

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 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, Behera Swadhin *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

アプリケーションラボでは、地球シミュレータを使った季節予測シミュレーション「SINTEX-F」を開発してきた。毎月準リアルタイムに、世界各地の季節の不順(日々の天気を数ヶ月間平均した気候場の異常。例えば、猛暑、暖冬、多雨、少雨など)について数ヶ月前から事前に予測(季節予測と呼ぶ)した情報を配信している。しかし、日本を含め、東アジアの冬の予測の精度は低いのが現状である。それにも関わらず、2019年から2020年にかけての日本の記録的な暖冬の予測は的中した。そこで、その理由を検証したところ、2019年に発生した過去最強クラスの正のインド洋ダイポールモード現象の影響が重要であることを示した。

この成果を契機に、極めて強いインド洋ダイポールモード現象が東アジアの冬に影響するプロセスの理解が進むと共に、それらの予測情報を基盤とした農業や感染症等に関する応用研究が展開されることも期待される。

本成果は、米国地球物理学連合の「Geophysical Research Letters」オンライン版に Doi et al. (2020a) [1] として 2020 年 9 月に掲載された。

キーワード： 季節予測, スーパーインド洋ダイポールモード現象, 記録的暖冬, アンサンブル共変動

1. 温暖化世界で益々重要になる季節予測

アプリケーションラボでは、ヨーロッパとの共同研究によって、大気-海洋-陸面-海氷のそれぞれの物理過程やその相互作用を表現する気候モデル「SINTEX-F」を基盤とした季節予測システムを開発し、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を使って、数ヶ月後の熱帯の海水温の変動や、それに伴う季節の不順(例えば、猛暑、暖冬、干ばつ等)を、数ヶ月前から事前に予測シミュレーションする研究に取り組んできた(毎月更新しており、最新の予測情報は以下のサイトから確認できる：<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.html>)。

過去のデータを解析すると、季節の不順は、数年に1度自然に発生することが確認できる。一方で、近年、人為起源とされる温暖化の進行で、従来の乾燥(湿潤)地域がさらに乾燥(湿潤)化しつつある。そのような状況下で、季節の不順が自然発生すると、従来よりもその影響が極端化し、人類の安全・安心を脅かす事例が頻発化してきた。

従って、進行中の温暖化を背景として、数ヶ月程度先の季節の異常変動を予測する技術と、それを基盤とした適応策の探索は、ますます重要になっている。

2. 2019/2020年の記録的暖冬について

2019年から2020年にかけて、日本は記録的な暖冬に見舞われ、社会・経済は大きく混乱した。特に、記録的な小雪により、スキー場などの冬のレジャー施設は多大な影響を受けた。このような極端な暖冬を、数ヶ月前から事前に予測することができれば、予想される被害を軽減するための対策することができるかもしれない。

JAMSTEC アプリケーションラボでは、季節予測シミュレーション「SINTEX-F」を、毎月準リアルタイムに運用している。しかし、日本を含む、東アジアの冬の予測精度は低いのが現状である(図1)。

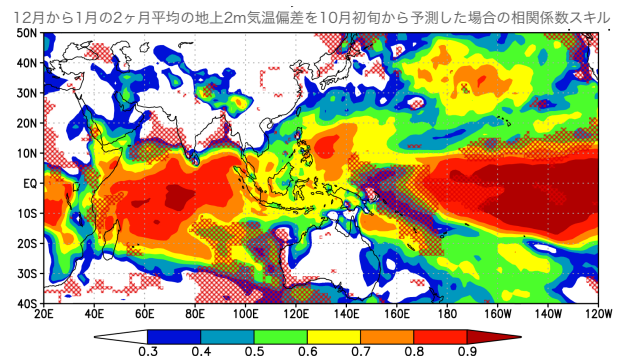
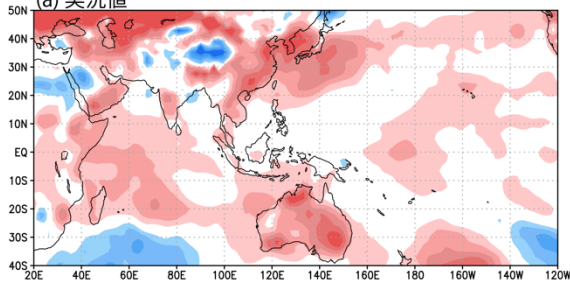


