リアルタイム-APL モデルアンサンブル季節予測とその応用可能性について

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
土井　威志*[1]，森岡 優志*[1]，Swadhin Behera*[1]
*[1] 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

自然災害をもたらす現象の高精度な事前予測の実現（第 3 期中期計画前文より）に資するため、日欧協力によって開発された大気海洋結合大循環モデル SINTEX-F を基にした全球規模のリアルタイム-アンサンブル季節予測システム”SINTEX-F 季節予測システム”を開発した。このシステムを更に発展させるための基盤研究は別の所内課題“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”で行った。本課題では、このシステムを準リアルタイムで運用し、毎月季節予測情報をメールやインターネットを使って配信した。2018 年度は、エルニーニョモドキ現象や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た。これらの気候変動現象は世界の至る処で天候異常を引き起こしたが、それらの予測の検証も実施した。アプリケーションラボのサイトや海洋研究開発機構のニュースサイトで、それら予測情報を世界に先駆けて積極的に配信した。特に、季節予測情報を一般向けにわかりやすく解説した記事をブログ形式で配信するサイト”季節ウオッチ”(2016 年 4 月に開設)や SINTEX-F の従来のサイトと合わせると、毎月約 10000 から 70000 程度のアクセスがあった。

キーワード：季節予測，リアルタイム，季節ウオッチ，エルニーニョモドキ予測，インド洋ダイポールモード予測

1. 準リアルタイムの季節予測情報の配信

SINTEX-F 季節予測システムは、2005 年から準リアルタイムで運用し、毎月、メールやインターネットを使って季節予測情報を配信しており、現在までの実績から、世界でも高い信頼を得ている。そのサイト(http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/)は、研究者にとっては使いやすいものであるが、一般向けの情報配信サイトとしては難解であるとの指摘があった。そこで、毎月の季節予測情報を一般向けにわかりやすく解説した記事をブログ形式で配信するサイト”季節ウオッチ”を 2016 年 4 月に、新たに開設した(http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/climate/)。SINTEX-F の従来のサイトと合わせると、毎月約 10000 から 70000 程度のアクセスがあった。平均すると、前年比の 2-3 倍程度増えており、特に一般向けに対しての季節予測の情報発信について、成果が確認できる(図 1)。

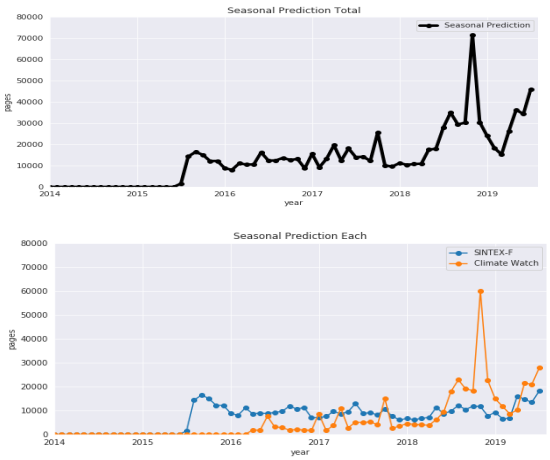


図 1: SINTEX-F 季節予測関連のウェブサイトのアクセス解析(美山主任研究員の提供)

2. インド洋に正のダイポールモード現象、太平洋にエルニーニョモドキ現象が久しぶりに同時発生

2.1 予測情報の配信

2017 年からラニーニャ現象(エルニーニョ現象の逆位相の現象)が発生していたが、2018 年春になり徐々に衰退し、2018 年初夏では、熱帯太平洋はほぼ平年並みの状態になった。しかし、その後、2018 年の後半になると、世界各地で異常気象が多発した。そのいくつかは、熱帯インド洋に正のダイポールモード現象が、熱帯太平洋にはエルニーニョモドキ現象が発生したことが一因であったと考えられる。

