

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^{*1}, 森岡 優志^{*1}, Venkata Ratnam^{*1}, Swadhin Behera^{*1}, 山形 俊男^{*1}

^{*1} 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）を開発し、SINTEX-F2 で 1982-2015 年の過去再現実験を実施した。海表面水温ナッジング法では再現性の低かった熱帯インド洋や熱帯大西洋の再現性が、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。来年度からこの 3DVAR 初期化スキームを搭載した過去再予測実験を実施する準備が整った。

SINTEX-F の過去再予測実験を解析し、中緯度における季節予測可能性の新たな潜在的根拠となりうる沿岸ニーニョ現象の予測可能性を検証し、周辺国への影響を調べた。

SINTEX-F2 の長期積分の実験を解析し、アフリカ南部の気候に見られる十年規模変動の物理メカニズムの詳細を明らかにした。

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, 沿岸ニーニョ現象, アフリカ南部の 10 年規模変動

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、我々は気候大気海洋結合モデル 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ー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の構築にも成功した。

季節予測の精度を向上させるためには、上述したような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-F 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高い実績を有する。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ことが解っている。そこで本課題では、従来の SST-

nudging 法に、海洋観測に基づいた 3 次元の水温 / 塩分データを同化する修正法（3DVAR 補正）を新たに導入した予測実験を実施し、海洋内部の情報がどのように数ヶ月 - 数年規模の気候予測に寄与するのかを明らかにする。

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。

以下、本年度の成果をまとめる。

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、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

Temperature along EQ (2S-2N ave.) in DEC1982 [°C]

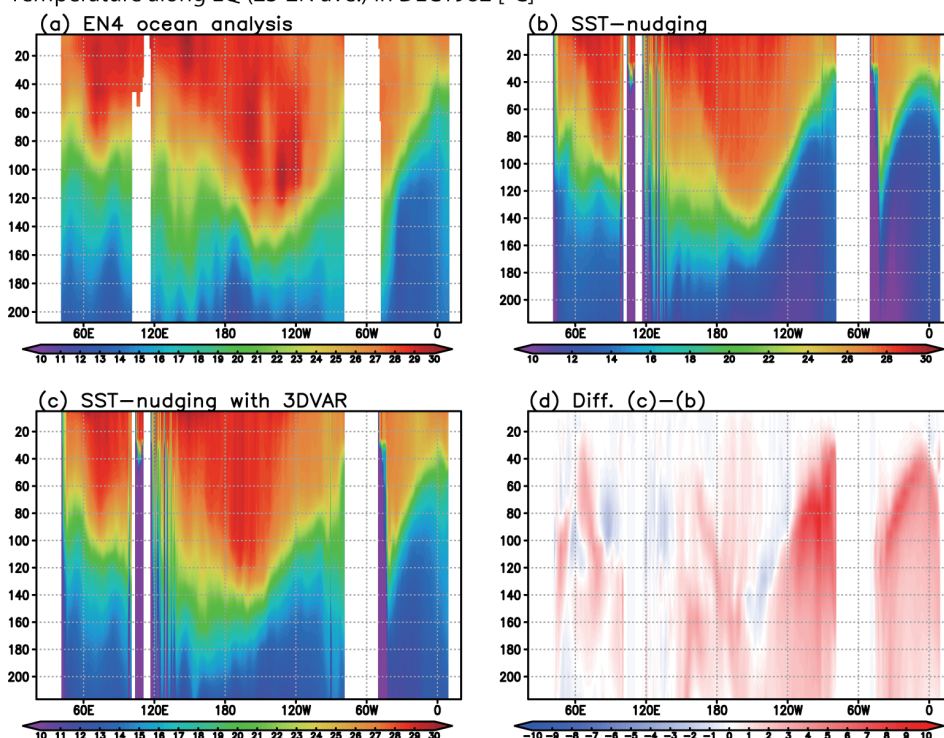


図1 1982年12月の月平均水温の赤道に沿った鉛直断面図(南北2度で平均)[°C]。(a): EN4 analysis data、(b): SINTEX-F2 モデルによる SST-nudging 計算(旧初期化スキーム)、(c): 3DVAR 補正を導入した新初期化スキームの計算結果。(d)(c) から (b) を引いた差。

