

数ヶ月から数10年スケールの気候予測とそのアプリケーション

課題責任者

ベヘラ スワディヒン 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

著者

土井 威志*¹, 森岡 優志*¹, ベヘラ スワディヒン*¹

*¹ 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

本課題では、全世界を対象に、季節の異常を数ヶ月前から最大で10年先まで数値的に予測するシステム(SINTEX-F 気候予測システム)を更に発展させると共に、その準オペレーショナルな運用と社会応用可能性研究も実施する。物理変数だけでなく、作物収量、感染症流行、海洋生態系の予測などの付加価値情報を創生する。本年度は、特に、三つの成果を創出した。

第一に、海氷の密接度(海氷が海面を覆う割合)と海氷厚の再解析プロダクトを用いて、海氷を予測するシステムを開発した。その結果、南極海の1つであるウェッデル海(南極半島の東)において、夏の海氷の密接度を半年前の冬から高い精度で予測することに成功した。改善された予測システムは、南極海のみならず、北極海への海氷予測の改善にも貢献することが期待される。

第二に、インド熱帯気象研究所(IITM)のMMCFS 季節予測システムと SINTEX-F 季節予測システムを組み合わせたマルチモデルアンサンブル予測システムを構築することで、インド夏季モンスーンの予測精度を改善できることを明らかにした。

第三に、ペルー沖で新たに見出された沿岸ニーニョタイプの地域気候変動モードであるチリニーニョ・チリニーニョの発生を、SINTEX-F 気候予測システムで、ある程度予測できることを明らかにした。

キーワード: 季節予測, 海氷予測, 海氷厚, インド洋夏季モンスーン, チリニーニョ・ニーニョ

1. 南極海の夏の海氷を半年前から予測することに成功 —冬の海氷の厚さが鍵を握る—

地球温暖化の影響を受けて減少を続ける北極海と異なり、南極海はロス海(南太平洋)などで増加しており、海氷変動の物理プロセスや将来予測に関する研究が近年盛んに行われてきた。南極海の中でも南極半島の東に位置するウェッデル海は、海洋の熱塩循環の起源の1つである南極底層水の形成域として知られ、海氷の変動が南極底層水の形成の変動を通して全球の気候に長期的に影響を与える可能性がある。

ウェッデル海は、人工衛星の観測が始まった1980年代から現在まで長期的な傾向を示していないが、季節・経年変動は大きく、変動の物理プロセスを調べる研究が行われてきた。近年著者らが行った研究で、海氷の経年変動が大きくなる10-12月について、海氷の密接度を高い精度で予測するには、気候モデルの海面水温に加え、海氷の密接度を観測データに近づけて予測を行う必要があることがわかった[1]。しかし、この研究では9月から海氷の予測を開始しており、予測期間は2-4ヶ月前に限られ、海氷を高い精度で予測する期間を延ばすためには更なる改良が欠かせない。1つの方法として、気候モデルの海氷厚の初期化が挙げられる。海氷厚が厚い氷ほど海氷は長く残りやすい傾向があるため、気候モデルの海氷厚を現実に近い値に近づけて(初期化して)から予測を行うことで、海氷の予測期間を延ばせる可能性がある。

そこで、本研究では海氷の予測が難しい夏に着目して、気候モデルの海氷厚を再解析プロダクトの海氷厚に近づ

けて、海氷を予測するシステムを開発し、海氷の予測精度が向上するか、調査を行った。

図1は南半球の夏(1-3月)の海氷密接度と海氷厚を示す。海氷密接度(図1a)は南極海の中でウェッデル海が最も大きく、特にウェッデル海の南西部で大きいことが特徴である。同様に、海氷厚(図1b)はウェッデル海で最も厚く、数十cmから1mほどとなっている。夏にウェッデル海で厚い海氷が残りやすいことから、他の海域に比べてウェッデル海は海氷が予測しやすいことが予想される。

そこで、SINTEX-F2 季節予測システムを用いて、モデルの海氷密接度を再解析プロダクトの密接度に近づけて(初期化して)予測した実験と、モデルの海氷密接度と海氷厚を再解析プロダクトで初期化して予測した実験を行った。予測期間は1986-2017年の毎年7月から1年先までである。