図1: 12月から1月の2ヶ月平均の地上2m気温偏差を10月初旬から予測した場合の相関係数スキル。1に近いほど予測スキルが高い。SINTEX-F2 季節予測システム(Doi et al. 2019[2])による1983-2015年の過去再予測実験の結果で、108アンサンブルメンバーの平均値とNCEP/NCAR再解析データの値から計算した。Persistent 予測の予測スキル(自己ラグ相関係数)より低い値は赤色で網掛けをした。

それにも関わらず、2019年から2020年にかけての日本の暖冬予測は的中した(図2)。

何故、2019年-2020年の冬の事例は予測が可能だったのか? その理由を探索するため、予測アンサンブルメンバーの「共変動」に注目した。

2019年12月から2020年1月で平均した地上2m気温偏差(°C)
(a) 実況値



(b) 2019年10月初旬からの予測値

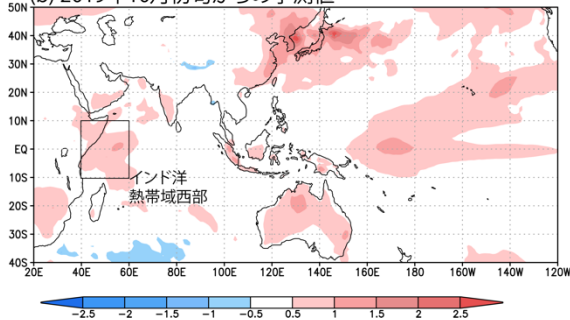


図2: (a) 2019年12月から2020年の1月の2ヶ月間で平均した地上2m気温の偏差の実況値(NCEP/NCAR再解析データ)。単位は°C。(b) 2019年10月初旬時点での予測値(108アンサンブルの平均値)。

3. 108 アンサンブル予測メンバーの共変動

アンサンブル手法(僅かに条件が違う予測シミュレーションを複数回繰り返す手法)を使った予測シミュレーションの各々の結果の「バラツキ」に対し、何らかの物理的構造や制御プロセスを持つ「共変動」が無いかを調べた。このような解析は、エルニーニョ現象の予兆やインド洋ダイポールモード現象の予兆を調べる研究で実績がある(Ogata et al. 2019[3]; Doi et al. 2020b[4], c[5])。特に、「SINTEX-F 季節予測システム」の最新版は、100を超えるアンサンブル数(単一の気候モデルを使うシステムでは世界最大規模)で予測を実施しており(Doi et al. 2019) [2]、数値カオス性(僅かな条件の違いでも、予測される未来が変わる性質)が強い中緯度域の季節予測において、新しい知見を開拓するために、有利であることが期待される。

4. 2019年のスーパーインド洋ダイポールモード現象の影響

日本付近における気温予測と、熱帯インド洋西部の水温予測には共変動が見られた(図3)。より詳しく見るために、アンサンブル次元の散布図を示す(図4)。(Terada et al. 2020) [6]でCMIP5気候モデル間の解析で使われた手法を、単一モデルのアンサンブル次元に適用し、線形回帰直線を計算した。熱帯インド洋西部の水温偏差のアンサンブル平均値 X と、アンサンブル次元での線形回帰直線の傾き a の積は、日本付近の気温偏差のアンサンブル平均値 Y のおよそ半分程度であった。このよう

な解析はアンサンブルメンバー間の予測のバラツキだけでなく、予測シグナルに踏み込んだ議論が可能である。一方で、非線形性や他の海域から寄与などをさらに詳しく解析する必要があるため、結果の解釈には注意が必要かもしれない。今後、さらに詳しく検討していく。

