

# 100 アンサンブルの季節予測実験

課題責任者

土井 威志 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

著者

土井 威志\*<sup>1</sup>, Swadhin Behera\*<sup>1</sup>, 山形 俊男\*<sup>1</sup>,

\*<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

極端に強いエルニーニョ/南方振動(ENSO)現象やインド洋ダイポールモード現象が発生すると日本を含む世界各地で季節的な異常(例えば、猛暑、暖冬等)が引き起こされる。従って、その予測を高精度に実施することは、社会・経済的な視点でも非常に重要である。

JAMSTEC アプリケーションラボでは、大気-海洋-陸面-海氷結合大循環モデルを基盤とした「SINTEX-F 季節予測システム」を開発し、数ヶ月後の ENSO 現象等の発生や季節的な異常の予測研究に取り組んできた。本研究では、「SINTEX-F 季節予測システム」を発展させ、予測シミュレーションされるパラレルワールドの数を約 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 ENSO 現象やインド洋ダイポールモード現象の発生を、数ヶ月前から高精度に確率予測することに成功した。

単一の気候モデルを基盤として、100 程度のパラレルワールドを創出する季節予測システムで、過去に発生したイベントの予測精度を検証したのは、世界初の試みである。

この成功を契機に、多数のパラレルワールドを有する予測結果を包括的に解析し、新しいプロセスの発見や、新しい予測シグナルの抽出等を実施し、気候予測研究を発展させると共に、極端な気候イベントの予測情報を基盤としたアプリケーション研究を展開し(例えば農作物予測や感染症予測)、人々の安全・安心に資するために、社会の活動に具体的に貢献することを目指していく。

キーワード：季節予測, 海氷予測, ウェッデル海, エルニーニョ予測, アンサンブル予測

## 1. 背景

季節的な異常(例えば冷夏、猛暑、暖冬、厳冬等)を数ヶ月前から事前に予測することを“季節予測”と呼ぶ。大気のスナップショットである日々の“天気”(晴れ、雨、日最高気温等。英訳 weather)を予測する天気予報と大きく違う点は、天気の大まかな傾向(あるいは統計量)である“気候”(英訳 climate)が予測の対象であることだ。季節予測を高精度に実現できれば、豊かな社会応用可能性がある。作物の豊凶予測、熱中症等の健康被害対策、水管理、レジャー、アイスクリームやビール等の生産管理にまで、季節予測情報は幅広く応用可能である。

季節予測の成功の鍵を握るのは、主に、海の水温である。海は大気よりも大きな熱容量をもち、ゆっくりと変動する。海の水温異常が、季節的な異常を引き起こしているならば、それを数ヶ月前から予測することが可能である。特に熱帯太平洋で発生する ENSO 現象(※1)や熱帯インド洋で発生するインド洋ダイポールモード現象(※2)は、熱帯の大気循環に影響を与えるだけでなく、日本を含む東アジアの大気循環に遠隔的に影響を与えることが知られている(テレコネクションと呼ばれている)。そのため、季節予測の成功の鍵は、まず ENSO 現象やインド洋ダイポールモード現象を正確に予測することであると断言しても過言ではない。

JAMSTEC アプリケーションラボでは、日欧協力によって開発された大気-海洋-陸面-海氷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にした「SINTEX-F 季節予測システム」(※3)を開発し、2005 年

から準リアルタイムで季節予測情報を配信してきた(例えば、最新の予測情報は <http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/outlook.html>) や、季節ウォッチ：<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/climate/>から確認できる)。数ヶ月後の ENSO 現象やインド洋ダイポールモード現象の発生や、それに起因する世界各地の季節的な異常の予測について、最先端の成果を創出してきた。

大気・海洋現象の予測シミュレーションを実施すると、同様の条件の下でも物理法則に基づく計算上で異なる状態(いわゆるパラレルワールド)が現れることが知られている。このような予測シミュレーションの不確実性を考慮し、できるだけ確からしい予測を実現するために、観測値に基づいた予測の初期値や予測に使用する数値モデルに、わずかな違いを与えて複数の予測シミュレーション(以下「予測アンサンブルメンバー」という。)を実施し、その平均や解の確率分布等から予測情報を抽出する手法が使われている。季節予測だけでなく、天気予報や台風の進路予測等でも用いられている。

