

SINTEX-F システムを使ったインド洋ダイポールモード現象の予測

土井 威志 (JAMSTEC)

1. インド洋ダイポールモード現象と季節予測

インド洋ダイポールモード現象の予測は、インド洋周辺国のみならず、欧州や日本を含む東アジアの季節予測の成功にとって、極めて重要である[Behera et al., 1999, 2005; Ashok et al., 2001, 2003, 2007; Behera and Yamagata, 2003; Black et al., 2003; Guan and Yamagata, 2003; Saji and Yamagata, 2003; Yamagata et al., 2004; Lu et al., 2017]。インド洋ダイポールモード現象は、熱帯インド洋で見られる気候変動現象で、5、6年に1度程度の頻度で、北半球の夏から秋にかけて発生する[Saji et al., 1999; Vinayachandran et al., 1999]。ダイポールモード現象には正と負の現象があり、特に正の現象が発生すると、熱帯インド洋の東部で海面水温が平年より下がり、西部で高くなるために、通常は東インド洋で活発な対流活動は西方に移動し、東アフリカのケニア周辺やその沖合で雨が多く、逆にインドネシアやオーストラリア周辺では雨が少なくなる。また、大気循環の変動を通して、インド洋周辺国だけでなく、欧州や東アジアに遠隔影響(テレコネクション)し、天候異常を引き起こすとされている[Yamagata et al., 2004]。例えば、西日本の猛暑のスターターにもなり得る[Guan

and Yamagata, 2003; Akihiko et al., 2014]。さらに、東アフリカで発生したマラリアなどの感染症の大流行[Hashizume et al., 2009]や、オーストラリアの小麦の凶作[Yuan and Yamagata, 2015]などを引き起こすことから、社会的な観点からも重要な現象である

2. インド洋ダイポールモード現象の予測について

インド洋ダイポールモード現象の予測スキルは、既に多くの研究で、調査されてきた[Wajsowicz, 2005; Luo et al., 2007, 2008; Feng et al., 2014; Zhao et al., 2019]。しかし、最先端の予測システムを持ってしても、太平洋のエルニーニョ現象ほどは、インド洋ダイポールモード現象の予測精度が高くないのが実情である[Zhu et al., 2015]。その中でも、特に、太平洋のエルニーニョ現象と同時に発生するインド洋ダイポールモード現象は、比較的予測しやすいことが知られている[Song et al., 2008; Zhao and Hendon, 2009; Yang et al., 2015]。また、それらインド洋外からの強制だけでなく、インド洋東部で発生する東風偏差[Lee Drbohlav et al., 2007]や、インド洋の海洋亜表層の水温構造も、インド洋ダイポールモード現象の発生に重要であると指摘されてい

る[Rao et al., 2002; Horii et al., 2008; Cai et al., 2009; Doi et al., 2017]。また、多くのイベントが、北半球の冬を跨いで予測することが難しいことから、インド洋ダイポールモード現象の予測には“冬バリエーション”があることも知られている[Wajsowicz, 2005; Feng et al., 2017; Mu et al., 2017]。

3. SINTEX-F とインド洋ダイポールモード予測

JAMSTEC アプリケーションラボが欧州の研究者と連携して開発してきた SINTEX-F と呼ばれる予測シミュレーション[Luo et al., 2003, 2005; Masson et al., 2005]では、スーパーコンピュータ“地球シミュレータ”を駆使し、準リアルタイムで、2006年に発生した正のインド洋ダイポールモード現象の発生予測に成功し、国内外の研究者を驚かせると共に、インド洋ダイポールモード現象の予測研究を盛り立てる先駆的な成果をあげた[Luo et al., 2007, 2008]。また、その予測の成否には、インド洋ダイポールモードの東極の発達プロセスの違いが重要であることも指摘された[Tanizaki et al., 2017]。

その予測の精度を向上させるために、著者らは、従来のモデルを高度化(海水モデルの導入、高解像度化、物理スキームの改善等)した第二版となる SINTEX-F2[Masson et al., 2012; Sasaki et al., 2013]をベースにして、新しい季節予測システムを開発した[Doi et al., 2016]。

しかし、インド洋ダイポールモード現象の予測スキルは向上しなかった。次に、予測システムの海洋初期値を作成するプロセスを高度化した。従来は、衛星から得られた海の表面の水温情報のみを初期値に取り込んでいたが、新しく、海の内部の3次元の水温/塩分の海洋観測データ(海に浮かべてある係留ブイ(例えば JAMSTEC の TRITON ブイ)、国際協力で海に投入されている ARGO フロート、船舶観測など)を3次元変分法(3DVAR)で初期値に取り込むプロセスを加えた(イタリア地中海気候変化センターCMCCとの共同開発)。その結果、インド洋ダイポールモード現象の予測精度が向上した[Doi et al., 2017]。さらに、予測アンサンブルの数を約10から約100まで増やした結果、発生頻度が稀ではあるが極端に強いインド洋ダイポールモード現象の発生を、数ヶ月前から確率予測する精度が向上した[Doi et al., 2019]。