インド洋熱帯域西部の水温予測と地上2mの気温予測を対象としたアンサンブル次元での相関係数

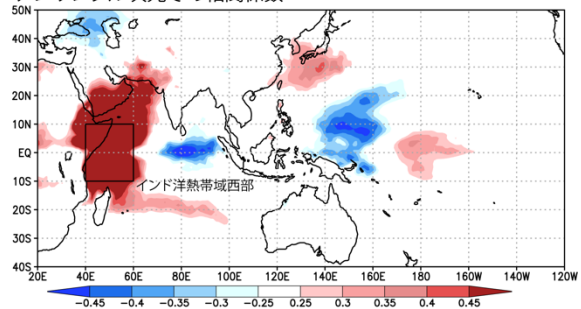


図3: インド洋熱帯域西部(40°E-60°E, 10°N-10°Nで領域平均)の海面水温の予測値と、地上2mの気温の予測値について、アンサンブル次元での相関係数を調べた結果。2019年12月から2020年1月の2ヶ月平均を対象として、2019年10月初旬から予測を開始した108のアンサンブル予測シミュレーションから算出。従ってサンプル数は108。赤色の部分では、熱帯インド洋西部で高温が強く表れる予測シミュレーションでは、地上2mの気温の予測も、高温が強く表れることを示している。日本付近の気温予測について、アンサンブルメンバー間のバラツキが、インド洋熱帯域西部の海面水温の予測に制御されている可能性が示された。

2019年12月-2020年1月の2ヶ月平均値を2019年10月予測した結果のアンサンブル次元の散布図(108アンサンブル)

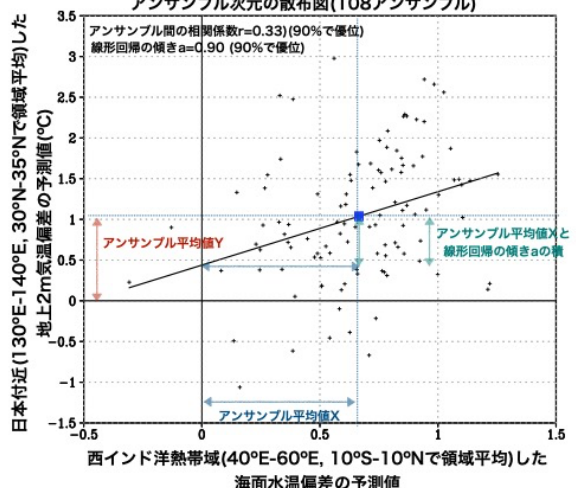


図4: 2019年12月から2020年1月の2ヶ月平均を対象として、2019年10月初旬から予測を開始した108のアンサンブル予測シミュレーションの結果を使ったアンサンブル次元の散布図。縦軸は日本付近(130°E-140°E, 30°N-35°N)で領域平均した地上2m気温偏差の予測値。横軸は西インド洋熱帯域(40°E-60°E, 10°S-10°Nで領域平均)した海面水温偏差の予測値。

N-35°N で領域平均)の地上 2m 気温偏差の予測値で、横軸は、西インド洋熱帯域(40°E-60°E, 10°N-10°N で領域平均)の海面水温の予測値。黒い点が 108 アンサンブルメンバーそれぞれの値で、青い四角がアンサンブル平均値を示す。黒線は線形回帰直線。相関係数は 0.33 で 90%の信頼区間で統計的に有意。回帰直線の傾き a は 0.90 で 90%の信頼区間で統計的に有意。

図 3 と同様の解析を 200hpa のジオポテンシャル高度 (GH200) や外向き長波放射 (OLR) にも実施した (図 5)。その結果、アンサンブル次元での共変動に、1. 西インド洋の高い水温が、周辺大気の前線対流を活性化させ、対流圏上空で高気圧性循環を形成し、2. その情報が、亜熱帯ジェット気流を導波管として、日本付近までに大気の波として伝播し、3. その結果、日本付近において偏西風は北に蛇行し、南からの寒気の流入が弱められるプロセスが、示唆された。