予測アンサンブルメンバーの数(つまりパラレルワールドの数)を増やすことのメリットは、過去の研究でも示唆されてきた。例えば、予測アンサンブルメンバーの多数化によって、予測値の頻度分布を精緻に捉えることができれば、極端ゆえに発生確率が稀なイベントの予測精度が向上すると期待される(例えば 10 年に 1 度の極端な現象の発生確率を 10 程度の予測アンサンブルメンバーで表現するのは難しいことは容易に想像できる)。しかしながら、主に計算コストの高さから、世界の予報機

関の季節予測システムはせいぜい数 10 程度の予測アンサンブルメンバーで構成されているのが現状である。JAMSTEC アプリケーションラボの「SINTEX-F 季節予測システム」も同程度のアンサンブル数で構成されていた。

そこで本研究では、「地球シミュレータ」の性能を駆使し、約 100 の予測アンサンブルメンバーで 1983-2015 年の過去再予測実験を実施し、主に ENSO 現象やインド洋ダイポールモード現象の予測について、そのメリットを調べた。単体の気候モデルを使って、このような大規模アンサンブルで過去の季節的な異常について予測実験を実施したのは世界初である。

## 2. 成果

まずは、季節予測において最も重要である ENSO 現象の予測精度について調べた。特に、過去最大級のラニーニャ現象（エルニーニョ現象と符号が逆の現象）が発生した 1988/89 年の ENSO 指標 Nino3.4 の推移に注目した（図 1）。黒色の線が観測、つまり実際の値です。水色の線は、1988 年 6 月 1 日時点の予測シミュレーションの結果で、12 アンサンブルある。この既存の 12 アンサンブルでは観測の値を予測できていないことが分かる。一方、オレンジ色の線は、今回の研究では新たに増やした予測アンサンブルメンバーです。オレンジ色の線のいくつかは、観測の値を捉えることに成功した。つまり、既存の 12 アンサンブルでは、観測されたような極端なラニーニャ現象が発生する確率は 0%であったが、108 アンサンブルでは、その可能性があると予測できるようになった。

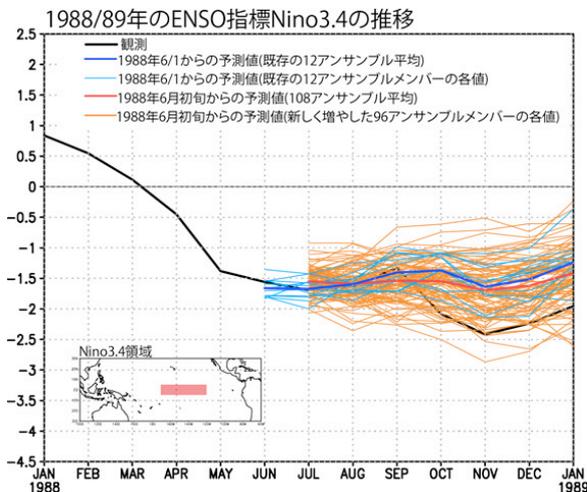


図 1: ENSO の指標 Nino3.4（東部熱帯太平洋 190°-240° E, 5°S-5°N で領域平均した海面水温の年平均値からの差、°C）の推移。黒色太線：観測値。水色線：SINTEX-F による既存の 12 アンサンブルによる 1988 年 6/1 からの各アンサンブル予測値。青色太線：SINTEX-F による既存の 12 アンサンブルによる 1988 年 6/1 からの予測平均値。オレンジ色線：今回の研究で新たに増やした 96 の予測アンサンブルメンバー。赤色太線：既存の 12 アンサンブルとこの 96 アンサンブルを合わせた 108 アンサンブルの平均値。

同様の解析を、インド洋ダイポールモード現象についても実施した（図 2）。過去 20 年のうち、最大級の正のインド洋ダイポールモード現象が発生した 2006 年のインド洋ダイポールモード現象の指標 DMI（熱帯インド洋の海面水温偏差の東西差を示す数値）の推移を見ると、既存の 12 アンサンブルでは、観測されたような極端に強いインド洋ダイポールモード現象が発生する確率は 0%であったが、108 アンサンブルでは、その可能性があると予測できるようになった。

