

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 K. Behera 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

著者

森岡 優志^{*1}, 土井 威志^{*1}, Swadhin K. Behera^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

アプリケーションラボでは、2005年より日欧協力のもと、大気海洋結合モデル SINTEX-F をベースとした、数ヶ月から数年先の気候変動を予測するシステムの開発を行っている。これまで、大気モデルや海洋モデルの高解像度化、中高緯度の気候変動に重要な役割を果たす海水モデルの導入、海洋内部の水温や塩分を観測データで初期化する手法 (3DVAR) の開発など、様々なシステムの改善を行い、数多くの研究成果を残してきた。今年度は SINTEX-F モデルを用いて、予測期間を十年先まで延長し、海洋のゆっくりとした変動が関わる気候の十年規模変動の予測可能性について研究を行なった。

本研究では、南インド洋の十年規模変動について報告する。南インド洋の海面水温は十年から二十年ほどの周期で変動し、直上にある大気の変動を通してアフリカ南部の降水量に十年規模変動をもたらす。SINTEX-F モデルの海面水温のみを観測データで初期化し、十年先まで再予測する実験を行なった。その結果、南インド洋の南西部において観測された、1990年代後半の温暖期や2000年代後半の寒冷期への移行を SINTEX-F モデルで予測できることが示された。また、海面水温の変動に伴う海面気圧の変動もよく捉えることができた。本研究ではモデルの初期化に観測された海面水温のみを用いているので、海面水温の観測データが長期に渡って存在する北半球では、さらに過去に遡って十年規模変動の予測可能性を調べる研究への応用が期待される。

キーワード：海面水温, 十年再予測実験, 大気海洋海水結合モデル

1. 気候変動予測システム「SINTEX-F」

アプリケーションラボ (APL) では、2005年より日欧協力のもと、大気海洋結合モデル SINTEX-F をベースとした、数ヶ月から数年先の気候変動を予測するシステムの開発を行っている。初代の SINTEX-F1 は約百 km の分解能をもつ大気海洋結合モデルで構成され、モデルの海面水温を観測データに近づけて (初期化して) からモデルを積分する手法を用いて、数ヶ月から数年先の気候予測を毎月行ってきた。この SINTEX-F1 モデルは、世界の気候に影響を及ぼす熱帯域の気候変動現象であるエルニーニョ・南方振動を約一年前から、インド洋ダイポールを約半年前から高い精度で予測できることが報告されている (Luo et al. 2005 [1])。こうした気候予測の情報は、APL のウェブサイトを通して、一般向けに分かりやすい記事とともに毎月配信されている (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)。

一方で、SINTEX-F1 モデルは、中高緯度域における気候変動の予測精度が十分ではない。そこで、大気モデルや海洋モデルの高解像度化 (大気モデルは約 100km、海洋モデルは約 50km) や中高緯度の気候変動に重要な役割をする海水モデルの導入を行い、2012年に第二世代の大気海洋海水結合モデル SINTEX-F2 を開発した (Masson et al. 2012 [2])。また、熱帯域の海洋亜表層 (海面から水深約 200m まで) に存在する細かな鉛直混合の効果を海洋モデルに取り込むなど、様々なシステムの改良を行ってきた (Sasaki

et al. 2013 [3])。

続く2016年には、SINTEX-F2 モデルをベースとした数ヶ月から数年先の気候予測に関する研究が行われ、熱帯域だけでなく亜熱帯域から中緯度域に存在する気候変動現象 (インド洋亜熱帯ダイポール現象やニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象など) の予測精度を向上させることに成功した (Doi et al. 2016 [4])。さらに、従来行われてきたモデルの海面水温のみを観測データで初期化する手法に加え、海洋内部の水温や塩分を観測データで初期化する手法 (3DVAR) を開発し、熱帯域の気候変動現象、特にインド洋ダイポールモード現象の予測精度が著しく向上することも近年報告した (Doi et al. 2017 [5])。こうした取り組みは、JAMSTEC の第3期中期計画 1- (2) -3「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」に大きく貢献する。

