

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 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}, 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

自然災害をもたらす気候変動現象の高精度な事前予測の実現に資するため、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 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。

2019年度は、過去最大級の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所で天候異常を引き起こした。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。その結果、テレビや新聞など多くのメディアに取り上げられた。

キーワード：季節予測, 準リアルタイム情報配信, 季節ウォッチ, インド洋ダイポールモード予測, マラリア流行予測

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“季節ウォッチ”を 2016 年 1 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 50000 程度のアクセスがあった。平均すると、前年と比べてアクセス数が増えており、季節予測の情報発信について、成果が確認できる(図 1)。

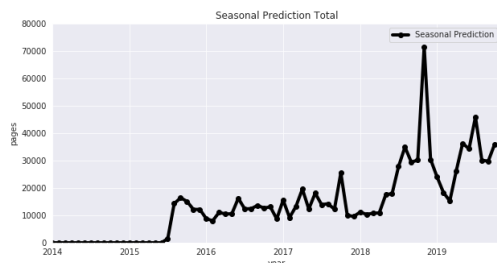


図 1: SINTEX-F 季節予測関連のウェブサイトのアクセス解析(美山主任研究員の提供)

2. インド洋に過去最大級の正のダイポールモード現象が発生

2019 年 5 月の時点では、2018 年の晩秋から、熱帯太平洋はほぼ全域で、平年より水温が高い状態が続いていた。典型的なエルニーニョ現象とは、少し様子が違うようであった。熱帯太平洋の動向も気になるころであったが、2019 年 5 月の時点で、熱帯インド洋に正のダイポールモード現象が発生する可能性が高まっていることが予測された。予測通りに進行するならば、2017 年、2018 年に続き、3 年連続で発生することになり、非常に珍しいケースであると言える。(2006 年、2007 年、2008 年も 3 年連続で発生した)。そこで、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/20190524/)。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 年や 2018 年であること、そしてそれら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。

実際に、2019 年、過去最強クラスの正のインド洋ダイポールモード現象が発生した。5 月頃から急成長し、11 月には最盛期を迎え、12 月からわずかに衰退し始め、年が明けてようやく終息した(図 2)。典型的な事例と比べ、数倍程度の強さで発生期間も長かったことから、1994 年や 1997 年と並び、スーパーインド洋ダイポールモード現象と呼ぶことができるであろう(Doi et al. 2020 [1])。過去最悪と言われる豪州の山火事や、東アフリカで食糧不足を招くバッタ大量発生、日本の記録的暖冬の一因にも

なったと指摘されている。

このように、予測が的中したこと、テレビや新聞など多くのメディアで関連する研究が取り上げられ、インド洋ダイポールモード現象や季節予測についての知名度が飛躍的に向上した。

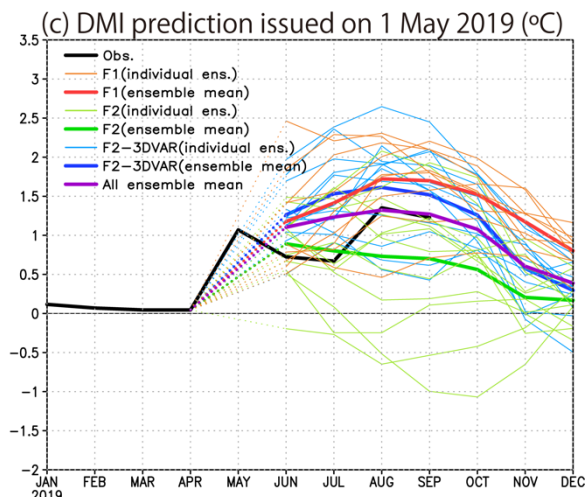


図 2: インド洋ダイポールモード現象の指数 DMI (西インド洋熱帯域の海面水温偏差の東西差を示す数値で単位は $^{\circ}\text{C}$)。0.5 度を越えれば正イベントが発生していると考えて良い。黒が観測。2019 年 5/1 時点で予測したのが色線。従来の SINTEX-F (赤色の線: アンサンブル平均値、橙色の線: 各予測アンサンブルメンバー)、モデルを改良した SINTEX-F2 (緑色の線: アンサンブル平均値、黄緑色の線: 各予測アンサンブルメンバー) や、海洋初期値作成プロセスを高度化した SINTEX-F2-3DVAR (青色の線: アンサンブル平均値、水色の線: 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値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。図は Fig. 1c of Doi et al. 2020 [1]。