図2は7月から予測を開始した、翌年1-3月の海氷密接度の予測精度を表す。ここで、予測精度は観測データの海氷密接度との相関係数を用いて評価され、相関係数が正の値で大きくなるほど、予測された海氷密接度の平年差(平年値からのずれ)が観測データと同じ符号をもつ傾向が高いことを示す。また、紫線は海氷の密接度が15%となる、海氷の北端を示す。

海氷密接度を初期化した実験を見ると(図2a)、ウェッデル海の北部で海氷密接度の予測精度が高いことがわかる。さらに、海氷厚を初期化した実験を見ると(図2b)、ウェッデル海の南部でも海氷密接度の予測精度が増加していることがわかる。この傾向は、2つの実験の差をとっ

た図2cからも明らかである。

また、予測精度が向上した原因を調べるため、ウェッデル海で海水が少ない年（1999, 2000, 2002, 2006, 2007, 2009, 2011, 2017年）に注目して解析を行った。図3は、海水が少ない年の1-3月に平均した海水密度の年差を示す。観測データを見ると（図3a）、ウェッデル海の北部で海水密度が年間に比べて少ないことがわかる。モデルの海水密度を初期化した実験では（図3b）、ウェッデル海の北部で海水の減少を予測できていなかった。一方、モデルの海水密度と海水厚を初期化した実験では（図3c）、ウェッデル海の北部で海水の減少を予測できていた。2つの実験の差をとると（図3d）、ウェッデル海の北西部（図3dの黒枠）で海水の減少をより良く予測できていることがわかった。

そこで、ウェッデル海の北西部において、海水が少なかった年について、予測を開始した7月から翌年3月まで、海水密度と海水厚の年差を計算した（図4a）。破線がモデルの海水密度を初期化した実験、実線がモデルの海水密度と海水厚を初期化した実験である。海水密度の年差を見ると（黒線）、7月から10月まで2つの実験に大きな差は見られないが、11月から翌年2月まで差が見られる。一方、海水厚を見ると（赤線）、7月から10月まで2つの実験に差は見られ、11月から翌年2月にかけて差が大きくなっていることがわかった。

モデルの海水密度と海水厚を初期化した実験について、海水厚の変動の原因を調べるため、海水厚の時間変化率の収支を調べた（図3b）。ここで、海水厚の時間変化率は東西、南北からの海水厚の移流の効果と、鉛直の効果（海水面や海水下からの熱フラックスなど）に分けられる。正味の海水厚の時間変化率（図3bの黒線）を見ると、7月から11月にかけて負の値となっていた。7-8月は東西や南北から海水厚の移流の効果が寄与しており、モデルの海水厚の初期化の影響が持続していることが考えられる。一方、10月には鉛直の効果が寄与しており、海水の減少に伴い、海水面から日射が入りやすくなったことで、海水厚が薄くなっていることが示唆される。また、海水下の水温も上昇しており、海水下から海水を温めて、海水厚が薄くなりやすい傾向にあることがわかった。

これらの結果は、気候モデルの海水厚を初期化することで、現実に近い海水厚の情報が最初の数ヶ月は持続し、その後、大気・海洋・海水の相互作用（海水・アルベドフィードバック）によって海水厚の変動が発達し、半年先の夏の海水を気候モデルで予測することができることを意味している。

本研究により、気候モデルの海水密度だけでなく海水厚を現実に近い値に近づけて（初期化して）予測を開始することで、南極海（特にウェッデル海）の夏の海水を半年前の冬から高い精度で予測できることがわかった。しかし、南極海の海水厚の観測は時空間的に少なく、予測に利用できるデータが限られている。船舶などを用いた現場観測に加え、人工衛星を用いた海水厚の観測も最近は行われているが、データの種類によって海水厚の値が異

なり、より精度の高い観測が求められている。

本研究では、海水が薄くなる夏の海水予測を実験したが、海水が張り出す冬の海水予測も重要である。冬の海水について夏から同じ実験を行ったところでは、半年先の冬の海水密度の予測精度に大きな違いは見られなかったが、海水下の海洋環境が影響するという報告もあり、現在新たなモデルの開発を進めている。