このような学術的な成果を基盤に、現在では、著者が所属する JAMSTEC アプリケーションラボを含め、アメリカ、欧州、オーストラリア、韓国などの予報・研究機関からインド洋ダイポールモード現象の指標(DMI)の予測情報が準リアルタイムで提供されている。

4. 2019年の正のインド洋ダイポールモード現象の予測

2019年の5月頃から、正のインド洋

ダイポールモード現象が発生し、夏には、過去最大級の1994や1997年の正イベントと同程度まで発達した。大変興味深いことに、SINTEX-F予測シミュレーションでは、上述した“予測の冬バリアー”を超えて、前年の11月時点で、その予測に成功していた。その長いリード時間を持つ予測可能性の潜在的ソースを、予測アンサンブル間の相関解析から探索したところ、熱帯太平洋のエルニーニョモドキ現象の影響を見出した。このように長いリード時間を持つ予測の成功は、正のインド洋ダイポールモード現象に伴う社会-経済的な損害リスクを軽減することに役立つことが期待される。

参考文献：

- Akihiko, T., Y. Morioka, and S. K. Behera (2014), Role of climate variability in the heatstroke death rates of Kanto region in Japan, *Sci. Rep.*, 4, 5655, doi:10.1038/srep05655.
- Ashok, K., Z. Guan, and T. Yamagata (2001), Impact of the Indian Ocean Dipole on the Relationship between the Indian Monsoon Rainfall and ENSO Karumuri Ashok •, Zhaoyong Toshio Yamagata technique, *Geophys. Res. Lett.*, 28(23), 4499–4502, doi:10.1029/2001GL013294.
- Ashok, K., Z. Guan, and T. Yamagata (2003), A Look at the Relationship between the ENSO and the Indian Ocean Dipole., *J. Meteorol. Soc. Japan*, 81(1), 41–56, doi:10.2151/jmsj.81.41.
- Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata (2007), El Niño Modoki and its possible teleconnection, *J. Geophys. Res. Ocean.*, 112(11), 1–27, doi:10.1029/2006JC003798.
- Behera, S., and T. Yamagata (2003), Influence of the Indian Ocean dipole on the Southern Oscillation, *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, 81(1), 169–177, doi:10.2151/jmsj.81.169.
- Behera, S. K., R. Krishnan, and T. Yamagata (1999), Unusual ocean-atmosphere Indian Ocean during 1994 conditions in the tropical Wind Anomalies, *Geophys. Res. Lett.*, 26(19), 3001–3004.
- Behera, S. K., J. J. Luo, S. Masson, P. Delecluse, S. Gualdi, A. Navarra, and T. Yamagata (2005), Paramount impact of the Indian Ocean Dipole on the East African short rains: A CGCM study, *J. Clim.*, 18(21), 4514–4530, doi:10.1175/JCLI3541.1.
- Black, E., J. Slingo, and K. R. Sperber (2003), An observational study of the relationship between excessively strong short rains in coastal East

- Africa and Indian ocean SST, *Mon. Weather Rev.*, *131*(1), 74–94, doi:10.1175/1520-0493(2003)131<0074:AOSOTR>2.0.CO;2.
- Cai, W., A. Sullivan, and T. Cowan (2009), How rare are the 2006–2008 positive Indian Ocean Dipole events? An IPCC AR4 climate model perspective, *Geophys. Res. Lett.*, *36*(8), 1–5, doi:10.1029/2009GL037982.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata (2016), Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, *8*(4), 1847–1867, doi:10.1002/2016MS000744.
- Doi, T., A. Storto, S. K. Behera, A. Navarra, and T. Yamagata (2017), Improved prediction of the Indian Ocean Dipole Mode by use of subsurface ocean observations, *J. Clim.*, *30*, 7953–7970, doi:10.1175/JCLI-D-16-0915.1.
- 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.
- Feng, R., W. Duan, and M. Mu (2014), The “winter predictability barrier” for IOD events and its error growth dynamics: Results from a fully coupled GCM, *J. Geophys. Res. Ocean.*, *119*, 2121–2128, doi:10.1002/jgrc.20224.
- Feng, R., W. Duan, and M. Mu (2017), Estimating observing locations for advancing beyond the winter predictability barrier of Indian Ocean dipole event predictions, *Clim. Dyn.*, *48*(3–4), 1173–1185, doi:10.1007/s00382-016-3134-3.
- Guan, Z., and Yamagata (2003), The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections, *Geophys. Res. Lett.*, *30*(10), doi:10.1029/2002GL016831.
- Hashizume, M., T. Terao, and N. Minakawa (2009), The Indian Ocean Dipole and malaria risk in the highlands of western Kenya., *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, *106*(6), 1857–1862, doi:10.1073/pnas.0806544106.
- Horii, T., H. Hase, I. Ueki, and Y. Masumoto (2008), Oceanic precondition and evolution of the 2006 Indian Ocean dipole, *Geophys. Res. Lett.*, *35*(3), 1–6, doi:10.1029/2007GL032464.
- Lee Drbohlav, H. K., S. Gualdi, and A. Navarra (2007), A diagnostic study of the Indian Ocean dipole mode in El Niño and non-El Niño years, *J. Clim.*, *20*(13), 2961–2977, doi:10.1175/JCLI4153.1.
- Lu, B., H. L. Ren, A. A. Scaife, J. Wu, N.

