

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

Behera Swadhin 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, 尾形 友道*¹, 土井 威志*¹, Swadhin 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がヨーロッパと共同で開発してきた気候モデル SINTEX-F2 を使った季節予測システムを、海氷に注目して高度化した。具体的には、気候モデルの海面水温と海氷密接度を観測データに近づけてから（初期化と呼ばれる）過去の気候を再び予測し直したところ、モデルの海面水温のみを観測データで初期化した実験に比べ、南半球春季に見られるウェッデル海の家氷変動を4ヶ月先まで高い精度で予測できることが分かった。また、海氷の予測精度の向上に伴い、ウェッデル海周辺の気温や風の変動もより現実近く予測できるようになった。

SINTEX-F2 を使った季節予測システムは、エルニーニョ予測について実績があるが、アンサンブル間の違いについては、よく分かっていなかった。そこで、エルニーニョ予測において、アンサンブルメンバー間で違いが現れる前兆に注目して解析を実施した。その結果、前冬の北太平洋での大気循環の不確かさが、13か月後のエルニーニョ予測の不確かさを生んでいる事を示唆できた。これは、エルニーニョ予測の精度を向上させるための貴重な情報である。

キーワード：季節予測、海氷予測、ウェッデル海、エルニーニョ予測、アンサンブル予測

1. 海氷データを用いて南極海の気候予測精度が向上

南極半島の東側に位置するウェッデル海は、他の南極海に比べて海氷の張り出しが大きいことが知られている（図1）。ウェッデル海では冷たく塩辛い南極底層水が生成され、地球規模の気候変動をもたらす海洋の熱塩循環を支えていることから、ウェッデル海の家氷変動を理解し予測することは極めて重要である。例えば、ウェッデル海の家氷が平年と比べて少なかった2010年は、南極半島で気温が平年よりも約2-3度上昇しており、南極氷床への影響も懸念されている。

1982-2016年の10-12月で平均した南極の家氷密接度（観測データ）

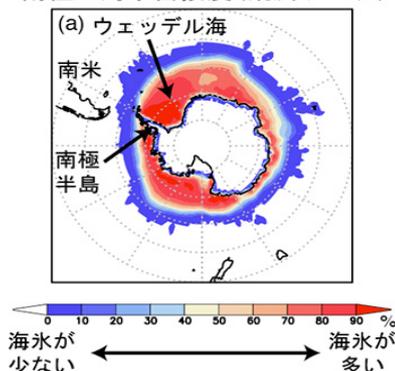


図1：1982-2016年の10-12月で平均した南極の家氷密接度（単位は%）。値が大きいほど、海氷が海面を覆う割合が多いことを表す。

近年の地球温暖化の影響を受けて、北極海では海氷が著しく減少しているが、ウェッデル海を含む南極海では海氷に有意なトレンドは見られず、一方で海氷の年々変

動が大きいことが報告されている。特に、南半球春季（10-12月）に海氷が衰退し始める時期に、ウェッデル海の家氷が平年に比べて大きく衰退すると、海氷による反射の効果が弱まって日射がより入りやすくなり、表面気温が上がって海氷がより衰退しやすくなることが報告されている。一方、ウェッデル海の家氷が上がることで、ウェッデル海の北側で気温の南北勾配が弱まり、大気の下層の安定度が強まる。これにより大気の大擾乱活動が抑えられ、高気圧の循環が維持されやすくなり、南大西洋など周辺の気温や風などに影響を及ぼすことが示唆されている。

このように、ウェッデル海の家氷変動が表面気温の変動を通して南大西洋など周辺の気候変動に影響を及ぼす仕組みは先行研究で報告されているが、数ヶ月先の気候変動予測に及ぼす影響は調べられていない。

そこで本研究では、気候モデル SINTEX-F2 を用いて、人工衛星で観測された海面水温を取り入れて再予測した実験（標準実験）と観測された海面水温と海氷密接度を取り入れて再予測した実験（海氷実験）を行い、2つの実験を比較することでウェッデル海の家氷や周辺の気候変動の予測精度に違いが見られないか、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を利用して海氷変動の影響について調べた。

