季節予測, 海表面水温ナッジング法, 3DVAR 海洋同化法

## 1. 課題概要

“自然災害をもたらす現象の高精度な事前予測の実現”（第 3 期中期計画前文）は海洋研究開発機構に要請される重要な課題である。世界の至るところで発生する季節の異常を数ヶ月前から予測するため、我々は気候海洋結合モデル SINTEX-F1 をベースとした数理的な季節予測システムを構築し、世界最先端の成果をあげてきた。更に中緯度気候変動現象や沿岸ニョ現象等の発生を予測するため、高解像度化および海水モデルを導入した SINTEX-F2 モデルによる季節予測システムのプロトタイプを構築し、亜熱帯域の予測精度の向上に成功した (Doi et al. 2016[1])。

季節予測の精度を向上させるには、上述した結合モデルの高度化が重要であるが、それと同程度に重要なのが海洋観測データを予測の初期値に取り込む同化手法の高度化である。現在の SINTEX-F1 および F2 予測システムの初期化スキームには海表面水温（SST）ナッジング法を採用している。これは、観測から得られた SST を結合モデルに馴染ませながら積分することで、大気モデルと海洋モデル間を矛盾なく初期化する手法である。非常にシンプルな初期化法ではあるが、エルニーニョ予測では国際社会から高く評価された。しかし、熱帯インド洋や熱帯大西洋、更には中緯度域での海洋内部の初期化には充分ではない。特に熱帯インド洋で発生するダイポールモード現象は、初夏から晩秋の季節予測にとって極めて重要な現象であり、予測精度の向上が望まれている。SINTEX-F2 システムでは、F1 システムと同様の予測精度を有するが、海洋内部を適切に初期化することで、予測

精度がさらに向上すると期待される。

さらにそれらの予測実験を新たなアンサンブルメンバーとして既存のシステムに統合し、予測システムを多アンサンブル化することで確率論的な気候予測システムを開発する。このシステムでは、極端現象の発生確率予測情報を創出できるため、予測情報の社会応用面でも革新的な成果が期待できる。これらは、“極端な気象現象や異常気象等を生み出す要因となる”季節スケールの”気候変動予測情報”を”段階的に創出・応用し、海洋・地球情報を学際的に展開する”（第 3 期中期計画 1-(2)-3）ことに直接的に寄与する。

本年度は、特にインド洋ダイポールモード現象の予測精度向上に挑戦した。以下、その成果をまとめる。

## 2. 3DVAR 補正を導入した新初期化スキームの開発

イタリア気候変化地中海研究センター（CMCC）の Storto 博士の協力のもと、3DVAR 補正を導入した新初期化スキームを開発し、そのオペレーション化に成功した。従来の SST ナッジング法では、1982 年から現在まで連続的に観測 SST をナッジングしていた。新スキームでも同様に観測 SST をナッジングするものの、1982 年 2 月から毎月 1 日に、UK Met Office から配信されている EN4 profile と呼ばれる海洋 3 次元の水温・塩分の観測プロファイルデータ（ARGO, 係留ブイ、船舶観測などのデータで格子化していないデータ）を使って、海洋モデルを 3DVAR 補正しながら、SST ナッジングを行う。

過去最も強い正のインド洋ダイポールモード現象が 1997 年夏から秋にかけて発生したが、そのプレコンディ

シオンに当たる 1997 年 5 月のインド洋水温プロファイルについて、上記の新・旧スキームの結果を比べた (図 1)。赤道に沿った水温の鉛直断面図の気候値を比べると、旧スキームでは温度躍層以深が現実に比べて冷たいエラーがあるが、新スキームでは修正されている。偏差場を見ても、新スキームは旧スキームに比べて現実に近い。1997 年時点では海洋垂表層の観測データはそれ程多くはないが、3DVAR 補正が効果的に働いていることを確認した。

次に、赤道に沿った 20°C 等温深偏差の時間経度図 (図 2) を比べてみると、熱帯太平洋東部、熱帯インド洋、熱帯

大西洋で、3DVAR 補正を導入したスキームの方が SST ナッジのみのスキームより再現性が高いことがわかった。

次に、北半球の秋に発生するインド洋ダイポールモード現象や冬に成熟するエルニーニョ現象のプレコンディションとして重要な 5 月における 20°C 等温深偏差の再現スキルを比較した (図 3)。SST ナッジ法でも熱帯太平洋は概ねよく初期化できている。3DVAR 補正を導入することで、亜熱帯域や熱帯インド洋、熱帯大西洋の初期化性能が向上した。従って、それらの海盆で発生する気候変動現象の予測精度が大幅に向上することが期待される。