2. 十年再予測実験

SINTEX-F2 モデルは数ヶ月から数年先までの気候変動について高い予測精度を示しているが、それより長い時間スケールの気候変動の予測精度についてはこれまで調べられていない。海洋のゆっくりとした変動が関わる長期な気候変動現象として十年規模変動がある。そこで、最先端の SINTEX-F2 モデルを用いて、過去に観測された十年規模変動をどこまで予測することができるか、十年再予測実験を行なった。

実験の手順を図1に示す。まず始めに、SINTEX-F2モデルの海面水温を観測された海面水温の月平均値に近づけて1950年から1981年まで約30年間積分する。これにより、モデルの気候の平均場が観測の平均場により近づく。次に、1982年から2015年まで月ごとに観測された海面水温に、モデルの海面水温を近づけ(初期化し)ながらモデルを積分する。これにより、観測された海面水温で駆動された、より現実に近いモデルの気候場が形成される。最後に、1982年から2006年まで毎年3月1日から十年再予測実験を開始する。例えば、1982年3月1日に再予測実験を開始した場合、1991年2月28日まで観測データを使わずにモデルを積分する。こうした実験を2006年まで合計で25回、再予測実験を行なった。

モデルに与える初期値の不確実性を考慮するために、本研究では観測された海面水温を2種類用いた(NOAA/OISSTv2の週平均低解像度データと日平均高解像度データ)。また、モデルの海面水温を観測された海面水温に近づける強度を3種類用いた(表層水温が1日または2日、3日で観測値に近づく強度)。さらに、Sasaki et al. 2013 [3]で開発された、熱帯太平洋の細かな鉛直混合を考慮した2種類の実験を行なった。これらの初期設定の違いにより、各年合計で12個(=3x2x2)のアンサンブル実験を行なった。

再予測実験で得られた結果について、月ごとにモデルの月平均値を差し引いて、モデルの偏差(平年値からのずれ)を計算した。これにより、モデルの系統誤差(いわゆる気候値ドリフト)を除去することができる。ただし、モデルの長期トレンドは除いていない。また、観測との比較を行うために、海面水温にはNOAA/OISSTv2を、海面気圧にはECMWF/ERA-interimを用いた。解析期間は、1982年から2015年までを対象とした。

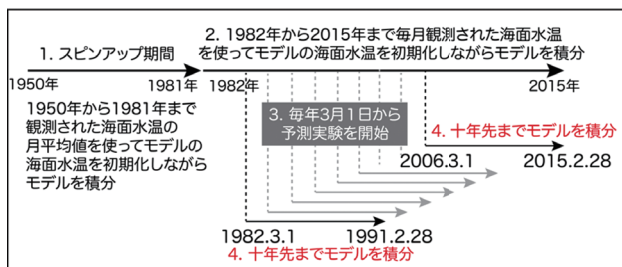


図1 SINTEX-F2モデルを用いた十年再予測実験の模式図

3. 南インド洋の十年規模変動の予測可能性

本研究では主に、南インド洋の十年規模変動の予測可能性について調べた。南インド洋の海面水温は十年から二十年の周期でゆっくりと変動することが知られている。この変動は直上に大気の変動を伴い、南インド洋からアフリカ南部へ水蒸気の輸送を変えることで、アフリカ南部の降水量に十年規模変動を生じさせる。南インド洋の海面水温に見られる十年規模変動は主に、インドネシア通過流の変動に伴う南インド洋の海洋循環の長期変動や、南大西洋から南極周極流に沿って東進する海面水温の変動によって生じることが報告されている。

南インド洋の十年規模変動は海洋内部の変動を強く伴

うため、温室効果ガスなど外部強制の変化を取り入れた気候モデルでも予測が困難であることが示唆されている。そこで、本研究では外部強制の変化を取り入れず、モデルの海面水温のみを観測データで初期化して、海洋内部の変動と大気との相互作用で、南インド洋の十年規模変動をどこまで予測できるか、調べた。