3. 季節予測を使った南アフリカのマラリアの流行予測

マラリアの流行は、降水量や気温など気候に大きく影響を受けるとされている。雨が多いと、マラリアを媒介する蚊の繁殖地が増え、感染が拡大する。また気温が高いと、蚊の中で、寄生虫の成長時間が短くなり、感染が拡大するとの報告がある。その他にも気温は、蚊の成長、繁殖、寿命、噛む頻度などに影響すると言われている。

アフリカ南部などの、開発途上国の感染症問題は近年の地球温暖化の進行や著しい季節不順によりその脅威を増しつつある。例えば、エルニーニョなどに伴う洪水により、マラリアやコレラの流行がアフリカで頻繁に発生している。しかし、事前に、エルニーニョの発生予測やそれに伴う大雨を予測できれば、感染症流行に備えて、薬を

蓄える、あるいは媒介する蚊の繁殖を抑える殺虫剤の散布を強化するなどの対策をとることができるようになる。

本研究では、南アフリカ共和国のリンポポ州に注目し、準リアルタイムの SINTEX-F 季節予測システムの予測結果を使って、マラリア流行を事前に予測するシステムを開発した。

過去の季節予測情報を使って 2 週間前からマラリア流行を予測することを繰り返した結果、各年のマラリア流行を良く予測できていたことを確認した (図 3)。予測と実際の値のもっとも大きな差異は、2014-2015 年のケースで確認できた。これは、予測モデルが、2015 年初頭の大規模なアウトブレイクを適切に予測できなかったことに起因する (図 4)。また、4 週間前から予測しても、予測スキルは低下するものの、全体的に各年のマラリア流行を良く予測できていたことがわかる (図 5)。

これらの流行予測の結果を医療機関等の現場に配信する感染症早期警戒システムの構築を進めている。

一連の成果は (Kim et al. 2019 [2]) として発表した。

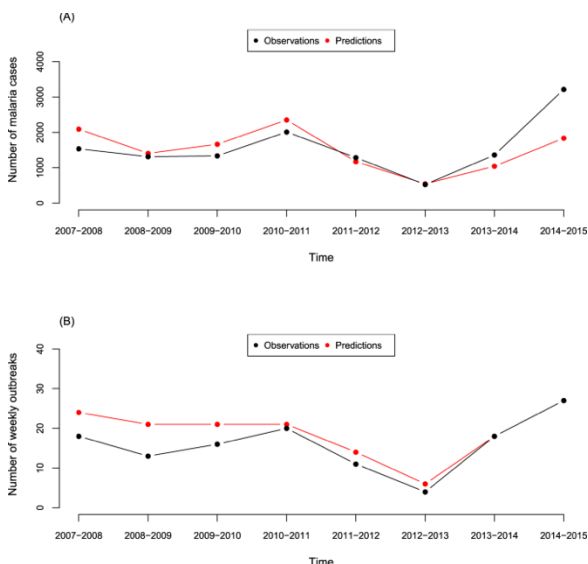


図 3: 南アフリカ共和国のリンポポ州ベンベ市で年毎に集計された (A) マラリアの患者数と (B) マラリアのアウトブレイク数 (9-5 月のマラリア流行季節に、5 年移動平均で発生したマラリアケースの 40% パーセンタイルで定義)。観測が黒線で、季節予測を使って 2 週間前から予測したのが赤線。