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。

上記の新・旧スキームをそれぞれ使用した約1年後の1982年12月時点とを比べた。赤道に沿った水温の鉛直断面図を見ると(図1)、旧スキームでは熱帯太平洋東部の深度100m付近が現実と比べて暖かいエラーがあるが、新スキームでは修正されている。1982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 ナッジング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 ナッジング法でも熱帯太平洋は概ねよく再現できている。3DVAR 補正を導入することで、亜熱帯域や熱帯インド洋、熱帯大西洋の再現が向上した。加えてニンガルーニーニョ現象に重要な豪州西岸域、インド洋亜熱帯ダイポール現象が発生する南インド洋などで海洋垂表層が効果的に補正されていた。従って、これらの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。来年度は、この 3DVAR 初期化スキームを搭載した過去再予測実験を実施する。

D20A[m] along 2S-2N in t1=t192

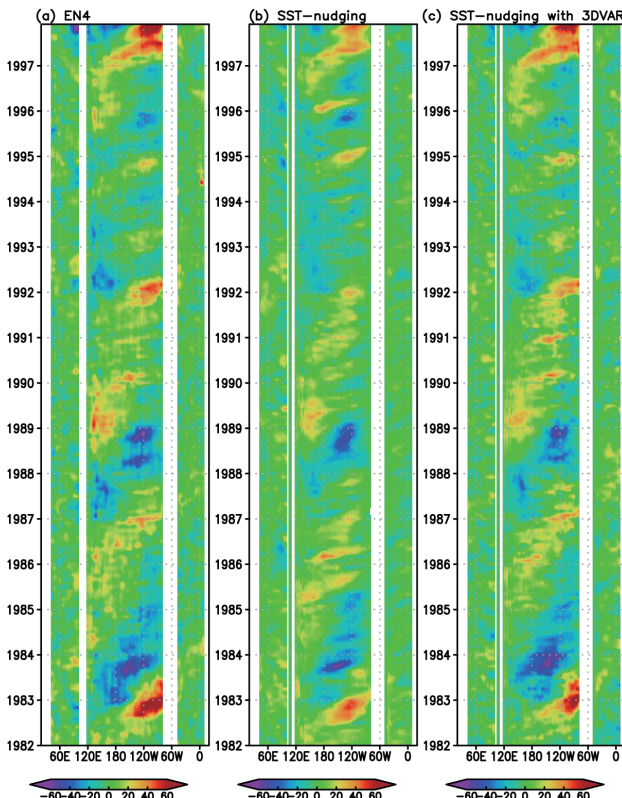


図2 赤道に沿った(南北2度で平均)20°C等温深偏差の時間経度図[m]。(a): EN4 analysis data、(b): SINTEX-F2 モデルによる SST-nudging 計算、(c): 3DVAR 補正を導入した計算結果。