まず始めに、標準実験と海氷実験における海氷密接度の予測精度を比較すると、海氷密接度の観測データを取り入れた海氷実験のほうが、ウェッデル海の家氷密接度を4ヶ月先まで高い精度で予測できていることが分かった（図2）。

10-12月の海水密度度の予測精度
(海水実験-標準実験)

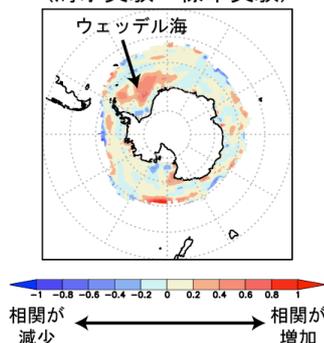


図2 気候モデル (SINTEX-F2) で 1982-2015 年の毎年 9 月 1 日から再予測した、10-12 月の海洋密度度の予測精度の差 (海水実験-標準実験)。予測精度は、気候モデルで計算された海水密度度の偏差 (平年値からのずれ) と観測データの海水密度度の偏差がどれくらい似ているか、両者の相関係数で見積もられている。暖色ほど気候モデルの予測精度が向上していることを表す。

次に、過去約 30 年間のデータの中からウェッデル海の海水が平年に比べて少ない年 (1996、1998、1999、2001、2010 年) を抽出し、海水や気候変動の予測精度について調べた。観測データで見られるウェッデル海の海水の異常な減少は、標準実験でもわずかに予測されているが、海水実験では振幅や空間分布がより大きく、より観測データに近く予測されていた。両者の差をとると、海水実験のほうがウェッデル海の海水の異常な減少をより良く捉えていることが分かった (図略)。

また、ウェッデル海の海水が少ない年における再解析値 (観測と数値予報モデルで推定された現実に近い値)、標準実験、及び海水実験のそれぞれの表面気温を比較すると、海水実験は標準実験よりも再解析値に近い値でウェッデル海の昇温を予測していた (図3)。

さらに、興味深いことに、ウェッデル海の異常な昇温は熱帯太平洋でラニーニャ現象を伴っていることが再解析値、標準実験及び海水実験から分かった。しかし、海水実験と標準実験の差を見ると、熱帯太平洋の海面水温に目立った違いが見られなかった。従って、ウェッデル海の異常な昇温を海水実験でより良く捉えられたのは、ラニーニャ現象の予測精度が向上したからではなく、ウェッデル海の異常な海水減少を海水実験でより良く予測できたためと考えられる。

最後に、海面気圧と地上風を比較した (図4)。ウェッデル海の海水が少ない年における再解析値では、ウェッデル海の北側で高気圧の循環が強まっているのが分かった。標準実験ではわずかに高気圧の偏差を予測できていたが、海水実験のほうが振幅と空間分布をより良く捉えられていることが、両者の差から見て分かった。熱帯太平洋に目立った気圧の変動が見られないことから、先行研究で指摘されているように局所的な海水の変動が表面気温の変動を通して大気循環場に影響を及ぼしていることが示唆された。