図2は、南インド洋で観測された海面水温とモデルで予測された海面水温の偏差相関係数を表す。ここで、モデルの結果には6-10年先に予測された海面水温を用いた。図2を見ると、南インド洋の南西部、特にアガラス反転流域において、観測とモデルの海面水温の相関が高い(相関係数0.6程度)ことがわかる。この海域は、アフリカ南部の降水量の変動との関係が強く、SINTEX-F2モデルが観測された海面水温の変動を高い精度で予測できることを示している。

より詳細に予測精度を調べるために、アガラス反転流域で平均した海面水温の偏差(平年値からのずれ)を図3に示した。1994年から再予測実験を行なった結果を見ると(図3上)、振幅には差があるものの、1990年代後半に観測されたアガラス反転流域の昇温期(黒線)がSINTEX-F2モデル(赤線)で捉えられていることがわかる。また、1999年から再予測実験を行なった結果を見ると(図3下)、2000年代後半に観測された昇温期から寒冷期への移行がSINTEX-F2モデルでよく予測できていることがわかる。

南インド洋の海面水温に見られる十年規模変動は、直上の大気にも影響を与えることが示唆されている。そこで、1990年代後半に観測された昇温期について、海面気圧の偏差を調べた(図4)。1994年から5年ごとに平均した再解析値を見ると(図4左)、アフリカ南部の南側で高気圧の偏差がゆっくりと東進し、1999-2003年にアガラス反転流域(黒いボックス)で強化されている。1994年から再予測実験を行なったSINTEX-F2モデルの結果をみると(図4右)、振幅には差があるものの、高気圧偏差の東進がよく捉えられていることがわかる。

以上の結果から、SINTEX-F2モデルは、過去に観測された南インド洋の十年規模変動を高い精度で予測できることがわかった(Morioka et al. 2018 [6, 7])。こうした研究は、南インド洋だけでなく、他の海域でも応用すること

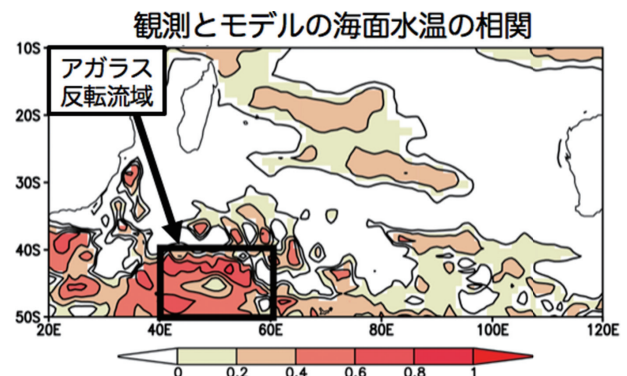


図2 観測された海面水温とSINTEX-F2モデルで6-10年先に予測された海面水温の相関係数。黒いボックスは、モデルの予測精度が高いアガラス反転流域を示す。

ができる。本研究ではモデルを初期化するために観測された海面水温データを用いているため、観測データが長期に渡って存在する北半球では、さらに過去に遡って十年規模変動の予測可能性を調べる研究に応用することができる。また、本研究では海洋内部の水温や塩分の初期

化手法 (3DVAR) を用いていないため、これを追加することで予測精度の向上に貢献する研究を今後進めていく予定である。

謝辞

SINTEX-F モデルのプロトタイプ開発に Jing-Jia Luo 博士、Sébastien Masson 博士、佐々木亘博士ほか欧州の研究機関 (INGV/CMCC, LOCEAN/IPSL, MPI-M) に協力していただいた。また、3DVAR 初期化スキームの開発にイタリア CMCC の Andrea Storto 博士に協力していただいた。本研究は、JSPS 若手 B 科研費 (15K17768) ほか、AMED-JICA が推進する SATREPS 南アフリカ感染症課題「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」の支援を受けている。