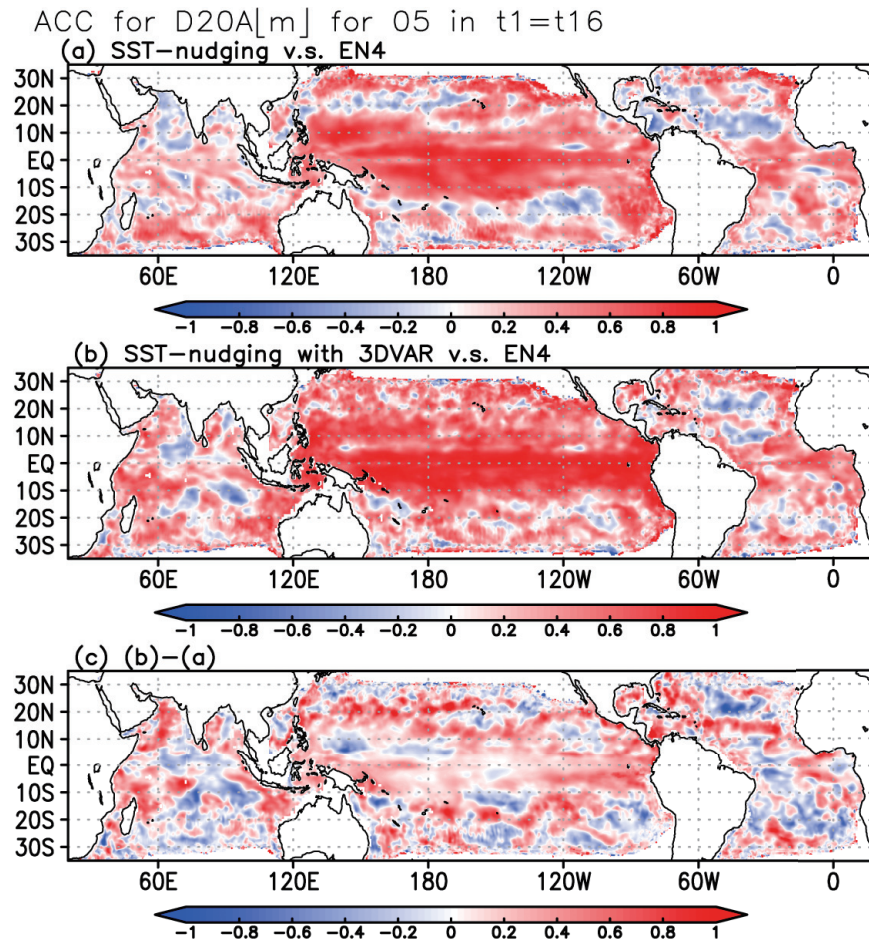


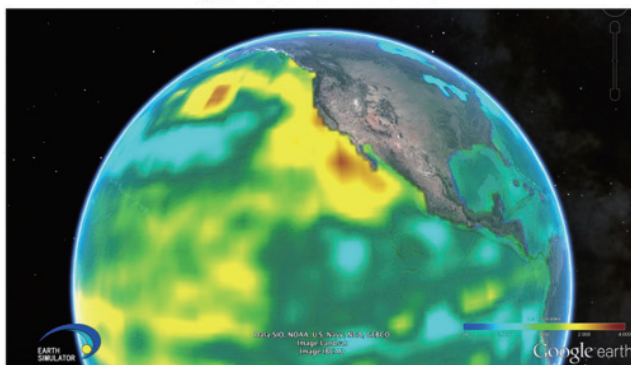
図3 (a)20°C等温深偏差[m]のEN4 analysis dataとSINTEX-F2モデルによるSST-nudging計算の相関係数。(b)EN4 analysis dataと3DVAR補正を導入した計算の相関係数。(c)(b)から(a)を引いた差。主に熱帯太平洋東部、インド洋全域、熱帯大西洋で精度が向上している。

3. 沿岸ニーニョ現象による季節予測の新展開

季節予測可能性の潜在的な根拠になるのが、海洋と大気が結合して発達する気候変動現象である。このような現象は、主に熱帯の海で発見されてきた。代表的なものが、太平洋のエルニーニョ現象やインド洋のダイポールモード現象である。これらの現象が発生すると、大気を介して遠隔影響（テレコネクションと呼ばれる）し、我が国

を含む全世界の異常気象・極端現象発生の母胎となる。そのため、1) 熱帯域の気候変動現象の発生予測と2) その中緯度域への遠隔影響予測の2点が季節予測研究の主たる課題だったと言える。しかし、近年、中緯度域において新たな季節予測可能性の根源になりうる現象が発見された。それが沿岸ニーニョ現象と呼ばれる現象である。これらは、大陸の西岸沖に東西100kmスケールで発生す