ウェッデル海の海水が少ない年
10-12月の表面気温の偏差

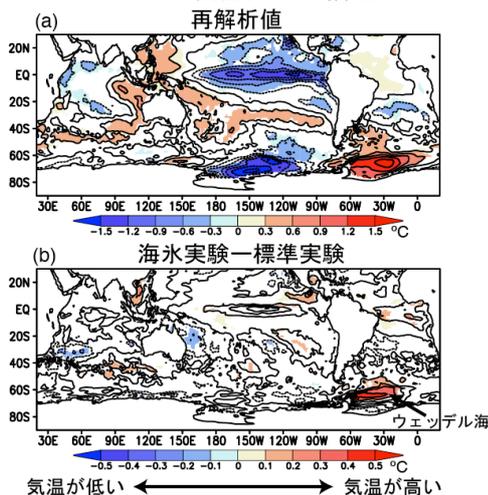


図3 (a) ウェッデル海の海水が少ない年 (1996、1998、1999、2001、2010 年) の 10-12 月に平均した、表面気温の偏差 (単位は°C) の再解析値。暖色ほど気温が平年に比べて高いことを表す。(b) (a)と同様に、ウェッデル海の海水が少ない年の 10-12 月について、気候モデル (SINTEX-F2) で 9 月 1 日から再予測した海水実験と標準実験の偏差の差。

ウェッデル海の海水が少ない年
10-12月の海面気圧と風の偏差

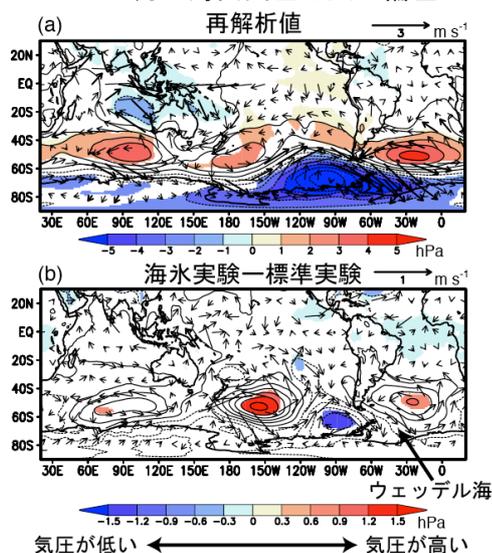


図4 (a) ウェッデル海の海水が少ない年 (1996、1998、1999、2001、2010 年) の 10-12 月に平均した、海面気圧 (カラーと等値線、単位は hPa) と地上 10m の風の偏差 (矢印、単位は $m s^{-1}$) の再解析値。暖色ほど気圧が平年に比べて高く、南半球では反時計周りに風が吹く。(b) (a)と同様に、ウェッデル海の海水が少ない年の 10-12 月について、気候モデル (SINTEX-F2) で 9 月 1 日から再予測した、海水実験と標準実験の偏差の差。

ウェッデル海を含む南極海など高緯度の気候変動は海水の影響を強く受けることから、気候モデルで海水変動を精度よく予測する必要がある。本研究では、観測さ

れた海水密度度を気候モデルに取り入れて再予測することで、ウェッデル海の海水変動だけでなく南大西洋など周辺の気候変動の予測精度を向上させることに成功した。本研究ではウェッデル海に着目したが、本研究で得られた知見や手法は、他の南極海や北極海など、海水が重要な役割をしている高緯度の気候変動予測に応用されることが期待される。

本研究では、海水の指標として海水密度度に着目した。これは人工衛星が打ち上がった 1980 年代から長期に渡り、地球全体で海水密度度の観測が行われるようになったこと、また、近年の研究で海水と気候変動の関係性が明らかになってきたことから検討が可能となったことに起因する。

しかし、海水密度度は局所的な風や気温など大気の変動だけでなく、海水の厚さや海水下部の水温などの変動にも影響を受けることから、海水密度度をさらに精度良く予測するためには、海水厚や海水下部の水温などの観測データを気候モデルに取り入れて予測する必要がある。海水厚や海水下部の観測データは未だ時空間的に十分ではないことから、今後は高緯度の海洋・海水観測の重要性を提唱していくとともに、観測データと海洋モデルで推定された再解析値を気候モデルに取り入れて予測するシステムの開発を行い、高緯度の気候変動予測の精度向上に資する研究を進めていく予定である。

一連の研究成果は、([1] Morioka et al. 2019, Scientific Reports)として発表され、JAMSTEC のホームページを通して、プレスリリースされた (https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20190225/)。