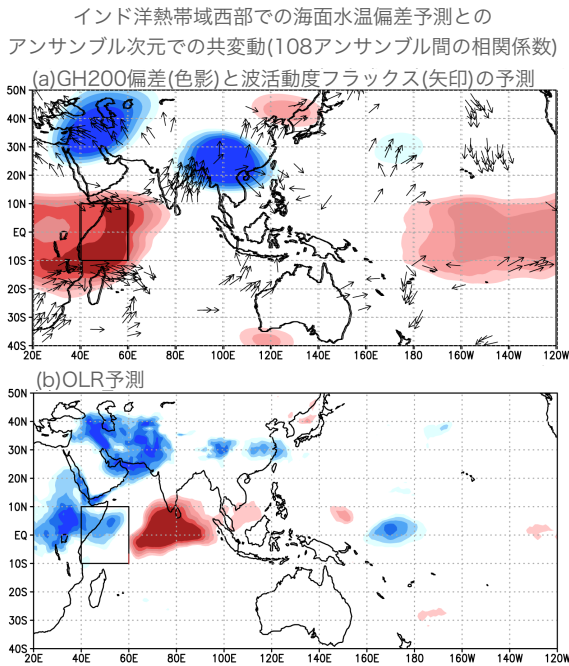
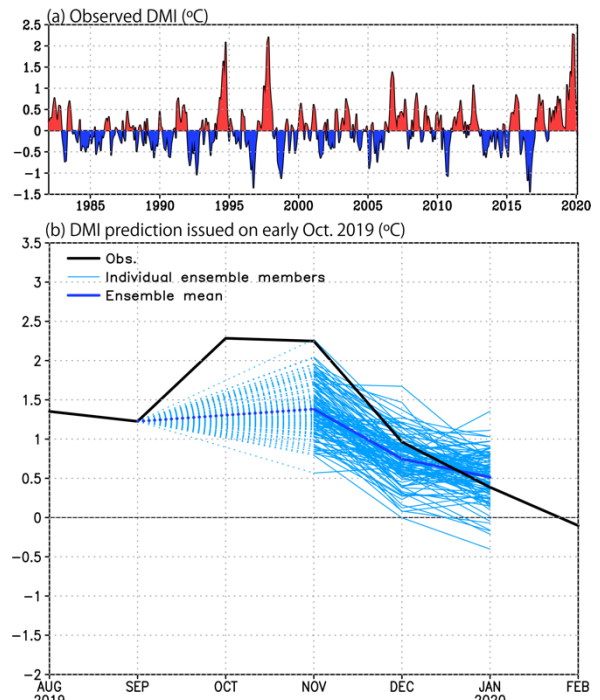


図 5: 図 3 と同様だが、(a)GH200 と 200hpa での波活動度フラックス (Takaya and Nakamura 2001) [7] に対して、(b)OLR に対して。

熱帯インド洋西部が平年より水温が高い状況は、2019 年に発生した過去最強クラスの正のインド洋ダイポールモード現象 (Doi et al. 2020a; Wang et al. 2020; Du et al. 2020; Lu and Ren 2020) に起因する (図 5, 6)。ダイポールモード現象の典型的な事例は、夏から秋にかけて最盛期を迎えた後、冬には急速に衰退する。そのため、その影響を調べる研究も、夏から秋を対象として実施されることがほとんどで、冬の影響については注目されてこなかった。本研究によって、スーパーインド洋ダイポールモード現象が、東アジアの冬の気候に影響し、その季節



予測が可能であることが示された。

図 6: (a)衛星観測データから計算した、1983 年から現在までのインド洋ダイポールモード現象の指標(海面水温の偏差(平年からの異常値)に注目し、インド洋熱帯域での東西差を示す数値。単位は $^{\circ}\text{C}$)。0.5 $^{\circ}\text{C}$ を越えると、正のイベントが発生していたと考えて良い。1994 年や 1997 年と並び、2019 年に過去最大クラスの正イベントが発生していたことがわかる。(b) 2019 年の後半から 2020 年始めまでのインド洋ダイポールモード現象の指標。黒い線が観測値。2019 年 10 月の初旬時点で予測したのが色線(水色の線: アンサンブルメンバー各々の予測値、青色の線: アンサンブルメンバーで平均した予測値)。11 月から 1 月にかけて、青色の線と黒い線の軌跡がよく似ており、大まかには、予測が成功していたことがわかる。また、水色の線を見ると、ダイポールモード現象が冬まで持続すると予測するメンバーや、衰退すると予測しているメンバーなど、アンサンブルメンバー同士でバラツキがあることがわかる。