1991年7月の海表面水温の異常
(平年からのズレ)



2011年3月の海表面水温の異常
(平年からのズレ)

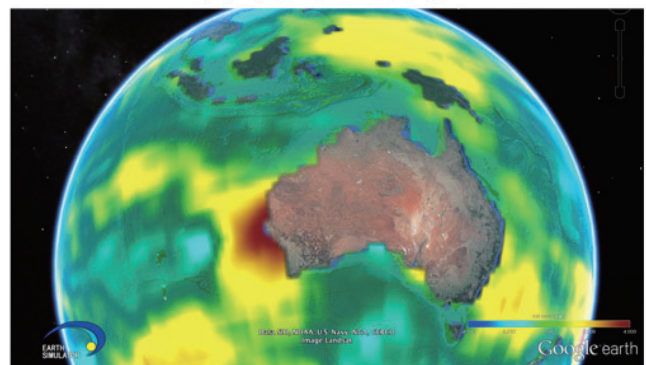


図4 観測データから得られた海の表面の水温異常（1983-2006年で平均した平年値からのズレ、単位は度）。暖色が水温が平年より異常に暖かいことを示す。左図：1991年7月の状況。カリフォルニア半島沖が平年より暖かく、カリフォルニアニーニョ現象が発生している。右図：2011年3月の状況。オーストラリア沖が平年より暖かく、ニンガルーニーニョ現象が発生している。

る気候変動現象で、大気海洋相互作用を伴い発達するため、近隣国の気候や海洋生態系に多大な影響を与える。特に、豪州西岸沖のニンガルーニーニョ/ニーニャ、カリフォルニア沖合のカリフォルニアニーニョ/ニーニャの季節予測可能性を発見し、周辺国の季節予測の向上に資する可能性を指摘した (Doi et al. 2013[1]; Doi et al. 2015a[2]; Doi et al. 2015b[3]、図 4)。季節予測精度の向上のため、上記 1)、2) の研究に、中緯度域の季節予測研究の新たなパラダイムとして、3) 沿岸ニーニョ現象の予測研究が加わったことで、季節予測研究に新しい展開が見え始めた。

次年度は、上述した結合モデルの高度化や 3DVAR 補正を導入した新初期化スキームにより、沿岸ニーニョ現象の予測精度の向上に挑戦する。

4. アフリカ南部の気候に見られる十年規模変動の物理メカニズムに関する研究

アフリカ南部の降水量は約 20 年周期で変動しており、南インド洋の海面気圧と海面水温の十年規模変動と関係していることが報告されている。しかし、南インド洋の十年規模変動の物理メカニズムの実態はよく分かっていない。

そこで、衛星観測が始まった 1982 年以降の観測データおよび再解析データを用いて、南インド洋の海面水温の十年規模変動について調べたところ、南インド洋の十年規模変動に伴う海面水温の偏差は、海面気圧の偏差とともに、南大西洋から南インド洋へゆっくり東方伝播していることが分かった。次に、この海面水温偏差の東進

が海面気圧偏差の東進に与える影響を調べるため、大気海洋結合モデル SINTEX-F2 を用いて、300 年に及ぶ長期積分実験を 2 ケース行った。1 つは、大気と海洋を自由に結合させた標準実験で、もう 1 つは、南大西洋の海面水温の年々変動を標準実験の気候値で抑えた南大西洋実験である。標準実験では、観測で見られる海面水温と海面気圧の偏差の東進は再現されていたが、南大西洋の海面水温の年々変動を抑えた南大西洋実験では、南大西洋から南インド洋への海面気圧の東進が確認されなかった (図 5)。従って南インド洋の十年規模変動には南大西洋の十年規模変動が大きく関わっていることが明らかになった。以上の成果は (Morioka et al. 2015[4]) として発表した。