文献

- [1] J. J. Luo, S. Masson, S. K. Behera, S. Shingu, and T. Yamagata, “Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts,” *J. Climate*, vol.18, no.21, pp.4474-4497, 2005.
- [2] S. Masson, P. Terray, G. Madec, J. J. Luo, T. Yamagata, and K. Takahashi, “Impact of intra-daily SST variability on ENSO characteristics in a coupled model,” *Climate Dynamics*, vol.39, no.3-4, pp.681-707, 2012.
- [3] W. Sasaki, K. Richards, and J. J. Luo, “Impact of vertical mixing induced by small vertical scale structures above and within the equatorial thermocline on the tropical Pacific in a CGCM,” *Clim. Dyn.*, vol.41, no.2, pp.443-453, 2013.
- [4] T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata, “Improved seasonal prediction using the SINTEX - F2 coupled model,” *J. Adv. Model. Ear. Sys.*, vol.8, no.4, pp.1847-1867, 2016.
- [5] T. Doi, A. Storto, S. K. Behera, A. Navarra, and T. Yamagata, “Improved Prediction of the Indian Ocean Dipole Mode by Use of Subsurface Ocean Observations,” *J.*

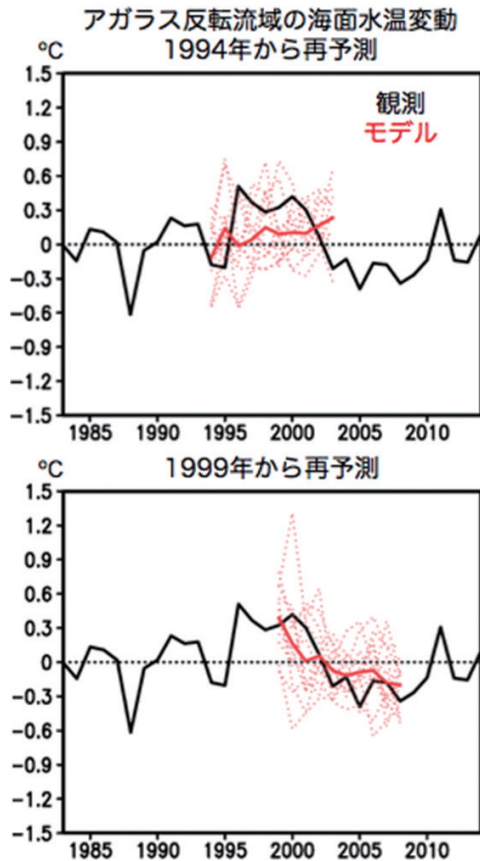


図3 アガラス反転流域 (図2の黒いボックス) で平均した海面水温の観測値 (黒線, 単位は $^{\circ}\text{C}$) とモデルの予測結果 (赤線, 単位は $^{\circ}\text{C}$)。赤い太線が12個のアンサンブル実験の平均値、赤い点線が各メンバーの結果を表す。上図が1994年からの再予測値、下図が1999年からの再予測値を示す。