2. エルニーニョ予測のバラつきと中緯度大気の関係

季節のおおよその気候が平年と比べてどうなるかを予測することを季節予測と呼ぶ。熱帯域の海水温の平年値からのずれは、その直上で降水活動の異常を引き起こす。この熱帯域の降水活動の異常は「池に投げた石とその波紋」のように、北米やアジア、ヨーロッパなどの世界各地で大気循環の異常を引き起こす。例えば、赤道東太平洋で海水温が上昇するエルニーニョ時には、日本域では冷夏・暖冬になりやすいことが知られている。この「海水温→降水→大気循環」というストーリーから、熱帯域の海水温を正しく予測することが季節予測のテーマの一つとなっている。そういった意味では、「海が主役となる」とも言える (図5)。

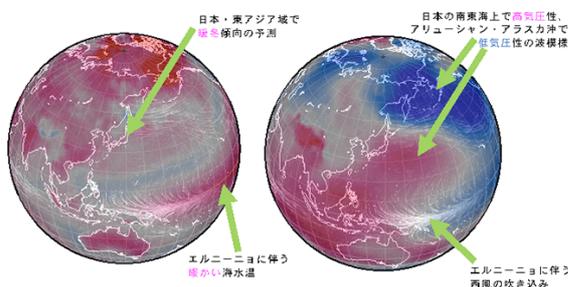


図5 JAMSTEC の季節予測モデル (SINTEX-F) で予測された、2018/19 年の冬の(左)地上気温/海面水温、(右)海面気圧の平年値からのずれ。

JAMSTEC のアプリケーションラボの SINTEX-F 季節予測システムにおいては、観測やシミュレーションの不確かさを考慮した「アンサンブル予測」と呼ばれる手法を用いている。すなわち、観測やシミュレーションの不確かさを考慮し、1つのシミュレーションからではなく、複数のシミュレーションを行う。複数のシミュレーションの平均を取ると(不確かさが消え)最もらしい結果が得られる。一方で、各々のシミュレーションの振れ幅は不確かさを示している。

従って、まず予報として注目されるのは、「アンサンブル平均」と呼ばれる値である。図6で見られるように、1997/98 及び 2009/10 のエルニーニョともに、太線のアンサンブル平均は(大きさを過小評価するものの)赤道東太平洋が暖かくなるというエルニーニョの傾向を捉えていることがわかる。

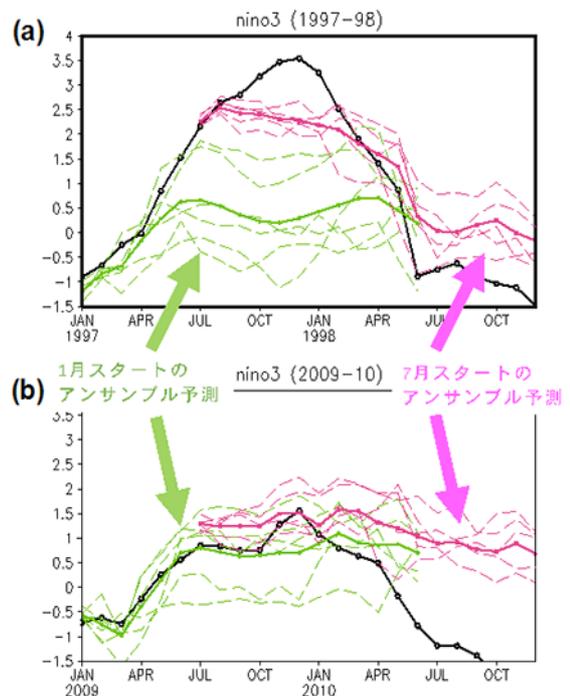


図6 : JAMSTEC の季節予測モデル (SINTEX-F2) で予測された、(a) 1997/98 及び (b) 2009/10 のエルニーニョ

一方、アンサンブル予測は1つのシミュレーションからではなく、現実の不確かさを考慮した複数のシミュレーションからできている。平均する前の1つ1つは細線で示されている。予測がバラついていることがわかる。エルニーニョを予測していないケースもあれば、大きなエルニーニョを予測しているケースもある。よく見ると、このバラつきは4月あたりから急に大きくなっているようにも見える。通常は「各々の予測がバラついている→信用できない」と考えがちだが、本研究では「何