近年、西インド洋熱帯域の温暖化の進行が顕著である (Roxy et al. 2015 [8]; 図 7)。また長期的な地球温暖化の影響を受け、極端に強い正のインド洋ダイポールも現象が頻発する可能性が指摘されている (Cai et al. 2014 [9], 2021 [10])。本研究で示されたように、スーパーインド洋ダイポールモード現象の発生に伴って西インド洋熱帯域が高温暖化すると、日本で記録的な暖冬が引き起こされる事例が今後増えるかもしれない。従って、進行中の温暖化を背景として、季節予測可能性の探究や、予測精度の評価と改善などの研究を推進すると共に、その予測情報を基盤とした対応策を探索することが、益々重要になってきた。

本研究の詳細は、(Doi et al. 2020a) [1]で発表した。

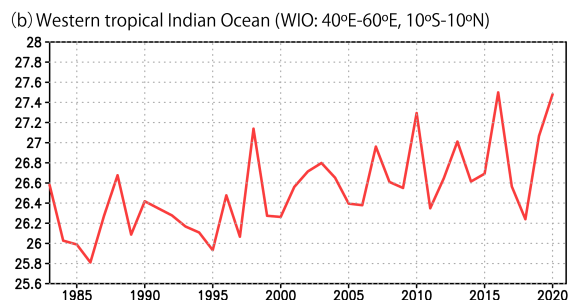


図 7: 西インド洋熱帯域(40°E-60°E, 10°N-10°N)で領域平均した気温の推移(°C)。NCEP/NCARs 再解析データより作成。

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] Doi, ST., S. K. Behera, and T. Yamagata, “Wintertime impacts of the 2019 super IOD on East Asia,” *Geophysical Research Letters* (47), doi:10.1029/2020GL089456., 2020
- [2] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, “Merits of a 108-member ensemble system in ENSO and IOD predictions,” *J. Climate*, 32, 957-972, 2019.
- [3] Ogata, T., T. Doi, Y. Morioka, and S. Behera, “Mid-latitude source of the ENSO-spread in SINTEX-F ensemble predictions,” *Climate Dynamics*, 52, 2613-2630, doi:10.1007/s00382-018-4280-6, 2019.
- [4] Doi, T., S. Behera, T. Yamagata, “Predictability of the super IOD event in 2019 and its link with El Nin Modoki”, *Geophysical Research Letters* (47), e2019GL086713, 2020.
- [5] Doi, T., M. Nonaka, and S. Behera, “Skill Assessment of Seasonal-to-Interannual Prediction of Sea Level Anomaly in the North Pacific Based on the SINTEX-F Climate Model,” *Front. Mar. Sci.*, 7, doi:10.3389/fmars.2020.546587, 2020.
- [6] Terada, M., S. Minobe, and C. Deutsch, “Mechanisms of future changes in equatorial upwelling: CMIP5 intermodel analysis,” *J. Climate*, 33, 497-510, doi:10.1175/JCLI-D-19-0128.1, 2020.
- [7] Takaya, K., and H. Nakamura, “A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow,” *J. Atmos. Sci.*, 58, 608-627, 2001.
- [8] Roxy, K. M., K. Ritika, P. Terray, and S. Masson,

“Indian Ocean warming—the bigger picture,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 96, 1070-1071. http://www.rocksea.org/bin/research/roxy_indian_ocean_warming_pon_bams_2015.pdf, 2015.

[9] Cai, W., A. Santoso, G. Wang, E. Weller, L. Wu, K. Ashok, Y. Masumoto, and T. Yamagata, “Increased frequency of extreme Indian ocean dipole events due to greenhouse warming,” *Nature*, 510, 254-258, doi:10.1038/nature13327, 2014

[10] Cai, W., K. Yang, L. Wu, G. Huang, A. Santoso, B. Ng, G. Wang, and T. Yamagata, “Opposite response of strong and moderate positive Indian Ocean Dipole to global warming,” *Nature Climate Change*, 11, 27-32, doi:10.1038/s41558-020-00943-1, 2021

Development of a Probabilistic Numerical Seasonal Prediction System with Ocean Observation

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, Swadhin Behera *¹

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

The Indian Ocean Dipole (IOD) is an intrinsic ocean-atmosphere coupled climate phenomenon in the tropical Indian Ocean with warm (cold) sea surface temperature anomalies with enhanced (reduced) rainfall in the western (eastern) tropical Indian Ocean during a positive phase. A strong and long-lasting positive IOD event occurred in 2019, which caused climate-related disasters in countries not only around the Indian Ocean but also East Asia, including Japan. Successful prediction of the teleconnection of such a super event may contribute to reducing the risks of socioeconomic losses under suitable measures for adaptation and mitigation.