来年度から SINTEX-F2 を用いて 10 年先までの長期予測実験を行い、南インド洋と南大西洋に見られる十年規模変動の予測可能性に挑戦していく。

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, 2013: Predictability of the Ningaloo Niño/Niña. *Scientific Reports*, 3, 2892, doi:10.1038/srep02892.
- [2] Doi T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2015a: An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s, *JGR-Oceans*, 120, 1388-1396.
- [3] Doi T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2015b: Predictability of the California Niño/Niña. *J. Climate*, 28, 7237-7249.
- [4] Morioka, Y., E. Francois, and S. K. Behera, 2015b, Potential sources of decadal climate variability over southern Africa. *Journal of Climate*, 28, 8695-8709.

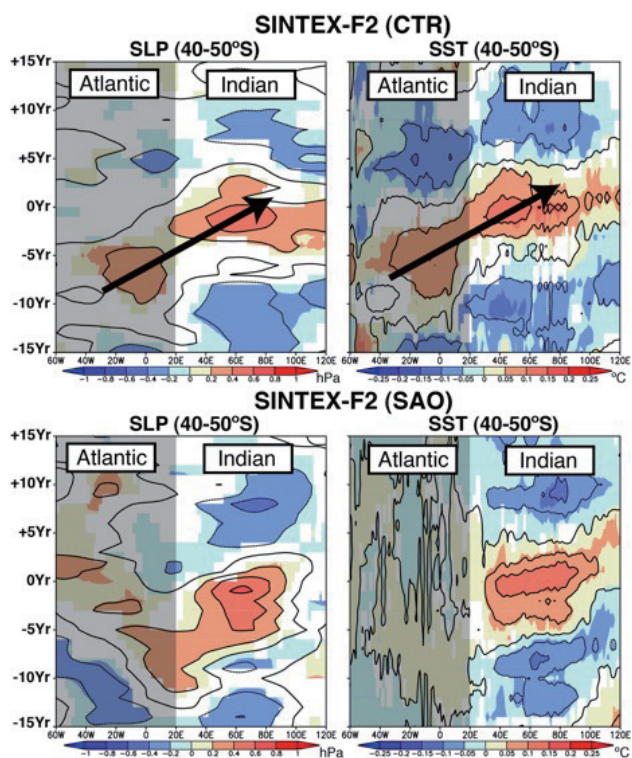


図 5 大気海洋結合モデル SINTEX-F2 で再現された、南大西洋から南インド洋へ東進する海面水温 (°C) と海面気圧 (hPa) の十年規模変動に伴う偏差。上段が標準実験、下段が南大西洋実験。カラーは統計的に有意な偏差、黒影は南大西洋を表す。

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^{*1}, Yushi Morioka^{*1}, Venkata Ratnam^{*1}, Swadhin K. Behera^{*1} and Toshio Yamagata^{*1}

^{*1} Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The SINTEX-F1 CGCM was developed within the EU-Japan collaborative framework to study global climate variability and its predictability. The seasonal prediction system based on the SINTEX-F1 has demonstrated its outstanding performance of predicting El Niño/Southern Oscillation (ENSO) and the Indian Ocean Dipole since 2005. However, there is much room for improvement in predicting extra-tropics climate variations. To deal with this, a prototype of a new seasonal prediction system, which is called as SINTEX-F2, is developed based on a high-resolution version of the SINTEX-F embedded with a dynamic sea-ice model. The SINTEX-F2 system shows the high skill in predicting ENSO just like the SINTEX-F1 system. In addition, it is found that the SINTEX-F2 system is more skillful in predicting the Indian Ocean Subtropical Dipole, the high-latitude temperature in the Northern Hemisphere, and some events associated with the El Niño Modoki and the Ningaloo Niño.