最後に、本研究では南極海の海水の予測精度に注目したが、北極海の海水予測の研究にも応用することができる。特に、夏の海水予測は北極海航路の推定に欠かせない。JAMSTECでは今年度から北極域研究船の建造に着手しており、北極域の海洋や海水に関する観測やシミュレーション研究がさらに一層行われる予定である。気候モデルの結果を現場観測のデータと比較することで、気候モデルの改良を行い、より高い精度で長い期間で、海水を予測するシステムの開発を今後行っていきたいと考えている。以上の成果は、Scientific Reportsで発表し[2]、プレスリリースを行った[3]。

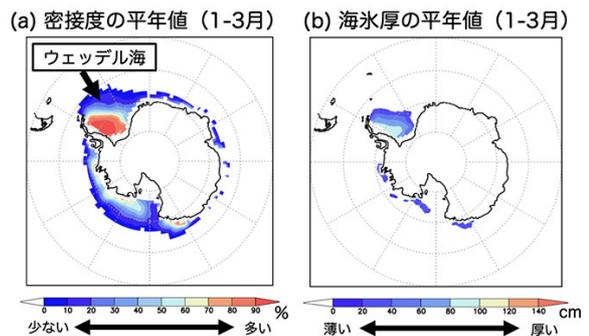


図1 (a) 海水の密度（海水が海面を覆う割合、単位は%）の年平均值（1-3月）。期間は1986-2017年。観測データ（OISSTv2）を使用。(b) 海水厚（単位はcm）の年平均值（1-3月）。再解析プロダクト（C-GLORSv7）を使用。ウェッデル海で密度が多く、海水厚が厚い。

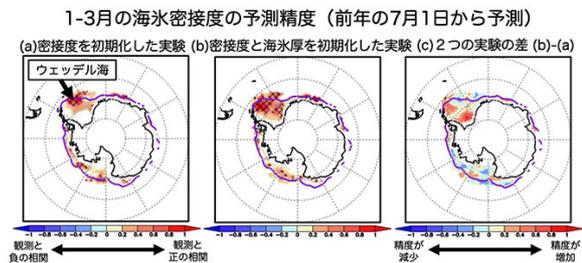


図2 1-3月の海水密度の予測精度（前年の7月1日から予測した場合）。期間は1987-2018年。予測精度は観測データとの相関係数（単位はなし）で表され、正の相関は予測結果が観測データと同じ符号をもつ傾向が高いことを意味する。網目は統計的に有意な相関を示す。紫線は密度が15%となる、海水の北端に対応する。(a) 気候モ

デルの海水氷接度を初期化して予測した実験。(b)モデルの海水氷接度と海水厚を初期化して予測した実験。(c)2つの実験の差((b)-(a))。ウェッデル海で予測精度が高く、海水氷接度と海水厚を用いた実験のほうが予測精度が高い。

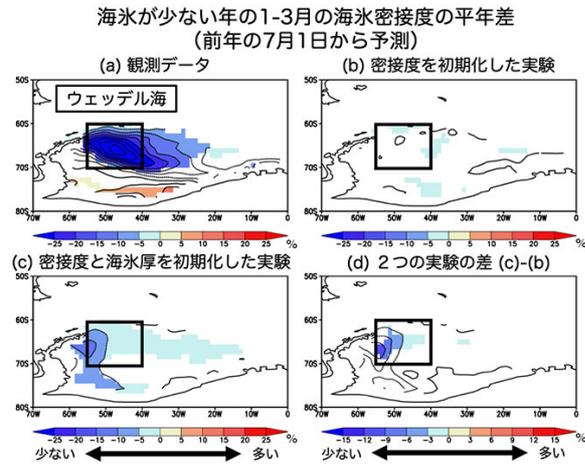


図3 ウェッデル海の海水氷が少ない年(1999, 2000, 2002, 2006, 2007, 2009, 2011, 2017年)で平均した1-3月の海水氷接度の平年差(前年の7月1日から予測、単位は%)。(a)観測データ(OISSTv2)の結果。黒枠はウェッデル海で対象とする海域(西経55度-40度、南緯70度-60度)。(b)気候モデルの海水氷接度を初期化して予測した実験。(c)モデルの海水氷接度と海水厚を初期化して予測した実験。(d)2つの実験の差((c)-(b))。海水氷接度はウェッデル海で少なく、海水氷接度と海水厚を用いた実験のほうがより少なく、観測データに近い。