Keywords : Seasonal prediction, Indian Ocean Dipole, Ensemble prediction

1. Introduction

Many parts of East Asia experienced extremely warm conditions during the 2019–2020 winter (e.g., NOAA Global Climate Report: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/>). In particular, western Japan experienced a record-breaking warm winter. The ski resort cannot operate if there is little snow. In northern Japan, winter snow is also an important water resource for rice cultivation. Also, the extreme warmth caused some varieties of vegetables to grow faster than usual. Sales of winter items were down at stores as reported in local newspapers. The successful prediction of such an extreme season a few months ahead may contribute to reducing the socio-economic losses under suitable measures for adaptation and mitigation.

The extreme warm event was successfully predicted a few months ahead using the 108-members ensemble SINTEX-F dynamical prediction system. It was quite surprising because the skill assessment in the reforecast experiments in the past 30 years shows not-so-skillful for predicting the winter season. We note, however, that the extremely warm winter conditions in 2019–2020 were preceded by an extremely strong positive Indian Ocean Dipole (IOD). Since the SST anomalies associated with the super IOD lasted long even through the winter, the persistence could be the key to understanding the successful prediction of the warm winter conditions of East Asia in 2019–2020.

This super IOD persisting through the winter may have excited a unique teleconnection pattern affecting the winter condition in East Asia including Japan. Since the peaks of the positive IOD events were mainly in boreal fall, only a few studies were conducted to investigate its winter teleconnection pattern.

In this study, we explore how the warm SST anomaly associated with the western pole of the IOD may generate winter teleconnection patterns to East Asia by analyzing the outputs from the SINTEX-F dynamical prediction system.

2. Analysis of inter-member co-variability

Anomalies among the ensemble members (defined as deviations from the ensemble mean) may provide useful insights into possible precursors and teleconnection patterns related to a climate event. In some of these previous studies, a way of sampling was not only in the ensemble-dimension, but also in the time-dimension by ignoring event-to-event diversity of climate events. In this study, however, we sampled only in the ensemble-dimension to explore the inter-member co-variability while maintaining event-to-event diversities. This is because IOD events display a diverse range of amplitudes, spatial patterns, life cycles, and developing mechanisms. We calculated the inter-ensemble correlation: correlation coefficient between a target index (ϵ) and a horizontal map of a variable (x, y, ϵ) for each grid point among the 108 members of ensemble prediction in a particular month. In this analysis, the conventional time dimension was replaced by the ensemble dimension. For the present purpose, the ensemble prediction system with 108-member (Doi et al. 2019) [1] has an advantage in finding possible teleconnection patterns influencing the mid-latitude climate with the large stochastic internal variability.

3. Results

Figure 1a shows a horizontal map of the inter-ensemble correlation between the WIO index (i.e., the SST anomaly averaged over the western box) and global 2m temperature anomaly. Considering that the degree of freedom is 108 based on the ensemble size, a correlation beyond 0.25 is statistically significant at a 90% level (using the two-tailed Student's t-test). Interestingly, we found that positive correlations over western Japan and the Korean Peninsula are above the significance level. For the inter-ensemble correlation between the WIO index and the GH200 anomaly (Fig. 1b), the positive (negative) correlations

