

2019-2020 年の記録的な暖冬を、数ヶ月前から予測する鍵は、 スーパーインド洋ダイポールモード現象

○土井 威志*・Swadhin Behera*・山形 俊男***

(*JAMSTEC/VAiG/APL, **NUIST/ICAR,)

キーワード：季節予測，インド洋ダイポールモード現象，エルニーニョモドキ現象

1.はじめに

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。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が、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)。

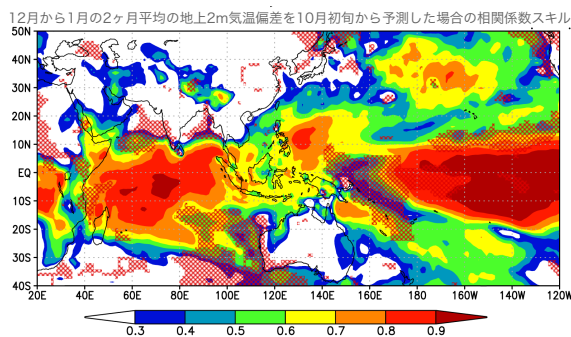


図 1: 12 月から 1 月の 2 ヶ月平均の地上 2m 気温偏差を 10 月初旬から予測した場合の相関係数スキル。1 に近いほど予測スキルが高い。SINTEX-F2 季節予測システム(Doi et al. 2019)による 1983-2015 年の過去再予測実験の結果で、108 アンサンブルメンバーの平均値と NCEP/NCAR 再解析データの値から計算した。Persistent 予測の予測スキル(自己ラグ相関係数)より低い値は赤色で網掛けをした。

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)。

2019年12月から2020年1月で平均した地上2m気温偏差(°C)

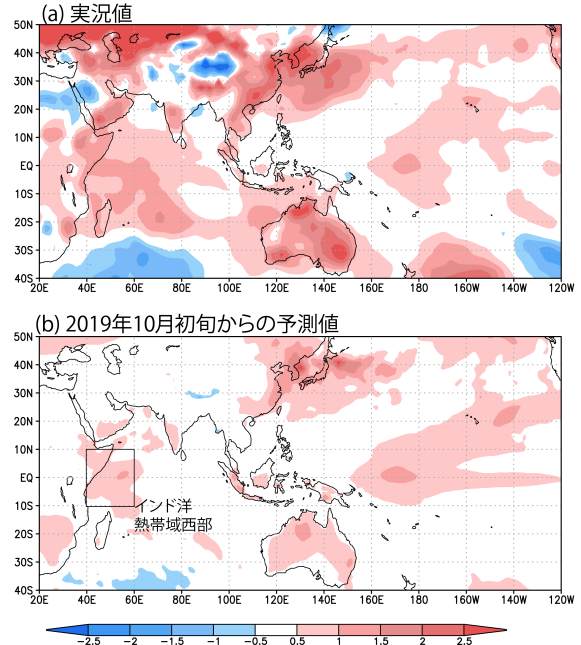


図 2: (a)2019 年 12 月から 2020 年の 1 月の 2 ヶ月間で平均した地上 2m 気温の偏差の実況値(NCEP/NCAR 再解析データ)。単位は °C。(b) 2019 年 10 月初旬時点での予測値(108 アンサンブルの平均値)。

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。

2. 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(Ma et al. 2017; Ogata et al. 2019; Doi et al. 2020a,c)。特に、「SINTEX-F」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)、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。

3. 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)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ず、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

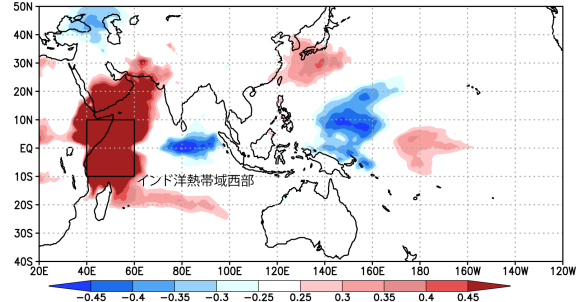


図 3: インド洋熱帯域西部(40°E-60°E, 10°N-10°N で領域平均)の海表面水温の予測値と、地上 2m の気温の予測値について、アンサンブル次元での相関係数を調べた結果。2019 年 12 月から 2020 年 1 月の 2 ヶ月平均を対象として、2019 年 10 月初旬から予測を開始した 108 のアンサンブル予測シミュレーションから算出。従ってサンプル数は 108。赤色の部分では、熱帯インド洋西部で高温が強く表れる予測シミュレーションでは、地上 2m の気温の予測も、高温が強く表れることを示している。日本付近の気温予測について、アンサンブルメンバー間のバラツキが、インド洋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