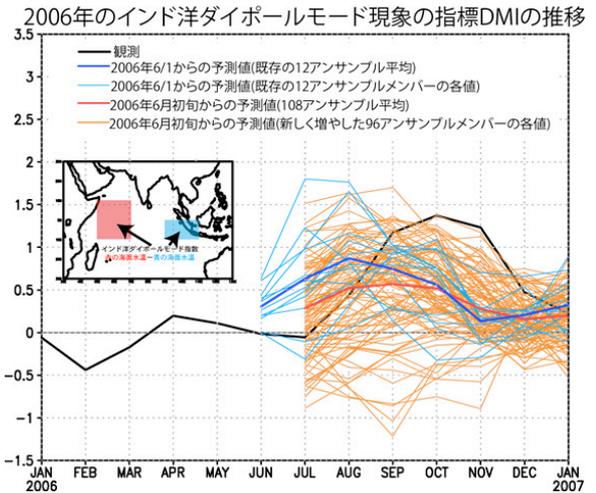


図 2: 2006 年のインド洋ダイポールモード現象の指標 DMI（熱帯インド洋の海面水温偏差の東西差を示す数値。単位は °C）の推移。カラーラインは図 1 と同義。

上述した予測実験を、1983 年から 2015 年の過去 33 年間のイベントに対して実施し、予測スキルの精度を統計的に評価した。ここでは、極端に強いイベントとは、約 7 年に 1 回起こる程度の極端事例と定義した。12 から 108 に予測アンサンブルメンバーを増やすことで、ENSO 現象やインド洋ダイポールモード現象の極端イベントの確率論的な予測の精度が向上することを示すことができた。すなわち、閾値を決めて、イベントの有無を定義し、その発生を確率で予測すること。カテゴリー予測の精度が向上した。例えば、ENSO 指標 Nino3.4 が、+0.5 度（閾値）を超える確率は 80% であるといった予測が確率論的予測で、ENSO 指標 Nino3.4 が、+0.8 度になるといった予測は決定論的な予測と呼ばれる。

さらに、11-12 月平均の降水量の全球分布を 6 月初旬から予測した場合の予測精度についても比較した（図 3）。発生頻度が 15%以下の極端な渇水イベントに対する確率論的な予測スキルが、メキシコ、ブラジル北部、中国南部域等で向上したことを確認した。

## 3. 今後の展望

ENSO 現象やインド洋ダイポールモード現象に焦点をあて、108 の予測アンサンブルメンバーで 1983-2015 年の過去再予測実験を実施したところ、発生確率が稀ではあるが発生すると甚大な被害を及ぼす極端なイベントについての確率予測が向上することを示した。この大

規模アンサンブルの過去再予測実験をさらに詳細に解析することで、ノイズの影響が強い中緯度の気候予測について、新しいプロセスの発見や、新しい予測シグナルの抽出等に活用されることが期待される。

また、気候予測研究を進展させるだけでなく、気候予測情報の社会応用研究にも大きく影響を与えることが期待される。例えば、既存のシステムでは不可能であった極端イベントの発生確率予測情報は、特に凶作被害対策やマラリア等の感染症流行対策において飛躍的に活用しやすくなることが期待される。

一連の研究成果は、([1] Doi et al. 2019)として米国気象学会 AMS の Journal of Climate に掲載された。

11-12月で平均した降水量が極端に少なくなる渇水イベント（発生確率 15% 以下）予測の SEDI スキルスコア

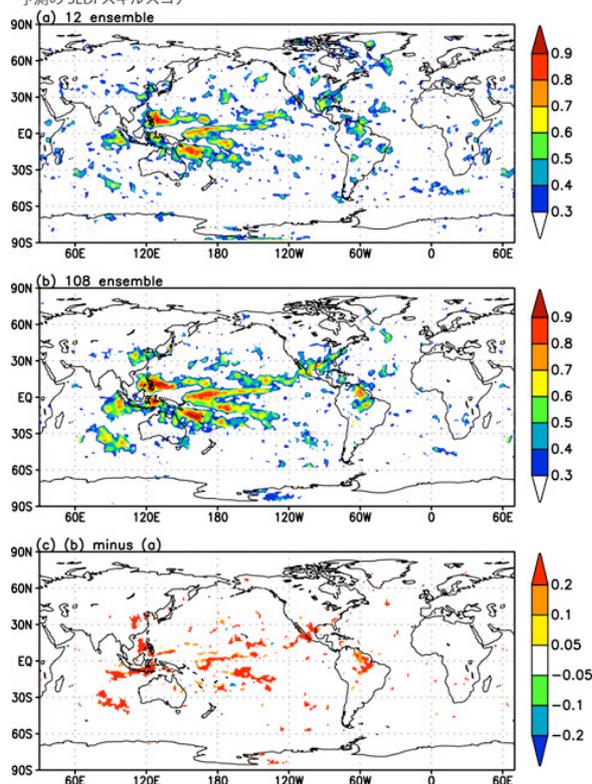


図3. 1983-2015年の11-12月平均の降水量の全球分布を、各年の6月初旬から予測した場合のSEDIスキルスコア。気候学的に発生確率が15%以下の極端な渇水イベントに対して、その発生確率が平年より約2倍以上に上昇していると予測シミュレーションが算出した際に、極端イベントが発生すると予測した場合について、その予測情報の正誤を判断するスキルスコア。12アンサンブルでの予測(上段)より、108アンサンブルでの予測(中段)の方が、メキシコ、ブラジル北部、中国南部域等で予測精度が高いことを示している。