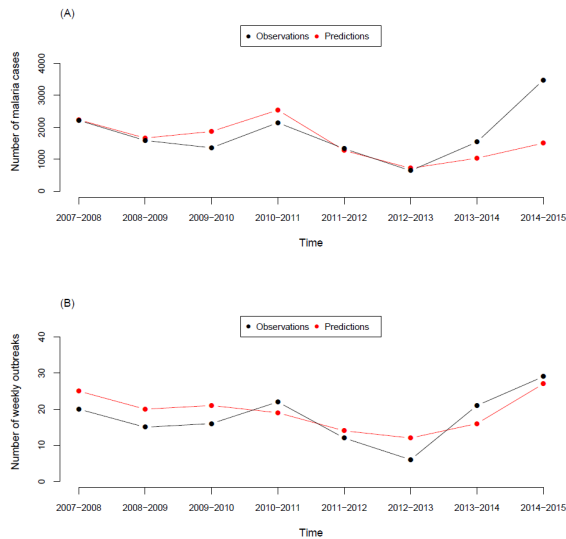


図4：図3と同様だが、季節予測を使って4週間前から予測したのが赤線。

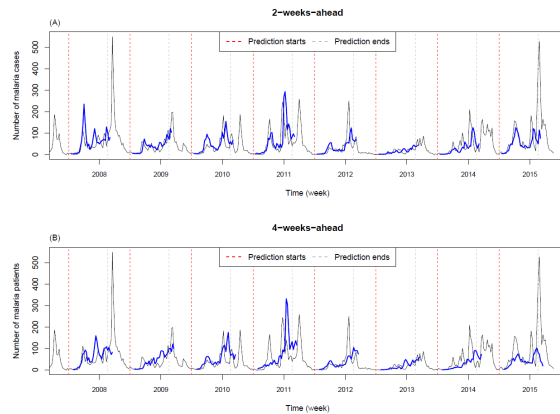


図5：南アフリカ共和国のリンボポ州ベンベ市で週毎に集計されたマラリアの患者数を、(A) 2週間前から予測した場合と(B) 4週間前から予測した場合。観測が黒線で、季節予測を使って予測したのが青線。赤点線は予測開始時点で、黒点線は予測終了時点。

4. 季節予測システムのバージョンアップ「SINTEX-F1 システムから SINTEX-F Family システムへ」

APL(前身は、地球環境フロンティア研究センターの気候変動プログラム)では、2005 年来、日欧協力で開発した SINTEX-F1 大気海洋結合モデルを基盤とした季節予測システム(Luo et al. 2005) [3]を用いて、最大2年先までの気候変動予測を行い、その予測情報を JAMSTEC のウェブサイト上で公開してきた(図6)。この予測システム(“F1”と呼ぶ)は、多くの成功を収め、エルニーニョ現象、エルニーニョモドキ現象、インド洋ダイポールモード現象などの熱帯の気候変動現象の予測に関して世界最先端の予測システムの1つとなった。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(所内課題