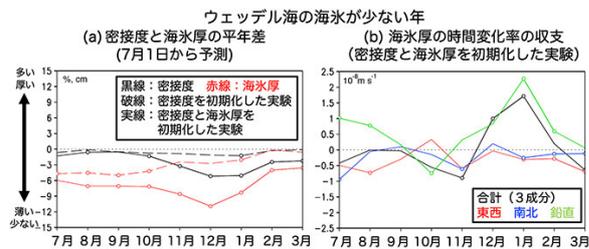


図4 (a) ウェッデル海の海水氷が少ない年で平均した海水氷接度の平年差(7月1日から予測)。黒線が海水氷接度、赤線が海水厚、破線が気候モデルの海水氷接度を初期化して予測した実験、実線がモデルの海水氷接度と海水厚を初期化して予測した実験を表す。丸印は統計的に有意な値を示す。7-10月において、2つの実験で海水氷接度に違いは見られないが、海水厚に違いが見られる。11月-翌2月において、両者の違いは大きくなる。(b)モデルの海水氷接度と海水厚を用いて予測した実験について、海水厚の時間変化率の収支。黒線が合計(3成分)、赤線が東西の移流の効果、青線が南北の移流の効果、緑線が鉛直の効果を表す。7-8月は東西や南北の移流の効果が、10月は鉛直の効果が海水厚の減少に寄与している。

2. インド夏季モンスーンのパredict精度を改善

インドやその周辺国に影響を与えるインド夏季モンスーンのパredict精度を改善するため、数ヶ月前からその変動を予測し、想定される被害を軽減するために備えることは重要である。

本研究では、インド夏季モンスーンに注目し、インド熱帯気象研究所(IITM)のMMCFS季節予測システムとJAMSTEC/APLのSINTEX-F季節予測システムの二つのシステムで予測精度を比較した。

まず、2月から予測した夏(6-8月平均)の気候値予測に注目した(図5)。SINTEX-F気候予測システムでは、熱帯太平洋中央部に、強い冷水温バイアスがあるが、インド夏季モンスーンのパredict精度をよく予測できていた。一方で、MMCFS季節予測システムでは、熱帯太平洋のやや赤道から離れた地域に高温バイアスが見られ、インド夏季モンスーンのパredict精度を過小評価していた。

次に、インド夏季モンスーンのパredict精度を評価した。相関係数スキル(1に近いほど予測精度が高い)で見ると、SINTEX-F気候予測システムでは0.45、MMCFS季節予測システムでは0.53であり、後者のシステムがわずかに高性能であった。一方で、最小2乗誤差で見ると、SINTEX-F気候予測システムでは1.43 mm/day、MMCFS季節予測システムでは2.34 mm/dayであり、前者のシステムが高性能であった。

異なるバイアス、特徴を持つ二つのシステムを、組み合わせたマルチモデルアンサンブル予測システムを構築することで、予測が改善できることを明らかにした。

以上の成果は、International Journal of Climatologyで発表した[4]。

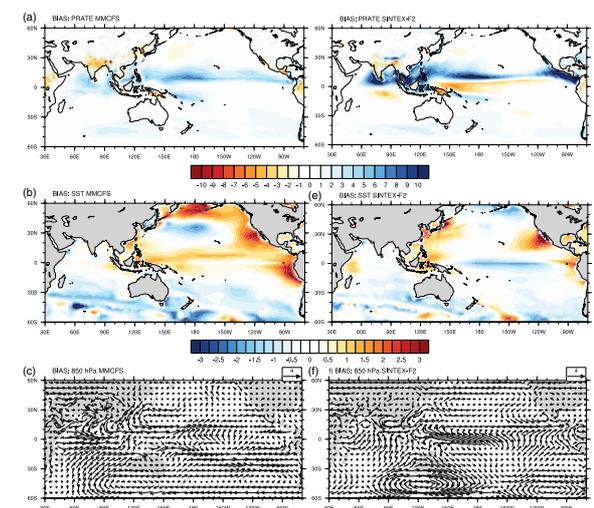


図5 夏季(6-8月平均)のモデルバイアス(1983-2015平均)。MMCFS季節予測システムの(a)降水量(mm/day)、(b) SST(°C)、(c)東西風速(m s⁻¹)バイアス。(d-f)は、SINTEX-F気候予測システムのバイアス。