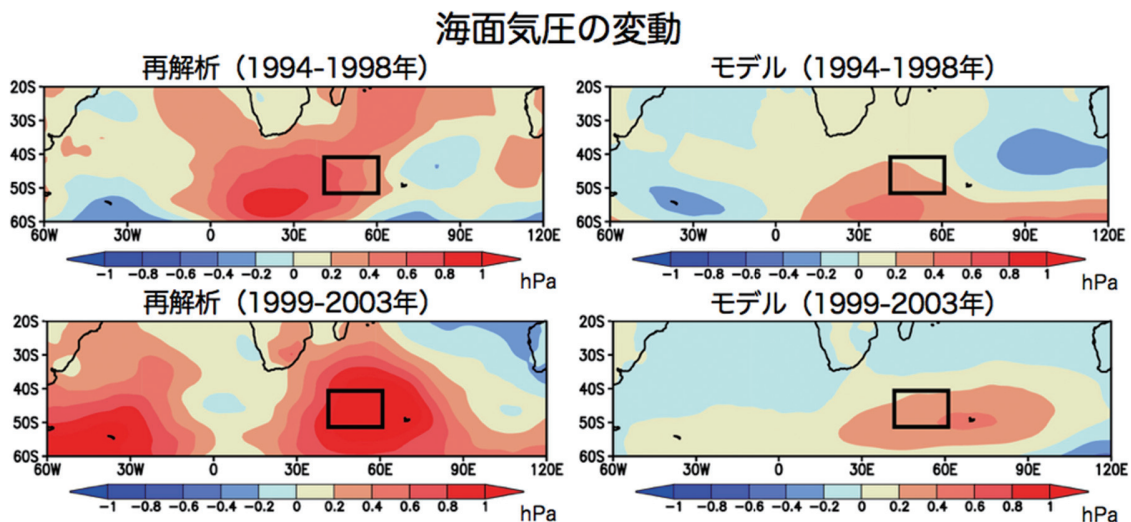


図4 1994年から5年ごとに平均した海面気圧の偏差 (平年値からのずれ, 単位はhPa)。左が観測に近い再解析値、右が1994年から再予測したモデルの結果を表す。モデルの結果は、12個のアンサンブル実験の平均値を用いた。黒いボックスは、予測精度の高いアガラス反転流域を示す。

Climate, vol.30, no.19, pp.7953-7970, 2017.

- [6] Y. Morioka, T. Doi, and S. K. Behera, “Decadal climate predictability in the southern Indian Ocean captured by SINTEX-F using a simple SST-nudging scheme,” Scientific Reports, vol.8, no.1, 1029, 2018.

- [7] 森岡優志, 土井威志, ベヘラスワディヒン, “海面水温データで南インド洋の十年規模変動が予測可能に～アフリカ南部の防災や農業、感染症分野へ応用の可能性～”, JAMSTEC プレスリリース, 2018 年 1 月 26 日

Development of Probabilistic Seasonal Prediction System Integrating Ocean Observation Data

Project Representative

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

Authors

Yushi Morioka^{*1}, Takeshi Doi^{*1} and Swadhin K. Behera^{*1}

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

Application Laboratory (APL) has, since 2005, developed a seasonal-interannual climate prediction system based on an atmosphere-ocean coupled model, called the SINTEX-F. Many efforts such as upgrading the model physics and incorporating a new initialization scheme of ocean data assimilation have been made to improve the prediction skills, leaving a large number of publications and the prediction information open to the public. Through extension of the prediction lead-time to up to 10 years, we have made the first attempt to explore decadal climate predictability using the SINTEX-F model. This decadal re-forecast experiments for 1982-2015 period shows high skills in predicting the decadal SST variability, particularly in the southwestern part of the southern Indian Ocean, which greatly affects the rainfall variability over southern Africa. The SINTEX-F skillfully predicts a warm state of the region in the late 1990s and its gradual shift to a cold state in the late 2000s. The associated atmospheric variability is also well captured. These results have many implications for decadal climate prediction studies in the other ocean basins, particularly in the Northern Hemisphere, where the long-term ocean observations are available.

Keywords: Sea-surface temperature, Decadal prediction, Atmosphere-Ocean-Sea-ice coupled model

1. Climate prediction system [SINTEX-F]

Application Laboratory (APL) has developed, since 2005, a seasonal-interannual climate prediction system based on an atmosphere-ocean coupled model called the SINTEX-F, in collaboration with a few European research institutes. The originally developed SINTEX-F1 model, although has moderate resolution in the horizontal and adopts a simple initialization scheme of sea-surface temperature (SST) nudging, exhibits high skills in predicting major climate phenomena such as El Niño-Southern Oscillation more than 1-yr ahead and the Indian Ocean Dipole up to 6-month ahead (Luo et al. 2005 [1]).