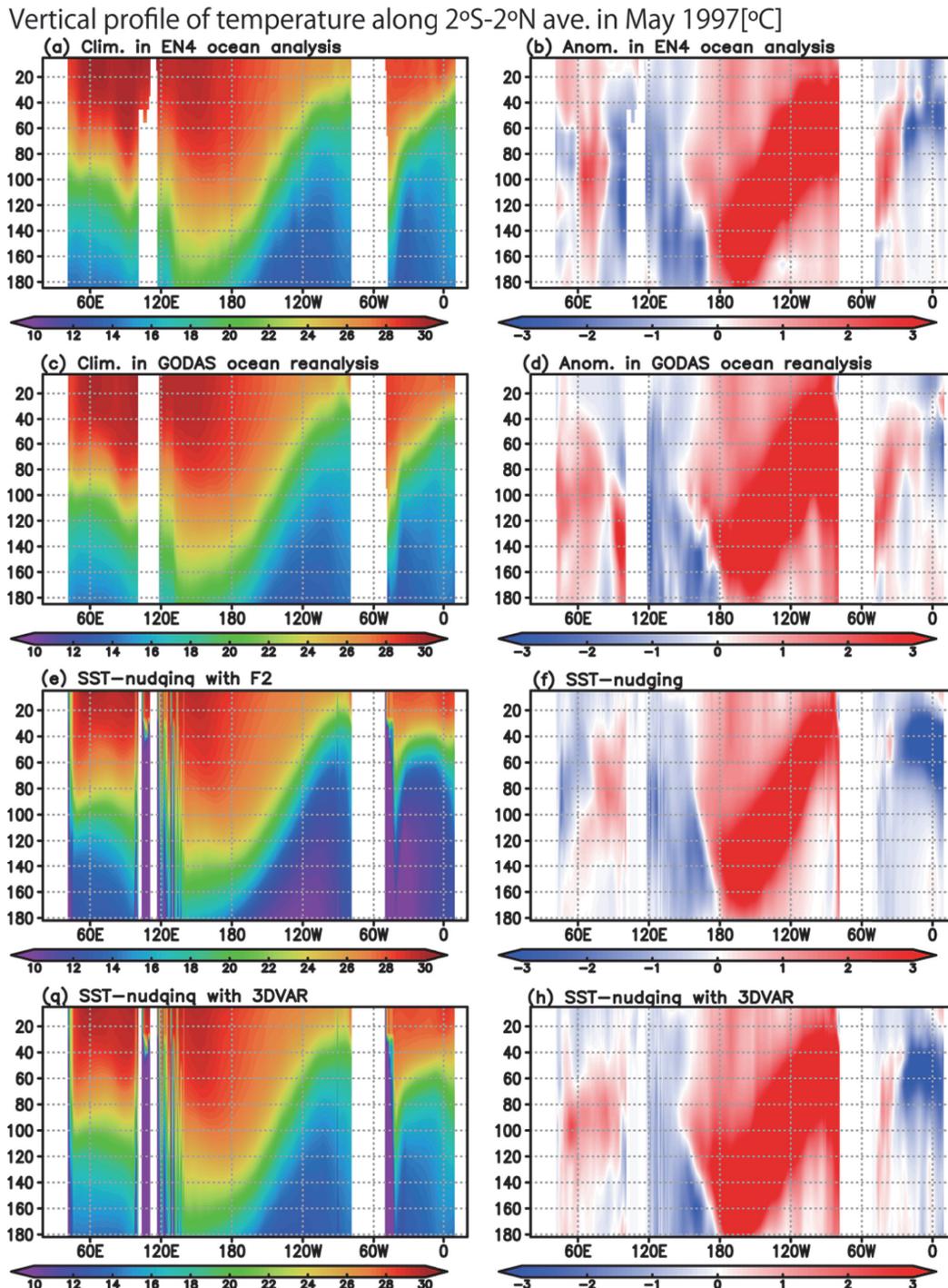


図 1 1997 年 5 月の月平均水温の赤道に沿った鉛直断面図 (南北 2 度で平均) [°C]。左が 5 月の気候値、右が 1997 年 5 月の偏差。(a) : 観測 (EN4 analysis data), (b) : 海洋再解析データ (NCEP/GODAS ocean reanalysis data), (c): SINTEX-F2 モデルによる SST-nudging 計算 (旧初期化スキーム), (d):SINTEX-F2 による 3DVAR 補正を導入した新初期化スキームの計算結果。

D20A [m] along 2°S-2°N ave.