3. チリニーニョ・チリニーニャの季節予測可能性

チリニーニョ・チリニーニャは、チリ北西岸に発生する

エルニーニョ・南方振動(ENSO)タイプの気候の内部変動現象で、沿岸の大気-海洋-陸面の相互作用で発達する。チリニーニョ・チリニーニャは、海洋生態系システムだけでなく、南アメリカの気候にも影響を与える。例えば、2015年3月に発生したチリの大洪水も、チリニーニョが影響していたと考えられる。従って、チリニーニョ・チリニーニャの発生を数ヶ月前から予測し、想定される被害を軽減するために備えることは重要である。

SINTEX-F 季節予測システムの過去再予測実験の結果から、チリニーニョ・チリニーニャの発生を数ヶ月前から予測することが可能であることが示された(図6)。特に、チリニーニョ・チリニーニャの予測には、チリ東岸域の大気-海洋-陸面の複雑な相互作用を現実的にシミュレートすることが重要であることを示した。

以上の成果は、Geophysical Research Letters で発表した[5]。

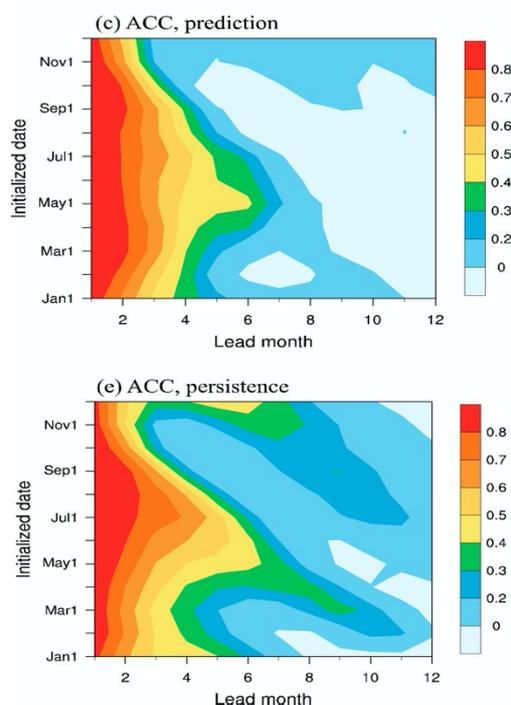


図6 上：チリニーニョ・ニーニャ指標(35-20S, 80-70Wで領域平均した海面水温偏差)の予測精度(相関係数スキル)の季節依存性。縦方向が、予測開始日、横方向が予測リード月。1984-2015年の過去再予測実験の結果より評価。下：Persistent 予測の精度(自己ラグ相関係数)。

謝辞

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, LOCEAN/IPSL, and MPI-Mのモデリングチーム)に多大なる貢献をして頂いた。

文献

[1] Morioka, Y., Doi, T., Iovino, D. et al., “Role

of sea-ice initialization in climate predictability over the Weddell Sea”, Sci. Rep. 9, (2457), (2019年2月).

[2] Morioka, Y., Iovino, D., Cipollone, A. et al., “Summertime sea-ice prediction in the Weddell Sea improved by sea-ice thickness initialization”, Sci. Rep. 11, (11475), (2021年6月).

[3] 森岡ら「南極海の夏の海水を半年前から予測することに成功—冬の海水の厚さが鍵を握る—」、JAMSTEC プレスリリース (2021年6月9日)、https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20210609/

[4] Pradhan, M., Rao, S. A., Doi, T., Pillai, P. A., Srivastava, A., & Behera, “Comparison of MMCFS and SINTEX-F2 for seasonal prediction of Indian summer monsoon rainfall”, International Journal of Climatology, 41(13), 6084-6108, (2021年5月).

[5] Xue, J., Doi, T., Luo, J.-J., Yuan, C., & Yamagata, T., “Predictability of the Chile Niño/Niña”, Geophysical Research Letters, 48, e2021GL095309, (2021年10月).

Seasonal to Decadal Prediction and Its Application

Project Representative

Swadhin Behera Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

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

^{*1} Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

A sea ice prediction system based on the SINTEX-F2 model has been successfully developed using sea ice concentration and sea ice thickness reanalysis products. Summertime sea ice concentration in the Weddell Sea (east of the Antarctic Peninsula) can be predicted from the winter season with high accuracy.