As similar to the SINTEX-F1 system, the SST-nudging semi-coupled initialization scheme is adopted in the SINTEX-F2 system. In this fiscal year, we developed a suitable three-dimensional ocean data assimilation method (3DVAR), which may improve the seasonal prediction skill, particularly in the tropical Indian Ocean, tropical Atlantic Ocean, and the subtropical regions, where the SST-nudging scheme is not enough for the subsurface initialization. We confirmed that the new initialization scheme with 3DVAR correction successfully improved the subsurface ocean initialization relative to the simple SST-nudging scheme. Next fiscal year, we will conduct the reforecast experiments with this new scheme.

Keywords: Seasonal Prediction, SST-nudging, 3DVAR, Coastal Niños, decadal variations over South Africa

1. A new initialization scheme with 3DVAR correction

The SINTEX-F2 seasonal prediction system used the simple SST-nudging scheme as similar to the F1 system; the OGCM SSTs are strongly nudged toward the observational data in the coupled mode from 1st January 1982. The scheme is one of the simplest approaches, but still a semi-coupled data assimilation scheme, which can generate the compatible initial conditions between the atmosphere and ocean. It is important to reduce the initial shock during forecasts. The SST-nudging scheme can capture well interannual variations of the equatorial Pacific thermocline due to its high model performance. However, this scheme is not enough to initialize subsurface ocean where air-sea coupling is weak (e.g. tropical Indian Ocean and Atlantic, mid-latitude). Also, it cannot resolve high-frequency variability related to MJO events and westerly wind bursts, which can have strong implications for the timing of initiation and termination of ENSO events. To deal with those issues, we developed a prototype of a new initialization scheme with the 3DVAR correction. In the new scheme, OGCM SSTs are strongly nudged toward the observational data in the coupled mode continuously from 1982 as similar to the simple SST-nudging scheme, besides 3DVAR correction is additionally conducted

every 1st date of each month using the Met Office Hadley Centre EN4 profile data of subsurface ocean temperature and salinity observation. The assimilation window in the first guess at appropriate time (FGAT) is 10 days.

Figure 1 shows that interannual variations of the 20°C isothermal depth along the equator. The new initialization scheme with 3DVAR correction can improve the subsurface ocean simulation, particularly in the tropical Indian Ocean and the tropical Atlantic Ocean relative to the simple SST-nudging scheme. Next fiscal year, we will conduct the reforecast experiments with this new scheme.

2. New potential source of seasonal predictability in the mid-latitude -Coastal Niño phenomena-

Coastal Niño (Niña) phenomena are becoming an interesting topic of climate research after the recent discovery of Ningaloo Niño (Niña) off the west coast of Australia and California Niño (Niña) off the west coast of California and Baja California (Fig. 2), in addition to the well-known Benguela Niño/Niña off the west coast of Angola–Namibia. Since the ocean–atmosphere positive feedback responsible for the coastal warming (cooling) is to some extent similar to the equatorial warm (cold) event