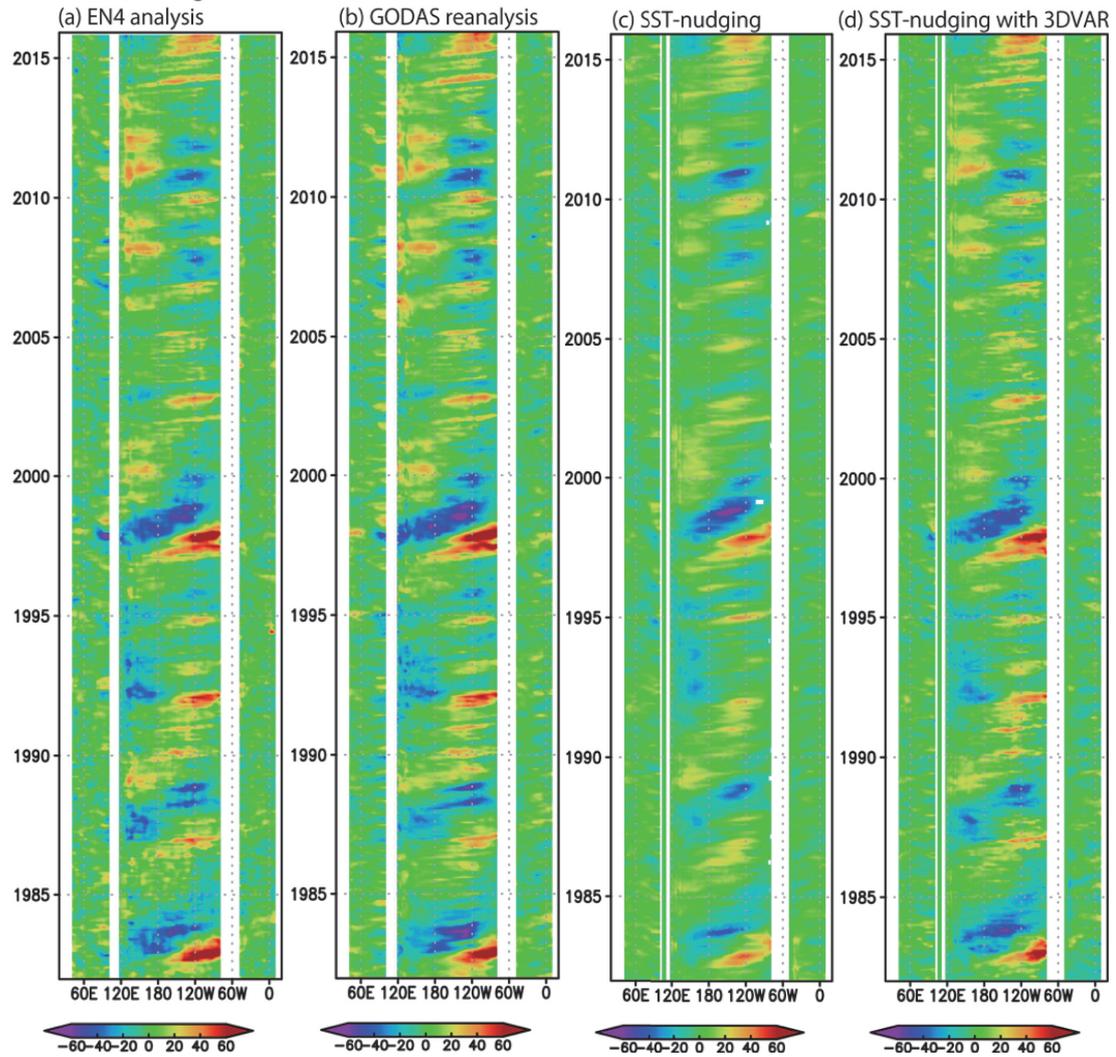


図2 赤道に沿った(南北2度で平均)20°C等温深偏差の時間経度図[m]。(a):EN4 analysis data, (b): GODAS reanalysis data, (c): SINTEX-F2 モデルによる SST-nudging 計算, (d):3DVAR 補正を導入した計算結果。