Efforts are made to improve the prediction skills through upgrading the model physics (Masson et al. 2012 [2]) and installing fine-scale vertical mixing scheme in the ocean model (Sasaki et al. 2013 [3]). This led to the successful implementation of the second-generation SINTEX-F2 model. The SINTEX-F2 model shows much improvements in predicting subtropical and mid-latitude climate phenomena such as the Indian Ocean Subtropical Dipole and the Ningaloo Niño/Niña (Doi et al. 2016 [4]). Also, a new initialization scheme (3DVAR) of subsurface ocean temperature and salinity using in-situ observation data has been recently incorporated into the SINTEX-F2 model (Doi et al. 2017 [5]). These research activities greatly contribute to a part of the JAMSTEC mid-term research plan by providing seasonal-to-interannual climate prediction information for societal applications.

2. Decadal re-forecast experiment

Although the SINTEX-F model has shown high skills in seasonal-interannual climate prediction, it was unclear to what extent the model has the ability in predicting decadal climate variation involving low-frequency ocean variability. This motivates us to further explore the prediction at lead times of up to 10 years. For the purpose, we performed a decadal re-forecast experiment using the SINTEX-F2 model with a simple SST-nudging initialization scheme. The experiment procedure is as follows: the SINTEX-F2 model is first integrated over 32 years from 1950 with the monthly climatological SST derived from the observation. The model is then integrated with monthly observed SST from 1982 to 2015. After that, decadal re-forecast experiment, in which the model is freely integrated over 10 years, is conducted on every March 1st of each year from 1982 to 2006.

Taking into account an uncertainty in the initial conditions, we utilized two types of the observed SST from NOAA/OISSTv2 and three different strengths of SST-nudging initialization. Also, we employed two types of fine-scale vertical mixing schemes in the ocean model developed by Sasaki et al. (2013 [3]). These different initial conditions lead to 12-ensemble members of decadal prediction. Based on these ensemble predictions, the monthly anomalies were calculated by removing the model's climatology over the prediction period. For comparison with the observation, we used the SST from the

NOAA/OISSTv2 and the Sea-Level Pressure (SLP) from the ECMWF/ERA-interim during 1982-2015, respectively.

3. Predictability of decadal variations in the southern Indian Ocean

In this study, we focus on decadal variability and predictability in the southern Indian Ocean. The SST in the southern Indian Ocean exhibits low-frequency variability with a cycle of 10-20 years and has a close link with rainfall variability over southern Africa. Previous studies reported that the decadal SST variability in the southern Indian Ocean is due to the low-frequency variability in the basin-wide ocean circulation induced by decadal modulation of the Indonesian Throughflow or to the eastward-propagating decadal SST variability from the South Atlantic.

Figure 1 shows the correlation between the observed SST and the model predicted SST at 6-10 year leads. High correlation coefficient of 0.6 is seen in the southwestern part of southern Indian Ocean where the Agulhas Return Current (ARC) flows eastward. This region is characterized by the strong SST front where the strong air-sea coupling takes place. The SST-nudging initialization, though a simple scheme, may allow the SINTEX-F2 model to keep some initial observation signal through the air-sea interaction on decadal timescale.

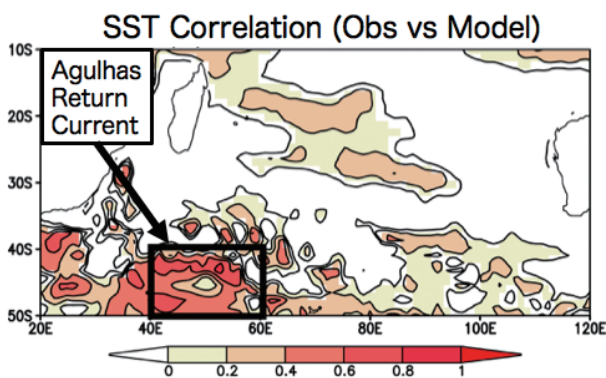


Fig. 1 Correlation coefficient between the observed sea-surface temperature (SST) anomalies and the SINTEX-F2 model's anomalies predicted at 6-10 year leads. Black box indicates the Agulhas Return Current region where the model shows high skills in predicting the observed SST.