A comparison of the Indian summer Monsoon Rainfall (ISMR) in two different coupled models (SINTEX-F2 and MMCFS) is carried out to ascertain the predictability sources in these models and their strengths and weaknesses.

Using the SINTEX-F2 seasonal prediction system, it is shown that the Chile Niño/Niña can be skillfully predicted up to 3-month ahead.

Keywords : Seasonal prediction, sea ice prediction, sea ice thickness, Indian summer Monsoon Rainfall, Chile Niño/Niña

1. Accurate Prediction of Summertime Sea Ice in the Antarctic Ocean from Previous Winter Conditions — Winter Sea Ice Thickness is Key to the Prediction—

Many researchers have been studying physical processes underlying sea ice variability and predictability due to the contrast between decreasing Arctic sea ice and increasing Antarctic sea ice. The Weddell Sea, located east of the Antarctic Peninsula, is one of the key regions for active formation of the Antarctic Bottom Water that potentially affects the global climate through the thermohaline circulation.

Although the sea ice extent in the Weddell Sea has not shown an increasing trend since the 1980s (when the satellite observation data became available), the sea ice cover experiences distinct seasonal and year-to-year variations. Morioka et al. (2019) [1] has recently reported that sea ice variability during October-December can be accurately predicted from September data by initializing the climate model's sea ice concentration (SIC) with the observed SIC. However, their methodology showed very limited ability, with only a few months of prediction lead time. Therefore, further improvement was necessary in the prediction strategy to extend the lead time beyond one season. The team thought that one plausible way would be to initialize the sea ice thickness (SIT) in addition to the SIC in the climate model. Since thicker sea ice generally tends to last longer, there seemed a high possibility of extending the prediction lead time to more than one season using the SIT initialization.

To explore the impact of SIT initialization on the sea ice prediction, two hindcast (i.e., retrospective) experiments during 1986-2017 were conducted using the SINTEX-F2 model on the Earth Simulator. In the first experiment, only the model's SIC was initialized with the one from the reanalysis product, while in the second experiment, both the model's SIC and SIT were

initialized.

Figure 1 shows the accuracy of the January-March mean SIC anomalies prediction from July 1st. Here, the prediction accuracy is evaluated using the correlation coefficients between the observed and predicted SIC. In the first experiment with only the SIC initialization (Fig. 1a), the prediction accuracy is high only in the northern Weddell Sea, whereas the second experiment (Fig. 1b) shows higher accuracy in the southern Weddell Sea as well. The improvement in sea ice prediction is also evident from the difference in prediction accuracy between the second and the first experiments (Fig. 1c).

Although this study highlights the importance of SIT, its observation in the Antarctic Ocean is spatio-temporally limited. In addition to the in-situ observation of SIT using research vessels, satellite observation data of sea ice thickness has become available in recent years. Since large differences exist in the SIT based on satellite observations, more accurate observations of SIT are indispensable.

The content was published as Morioka et al. 2021 [2] and press-released [3]

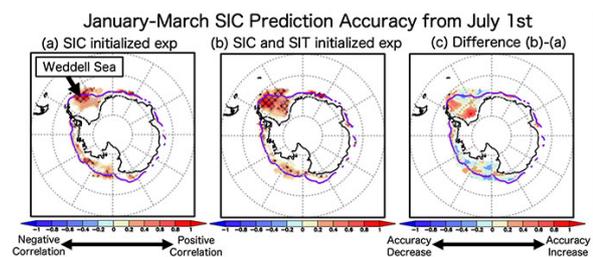


Figure 1: (a) January-March SIC prediction accuracy from July 1st in the SIC initialized experiment. Prediction accuracy is evaluated using the correlation coefficients between the observed and predicted SIC anomalies. Hatches indicate statistically significant correlation coefficients. The purple line corresponds

to the northern edge of sea ice defined as 15% of SIC. (b) Same as in (a), but for the SIC and SIT initialized experiments. (c) Difference in the SIC prediction accuracy between the two experiments (i.e., (b)-(a)).