これらの現象は、最先端の科学技術でも、数ヶ月前から事前に予測することが難しいとされている。その中で、アプケーションラボの SINTEX-F 予測シミュレーションは、スーパーコンピュータ”地球シミュレータ”を使って数ヶ月前からインド洋ダイポールモード現象やエルニーニョモドキ現象の発生予測に成功した実績がある[1]。例えば、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、国内外においてインド洋ダイポールモード現象の予測研究を活性化する先駆的成果をあげた。その後も、インド洋ダイポールモード現象やエルニーニョモドキ現象の予測精度を向上させるべく、予測システムの改良を続けてきた。例えば、従来のモデルを高度化(海氷モデル

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 システム[2]や、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］を予測初期値に取り込んだ SINTEX-F2-3DVAR システムを開発した[3]。例えば、SINTEX-F2 システムでは、2009 年に発生したエルニーニョモドキ現象の予測精度が向上、SINTEX-F2-3DVAR システムでは、インド洋ダイポールモード現象の予測精度が向上した。

従来の SINTEX-F に加えて、モデルを改良した SINTEX-F2 や、海洋初期値作成プロセスを高度化した SINTEX-F2-3DVAR を使って、2018 年の夏から秋にかけてのインド洋ダイポールモード現象の発生を、2018 年 5 月 1 日時点で予測したのが、図２である。また、同様にエルニーニョモドキ現象の発生を予測したのが図３である。強さの不確実性は残るものの、2018 年夏にはインド洋ダイポールモード現象の正のイベントとエルニーニョモドキ現象が同時発生する確率がかなり高いと予測していた。

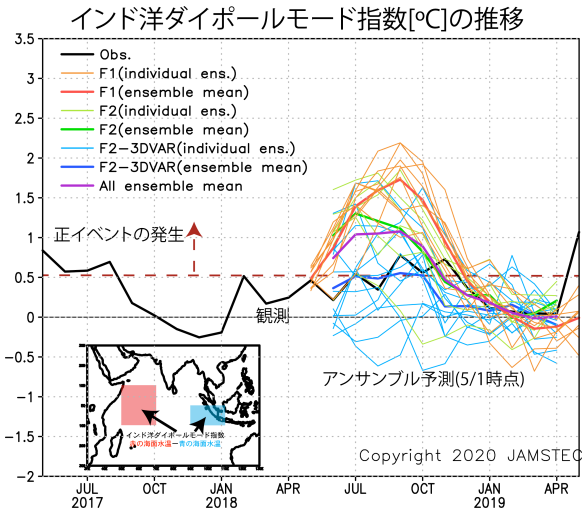


図２： インド洋ダイポールモード現象の指数 DMI（西インド洋熱帯域の海面水温偏差の東西差を示す数値で単位は°C）。0.5 度を越えれば正イベントが発生していると考えて良い。黒線が観測。2018 年 5/1 時点で予測したのが色線。従来の SINTEX-F（赤色の線：アンサンブル平均値、橙色の線：各予測アンサンブルメンバー）、モデルを改良した SINTEX-F2（緑色の線：アンサンブル平均値、黄緑色の線：各予測アンサンブルメンバー）や、海洋初期値作成プロセスを高度化した SINTEX-F2-3DVAR（青色の線：アンサンブル平均値、水色の線：各予測アンサンブルメンバー）の結果。紫色の線は全ての予測アンサンブルの平均値。このように、気候モデルを用いた数理的な予測実験ではそれぞれの予測システムで初期値やモデルの設定を様々な方法で少しずつ変えて、複数回予測を行う（アンサンサンブル予測と呼ぶ）。これらの手法は、インド洋ダイポールモード現象の予測の不確実性を議論するために有効である。