ACC for D20A in May in 1983-2015

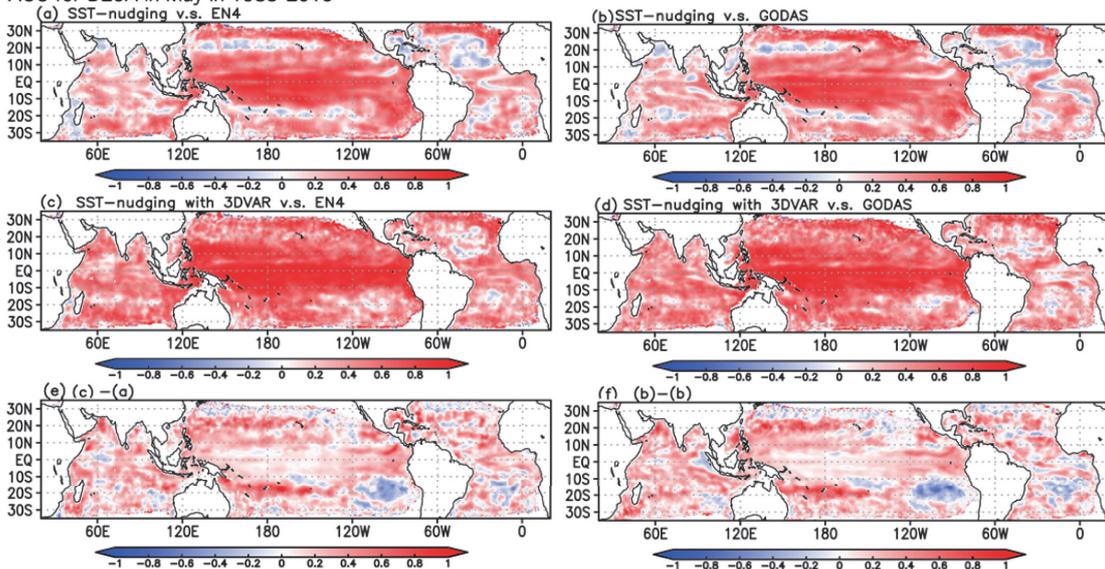


図3 (a) 20°C等温深偏差[m]のEN4 analysis dataとSINTEX-F2モデルによるSST-nudging計算の相関係数。(c) EN4 analysis dataと3DVAR補正を導入した計算の相関係数。(e) (c)から(a)を引いた差。(b, d, f) EN4 analysis dataの代わりに、GODAS reanalysis dataを使用。

### 3. 新初期化スキームによる季節予測精度の向上

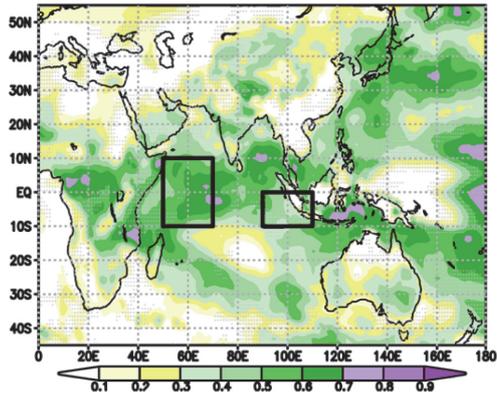
1983-2015年で過去再予測実験を実施したところ、海洋垂表層観測データを初期値に取り込むことで、インド洋ダイポールモード現象の約5ヶ月前の予測精度が30%程度向上した(図4)。

また、過去最も強い正のインド洋ダイポールモード現象が発生した1997年に注目しても、新しい初期化スキ-

ームを使ったSINTEX-F2の予測が、SST-nudging法を使ったSINTEX-F1, SINTEX-F2の予測より最も精度が高い(図5)。

これらの成果は従来予測が潜在的に難しいとされていたインド洋ダイポールモード現象が、海洋観測の充実によって、飛躍的に予測しやすくなることを示したもので、今後のインド洋観測網の発展に資することが期待される。これらの結果は(Doi et al. 2017[2])としてJ. Climateに投稿中である。