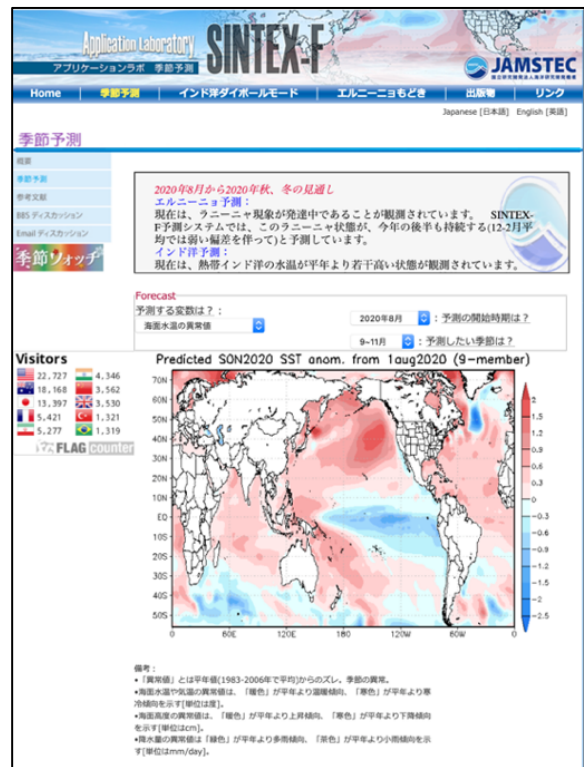


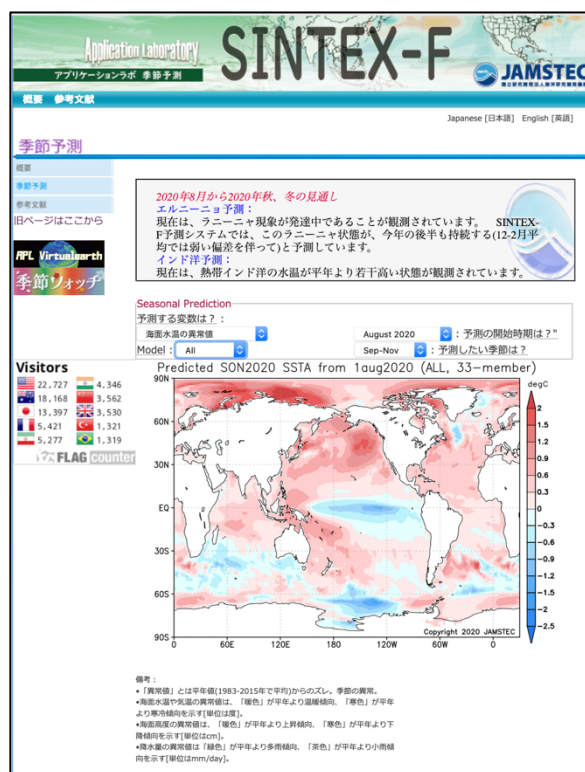
図6：従来の SINTEX-F1 の Web サイト(現在は、<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.F1.html> で確認できる)。

「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」(代表：Swadhin Behera)。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“F2”(Doi et al. 2016) [4]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(“F2-3DVAR “; Doi et al. 2017[5])。

大気海洋結合システムは強い非線形性を持つため、初期値や使用する物理スキームの違いによって得られる解がばらつく。したがって、初期値や物理スキームの違いに起因する予測の不確実性を軽減するために、多くのアンサンブルメンバーで予測を行ってきた。SINTEX-F 季節予測システムは、初期状態を作成する際にモデルの海面水温を3段階の強さで、2種類の観測された海面水温に緩和する(“F2-3DVAR “では上述の通り、海中の観測データも同化している)。さらに、その各々に対して数種類の大気-海洋結合スキームや海洋鉛直混合スキームを使用している。

従来は“F1”を使った9アンサンブルでの予測情報を配信していたが、2019年度から、“F1”, “F2”, “F2-3DVAR”の3種類のシステムを合計して、33のマルチモデルアンサンブルメンバーで季節予測を配信できるように新しく Web サイトを構築した。2005 年来から継続して実施して

きた準リアルタイム季節予測情報の配信が、今年度から SINTEX-F の様々なバージョンを統合したマルチモデルアンサンブル予測(SINTEX-F Family と呼ぶ, Doi et al. 2020 [1])による配信へと、大幅にバージョンアップされた(図 7)。また、“F2-3DVAR” システムのアンサンブルメンバーを、時間ズラし平均法(予測開始日が毎月の1-9日)で、108 まで増強した“108mem”での4ヶ月リード予測の情



報も実験的に公開し始めた(Doi et al. 2019 [6])。図 7: 新しい SINTEX-F Family の Web サイト (<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.html>)。従来のサイトと違って、「Model」と書かれたプルダウンメニューで、“F1”, “F2”, “F2-3DVAR” システムのそれぞれの予測結果を確認できると共に、それらのアンサンブル平均値を“All”で確認できるようになった。

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。

特にセクション 3 は、地球規模課題対応国際科学技術協力事業の課題『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』の支援を受けた。本課題は、長崎大学熱帯医学研究所と南アフリカ共和国の気候地球システム科学応用センター(ACCESS)の共同研究で、期間は、平成 31 年 3 月(5 年間)まで実施した。