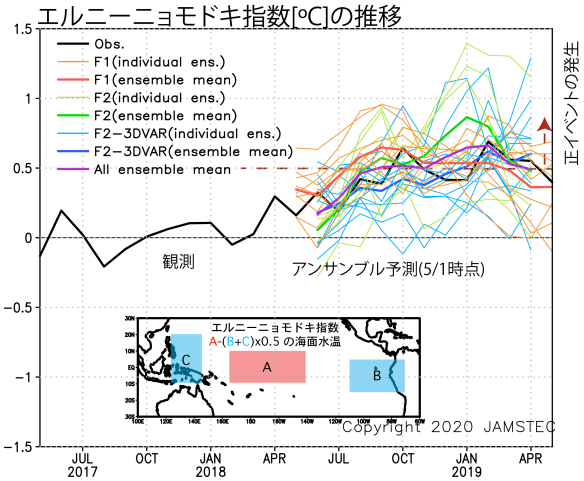


図３： 図２と同様だが、エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象の指標 EMI についての図（単位は°C）。0.5 度を超えればエルニーニョモドキ現象が発生していると考えて良い。

そこで、我々は、JAMSTEC ニュースコラムにおいて、その早期警戒情報を配信した（http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20180606_3/）。特に、予測通りに進行するならば、インド洋東部から海大陸周辺にかけて、海水温が低下し、対流活動が抑制されて、インドネシア、オーストラリアでは干ばつが発生し、水不足による農業への影響や山火事の多発による煙害などが危惧されることや、正のダイポールモード現象とエルニーニョモドキ現象の組み合わせの典型的な夏は 1994 年であること、そしてこの年の日本は記録的な猛暑であったこと、などを指摘した。

2.2 予測の検証

実際、正のインド洋ダイポールモード現象とエルニーニョモドキ現象は同時発生し、その予測は成功した。また、日本は記録的な猛暑になった。その成功から、多くのメディアに取り上げられた。

まず、インド洋ダイポールモード指数に関して言えば、2018 年 9-11 月において、観測値は 0.5°C を上回り、正のイベントが発生したといえる。SINTEX-F や SINTEX-F2 システムではやや振幅を過大評価していたものの、SINTEX-F2-3DVAR システムでの予測は、観測値とよく合っていたといえる（図２）。

次に、エルニーニョモドキ現象の指標 EMI に注目すると、観測値は 0.5°C 付近を推移しており、弱いながらもエルニーニョモドキ現象が発生したといえる。予測は、その符号のみならず、振幅までも現実と整合的であったといえる（図３）。

次に、2018 年夏（2018 年 6 月から 8 月の平均）の水平図を確認した。まず、海表面偏差を確認すると、熱帯インド洋東部の負偏差や、熱帯太平洋中央部の正偏差を、過大評価しているもの、概ね予測値は観測値と整合的で

あった(図４)。

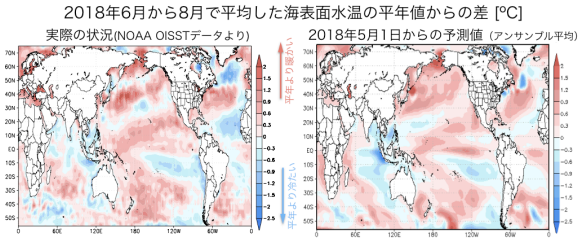


図４: 2018 年夏(2018 年 6 月から 8 月の平均)における海表面水温の平年値からの差(単位は℃)。左図は実際の状況(正確には米国 NOAA から配信される観測データ)で、右図が 2018 年 5 月 1 日からの予測値。

次に、地上気温の平年値からの差を比較した(図５)。実際の状況をみると、ユーラシア大陸の広い範囲で、高温傾向が目立つ。その予測には概ね成功していた。しかし、アフリカ大陸や南アメリカ大陸の一部の地域の低温傾向については予測が外れていた。

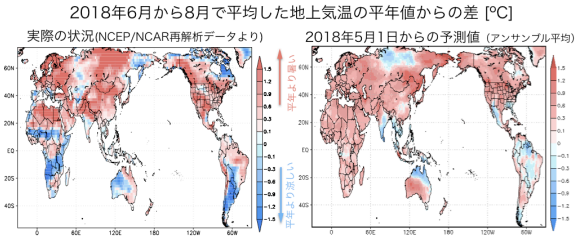


図５: 2018 年夏(2018 年 6 月から 8 月の平均)における地上気温の平年値からの差(単位は℃)。左図は実際の状況(正確には米国 NCEP/NCAR から配信される再解析データ)で、右図が 2018 年 5 月 1 日からの予測値。