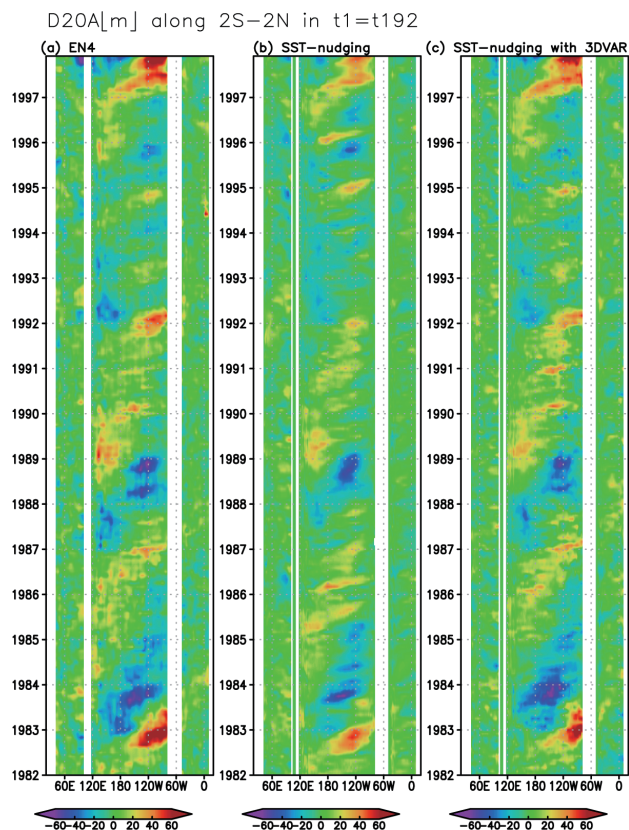


Fig. 1 Interannual anomalies of the 20°C isothermal depth (m) along the equator (2°S-2°N average) from (a) the EN4 analysis data, (b) the SST-nudging scheme and (c) the new scheme with 3DVAR correction. Positive (negative) values shows anomalously deeper (shallower).

called El Niño (La Niña), the term “coastal Niño (Niña)” is used.

Besides the efforts to understand the mechanism of those coastal Niño/Niña events, exploring their seasonal prediction skill is equally important for various regional applications of climate information because they can be potential sources of seasonal predictability in the mid-latitude via their regional air-sea couplings. We found predictability of the Ningaloo Niño (Niña) and the California Niño (Niña), using a seasonal prediction system based on the Scale Interaction Experiment-

Frontier version 1 (SINTEX-F1) coupled ocean–atmosphere general circulation model (Doi et al. 2013[1]; Doi et al. 2015a[2]). Also, we found that the rainfall predictability near the coastal region of Western Australia on a seasonal time scale was drastically enhanced after the late 1990s due to the frequent occurrence of the Ningaloo Niño (Doi et al. 2015b[3]). Those studies may open a new door to the regional climate prediction in the mid-latitude, where the seasonal predictability is mostly related to the teleconnection from El Niño (La Niña) events.

3. Decadal climate variability over southern Africa (Morioka et al. 2015[4])

A recent study has reported that southern African rainfall undergoes a significant bi-decadal variability, which is related to decadal sea surface temperature (SST) and sea level pressure (SLP) anomalies in the southern Indian Ocean. However, a detailed physical mechanism on the decadal climate variability in the southern Indian Ocean remains unclear. In order to first examine the decadal SST variability in the southern Indian Ocean, we analyzed the observational and re-analysis datasets since 1982 when the satellite observation was initiated. The results show that decadal SST anomalies in the southern Indian Ocean are strongly associated with the overlying decadal SLP anomalies and both the anomalies originate in those propagating eastward from the South Atlantic. Next, we performed two series of 300-yr experiments by using the SINTEX-F2. In the control experiment, atmosphere and ocean is freely coupled, while in the South Atlantic experiment, the interannual SST variability in the South Atlantic is suppressed with the climatology of the control experiment. The control experiment reasonably simulates the observed eastward propagation of decadal SST and SLP anomalies from the South Atlantic, but in the South Atlantic experiment, the eastward propagation is not well simulated (Fig. 3). The comparison between the two experiments indicates that the decadal SST variability in the South Atlantic plays a vital role in the decadal climate variability over the southern Indian Ocean.

