

# 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\*<sup>1</sup>, 森岡 優志\*<sup>1</sup>, Behera Swadhin \*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 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。本年度は主に以下の二つの成果をあげた。

気候にも大きく影響する熱帯の海水温変動を捉えることは季節予測シミュレーションに重要だが、地形が複雑な縁辺海の海洋観測データが不足している。本研究では、深度・水温観測装置を付けたウミガメ由来の観測データを用いることで、数ヶ月先の海水温変動の予測精度が向上した。従来、主に生態調査に活用されてきた動物由来の観測データを、熱帯域において、季節予測シミュレーションに活用した研究は世界初である。本成果は、バイオロギング手法による野生動物の回遊パターンの把握のみならず、海洋・気象観測網を構築できる可能性を示す。

2019年に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。本現象は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の大量発生、日本の記録的暖冬の一因になったとも指摘されている。SINTEX-Fでは、前年の秋から、その予測に成功していた。予測成功の鍵は、熱帯太平洋で発生していたエルニーニョモドキ現象であった。

**キーワード:** 季節予測, 観測システム実験, バイオロギング, 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. 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、EUとの共同研究によって、大気-海洋-陸面-海水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を基盤とした「SINTEX-F 季節予測システム」と呼ばれるソフトウェアを開発し、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。例えば、2019年豪州の山火事などは、まさにそのような問題であったと考えられる。すなわち、温暖化の進行によって、乾燥化しつつある豪州で、インド洋ダイポールモード現象の影響が重なったことで、極端に乾燥し、過去最悪の山火事を引き起こしたと考えられる。

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. 海洋観測の現状

数ヶ月程度先の季節の不順を高精度に事前予測するためには、予測開始時点で、熱容量の大きい海の水温構造を正確に把握する必要がある。海の表面水温は、国際協力のもと人工衛星によって準リアルタイムに地球規模でモニタリングされている。一方、海中の水温構造は人工衛星からは直接観測できない。そこで、いわゆる開けた大きな海(太平洋、大西洋、インド洋など)については、別の手段を用いた国際観測網が設計・展開されてきた。例えば、アルゴフロートと呼ばれる自動ロボットは、深度2,000mから海面までの水温の鉛直分布を観測可能で、2000年代から展開され始め、今では、世界の海で4,000台近くが稼働している。また、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の兆候を監視するため、熱帯には係留ブイ網が展開されている。その計画には、JAMSTECも大きく貢献してきた。

しかし、このような観測網のデザインを比較的水深が浅く複雑な陸地や島で囲まれている縁辺海にそのまま適用することは難しく、縁辺海の海洋観測データは不足しているのが現状である

## 3. バイオロギングデータを季節予測に活用

Doi et al. (2019) [1]では、従来、主に生態調査に活用されてきた動物由来の観測データを、熱帯域において、季節予測シミュレーションに活用し、その有効性を示した。これは世界初の成果である。対象としたのは、アラフラ海(ニューギニア島南西岸、オーストラリア北岸、小スンダ列島・タニンバル諸島等で囲まれる海)と呼ばれる縁辺海である。

ウミガメの潜水行動や経験水温を記録して、人工衛星

経路でデータを送信する装置を個体に取り付けるバイオリロギング手法により、既存の観測システムでは測定できなかったアラフラ海の水面下の水温情報を効率良く取得することを考えた。今回研究に用いたヒメウミガメは、比較的小型の種だが海底に生息する生物を餌として捕らえるために深度100m以上の潜水を繰り返すという行動生態的な特徴がある。東京大学大気海洋研究所の佐藤克文教授らは、科学技術振興機構 JST の元で進められている戦略的創造研究推進事業 CREST の予算を受けて、特定非営利活動法人エバーラスティング・ネイチャーとの共同研究としてヒメウミガメの野外調査を2017年6月に実施した。インドネシア西パプア州のワルマメディ海岸において、産卵のために上陸したヒメウミガメ5頭に人工衛星対応型発信器を取り付けたところ、5頭はニューギニア島を反時計回りに迂回してアラフラ海へ向かった。各個体が毎日深度数十メートルから100メートル以上の潜水を繰り返した結果、約3ヶ月間にわたってほぼ毎日、水面下の水温情報を人工衛星経路で得ることができた。