#### 4. 補足説明

※1 エルニーニョ/南方振動現象 (ENSO 現象) : エルニーニョ現象は、熱帯太平洋で見られる気候変動現象で、数年に1度、春から冬にかけて発生する。エルニーニョ

現象が発生すると、熱帯太平洋の東部で海面水温が平年より高く、西部で海面水温が低くなる。この水温の変化によって、通常は熱帯太平洋の西部で活発な対流活動が東に移動し、インドネシアや南米の北部では平年より雨が少なく暖くなる。また、熱帯からの大気の変動を通して、日本では冷夏、暖冬となる傾向がある。海洋に着目した場合には「エルニーニョ現象」、大気に着目した場合には「南方振動」と呼び分けることが多いものの、両者は密接に関係しており、まとめて「エルニーニョ/南方振動現象 (ENSO 現象)」と呼ぶ。一方、ラニーニャ現象は、エルニーニョ現象とは符号が逆の現象で、熱帯太平洋の西部で海面水温が平年より高く、東部で海面水温が低くなる。この水温の変化によって、熱帯太平洋の西部で対流活動がさらに活発になり、インドネシアでは平年より雨が多くなる。また、熱帯からの大気の変動を通して、日本では猛暑、寒冬となる傾向がある。

※2 インド洋ダイポールモード現象 : 熱帯インド洋で見られる気候変動現象で、数年に1度、夏から秋にかけて発生する。インド洋ダイポールモード現象には正と負の符号があり、正のインド洋ダイポールモード現象が発生すると、熱帯インド洋の南東部で海面水温が平年より冷たく、西部で海面水温が温かくなる。この水温の変化によって、通常は東インド洋で活発な対流活動が西に移動し、東アフリカで雨が多くなり、インドネシアでは雨が少なくなる。また、熱帯からの大気の変動を通して、日本では雨が少なく、気温が高くなる傾向がある。一方、負のインド洋ダイポールモード現象は、熱帯インド洋の南東部で海面水温が平年より温かく、西部で海面水温が冷たくなる。この水温の変化によって、通常は東インド洋で活発な対流活動がさらに活発となり、インドネシアやオーストラリアで雨が多くなる。また、熱帯からの大気の変動を通して、日本では雨が多くなり、気温が低くなる傾向がある。

※3 SINTEX-F 季節予測システム : JAMSTEC アプリケーションラボ (前身は地球フロンティア研究システム気候変動予測領域) では、数ヶ月から数年スケールで発生する気候変動現象の解明ならびにその予測研究のため、SINTEX-F 気候モデルを基盤としたダイナミカルな季節予測システムを、日欧研究協力に基づき「地球シミュレータ」を用いて開発および改良してきた。気候モデルとは、大気-海洋-陸面-海氷の物理に関する微分方程式群で構成されており、地球を3次元的な格子状に分割し、それぞれの格子に対して方程式を時間方向に数値積分するプログラム群を指す。現在の観測情報(季節予測では、熱容量の大きい海洋の水温異常の情報が特に重要)を気候モデルに教え込み、その時間発展をスーパーコンピュータで計算することで、季節の異常性(平年からのズレ)を数ヶ月前から予測することが可能となる。JAMSTECでは、海洋観測網の発展に尽力していると共に、世界有数のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」

を有する。観測と数値計算を両輪として、自然災害をもたらす現象の高精度な事前予測を実現させ、人々の安全・安心に資するために、季節予測研究は重要な課題の一つ。

### 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, L' OCEAN, and MPI のモデリングチーム) に多大なる貢献をして頂いた。また、野中正見博士や Antonio Navarra 博士から本研究の推進にあたり、貴重なコメントを頂いた。

### 文献

[1] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, "Merits of a 108-member ensemble system in ENSO and IOD predictions". J. Climate, 32, 957-972, 2019

## 100-member ensemble seasonal prediction system

### Project Representative

Takeshi Doi Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

### Authors

Takeshi Doi <sup>\*1</sup>, Swadhin Behera <sup>\*1</sup>, Toshio Yamagata <sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

This project explores merits of 100-ensemble simulations from a single dynamical seasonal prediction system by evaluating differences in skill scores between ensembles predictions with few (~10) and many (~100) ensemble members. A 100-ensemble retrospective seasonal forecast experiment for 1983–2015 is beyond current operational capability.