か理由があって、各々がバラついているのではないか？」と考え、エルニーニョ予測における各々のバラつきの前兆を調べた。

「次の冬のエルニーニョ予測（13 か月後の予報）における、バラつきの前兆のシグナル」を、抽出するため、ラグ回帰と呼ばれる統計的な手法を使った。すなわち、前年冬から 13 か月後の冬（1 月）のエルニーニョ予測のバラつき（赤道東部太平洋での海水温の年平均値かつアンサンブル平均からのずれ）をターゲットとし、その前（1~13 か月後）の海面水温と海上風において、関連性の強い場所を統計的手法で抽出した。「主役（＝エルニーニョ予測のバラつき）」を操っている「黒幕（＝関連性の強い海面水温と海上風）」をあぶり出すために、良く用いられる手法である。

結果、その始まりは熱帯ではなく、前冬の北太平洋にあった（図 7）。前冬の北太平洋で低気圧性（反時計回り）の流れが年平均値に重なると、その 3 か月後の春にハワイの南に海水温の高い領域が形成される。その海水温に対して大気が応答し、暖かい海水温域に吹き込むような南西風が生じる。この南西風は赤道太平洋西部域にも及ぶ。この赤道での（南）西風が暖かい赤道域の水を西から東へ動かし、エルニーニョ域に海水温の高い領域を生む。

この事は「前冬の北太平洋での大気循環の不確かさ」が、「13 か月後のエルニーニョ予測のバラつき」を生んでいる事を示唆する。不確かさを減らすように北太平洋の大気循環の観測情報を適切に取り込む事で、今後のエルニーニョの予測精度が向上することが期待される。

この結果は *Climate Dynamics* 誌に受理された論文 ([2] Ogata et al. 2019) の主要部を抜粋したものである。

と国際協力機構 (JICA) が共同実施する地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) 「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」及び日本学術振興会科学研究費助成事業若手研究 (B) JP15K17768 の支援を受けて行われた。

セクション 2 の研究は住友財団研究助成 (2017 年度環境研究助成 : 助成番号 173070) の支援を受けた。

文献

[1] Morioka, Y., T. Doi, D. Iovino, S. Masina, and S. K. Behera, “Role of sea-ice initialization in climate predictability over the Weddell Sea”, *Scientific Reports*, 9, 2457, 2019.

[2] Ogata, T., T. Doi, Y. Morioka, and S. K. Behera “Mid-latitude source of the ENSO-spread in SINTEX-F ensemble predictions”, *Climate Dynamics*, 52, 2613–2630, 2019.

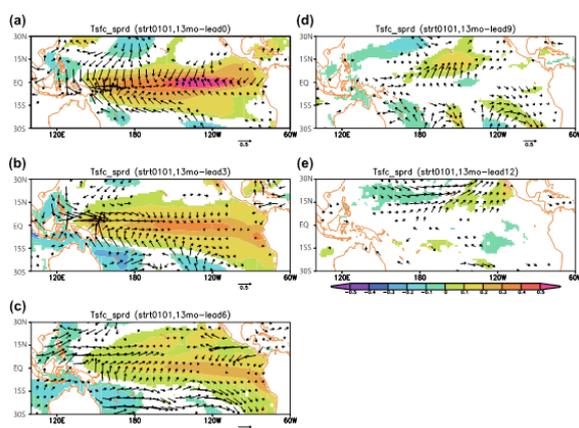


図 7 : JAMSTEC の季節予測モデル (SINTEX-F2) で予測された、次の冬のエルニーニョ予測 (13 か月後の予報) における、バラつきの前兆のシグナル (色は海面水温、矢印は海上風) : (a) 0 か月前 (=同年冬)、(b) 3 か月前 (=前年秋)、(c) 6 か月前 (=前年夏)、(d) 9 か月前 (=前年春)、(e) 12 か月前 (=前年冬)