上記の方法で得られたウミガメ由来の水温データを、季節予測システムに取り込むことで、3ヶ月後の周辺海域の水温変動の予測シミュレーションが劇的に改善されるという結果が得られた。図1は、2017年11月の海表面水温の異常値(°C)を示している。赤(青)色ほど水温が平年より異常に高(低)いことを示している。(a)は衛星から観測された値で、黒線で囲った海域の水温が平年に比べて異常に高いことがわかる。(b)は2017年8月1日時点(つまり3ヶ月程度前から)で、予測シミュレーションした値である。黒線で囲った海域の水温予測が(a)の実際に観測された値から大きく外れてしまっているのが分かる。(c)はウミガメ由来の水温データを予測の初期値に取り込んで、予測シミュレーションした値である。黒線で囲った海域の水温予測が(b)と比べて(a)に近く、水温予測が大幅に改善された。

従来、バイオリロギングによる動物由来の観測データは主に生態調査に活用されてきたが、近年はそのような動物由来の観測データを使って海況・気候の変動の理解を深めたり、その予測シミュレーションの精度を向上させようとする挑戦的な研究が始まっている。例えば、Doi et al. (2019) [1]の他に、海鳥由来のデータやウミガメ由来のデータを日本近海の海況シミュレーションに応用する研究が実施された(Miyazawa et al. 2015; 2019) [2, 3]。これらの成功を契機に、よりたくさんの動物由来の観測データが収集され、国際的な海洋観測システムに適切に統合されることが期待される。バイオリロギング手法による野生動物の回遊パターンの把握のみならず、持続可能な海洋・気象観測網を効率的に構築することができれば、大きな海と縁辺海の複雑な相互関係の理解が進み、合わせてその変動予測シミュレーション技術も向上することが期待される。

2017年11月の海表面水温の異常値(°C)