文献

- [1] Doi, T., S. Behera, T. Yamagata, “Predictability of the super IOD event in 2019 and its link with El Niño Modoki”, Geophysical Research Letters (47), e2019GL086713, (2020/04)
- [2] Kim, Y. Jayanthi Ratnam, T. Doi, Yushi Morioka, Swadhin Behera, and coauthors, “Malaria predictions based on seasonal climate forecasts in South Africa: A time series distributed lag nonlinear model”, Scientific Reports, 17882, (2019/12)
- [3] 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”, Journal of Climate (18), 4474-4494, (2005/11)
- [4] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, “Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model”, Journal of Advances in Modeling Earth Systems (8), 1847-1867, (2016/11)
- [5] 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”, Journal of Climate (30), 7953-7970, (2017/09)
- [6] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, “Merits of a 108-Member Ensemble System in ENSO and IOD Predictions”, Journal of Climate (32), 957-972, (2019/01)

A Real-time APL Model Ensemble Seasonal Prediction System 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

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 2019, we have started to provide a real time seasonal prediction by SINTEX-F multi model ensemble system i.e. the “SINTEX-F Family”. The system successfully predicted co-occurrence of a positive Indian Ocean Dipole event in 2019. We provided the information through our open websites not only for researchers, but also for general public.

We have developed a Malaria prediction system based on SINTEX-F real time seasonal forecasts in South Africa.

Keywords : Seasonal prediction, Indian Ocean Dipole, Maralia prediction, Model ensemble prediction

1. Real time predictions

For our climate predictions, almost 15 years ago, we have developed the SINTEX-F1 ocean-atmosphere coupled general circulation model under the EU-Japan research collaboration. Based on this seasonal prediction system ("F1", Luo et al. 2005 [1]), we have performed climate predictions 2 year ahead and distributed the prediction information on JAMSTEC website since 2005 (<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/e/seasonal/outlook.html>). We have achieved great successes in these years and SINTEX-F1 has become one of the leading models of the world for predicting the tropical climate variations in particular the IOD, the ENSO and the ENSO Modoki.

To improve prediction of extratropical climate, an upgraded CGCM called SINTEX-F2 has been developed; the new system is a high-resolution version of the previous model added with a dynamical sea-ice model ("F2", Doi et al. 2016 [2]). For the tropical climate variations in the Pacific and the Indian Ocean, the SINTEX-F2 preserves the high-prediction skill, and sometimes even shows higher skill especially for strong events, as compared to the SINTEX-F1. In addition, it has turned out that the new system is more skillful in predicting the subtropics, particularly, the Indian Ocean Subtropical Dipole and the Ningaloo Niño.

The SINTEX-F1/F2 seasonal prediction systems adopt a relatively simple initialization scheme based on nudging only the sea surface temperature (SST). However, it is to be expected that the system is not sufficient to capture in detail the subsurface oceanic preconditions. Therefore, we have introduced a new three-dimensional variational ocean data assimilation (3DVAR) method that takes three-dimensional observed ocean temperature and salinity into account. This system ("F2-3DVAR", Doi et al.

2017 [3]) has successfully improved seasonal predictions in the tropical Indian and Atlantic Oceans.

We have started to provide a real time seasonal prediction based on those three systems. This multi model ensemble system “SINTEX-F Family” (Doi et al. 2020 [4]) successfully predicted co-occurrence of a positive Indian Ocean Dipole event (Figure 1) and an El Niño-Modoki event in 2019. We provided the information through our open websites not only for researchers, but also for general public.

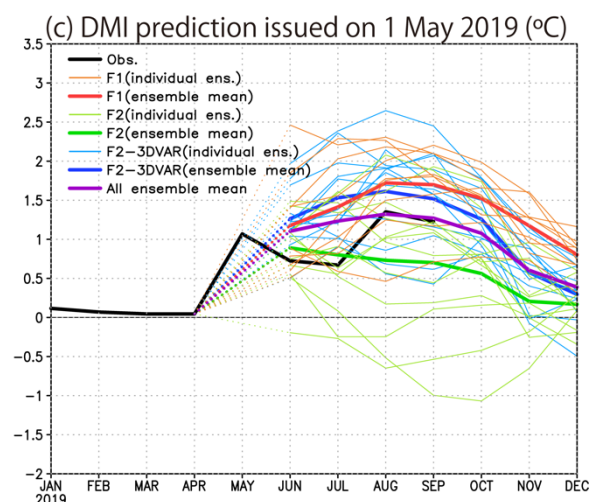


Figure 1: Monthly Indian Ocean Dipole Mode Index (DMI) in 2019 (°C) from the observational data of NOAA OISSTv2 (black) and the prediction issued on 1 May 2019 with the 9-ensembles by the F1 (thin orange, each ensemble member; thick red, ensemble mean), the 12-ensembles by the F2 (thin right green, each ensemble member; thick green, ensemble mean), the 12-ensembles by the F2-3DVAR (thin right blue, each ensemble member; thick blue, ensemble mean), and the all ensemble mean