謝辞

セクション 1 の研究は、日本医療研究開発機構 (AMED)

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

Yushi Morioka ^{*1}, Tomomichi Ogata ^{*1}, Takeshi Doi ^{*1}, Swadhin Behera ^{*1}

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

We have successfully improved prediction accuracy of sea-ice and climate variability over the Weddell Sea, one of the Antarctic Seas, by incorporating satellite data of sea-ice concentration into SINTEX-F2 prediction system developed at APL and performing re-forecast experiments over the past 30 years.

The ensemble spread of seasonal prediction is investigated in another SINTEX-F2 study to understand its role in the predictability of El Niño/Southern Oscillation (ENSO). Model results suggest that air-sea interaction related to the seasonal footprinting mechanism (SFM) is important for ENSO spread and the “spring predictability barrier”.

Keywords : Seasonal Prediction, Sea Ice Cover Prediction, Weddell Sea, El Niño Prediction, Ensemble Prediction

1. Sea-ice data improves climate prediction over the Antarctic Seas [1]

Weddell Sea, located east of the Antarctic Peninsula, is covered in the greatest extent of sea-ice among the Antarctic Seas during austral winter (Jul-Sep). Through the generation of cold and saline Antarctic Bottom Water, it plays an important role in maintaining the global ocean thermohaline circulation. In contrast to the Arctic Sea, which has witnessed a significant decrease in sea-ice cover due to the recent global warming, the sea-ice extent over the Antarctic Seas, including that over the Weddell Sea, has not shown a significant increasing or decreasing trend; rather, it has exhibited pronounced interannual variability. In particular, a recent study suggests that during austral spring (Oct-Dec), when the sea-ice starts to retreat, the lower-than-normal sea-ice cover over the Weddell Sea changes the surface-air temperature and surface wind in surrounding regions such as the Antarctic Peninsula and the South Atlantic. However, the potential impact of interannual sea-ice variability on seasonal climate prediction accuracy remains poorly understood.

To address this issue, we performed two types of re-forecast experiments over the past 30 years using a climate model (SINTEX-F2), which was originally developed as a collaboration between EU agencies and JAMSTEC. The control experiment (CTR) was set to the initialization of the model’s sea-surface temperature using the observation data, while the sea-ice restoring (SIR) experiment additionally incorporated the initialization of the model’s sea-ice concentration, which was derived from satellite observations. Compared to the CTR experiment, the SIR experiment shows significant improvement in terms of prediction skills needed

for predicting sea-ice concentration over the Weddell Sea up to four months ahead (Fig. 1) from the Sep 1st initialization.

Prediction skill difference of Oct-Dec SIC (SIR-CTR exp)

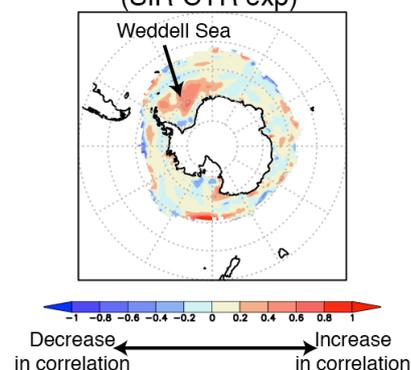


Figure 1: Differences in prediction skills of the Antarctic sea-ice concentration (SIC) during the Oct-Dec season between the SIR and CTR experiments, initialized every September 1st from 1982 to 2015. The skills were evaluated against the correlation between the SIC observation data and the predicted SIC anomalies.

It was also found that the improvement in the sea-ice prediction over the Weddell Sea during austral spring leads to corresponding improvements in the surface-air temperature and surface wind prediction for the surrounding regions (Fig. 2).