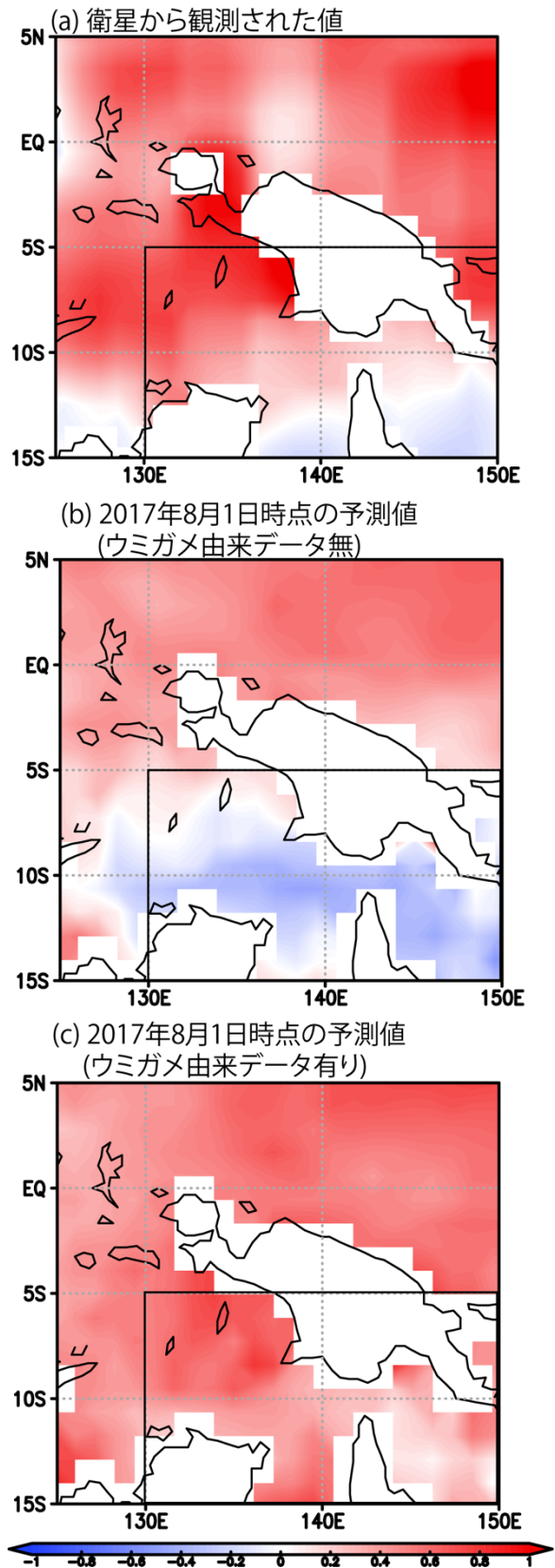


図1: 2017年11月の海表面水温の異常値(°C)。赤(青)色ほど水温が平年より異常に高(低)いことを示す。(a)衛

星から観測された値。(b)2017年8月1日時点(つまり3ヶ月程度前から)で、予測シミュレーションした値。本研究で得られたウミガメ由来の水温データは予測の初期値に取り込んでいない。黒線で囲った海域の水温予測が(a)と大きく外れている。(c)2017年8月1日時点で、ウミガメ由来の水温データを予測の初期値に取り込んで、予測シミュレーションした値。黒線で囲った海域の水温予測が(b)と比べて大幅に改善されて実測値(a)に近づいた。

#### 4. 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予測

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、夏から秋にかけて発生する。ダイポールの名前は、海面水温、外向き長波放射、海面高度などの大気海洋場の異常がダイポール(双極子)構造で持っていたことに由来する。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低くなり、西部で高くなる。これに伴い、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、西日本では雨が少なく、気温が高めに推移する傾向がある。このように、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。

インド洋ダイポールモード現象は、JAMSTECの山形俊男博士、Hameed Saji博士を中心とした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(アプリケーションラボの前身)の研究者らによって発見された。それからちょうど20年目に当たる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。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(図2a)。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。

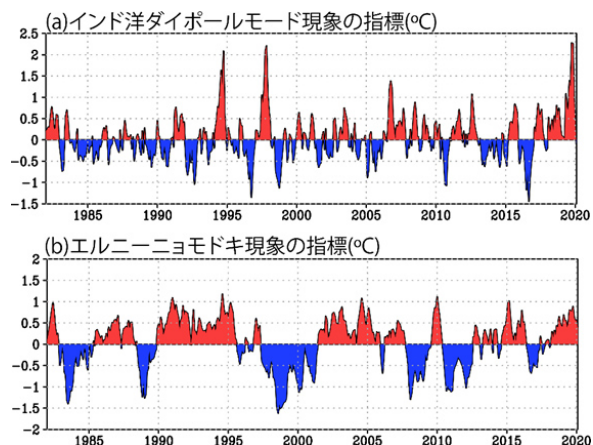


図2:(a)衛星観測データから計算した、1983年から現在までのインド洋ダイポールモード現象の指標(海面水温の偏差(平年からの異常値)に注目し、インド洋熱帯域での東西差を示す数値。単位は $^{\circ}\text{C}$ 。図2aの模式図参照)。 $0.5^{\circ}\text{C}$ を越えると、正のイベントが発生していたと考えて良い。1994年や1997年と並び、2019年に過去最大クラスの正イベントが発生していたことがわかる。

(b)エルニーニョモドキ現象の指標(熱帯太平洋の東部と西部で海面水温が平年より低くなり、中央部で高くなる3極構造を捉えた数値。単位は $^{\circ}\text{C}$ 。図2bの模式図参照)。 $0.5^{\circ}\text{C}$ を越えると、正のイベントが発生していたと考えて良い。2018年から2019年にかけて正イベントが発生していたことがわかる。

JAMSTECアプリケーションラボでは、「SINTEX-F」に基づき、毎月準リアルタイムに、同現象の12ヶ月先までの予測情報を配信している(最新の予測情報は<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.html>を参照して頂きたい)。このシミュレーションでは、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象などの発生に加えて、それに伴う季節不順などを数ヶ月前から予測しており、先駆的な成果を上げてきた実績がある。

しかし、インド洋ダイポールモード現象は、最先端のシミュレーション技術でも、数ヶ月前から予測することが難しいとされている。特に、夏から秋にかけて発生する同現象を、冬をまたいで前年の秋から予測することは非常に困難であることが知られており、「冬の予測バリアー」とも呼ばれている。これは、インド洋は夏と冬で風系が逆転するため、前年の情報を引き継ぐことが難しいからだと考えられる。ところが、2019年のスーパーインド洋ダイポールモード現象は、前年の秋の時点で予測が的中した(図3a)。