次に、降水量の平年値からの差を比較した(図６)。実際の状況をみると、海上の降水量パターンや、豪州の乾燥傾向などがよく予測できていた。一方で中国を中心とした東アジアや、西アフリカの一部の地域の多雨傾向についてはあまり予測できていなかった。

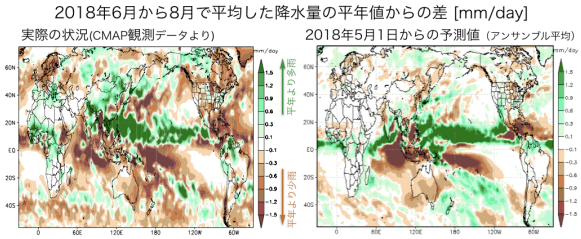


図６: 2018 年夏(2018 年 6 月から 8 月の平均)における降水量の平年値からの差(単位は mm/day)。左図は実際の状況(正確には CMAP と呼ばれる観測データ)で、右図が 2018 年 5 月 1 日からの予測値。

次に、対流圏下層の循環場を比較した(図 7)。インド洋東部での高気圧性、フィリピン付近の低気圧性、日本を含む極東域の高気圧性偏差などが、比較的よく予測できていた。

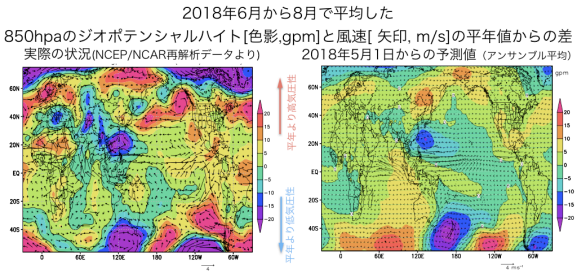


図７: 2018 年夏(2018 年 6 月から 8 月の平均)における対流圏下層 850hpa のジオポテンシャル高(色影:gpm)と風速(矢印:m/s)の平年値からの差。左図は実際の状況(正確には正確には米国 NCEP/NCAR から配信される再解析データ)で、右図が 2018 年 5 月 1 日からの予測値。

次に、対流圏上層の循環場を比較した(図 8)。インド洋東部での負偏差、日本を含む極東域の正偏差などが、比較的よく予測できていた。

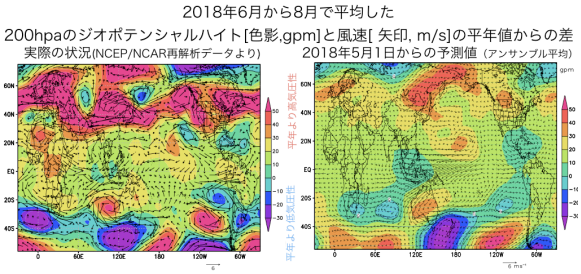


図 8: 2018 年夏(2018 年 6 月から 8 月の平均)における対流圏上層 200hpa のジオポテンシャル高(色影:gpm)と風速(矢印:m/s)の平年値からの差。左図は実際の状況(正確には米国 NCEP/NCAR から配信される再解析データ)で、右図が 2018 年 5 月 1 日からの予測値。

これらは、インド洋の水温異常が東アジアまで遠隔的に影響していた可能性(例えば、[4])を示唆しているかもしれない。すなわち、1)インド洋ダイポールモード現象の東の極の水温が平年より冷たいことで、2)同領域で高気圧性循環及び下降流が形成される。3)その空気は北に動き、フィリピン付近に、平年より多くの水蒸気が供給され、降水量が増加し、低気圧性循環が強化される。4)この付近の上空で空気が広がる発散域ができ、 5)それが東アジア上空で収束することで、日本を含む東アジアが背の高い高気圧に覆われやすく、暑く乾燥した夏になった可能性である。その因果関係やプロセスを理解するためには、今後さらなる解析が必要である。