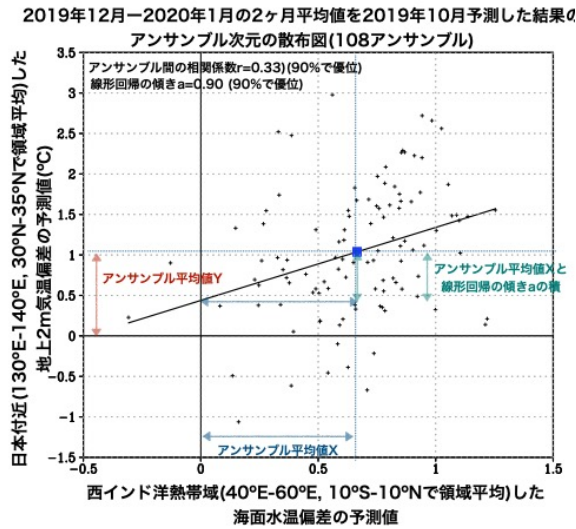


図 4: 2019 年 12 月から 2020 年 1 月の 2 ヶ月平均を対象として、2019 年 10 月初旬から予測を開始した 108 のアンサンブル予測シミュレーションの結果を使ったアンサンブル次元の散布図。縦軸は日本付近(130°E-140°E, 30°N-35°N で領域平均)の地上 2m 気温偏差の予測値で、横軸は、西インド洋熱帯域(40°E-60°E, 10°S-10°N で領域平均)の海面水温の予測値。黒い点が 108 アンサンブルメンバーそれぞれの値で、青い四角がアンサンブル平均値を示す。黒線は線形回帰直線。相関係数は 0.33 で 90%の信頼区間で統計的に有意。回帰直線の傾き 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、周辺大気の積雲対流を活発化させ、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。

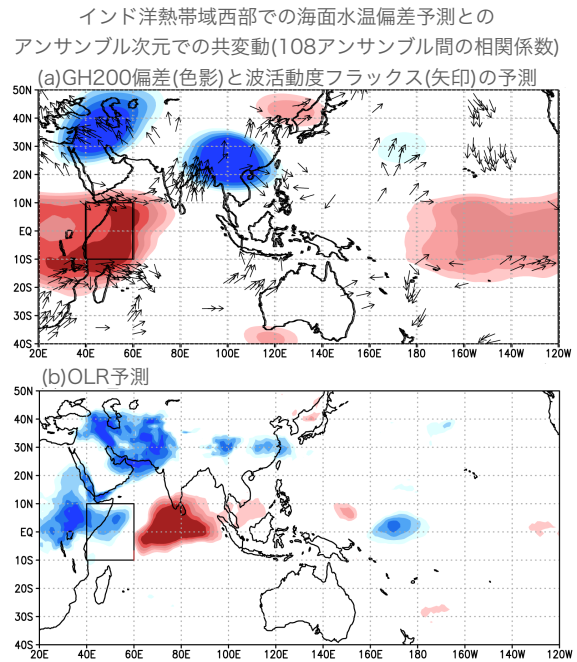


図 5: 図 3 と同様だが、(a)GH200 と 200hpa での波活動度フラックス(Takaya and Nakamura 2001)に対して、(b)OLR に対して。

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。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。

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)。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. 2021, 2014)。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、季節予測と、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. 2020b)で発表した。

- Cai, W., A. Santoso, G. Wang, E. Weller, L. Wu, K. Ashok, Y. Masumoto, and T. Yamagata, 2014: Increased frequency of extreme Indian ocean dipole events due to greenhouse warming. *Nature*, **510**, 254–258, doi:10.1038/nature13327.
- , K. Yang, L. Wu, G. Huang, A. Santoso, B. Ng, G. Wang, and T. Yamagata, 2021: Opposite response of strong and moderate positive Indian Ocean Dipole to global warming. *Nat. Clim. Chang.*, **11**, 27–32, doi:10.1038/s41558-020-00943-1. <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-020-00943-1>.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2019: Merits of a 108-member ensemble system in ENSO and IOD predictions. *J. Clim.*, **32**, 957–972.
- , ———, and ———, 2020a: Predictability of the Super IOD Event in 2019 and Its Link With El Niño Modoki. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi:10.1029/2019GL086713.
- , S. K. Behera, and T. Yamagata, 2020b: Wintertime impacts of the 2019 super IOD on East Asia. **1997**, 0–3, doi:10.1029/2020GL089456. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL089456>.
- Doi, T., M. Nonaka, and S. Behera, 2020c: 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.
- Du, Y., Y. Zhang, L. Y. Zhang, T. Tozuka, B. Ng, and W. Cai, 2020: Thermocline Warming Induced Extreme Indian Ocean Dipole in 2019. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, 1–10, doi:10.1029/2020GL090079.
- Lu, B., and H. L. Ren, 2020: What caused the extreme Indian Ocean Dipole event in 2019? *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL087768.
- Ma, J., S. P. Xie, and H. Xu, 2017: Contributions of the North Pacific meridional mode to ensemble spread of ENSO prediction. *J. Clim.*, **30**, 9167–9181, doi:10.1175/JCLI-D-17-0182.1.
- Ogata, T., T. Doi, Y. Morioka, and S. Behera, 2019: Mid-latitude source of the ENSO-spread in SINTEX-F ensemble predictions. *Clim. Dyn.*, **52**, 2613–2630, doi:10.1007/s00382-018-4280-6.
- Roxy, K. M., K. Ritika, P. Terray, and S. Masson, 2015: 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.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: 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.
- Terada, M., S. Minobe, and C. Deutsch, 2020: Mechanisms of future changes in equatorial upwelling: CMIP5 intermodel analysis. *J. Clim.*, **33**, 497–510, doi:10.1175/JCLI-D-19-0128.1.
- Wang, G., W. Cai, K. Yang, A. Santoso, and T. Yamagata, 2020: A unique feature of the 2019 extreme positive Indian Ocean Dipole event. 0–3, doi:10.1029/2020GL088615.