Based on the high prediction skills in the ARC region, we calculated the area-averaged SST anomalies and plotted the time series during 1982-2015 (Fig. 2). The observed SST anomalies show a warm state in the late 1990s, and this is well captured in the re-forecast experiment initiated in 1994 (top panel in Fig. 2), although there exist some differences in the amplitude. On the other hand, the observation shows a rapid shift from the warm to cold state in the late 2000s and this is well predicted by the re-forecast experiment initiated in 1999.

Decadal SST variability in the southern Indian Ocean has some influences on the overlying atmospheric variability. Figure 3 shows spatial patterns of SLP anomalies averaged for 5 years

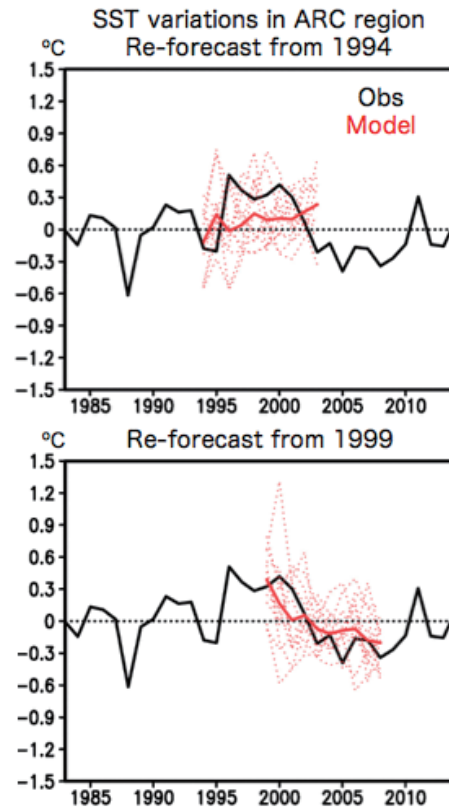


Fig. 2 Time series of yearly-mean SST anomalies (in °C) averaged in the Agulhas Return Current (ARC, black box in Fig. 1) region. Observation (black line) and 12-ensemble mean (thick red line) and each member's results (red dotted lines) obtained from the SINTEX-F2 model are shown, respectively. Prediction results initiated from 1994 are shown in the top panel, whereas those from 1999 are represented in the bottom panel.

from 1994. The re-analysis shows anticyclonic circulation anomalies to the south of southern Africa during 1994-1998 and its eastward movement and intensification in the ARC region during 1999-2003. The SINTEX-F2 model, although there exist some differences in the amplitude, reasonably captures the high-pressure anomalies to the south of southern Africa and its eastward movement in the ARC region.

The above results suggest that the SINTEX-F2 model has high skills in predicting decadal climate variability in the southern Indian Ocean (Morioka et al. 2018 [6, 7]). Since this model employs a simple SST-nudging scheme for initialization, it would enable us to explore predictability of decadal variability in the earlier period, especially in the Northern Hemisphere where better long-term observations are available. Also, further initialization of subsurface ocean temperature and salinity using the 3DVAR scheme may help improve the prediction skill in the southern Indian Ocean. Along this line, further studies exploring decadal predictabilities are underway.