- Dunstone, D. Smith, J. Wan, R. Eade, C. Maclachlan, and M. Gordon (2017), An extreme negative Indian Ocean Dipole event in 2016: dynamics and predictability, *Clim. Dyn.*, (0123456789), in press, doi:10.1007/s00382-017-3908-2.
- Luo, J. J., S. Masson, S. Behera, S. Shingu, and T. Yamagata (2005), Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts, *J. Clim.*, 18(21), 4474–4497, doi:10.1175/JCLI3526.1.
- Luo, J. J., S. Masson, S. Behera, and T. Yamagata (2007), Experimental forecasts of the Indian Ocean dipole using a coupled OAGCM, *J. Clim.*, 20(10), 2178–2190, doi:10.1175/JCLI4132.1.
- Luo, J. J., S. Behera, Y. Masumoto, H. Sakuma, and T. Yamagata (2008), Successful prediction of the consecutive IOD in 2006 and 2007, *Geophys. Res. Lett.*, 35(14), 1–6, doi:10.1029/2007GL032793.
- Masson, S., P. Terray, G. Madec, J. J. Luo, T. Yamagata, and K. Takahashi (2012), Impact of intra-daily SST variability on ENSO characteristics in a coupled model, *Clim. Dyn.*, 39(3), 681–707, doi:10.1007/s00382-011-1247-2.
- Mu, M., R. Feng, and W. Duan (2017), Relationship between optimal precursors for Indian Ocean Dipole events and optimally growing initial errors in its prediction, *J. Geophys. Res. Ocean.*, 122(2), 1141–1153, doi:10.1002/2016JC012527.
- Saji, N. H., and T. Yamagata (2003), Possible impacts of Indian Ocean Dipole mode events on global climate, *Clim. Res.*, 25(2), 151–169, doi:10.3354/cr025151.
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata (1999), A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, 401(6751), 360–363, doi:10.1038/43854.
- Sasaki, W., K. J. Richards, and J. J. Luo (2013), 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.*, 41(2), 443–453, doi:10.1007/s00382-012-1593-8.
- Song, Q., G. A. Vecchi, and A. J. Rosati (2008), Predictability of the Indian Ocean sea surface temperature anomalies in the GFDL coupled model, *Geophys. Res. Lett.*, 35(2), 1–5, doi:10.1029/2007GL031966.
- Vinayachandran, P. N., N. H. Saji, and T.

- Yamagata (1999), Response of the Equatorial Indian Ocean to an unusual wind event during 1994, *Geophys. Res. Lett.*, 26(11), 1613–1616, doi:10.1029/1999GL900179.
- Wajsowicz, R. C. (2005), Potential predictability of tropical Indian Ocean SST anomalies, *Geophys. Res. Lett.*, 32(24), 1–4, doi:10.1029/2005GL024169.
- Yamagata, T., S. K. Behera, J. Luo, S. Masson, M. R. Jury, and S. a. Rao (2004), Coupled Ocean-Atmosphere Variability in the Tropical Indian Ocean, *Earth's Clim.*, 1–23, doi:10.1029/147GM12.
- Yang, Y., S. P. Xie, L. Wu, Y. Kosaka, N. C. Lau, and G. A. Vecchi (2015), Seasonality and predictability of the Indian Ocean dipole mode: ENSO forcing and internal variability, *J. Clim.*, 28(20), 8021–8036, doi:10.1175/JCLI-D-15-0078.1.
- Yuan, C., and T. Yamagata (2015), Impacts of IOD , ENSO and ENSO Modoki on the Australian Winter Wheat Yields in Recent Decades, *Sci. Rep.*, (17252), 1–8, doi:10.1038/srep17252.
- Zhao, M., and H. H. Hendon (2009), Representation and prediction of the Indian Ocean Dipole in the POAMA seasonal forecast model, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 135(639), 337–352, doi:10.1002/qj.370.
- Zhao, S., F. Jin, and M. F. Stuecker (2019), Improved Predictability of the Indian Ocean Dipole Using Seasonally Modulated ENSO Forcing Forecasts Geophysical Research Letters, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 1–11, doi:10.1029/2019GL084196.
- Zhu, J., B. Huang, A. Kumar, and J. L. Kinter (2015), Seasonality in prediction skill and predictable pattern of tropical Indian Ocean SST, *J. Clim.*, 28(20), 7962–7984, doi:10.1175/JCLI-D-15-0067.1.