ACC for SON from Jun. 1 ini. (2mAirTemp)  
(a) F2



(b) F2\_3DVAR

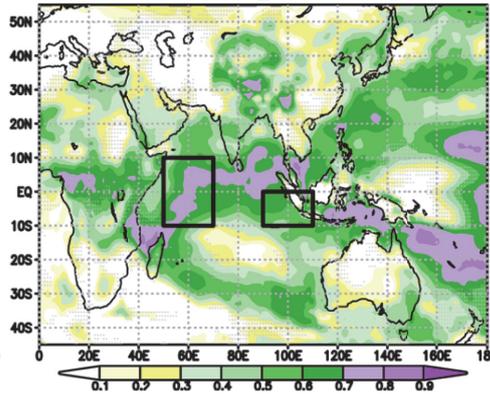


図4 (a) 9-11月平均の地上2m気温偏差を6月1日から予測した場合の偏差相関係数。1に近い程度予測精度が高い。解析期間は1983-2015年。黒ボックスはインド洋ダイポールモード指標「DMI」の領域。(a) 初期値にSST-nudging法を用いたSINTEX-F2の結果。(b) 3DVAR補正を導入した新しい初期化スキームを使ったSINTEX-F2の結果。

Indian Ocean Dipole in 1997  
Anomalous SST(shaded), D20(contour) and UV10m(vector)