何故、2019年の事例は、そのように長いリード時間で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。すなわち、アンサンブル手法(僅かに初期条件が違う予測実験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パラツキ(つまり、将来起こりうるパラレルワールドの揺らぎ)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。その結果、比較的ゆっくりと変動し且つ予測がしやすいエルニーニョモドキ現象が、インド洋ダイポールモード現象の予測の成否に重要であることがわかった(図2b, 3b)。エルニーニョモドキ現象が強く現れる予測シミュレーションでは、インド洋ダイポールモード現象も強く現れたのである。

エルニーニョモドキ現象は、熱帯太平洋で見られる気候変動現象で、エルニーニョ現象と似ているが、その世界各地への影響はかなり異なり、現在、活発に研究されている現象である。エルニーニョ現象は、熱帯太平洋の東部で海面水温が平年より高くなるが、エルニーニョモドキ現象は、熱帯太平洋の東部と西部で海面水温が平年より低

くなり、中央部で海面水温が高くなる。2018 年の終わりにから 2019 年の初めにかけて、1. 太平洋でエルニーニョモード現象が発生し、2. インドネシア(海洋大陸)付近が高気圧性になることで、スマトラ島沖合で東風偏差が形成され、3. 正のインド洋ダイポールモード現象を励起した結果と考えられる(図 4)。2019 年のインド洋ダイポールモード現象の長期事前予測を可能にしたのは、熱帯太平洋で発生したエルニーニョモード現象であり、その強い影響力により、「冬の予測バリアー」を打ち破ったものと考えられる。

エルニーニョモード現象も、JAMSTEC の山形俊男博士、Karumuri Ashok 博士、Swadhin K. Behera 博士を中心とした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の研究者らによって発見された現象である。2019 年の異常な季節不順の多くは、これら JAMSTEC で見出された 2 つの気候変動現象が大きな役目を果たしていたと考えられる。

一連の成果を Doi et al. 2020[4]として発表した。

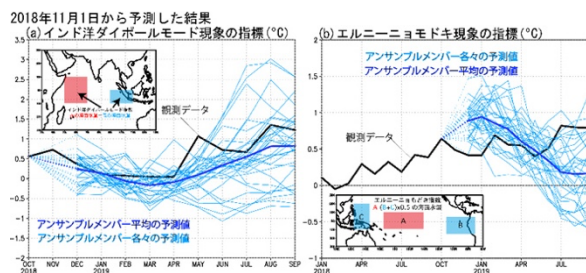


図 3: (a) インド洋ダイポールモード現象の指標。黒い線が観測値。2018 年 11/1 時点で予測したのが色線(水色の線: アンサンブルメンバー各々の予測値、青色の線: アンサンブルメンバーで平均した予測値)。青色の線と黒い線の軌跡がよく似ており、大まかには、予測が成功していたことがわかる。また、水色の線を見ると、ダイポールモード現象の発生を過大評価しているメンバーや予測していないメンバーなど、アンサンブルメンバー同士でバラツキがあることがわかる。(b) (a)と同様だが、エルニーニョモード現象の指標について。(a)と同じく、アンサンブルメンバー同士でバラツキがある。本研究では、このバラツキが、インド洋ダイポールモード指標の予測のバラツキと、共変動していたことを見出した(図無し)。



図 4: エルニーニョモード現象が正のインド洋ダイポールモード現象を励起するメカニズム(模式図)。1. エルニーニョモード現象が発生すると、熱帯太平洋中央部で高温・低気圧性になる一方で、2. インドネシア(海洋大陸)付近では、

近では、低温・高気圧性になる。すると、インド洋東部のスマトラ沖では東風偏差が形成されやすくなる。その東風偏差は、3. 正のインド洋ダイポールモード現象を励起する。すなわち、東風偏差により、インド洋東部では湧昇が促され低温化が進み、西部では暖水が吹き寄せられ高温化が進む。東(西)部では低(高)温化により高(低)気圧性が強化され、それに伴い東風偏差も強化され、更に西高東低の水温コントラストが強化されていく(大気海洋相互作用における正のフィードバックが働く)。