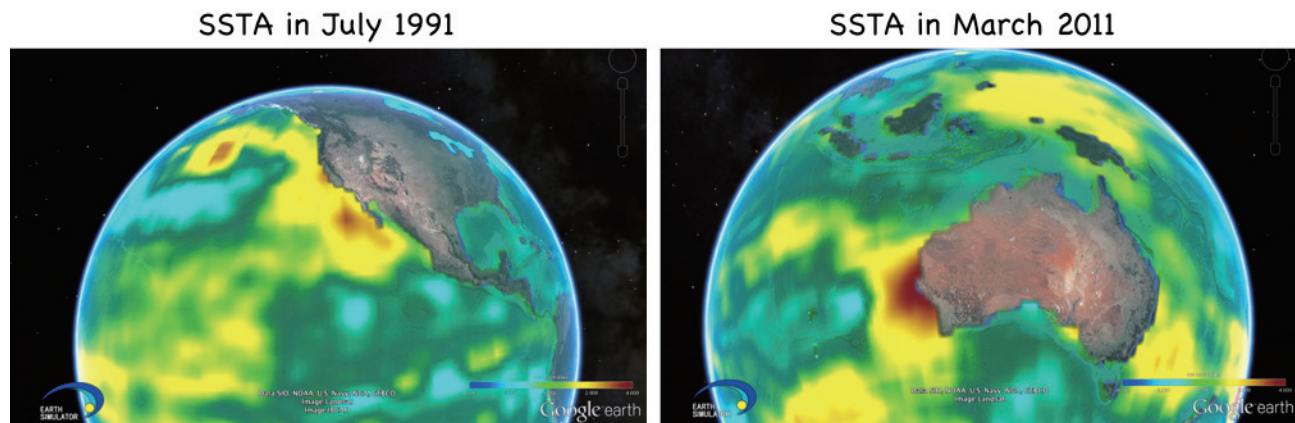


Fig. 2 (a) SST anomalies in July 1991 show the occurrence of the California Niño. (b) SST anomalies in March 2011 shows the occurrence of the Ningaloo Niño.

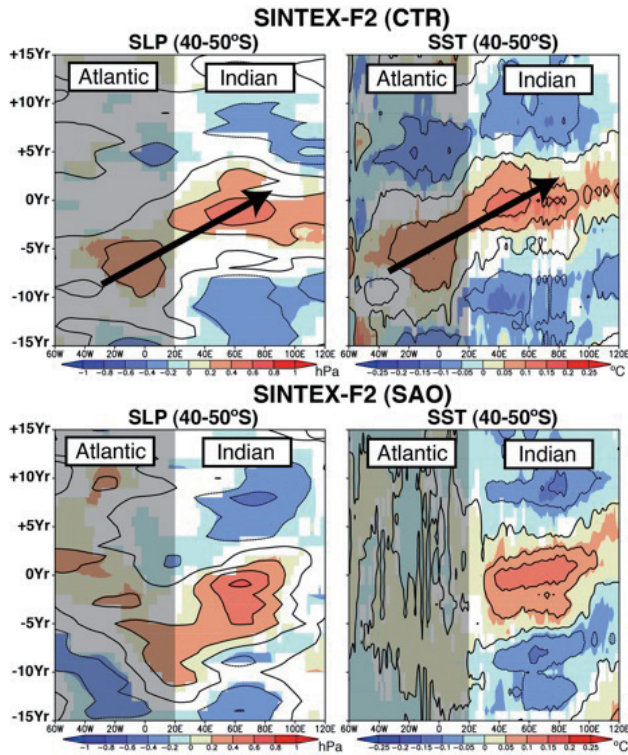


Fig. 3 Eastward propagating decadal SST (°C) and SLP (hPa) anomalies simulated in the SINTEX-F2. The upper panels show the control experiment, while the lower panels show the South Atlantic experiment. Color indicates statistically significant anomalies and black shade corresponds to the South Atlantic.

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] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2013: Predictability of the Ningaloo Niño/Niña. *Scientific Reports*, 3, 2892, doi:10.1038/srep02892.
- [2] Doi, T., C. Yuan, S. K. Behera, and T. Yamagata, 2015a: Predictability of the California Niño/Niña, *J. Climate*, 28, 7237-7249, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0112.1>.
- [3] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2015b: An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 1388-1396, doi:10.1002/2014JC010562.
- [4] Morioka, Y., F. Engelbrecht, and S. K. Behera, 2015: Potential sources of decadal climate variability over southern Africa" *J. Climate*, 28, 8695-8709.