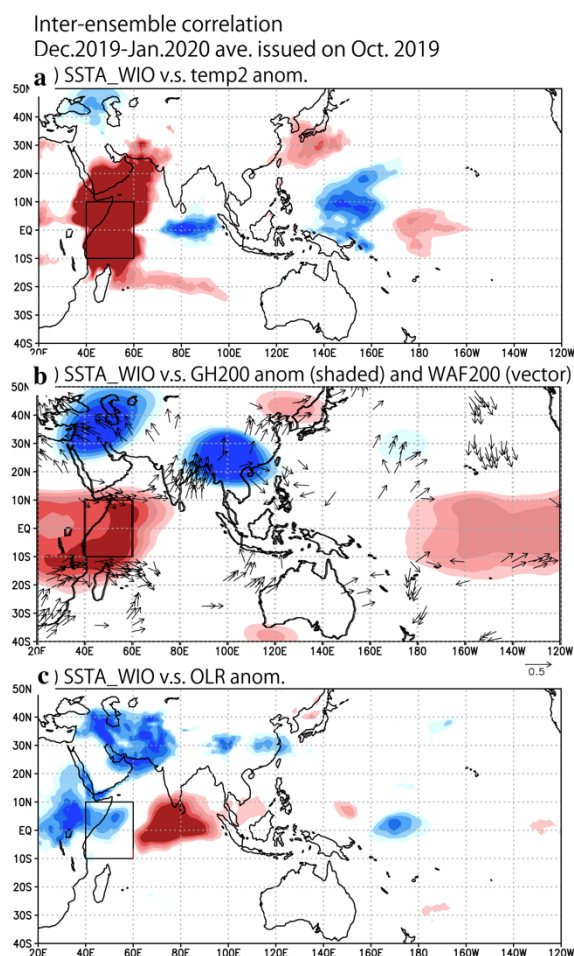


Figure 1. (a) Inter-ensemble members correlation in the 108-members prediction between the SST anomaly in the western tropical Indian Ocean (WIO: 40°E-60°E, 10°S-10°N) and the 2m air temperature anomaly. (b) Same as (a), but for the geopotential height anomaly (shaded) and the wave activity flux (vector) at 200hPa. The wave activity flux of which root mean square value of zonal and meridional components is above 0.25 is shown by arrows, except for the tropics (10°S-10°N). (c) Same as (a), but for OLR.

were found over the WIO and the northwest of Japan (southern China and a northern part of the Middle East). The wave activity flux shows propagation pathways of stationary Rossby waves between them, causing the meander of the subtropical jet over these regions. Also, a negative correlation is found between the WIO SST index and the OLR in WIO (Fig. 1c). The co-variability of the ensemble members for the WIO may suggest a possible teleconnection as in the following. The warmer SST anomaly in the WIO enhances the convective activity locally and excite stationary Rossby waves, leading to the southward meandering of the subtropical jet over southern China (upstream of Japan) and the northward meandering over northwest Japan. The analysis of the wave activity fluxes shown in Fig. 1b also suggests that the meandering of the jet in East Asia may be partly

due to the northward meandering above the northern part of the Middle East. As a result, the southward penetration of cold air masses from the high latitude to Japan was weakened, which caused the warm winter in Japan. This is also seen by the time-latitude plot of the daily 2m air temperature zonally averaged around Japan.

A zonal dipole is also seen in the correlation maps for the temperature and the OLR anomalies in the tropical Indian Ocean (Fig. 1c), confirming the link with the super IOD of 2019 (Doi et al 2020a [2]). The observed DMI was decaying at that time. However, the SST DMI was still about 1.0°C above climatology in December 2019, and it was 0.4°C even in January 2020. We note that the predicted ensemble mean DMI value was 0.8°C in December 2019 and 0.5°C in January 2020.

The results were published as Doi et al. (2020b) [3].

Acknowledgement

The SINTEX - F seasonal climate prediction system was run by the Earth Simulator at JAMSTEC (see <http://www.jamstec.go.jp/es/en/index.html>, for the system overview). We are grateful to Drs. Wataru Sasaki, Jing - Jia Luo, Sebastian Masson, Andrea Storto, Antonio Navarra, and Silvio Gualdi and our European colleagues of INGV/CMCC, L'OCEAN, and MPI for their contributions in developing the prototype prediction system.

References

- [1] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, "Merits of a 108-member ensemble system in ENSO and IOD predictions," *J. Climate*, 32, 957-972, 2019.
- [2] Doi, T., S. Behera, T. Yamagata, "Predictability of the super IOD event in 2019 and its link with El Nin Modoki", *Geophysical Research Letters* (47), e2019GL086713, 2020.
- [3] Doi, ST., S. K. Behera, and T. Yamagata, "Wintertime impacts of the 2019 super IOD on East Asia," *Geophysical Research Letters* (47), doi:10.1029/2020GL089456., 2020