### 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。

セクション 3 の成果は、東京大学大気海洋研究所の佐藤克文教授が代表をつとめた、科学技術振興機構 JST の元で進められている戦略的創造研究推進事業 CREST の「サイバーオーシャン:次世代型海上ナビ機構」の予算を受けて推進された。

### 文献

[1] Doi, T., Storto, A., Fukuoka, T., Suganuma H., Sato K., “Impacts of temperature measurements from sea turtles on seasonal prediction around the Arafura Sea”, *Frontiers in Marine Science* (6), 719, (2019/06)

[2] Miyazawa, Y., Guo, X., Varlamov, S. et al., “Assimilation of the seabird and ship drift data in the north-eastern sea of Japan into an operational ocean nowcast/forecast system” *Scientific Reports* (5), 17672, (2016/01)

[3] Miyazawa, Y., Kuwano-Yoshida, A., Doi, T. et al., “Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region”, *Ocean Dynamics* (69), 267-282, (2019/02)

[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)

# 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 \*<sup>1</sup>, Yushi Morioka \*<sup>1</sup>, Swadhin Behera \*<sup>1</sup>

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

We used subsurface ocean observation data from sea turtles tagged with devices to measure depth and temperature to improve the predictive accuracy of variations in sea surface temperatures a few months ahead. This is the first time that observation data based on animals, which are traditionally used for ecological surveys, have been utilized to improve seasonal climate predictions in the tropics. Our results show the potential of this method for not only understanding the migration patterns of wild animals, but also for constructing an ocean/atmospheric observation system using bioglogging.

An extremely strong positive Indian Ocean Dipole (IOD) occurred in 2019. Successful predictions were made from the autumn of the previous year using “SINTEX-F” numerical simulations with the “Earth Simulator” supercomputer. The occurrence of the El Niño Modoki phenomenon in the tropical Pacific Ocean was a key to successfully predict this super IOD.

**Keywords** : Seasonal prediction, Indian Ocean Dipole, Animal-borne instruments, Observing system experiment, Ensemble prediction

## 1. Applying Ocean Observation Data from Sea Turtles to Seasonal Climate Predictions

In a collaborative effort, we and researchers in the Behavior, Ecology and Observation Systems Group of the Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, have succeeded in increasing the accuracy of a new system that predicts sea surface temperatures a few months in advance by applying subsurface ocean observation data from sea turtles. Variations in tropical sea temperatures often lead to unusual seasonal climate variations (e.g. heat waves, warm winters, etc.) and marine resources. Thus, high-precision predictions are very important from both social and economic viewpoints, as they enable preemptive measures to be taken.

In order to generate high-precision predictions, it is crucial to accurately determine ocean surface/subsurface temperatures at the start of a simulation. However, there are currently not enough observation data from marginal seas, which are surrounded by landmasses and islands and often have complex bathymetries (i.e., seafloor topography). In an experiment, scientists released five sea turtles after attaching devices that can record and transmit depth and water temperature data via satellite. Using these loggers (Satellite Relay Data Logger), they succeeded in recording the water temperature structure of the Arafura Sea, which is a tropical marginal sea for which observational data have been lacking (Figure 2). By incorporating these water temperature data into a seasonal prediction system, it was found that the predictive simulations of variations in water temperatures in nearby marine regions were greatly improved a few months later (Figure 1).

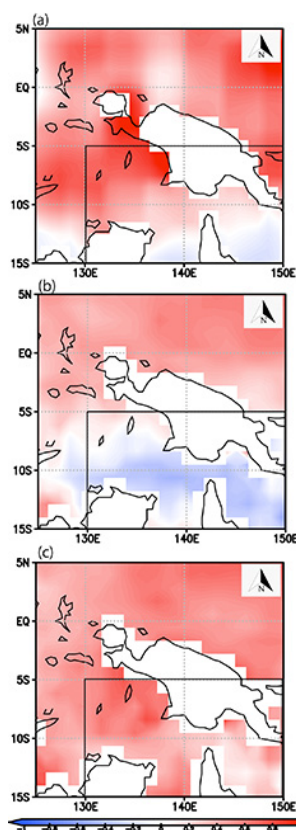


Figure 1: SST anomaly in November 2017 from (a) the observations, (b) the original forecast issued on August 1, 2017, and (c) the forecast after assimilating the sea turtles' measurements issued on the same date (°C)

This study is the first of its kind in which the seasonal temperature structure of a tropical sea has been predicted by use

of observational data from logger-tagged animals. This success could trigger new developments in ocean/climate simulation technologies and their predictions, as observation data from animals could become integrated into international observation systems, advancing our understanding of the complex interactions among large oceanic bodies and marginal seas. The results of this study were published as Doi et al. 2019 [1].