Oct-Dec SAT anomalies during low sea-ice years

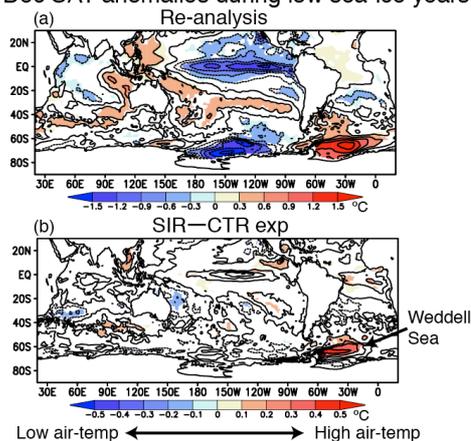


Figure 2: (a) Composite observed surface air-temperature (SAT, in °C) anomalies during the Oct-Dec season of the low sea-ice years (1996, 1998, 1999, 2001, 2010) in the Weddell Sea. (b) Differences between the SAT anomalies predicted in the SIR experiments and those in the CTR experiments.

Given that the extent of sea-ice cover influences the high-latitude climate variability over the Antarctic Seas, including that in the Weddell Sea, it is imperative to accurately predict sea-ice variability using climate models. The findings of this study underline the importance of sea-ice observations, which help improve the prediction skills of the climate models for sea-ice and climate variability at high latitudes. The scientific findings and initialization schemes developed in this study are applicable to high-latitude climate prediction in the Southern and Northern Hemispheres. The above results are published as a scientific paper [1] and press-released through the JAMSTEC website (https://www.jamstec.go.jp/e/about/press_release/20190225/).

2. Mid-latitude source of the ENSO-spread in SINTEX-F ensemble predictions [2]

The ensemble spread of seasonal prediction is investigated in this study to understand its role in the predictability of El Niño/Southern Oscillation (ENSO) based on the results of SINTEX-F2. In the results, the first ENSO precursor appears as a cyclonic wind anomaly over the central north Pacific in boreal winter (January). This is followed by warm SST, positive rainfall and cross-equatorial southerly wind anomalies in the northern hemisphere during spring (particularly in April). These anomalies in April are accompanied by westerly wind anomaly in the western equatorial Pacific. Finally, El Niño-like conditions with warm SST and positive rainfall anomalies become dominant in the ensemble standard deviation after boreal summer. The 500 hPa geopotential height suggests that stochastic atmospheric variability excites El Niño-like spread through air-sea interaction. The oceanic response in the form of upper heat

content (in the top 150 m) appears to result from the equatorial wind forcing during boreal spring and summer. These model results suggest that air-sea interaction related to the seasonal footprinting mechanism (SFM) is important for ENSO spread and the “spring predictability barrier”. The dependence of ENSO spread on the background ensemble-mean state is also investigated

Acknowledgement

The study in Section 1 was conducted with support from the Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS) of the Japan Agency for Medical Research and Development (AMED) and Japan International Cooperation Agency (JICA). It was also supported by the Grant-in-aid for early career scientist (B) program (IP15K17768) by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

For the study in Section 2, the authors would like to appreciate careful reading and constructive comments by Drs. Masami Nonaka, Bunmei Taguchi and Ingo Richter. Numerical experiments of SINTEX-F2 were executed on the Earth Simulator of the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). We are grateful to Drs. Wataru Sasaki, Jing-Jia Luo, Sebastian Masson, Andrea Storto, and our European colleagues of INGV/CMCC, L’OCEAN, and MPI for their contribution to developing the prototype of the 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, and JSPS KAKENHI Grant Number 16H04047 and 16K17810.

References

- [1] Morioka, Y., T. Doi, D. Iovino, S. Masina, and S. K. Behera, “Role of sea-ice initialization in climate predictability over the Weddell Sea”, *Scientific Reports*, 9, 2457, 2019.
- [2] Ogata, T., T. Doi, Y. Morioka, and S. K. Behera “Mid-latitude source of the ENSO-spread in SINTEX-F ensemble predictions”, *Climate Dynamics*, 52, 2613–2630, 2019.