インド洋ダイポールモード現象は、インド洋周辺国だけでなく、欧州や東アジアの天候の異常に影響する。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[5]や、オーストラリアの小麦の凶作[6]などを引き起こし、私達の安全・安心を脅かす程甚大な被害を与え

ることが解ってきた。エルニーニョモドキ現象も、例えば、エルニーニョのときはアメリカの西海岸では雨が多くなるが、エルニーニョモドキのときは雨が少なくなる(例えば、[7])。最近の研究によれば、ENSO モドキに付随するテレコネクションはインドと南アフリカの降水に影響を与えることが報告されている(例えば、[8])。これらの現象が同時発生すると、複雑に影響し合うことも指摘されている(例えば、[9])。特に、インドネシアの少雨傾向が極端化される可能性が危惧される。

今後も、アプリケーションラボの SINTEX-F 予測シミュレーションを準リアルタイムに運用し、熱帯太平洋、熱帯インド洋の状況に注意していく必要がある。

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。本研究は環境研究総合推進費(2-1405:"最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測とその社会応用") や、AMED-JICA が推進する SATREPS 感染症課題[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]の補助を受けている。

文献

[1] Luo, J.-J., S. Masson, S. Behera, S. Shingu, and T. Yamagata, "Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts", J. Clim., 18, 4474-4494, 2005

[2] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, "Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model", J. Adv. Model. Earth Syst., DOI: 10.1002/2016MS000744, 2016

[3] Doi, T., A. Storto, S. K. Behera, A. Navarra, and T. Yamagata, "Improved prediction of the Indian Ocean Dipole Mode by use of subsurface ocean observations", J. Climate, 30, 7953-7970, 2017

[4] Yamagata, T., S. K. Behera, J. Luo, S. Masson, M. R. Jury, and S. a. Rao, "Coupled Ocean-Atmosphere Variability in the Tropical Indian Ocean", Earth's Clim., 1-23, doi:10.1029/147GM12, 2004

[5] Hashizume, H., L. F. Chaves, and N. Minakawa, "Indian Ocean Dipole drives malaria resurgence in East African highlands." Sci. Rep. 2, doi:10.1038/srep00269, 2012

[6] Yuan, C., and T. Yamgata, "Impacts of IOD, ENSO and ENSO Modoki on the Australian Winter Wheat Yields in Recent Decades". Sci. Rep. doi:10.1038/srep17252, 2015

[7] Weng, H., K. Ashok, S. K. Behera, S. A. Rao, and T. Yamagata, "Impacts of recent El Nino Modoki on dry/wet condidions in the Pacific rim during boreal summer". Climate Dynamics, 29, 113-129, 2008

[8] Ratnam J. V., S. K. Behera, Y. Masumoto, K. Takahashi and T. Yamagata, "Pacific Ocean origin for the 2009 Indian summer monsoon failure". Geophys. Res. Lett., 37, L07807, doi:10.1029/2010GL042798, 2010

[9] Tozuka, T., Luo, JJ., Masson, S. et al. "Tropical Indian Ocean variability revealed by self-organizing maps,Clim Dyn 31: 333. https://doi.org/10.1007/s00382-007-0356-4, 2008

A real-time APL Model Ensemble Seasonal Prediction System and its Application

Project Representative
Swadhin Behera　Application Laboratory,　Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors
Takeshi Doi *[1],　Yushi Morioka *[1],　Swadhin Behera *[1]
*[1] Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We have been conducting seasonal predictions every month using the SINTEX-F seasonal prediction system on the Earth Simulator and providing a real-time outlook of seasonal to interannual climate prediction on our website (http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/e/seasonal/outlook.html).

In 2018, we experienced co-occurrence of a positive Indian Ocean Dipole event and an El Niño-Modoki event. The SINTEX-F system successfully predicted these events. We provided the information through our open websites not only for researchers, but also for general public.