## 2. Prediction of El Niño Modoki in the tropical Pacific Ocean was a key to successfully predict the 2019 Super Indian Ocean Dipole phenomenon

We showed that the El Niño Modoki phenomenon in the tropical Pacific Ocean played a critical role in successfully predicting the extremely strong positive Indian Ocean Dipole (IOD; \*1) that occurred in 2019. The IOD causes a variety of weather and climate abnormalities worldwide. For example, it increases the seasonal precipitation in East Africa but decreases the seasonal precipitation in Indonesia and Australia during boreal autumn. For these reasons, accurate prediction of the occurrence of such phenomena is important not only from a scientific perspective, but from a socioeconomic one as well. However, it is extremely difficult to predict IOD phenomena, which occur from the summer to autumn, from as early as the previous autumn and across the winter season.

We distributed monthly quasi-real-time IOD prediction data up to 12 months in advance, based on the numerical prediction system “SINTEX-F”, which uses the “Earth Simulator” supercomputer (URL: <http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/e/seasonal/outlook.htm>). While the current predictive accuracy of simulations conducted from the previous autumn remain low, the 2019 prediction of the super IOD was accurate (Figure 2). Upon further investigation, it was found that the occurrence of the El Niño Modoki phenomenon in the tropical Pacific Ocean was a key factor that controlled the accuracy in this prediction. The results of this study are expected to advance our understanding of the mutual relationships between the IOD and El Niño Modoki phenomena, as well as the development of agricultural and infectious disease research associated with their predictions. This study was published as Doi et al 2020 [2].

\*1: Indian Ocean Dipole is a climate variation phenomenon that is observed in the tropical Indian Ocean once every several years from summer to autumn. This phenomenon has both positive and negative phases. When a positive Indian Ocean Dipole occurs, sea surface temperatures become cooler than that in an average year on the southeastern side of the tropical Indian Ocean and warmer than that in an average year on the western side. These variations in ocean temperatures cause vigorous atmospheric convection, which usually occurs in the eastern Indian Ocean, to move westward; as a result east Africa receives more rain, while Indonesia receives less. These variations also

lead to less rain and higher temperatures in Japan. Conversely, when a negative Indian Ocean Dipole occurs, sea surface temperatures are warmer than that in an average year in the southeastern tropical Indian Ocean and colder than that in an average year in the west, causing convection in the eastern Indian Ocean to be more intense than usual, and more rain falls in Indonesia and Australia, and generally more rain occurs in Japan with lower surface temperatures.

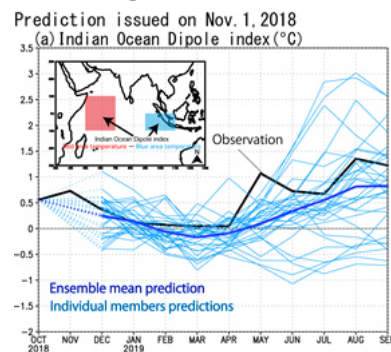


Figure 2: Indian Ocean Dipole index. The black line is the observed value and colored lines are the predictions made on November 1, 2018 (light blue lines: predicted values of each ensemble member; dark blue lines: averaged value of the ensemble members). The trajectories of the dark blue line and the black line are very similar, and the prediction is thought to have been broadly successful though some variations are seen among the ensemble members (light blue lines) with some overestimating and others underestimating the occurrence of a dipole event.

## 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 work in Section 1 was supported by a research project entitled with “Cyber Ocean: Next generation navigation system on the sea” funded by the CREST program (JPMJCR1685) of Japan Science and Technology Agency.

## References

- [1] Doi, T., Storto, A., Fukuoka, T., Suganuma H., Sato K., “Impacts of temperature measurements from sea turtles on seasonal prediction around the Arafura Sea”, *Frontiers in Marine Science* (6), 719, (2019/06)
- [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, (2020/04)