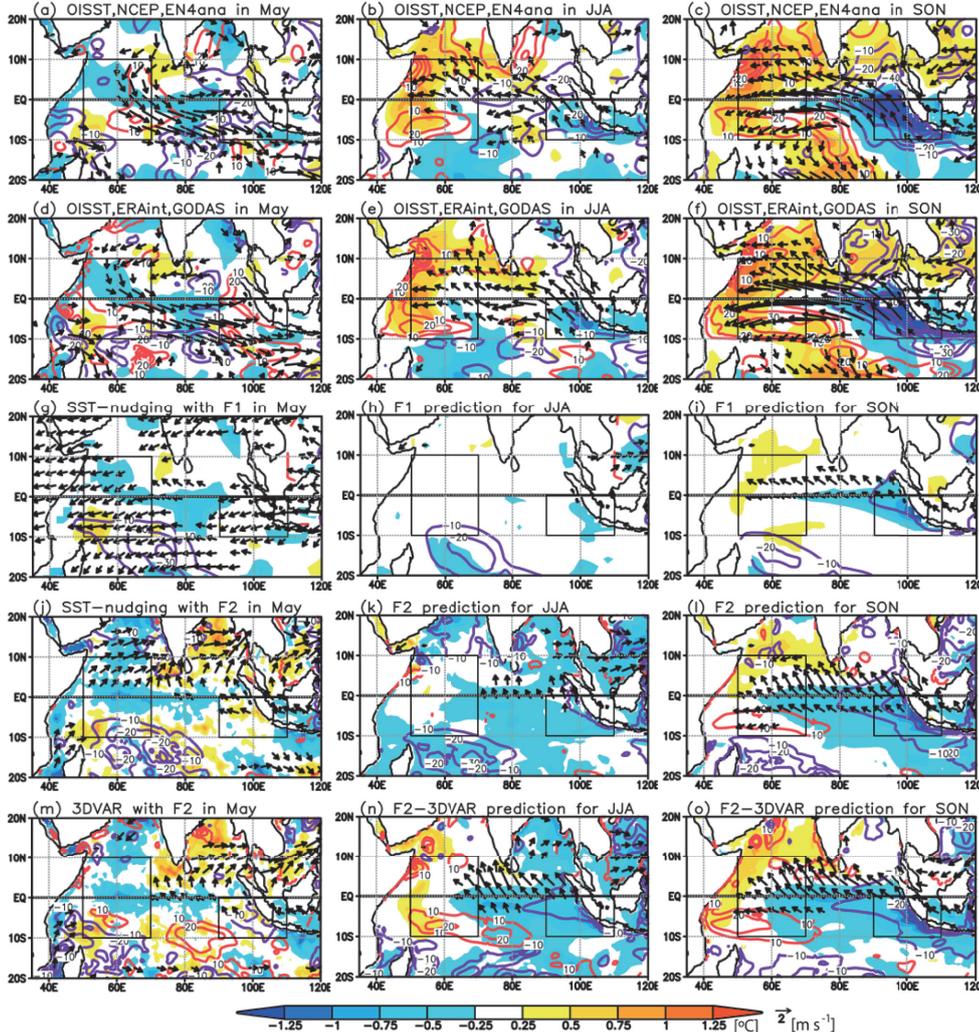


図5 (a) 1997年5月の海表面水温偏差(°C, 色影)、20°C等温線深度偏差(m, コンター)、10m風速偏差(m/s, 矢印) 観測データおよび再解析データを使用(OISSTv2, EN4 gridded analysis, NCEP/NCAR reanalysis)。(b, c) (a)と同様だが、1997年6-8月平均と9-11月平均について。(d, e, f) (a, b, c)と同様だが、20°C等温線深度偏差(m, コンター)と10m風速偏差(m/s, 矢印)に、NCEP GODAS ocean reanalysisとERA int再解析データを使用。(g) SINTEX-F1のSST-nudging runの結果で、1997年5月の海表面水温偏差(°C, 色影)、20°C等温線深度偏差(m, コンター)、10m風速偏差(m/s, 矢印)。(h, i) (b, c)と同様だが、SINTEX-F1で1997年6月1日から予測した結果。(j, k, l) (g, h, i)と同様だが、SINTEX-F2の旧初期化スキームを使用した結果。(m, n, o) (g, h, i)と同様だが、SINTEX-F2の新初期化スキームを使用した結果。

## 謝辞

3DVAR 初期化スキームはイタリア CMCC の Andrea Storto 博士と共同で開発した。SINTEX-F 予測システムのプロトタイプ開発に Jing-Jia Luo 博士, Sebastian Masson 博士, 佐々木亘博士, および欧州の共同研究者 (INGV/CMCC, L' OCEAN, and MPI のモデリングチーム) に多大なる貢献をして頂いた。本研究は環境研究総合推進費 (2-1405:" 最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測とその社会応用 ") や、AMED-JICA が推進する SATREPS 感染症課題 [南部アフリカにおける気候予測モデルをもとにした感染症流行の早期警戒システムの構築] の補助を受けている。

## 文献

- [1] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2016: Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, DOI: 10.1002/2016MS000744.
- [2] Doi, T., A. Storto, S. K. Behera, A. Navarra, and T. Yamagata, 2017: Improved prediction of the Indian Ocean Dipole Mode by use of subsurface ocean observations. *J. Climate*, in press. (<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-16-0915.1>)

# Development of a Probabilistic Numerical Seasonal Prediction System with Ocean Observation

Project Representative

Swadhin Behera Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Takeshi Doi<sup>\*1</sup>, Swadhin K. Behera<sup>\*1</sup> and Toshio Yamagata<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The numerical seasonal prediction system using the SINTEX-F ocean-atmosphere coupled model has so far demonstrated a good performance for prediction of the Indian Ocean Dipole Mode (IOD) despite that the system adopts a relatively simple initialization scheme based on nudging only the sea surface temperature (SST). However, it is to be expected that the system is not sufficient to capture in detail the subsurface oceanic precondition. Therefore, we have introduced a new three-dimensional variational ocean data assimilation (3DVAR) method that takes three-dimensional observed ocean temperature and salinity into account. Since the new system has successfully improved IOD predictions, the present study is showing that the ocean observational efforts in the tropical Indian Ocean are decisive for improvement of the IOD predictions and may have a large impact on to important socio-economic activities, particularly in the Indian Ocean rim countries.

**Keywords:** Seasonal Prediction, SST-nudging, 3DVAR

## 1. A new initialization scheme with 3DVAR correction

The SINTEX-F1/F2 system adopted a relatively simple SST-nudging scheme for the initialization (Luo et al. 2005; Doi et al. 2016[1, 2]). In the new scheme, OGCM SSTs are strongly nudged toward the observations in the coupled run continuously from January 1982, which is similar to the simple SST-nudging scheme used in the F2-system. In addition, 3DVAR correction is conducted every 1st day of each month using the Met Office Hadley Centre EN4 profile data of subsurface ocean temperature and salinity observation. The set of *in situ* observations consists of all types of ocean profiling instruments that provide temperature and salinity (when available) from the expandable bathythermographs (XBTs), mooring buoys, sea stations, Argo floats, etc. A fully non-linear observation operator is used only once to compute the initial departures by employing the background fields closer to the observation time (FGAT). In our formulation, only temperature and salinity are corrected after a 3DVAR/FGAT assimilation step; altimetry sea surface height observations are not assimilated. The assimilation time window is 10 days, using all types of ocean profiling instruments that provide temperature and (if available) salinity (e.g. ARGO floats, moored buoys, etc) included in the temporal range of  $\pm 5$  days before and after the assimilation time. We have implemented this new initialization scheme to each 6 ensemble members of the F2 system.