Keywords : Seasonal Prediction, Real-time, Climate Watch, El Niño Prediction, Indian Ocean Dipole Mode Prediction

1. Websites for real-time seasonal prediction

We have updated several websites (

SINTEX-F website:

http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/e/seasonal/outlook.html ;

Climate Watch:

http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/climate/?lang=en

) to provide quasi real-time seasonal climate prediction information based on the SINTEX-F systems developed at JAMSTEC/APL (Luo et al. 2005; Doi et al. 2016; Doi et al. 2017). Now, these websites receive worldwide attention with about 10,000-70,000 hits per month (Fig. 1).

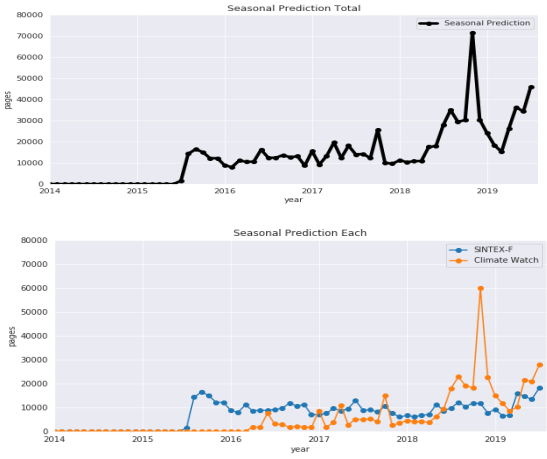


Fig. 1: The number of visitors to the SINTEX-F websites (compiled by Dr. Miyama)

2. Verifying the 2018 summer prediction

The observations show that a positive Indian Ocean Dipole (IOD) developed in summer 2018 and continued through the autumn, with the IOD index exceeding +0.5 ºC (black line in Fig. 2). It was successfully predicted by the SINTEX-F systems initialized on May 1, 2018. Although the SINTEX-F1 (Luo et al. 2005) and the SINTEX-F2 (Doi et al. 2016) prediction overestimated the amplitude of the IOD, the SINTEX-F2-3DVAR system (Doi et al. 2017) successfully predicted it.

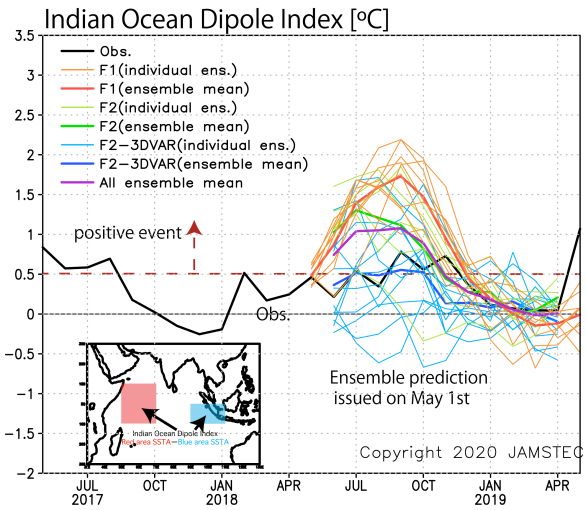


Figure 2. Observations (black line) and SINTEX-F ensemble prediction (color lines) of the Indian Ocean Dipole Mode Index, which measures the east-west temperature difference in the tropical Indian Ocean. The prediction was initialized on May 1, 2018. The values denote the departure of the index from average conditions (i.e. anomalies). The units are degrees Celsius.

Also, a weak El Niño Modoki developed and continued in the latter half of 2018, with the El Niño Modoki index exceeding +0.5 ºC (black line in Fig. 3). It was also successfully predicted by the SINTEX-F systems initialized on May 1, 2018.