Prediction of extremely strong ENSO and the Indian Ocean dipole (IOD) events is significantly improved in the larger ensemble. It indicates that the ensemble size of 10 members, used in some operational systems, is not adequate for the occurrence of 15% tails of extreme climate events, because only about 1 or 2 members (approximately 15% of 12) will agree with the observations. We also showed an ensemble size of about 50 members may be adequate for the extreme El Niño and positive IOD predictions at least in the present prediction system.

Even if running a large-ensemble prediction system is quite costly, improved prediction of disastrous extreme events is useful for minimizing risks of possible human and economic losses.

**Keywords :** Seasonal Prediction, Large ensemble, El Niño, Indian Ocean Dipole, extreme event

### 1. Occurrences of Extremely Strong El Niño and Indian Ocean Dipole Phenomena are Now Predictable with High Accuracy

We have developed a system capable of accurately predicting the occurrence of extremely strong El Niño/Southern Oscillation (ENSO; \*1) and Indian Ocean Dipole phenomena (\*2) several months in advance. When these phenomena occur, they produce abnormal seasonal weather (e.g., heat waves and warm winters) around the world, including in Japan. Therefore, extremely strong occurrences of these phenomena merit close monitoring, and the generation of accurate predictions as to when they will occur is of extreme importance from both societal and economic standpoints.

An integrated atmosphere-ocean-land-sea ice systemic circulation model was used by JAMSTEC Application Lab scientists as the basis for developing the SINTEX-F Seasonal Climate Prediction System (\*3). The system was designed for performing predictive research on the occurrence of seasonal abnormalities, ENSO phenomena, and other such events that will occur several months in the future. It has traditionally been difficult to understand and predict the scale of these events; despite this fact, the SINTEX-F Seasonal Climate Prediction System was developed and the number of parallel worlds used in its predictive simulations was increased from approximately 10 to approximately 100. As a result, though

their frequency of occurrence was rare, the system succeeded in accurately predicting the occurrences of extremely strong ENSO (Fig. 1) and Indian Ocean Dipole phenomena (Fig. 2) several months in advance. Additionally, when the system's accuracy in predicting extreme drought events across the globe nearly six months in advance was examined, the results showed that the system improved the accuracy of predictions (Fig. 3). This is the first experiment yet to have examined the accuracy of a seasonal climate prediction system based on a single climate model and featuring the generation of approximately 100 parallel worlds for past climatic events.

The vast calculations required in this study were made possible by the free use of the functions of a global simulator. The knowledge gained by these simulations is expected to lead to the strategic development of numerous seasonal climate prediction systems in the future. Our goals are for this success to spark the comprehensive analysis of prediction results featuring numerous parallel worlds, the discovery of new processes and the identification of new prediction signals, the development of climate prediction research and expansion of applied research based on predictive information for extreme climatic events (e.g., crop and infectious disease forecasts), and to make specific contributions to societal initiatives aimed at ensuring the safety and security of the public.

The above results were published in the Journal of Climate

issued by American Meteorological Society ([1] Doi et al. 2019).