2. Comparison of MMCFS and SINTEX-F2 for seasonal prediction of Indian summer monsoon rainfall

A comparison of the Indian summer Monsoon Rainfall (ISMR) in two different coupled models (viz., Scale Interaction Experiment-Frontier-F2; SINTEX-F2, and Monsoon Mission Climate Forecast System; MMCFS) is carried out to ascertain the predictability sources in these models and their strengths and weaknesses. SINTEX-F2 has a stronger cold sea surface temperature (SST) bias in the central equatorial Pacific, and it simulates mean ISMR better while underestimating the interannual variability of ISMR. On the other hand, MMCFS has warmer SST bias in the tropical Pacific off the equator, simulates a drier mean monsoon, but has a more realistic ISMR interannual variability. Further, the cold SST bias in the central tropical Pacific adversely affects the ability of the SINTEX-F2 to capture the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) related interannual variability and teleconnection patterns with monsoon by shifting it further westward in the tropical Pacific Ocean. The models' skill in simulating various climate indices are compared by considering criteria such as anomaly correlation coefficient (ACC), spread to root mean square error (RMSE) ratio, and signal to noise ratio (SNR). The prediction skill for ISMR in terms of ACC in MMCFS (.53) and SINTEX-F2 (.45) are comparable for hindcasts initialized in February month. However, RMSE for ISMR from February initial conditions in SINTEX-F2 (1.43 mm/day) is small compared to MMCFS (2.34 mm/day). A simple multi-model ensemble prediction system based on MMCFS and SINTEX-F2 results in better prediction skill in terms of ACC for tropical SST and ISMR. The spread/RMSE ratio for ISMR is similar in both the models but is better for ENSO indices in MMCFS at a longer lead time than in SINTEX-F2. Considering the SNR as performance criteria, MMCFS has an advantage due to better predictability of SST and vertical wind shear in several parts of the Indo-Pacific domain.

The content was published as Pradhan et al. 2021 [4].

3. Predictability of the Chile Niño/Niña

The recently discovered Chile Niño/Niña is an intrinsic coupled climate mode in the southeast Pacific, which influences both regional climate and marine ecosystem. Using the Scale Interaction Experiment-Frontier version 2 seasonal prediction system, it is shown that the Chile Niño/Niña can be skillfully predicted up to 3-month ahead. Although the occurrences and related climate impacts of the Chile Niño/Niña are captured by the prediction system, the predicted magnitudes are weaker than observations in the ensemble mean. Further analyses of the inter-

member relationships indicate that the Chile Niño/Niña predictability depends on how well the coastal ocean-atmosphere-land positive feedback among alongshore surface winds, coastal upwelling and the SST anomalies is captured. The insufficient reproduction of this essential feedback is responsible for the underestimated magnitude. Therefore, accurately predicting the Chile Niño/Niña remains a challenge. Improving model resolution and ensemble size may be a key to enhancing prediction skills of the coastal climate modes along the eastern boundary upwelling systems.

The content was published as Xue et al. 2021 [5].

Acknowledgement

We are sincerely grateful to Drs. Wataru Sasaki, Jing-Jia Luo, Sebastian Masson, Andrea Storto, Antonio Navarra, Silvio Gualdi and our European colleagues of INGV/CMCC, L'OCEAN, and MPI for their contributions in developing the prototype prediction system.

References

- [1] Morioka, Y., Doi, T., Iovino, D. et al., “Role of sea-ice initialization in climate predictability over the Weddell Sea”, *Sci. Rep.* 9, (2457), (2019 年 2 月).
- [2] Morioka, Y., Iovino, D., Cipollone, A. et al., “Summertime sea-ice prediction in the Weddell Sea improved by sea-ice thickness initialization”, *Sci. Rep.* 11, (11475), (2021 年 6 月).
- [3] Morioka et al. “Accurate Prediction of Summertime Sea Ice in the Antarctic Ocean from Previous Winter Conditions—Winter Sea Ice Thickness is Key to the Prediction—”, *Journal of Geophysical Research*, Jun 6, 2021. https://www.jamstec.go.jp/e/about/press_release/20210609/
- [4] Pradhan, M., Rao, S. A., Doi, T., Pillai, P. A., Srivastava, A., & Behera, “Comparison of MMCFS and SINTEX-F2 for seasonal prediction of Indian summer monsoon rainfall”, *International Journal of Climatology*, 41(13), 6084– 6108, (2021 年 5 月).
- [5] Xue, J., Doi, T., Luo, J.-J., Yuan, C., & Yamagata, T., “Predictability of the Chile Niño/Niña”, *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL095309, (2021 年 10 月).