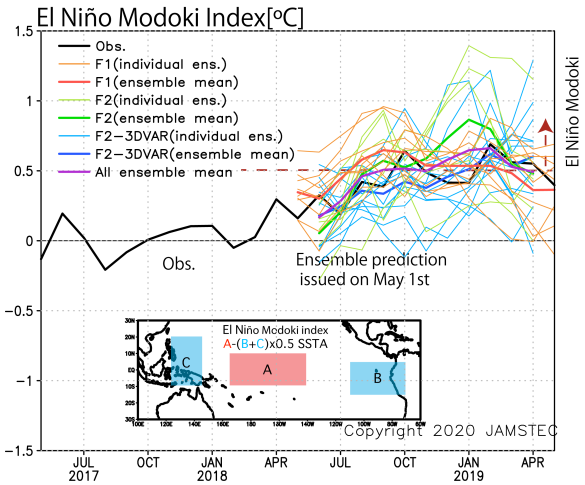


Figure 3. Same as Fig. 2, but for the El Niño Modoki index.

Surface air temperature predictions for the summer of 2018 are shown in Fig. 4. The left panel shows the surface air temperature anomalies in the NCEP/NCAR reanalysis (a product that combines observations and model simulation to obtain a best estimate of climate conditions), while the right panel shows the SINTEX-F predictions. Both are averaged from June through August. Since the model was initialized on 1 May, 2018, the shown predictions are for temperatures one-to-three months ahead. By and large the prediction was successful, including Japan. However, there are some regions with less skillful prediction, such as some parts of the African Continent and the South American Continent.

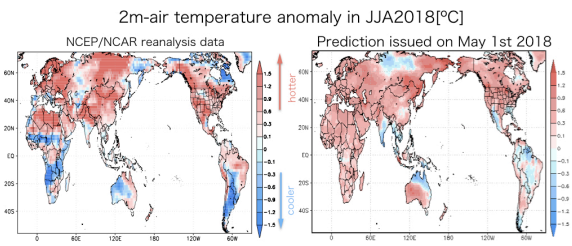
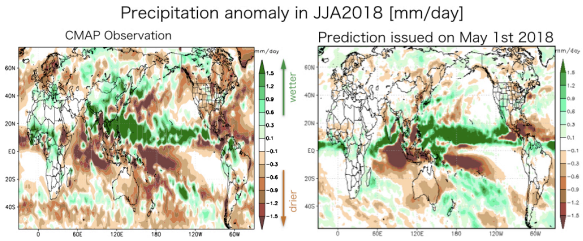


Figure 4. Surface air temperature anomalies for the period June through August 2018 from NCEP/NCAR reanalysis (left) and the SINTEX-F prediction initialized on 1 May 2018 (right). Blue shading means cooler than average, red shading means warmer than average.

Finally, let us take a look at the rainfall prediction for summer 2018 (averaged from June through August). The left panel of Fig. 5 shows the CMAP observations, while the right panel shows the SINTEX-F prediction initialized from May 1. For regions over ocean, the prediction agrees quite well with the observations. In particular, the signature of the above-mentioned positive IOD, with decreased rain over the eastern equatorial Indian Ocean, is well reproduced by the model. The model also correctly predicted drier conditions over Java, Sumatra, Australia and wetter conditions over the



Philippine Sea. However, the prediction failed in many areas of midlatitudes, including East Asia and West Africa. Obviously, much work remains to be done to improve the seasonal climate predictability of those regions.

Figure 5. Rainfall anomalies for the period June through August 2018 from CMAP observations (left) and the SINTEX-F prediction initialized on 1 May 2018 (right). Brown shades mean drier than average, green shades mean wetter than average.

Acknowledgement

We are grateful to Drs. Wataru Sasaki, Jing-Jia Luo, Sebastian Masson, and our European colleagues of INGV/CMCC, LOCEAN/IPSL, and MPI-M 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.

References

[1] Luo, J.-J., S. Masson, S. Behera, S. Shingu, and T. Yamagata, 2005a: Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts. J. Clim., 18, 4474-4494.

[2] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2016: Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model, J. Adv. Model. Earth Syst., 8, 1847-1867, DOI: 10.1002/2016MS000744

[3] 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. Climate, 30, 7953-7970