We have calculated anomaly correlation coefficients (ACCs) for the 20°C isothermal depth anomaly (D20A) for May of 1983-2015 using the EN4 analysis as the reference

(Fig. 1). The condition in May is known to be important for preconditioning most of IOD events. The skill is high over the tropical Pacific in both the schemes. Even so, compared to the simple SST-nudging scheme, the new scheme with 3DVAR correction performs better over the tropical Indian Ocean, the tropical Atlantic, and the subtropics. Such improvement in the subsurface ocean initialization is expected to improve the IOD prediction skill significantly.

Horizontal maps of ACC skill scores for predicting 2m air-temperature and rainfall in SON from the June 1<sup>st</sup> initialization are shown in Fig. 2. We find significant improvement in the prediction for 2m air-temperature in the SINTEX-F2 system as compared to that in SINTEX-F1 system over Central Africa, the western pole of the DMI, the Bay of Bengal, Japan, the Sea of Japan, the Kuroshio-Oyashio Extension region, and southeastern Australia. The SINTEX-F2-3DVAR system, compared to the SINTEX-F2 system, shows much improved prediction skill over Central Africa, the western and eastern poles of the DMI, the Bay of Bengal, and the Tibetan Plateau. This is due to the change of the ocean subsurface initialization from the simple SST-nudging to the 3DVAR correction. However, we do not find much difference among the three systems in the rainfall prediction. We need to improve atmospheric responses, particularly moist processes and teleconnection patterns related to IOD and ENSO.

A paper about those results is submitted to J. Climate (Doi et al. 2017[3]).

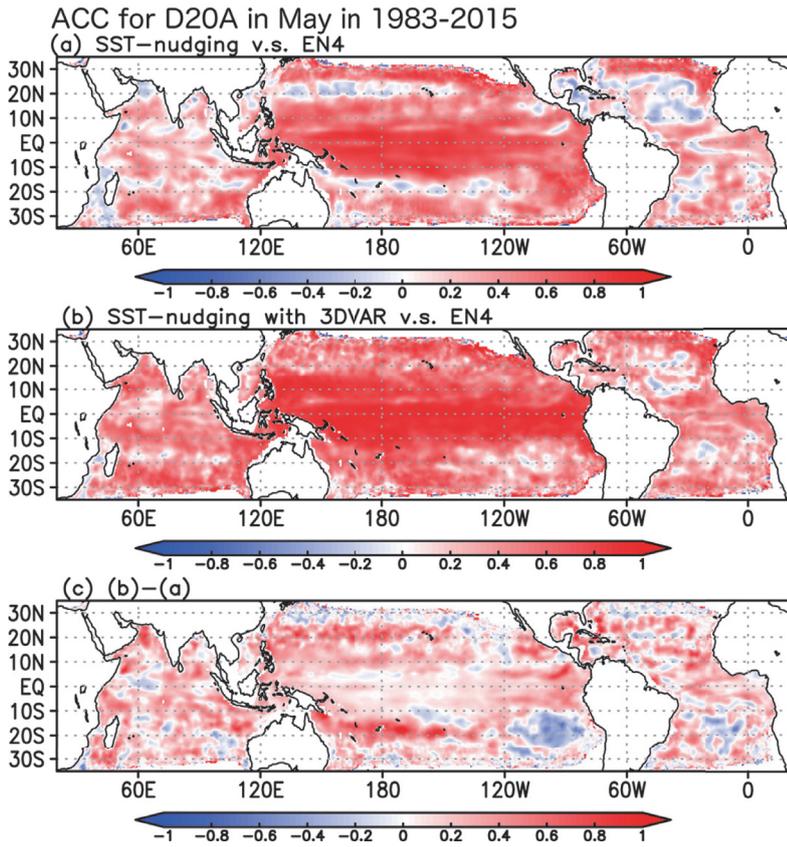


Fig. 1 (a) Horizontal map of anomaly correlation coefficients (ACCs) in D20A between the EN4 gridded objective analyses and the model outputs by the SST-nudging scheme (6 ensemble mean with the F2 system) for May of 1983-2015. (b) Same as (a), but for the model outputs by the new initialization scheme with 3DVAR correction (6 ensemble mean with the F2-3DVAR system). (c) (b) minus (a).