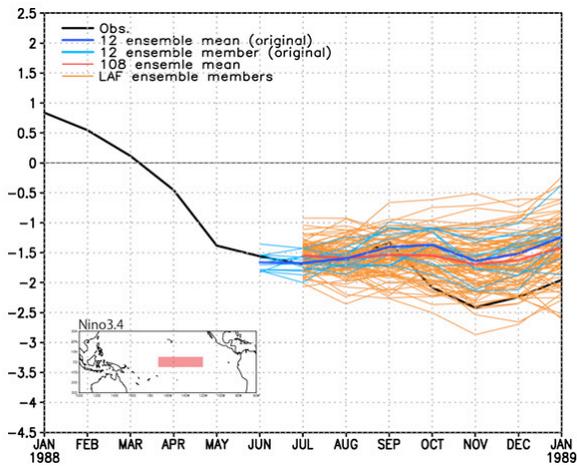


Figure 1. Variation over time in the ENSO index Nino3.4 (i.e., the divergence from annual mean values in sea surface temperatures averaged over the area of the eastern-central tropics of the Pacific Ocean, from 190°-240°E, 5°S-5°N, °C). Thick black line, observed values; light blue lines, individual ensemble (parallel world) prediction values from 6/1/1988 onward using 12 existing ensembles from SINTEX-F. Thick blue line, average prediction value from 6/1/1988 onward using 12 existing ensembles from SINTEX-F; orange line, 96 prediction ensemble members newly added for this study; thick red line, average value for 108 ensembles (i.e., the existing 12 ensembles and the 96 added ensembles).

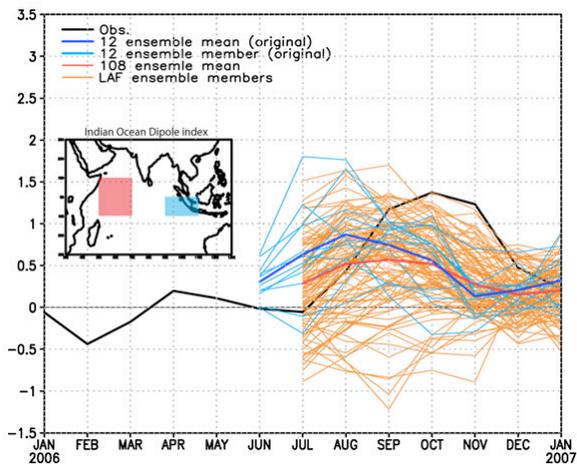


Figure 2. Variation over time in the Indian Ocean Dipole index DMI (i.e., the difference between sea surface temperatures anomalies in the eastern and western tropics of the Indian Ocean, °C). The colored lines are defined as in Fig. 1.

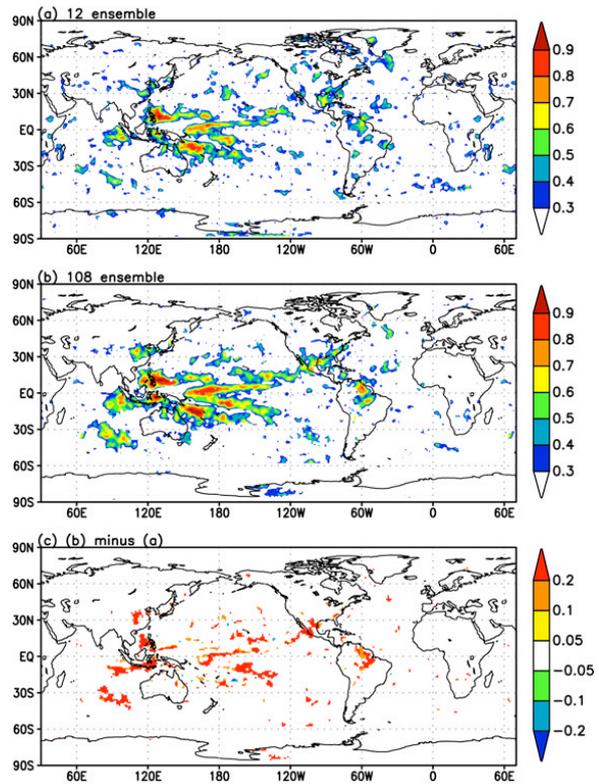


Figure 3. SEDI skill scores for the predictions made each year, starting in early June, for the global distribution of average precipitation from November to December of 1983-2015. For extreme drought events that have a less than 15% chance of occurring from a climatic standpoint, if their likelihood of occurrence is predicted to be approximately 20% greater than it is in an average year by the SINTEX-F system, then the simulation predicts that the event will occur, and a skill score is calculated to determine the accuracy of the prediction data. The results indicate that predictions using 108 ensembles (b) are more accurate than those using only 12 ensembles (a) for Mexico, northern Brazil, southern China, and other regions (c).

**Acknowledgement**

We are grateful to Drs. Wataru Sasaki, Jing-Jia Luo, Sebastian Masson, and Andrea Storto and our European colleagues of INGV/CMCC, L’OCEAN, and MPI for their contribution to developing the prototype of the systems. We also thank Dr. Masami Nonaka and Antonio Navarra for helpful comments and suggestions.

**References**

[1] Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, “Merits of a 108-member ensemble system in ENSO and IOD predictions”. *J. Climate*, 32, 957-972, 2019