Acknowledgement

We are grateful to Drs. Jing-Jia Luo, Sébastien Masson, Wataru Sasaki and other research institutes (INGV/CMCC, LOCEAN/IPSL, MPI-M) for developing a prototype of

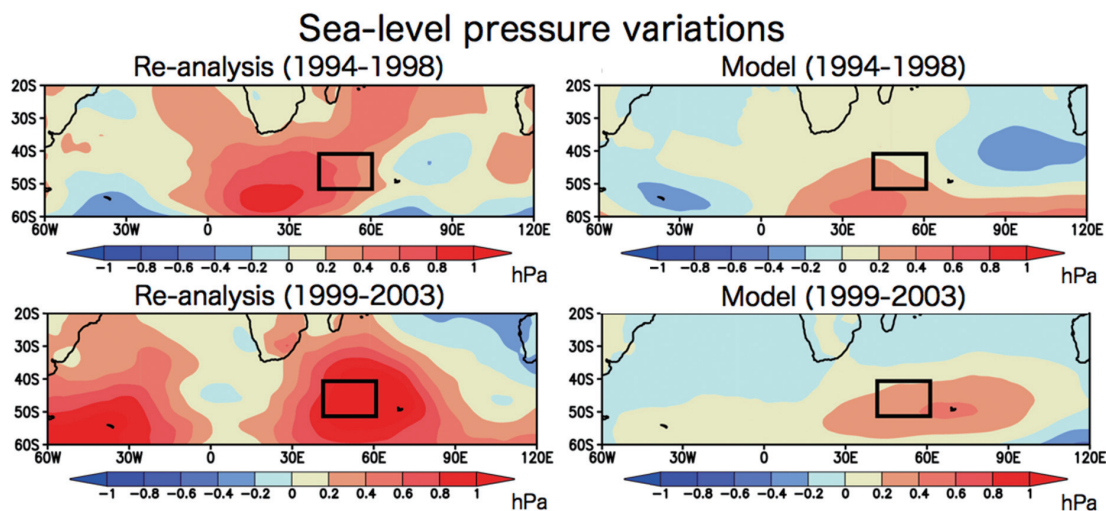


Fig. 3 5-yr mean sea-level pressure (SLP, in hPa) anomalies since 1994 from the re-analysis (left panel) and prediction results by the SINTEX-F2 model (right panel). Prediction results are based on 12-ensemble mean anomalies. Black box indicates the ARC region where the model shows high skills in predicting the observed SST.

SINTEX-F model. Also, we thank Dr. Andrea Storto (CMCC) for installing a 3DVAR data assimilation scheme. This work is supported by JSPS KAKENHI Grant Number (15K17768) and Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS) program of JAPAN International Cooperation Agency (JICA)/Japan Agency for Medical Research and Development (AMED).

References

- [1] J. J. Luo, S. Masson, S. K. Behera, S. Shingu, and T. Yamagata, “Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts,” *J. Climate*, vol.18, no.21, pp.4474-4497, 2005.
- [2] S. Masson, P. Terray, G. Madec, J. J. Luo, T. Yamagata, and K. Takahashi, “Impact of intra-daily SST variability on ENSO characteristics in a coupled model,” *Climate Dynamics*, vol.39, no.3-4, pp.681-707, 2012.
- [3] W. Sasaki, K. Richards, and J. J. Luo, “Impact of vertical mixing induced by small vertical scale structures above and within the equatorial thermocline on the tropical Pacific in a CGCM,” *Clim. Dyn.*, vol.41, no.2, pp.443-453, 2013.
- [4] T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata, “Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model,” *J. Adv. Model. Ear. Sys.*, vol.8, no.4, pp.1847-1867, 2016.
- [5] T. Doi, A. Storto, S. K. Behera, A. Navarra, and T. Yamagata, “Improved Prediction of the Indian Ocean Dipole Mode by Use of Subsurface Ocean Observations,” *J. Climate*, vol.30, no.19, pp.7953-7970, 2017.
- [6] Y. Morioka, T. Doi, and S. K. Behera, “Decadal climate predictability in the southern Indian Ocean captured by SINTEX-F using a simple SST-nudging scheme,” *Scientific Reports*, vol.8, no.1, 1029, 2018.
- [7] 森岡優志, 土井威志, ベヘラスワディヒン, “海面水温データで南インド洋の十年規模変動が予測可能に～アフリカ南部の防災や農業、感染症分野へ応用の可能性～”, JAMSTEC プレスリリース, 2018年1月28.