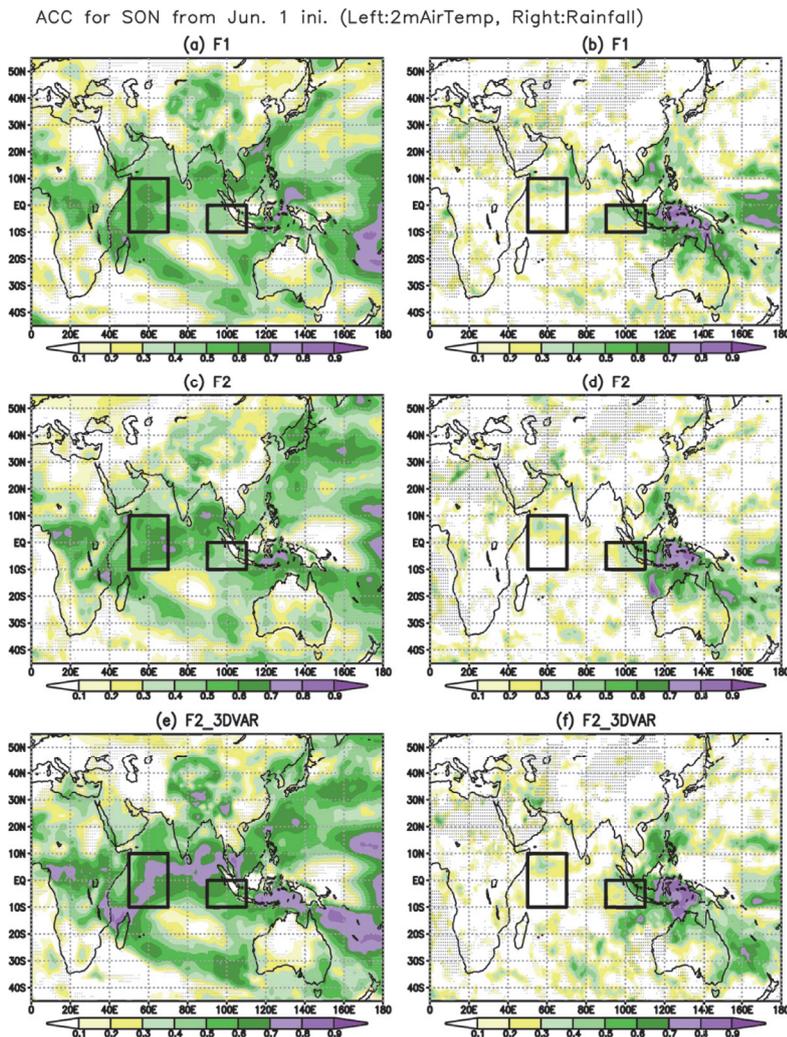


Fig. 2 (a) Anomaly correlation coefficient (ACC) for SON 2m air-temperature between the NCEP/NCAR reanalysis data and the prediction initialized on every 1st June of each year with the SINTEX-F1 system (9 ensemble mean) in 1983-2015. Dark-shaded is a region where the ACC is below the persistence. (b) Same as (a), but for rainfall between the CMAP and the prediction. Dark-shaded is a region where the ACC is below the persistence or the standard deviation of the interannual variability of the observation in 1983-2015 is below 0.2 mm day<sup>-1</sup>. (c, d) Same as (a, b), but with the SINTEX-F2 system. (e, f) Same as (a, b), but with the SINTEX-F2-3DVAR system. The DMI regions are shown by black boxes.

### Acknowledgement

We are grateful to Dr. Andrea Storto for his contribution to developing the new initialization scheme with 3DVAR correction. We also thank Drs. Wataru Sasaki, Jing-Jia Luo, Sebastian Masson, and our European colleagues of INGV/CMCC, L'OCEAN, and MPI for their contribution to developing the prototype of the SINTEX-F1/F2 systems. This research was supported by the Environment Research and Technology Development Fund (2-1405) of the Ministry of the Environment, Japan, the Japan Agency for Medical Research and Development (AMED) and Japan International Cooperation Agency (JICA) through the Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS) project for iDEWS South Africa.

### References

- [1] Luo, J.-J., S. Masson, S. Behera, S. Shingu, and T. Yamagata, 2005: Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts. *J. Clim.*, 18, 4474-4494.
- [2] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2016: Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, DOI: 10.1002/2016MS000744
- [3] Doi, T., A. Storto, S. K. Behera, A. Navarra, and T. Yamagata, 2017: Improved prediction of the Indian Ocean Dipole Mode by use of subsurface ocean observations. *J. Climate*, in press. (<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-16-0915.1>)