(thick purple). DMI is defined as the SST anomaly difference between the western pole off East Africa (50–70°E, 10°S to 10°N) and the eastern pole off Sumatra (90–110°E, 10°S to equator).

2. Malaria predictions in South Africa based on our seasonal climate forecasts: A time series distributed lag nonlinear model (Kim et al. 2019 [5])

We developed a malaria prediction model taking into account nonlinear and delayed complexities of the malaria–climate dynamics. The prediction model showed good performance at the short-term lead time, and the prediction accuracy decreased as the lead time increased but retained fairly good performance. We also demonstrated the weekly-updated malaria prediction process based on seasonal climate forecasts and found that the malaria predictions for short-term lead time coincided closely with the observed malaria cases (Figure 2). The malaria prediction model we developed is promising because it is feasibly applicable in practice together with the skillful seasonal climate forecasts and existing malaria surveillance system in South Africa. Establishing an automated operating system based on real-time data inputs could potentially be beneficial for the malaria early warning system in Limpopo, South Africa, and can be an instructive example for other malaria-endemic areas.

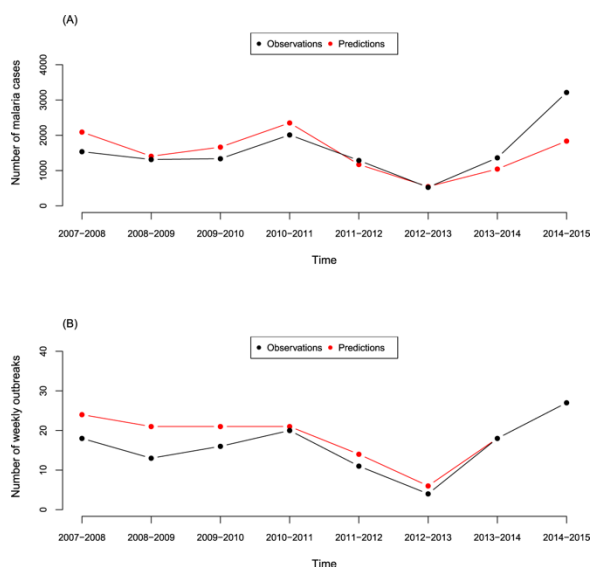


Figure 2: Cumulative annual number of malaria incidence and malaria outbreaks, defined by the 40th percentile of the past moving 5-years malaria cases during the endemic season (September–May), for the 2-weeks-ahead lead time (red, predictions; black, observations) in the demonstration of the weekly-updated malaria prediction process based on SINTEX-F seasonal climate forecasts.

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.

The research in Section 2 was carried out for the iDEWS (infectious Diseases Early-Warning System) project supported by SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development) Program of JICA (Japan International Cooperation Agency)/AMED (Japan Agency for Medical Research and Development) in Japan and the ACCESS (Applied Centre for Climate and Earth Systems Science) program of NRF (National Research Foundation) and DST (Department of Science and Technology) in South Africa.

References

- [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”, *Journal of Climate* (18), 4474–4494, (2005/11)
- [2] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, “Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model”, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* (8), 1847–1867, (2016/11)
- [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”, *Journal of Climate* (30), 7953–7970, (2017/09)
- [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, (2020/04)
- [5] Kim, Y. Jayanthi Ratnam, T. Doi, Yushi Morioka, Swadhin Behera, and coauthors, “Malaria predictions based on seasonal climate forecasts in South Africa: A time series distributed lag nonlinear model”, *Scientific Reports*, 17882, (2019/12)