

100 アンサンブルメンバーによる季節予測実験 ~極端イベントの確率予測精度の向上~

○土井 威志*・Swadhin Behera*・山形 俊男*
(*JAMSTEC/APL)

キーワード：季節予測， 予測アンサンブルの多数化， 極端現象の確率予測

1.はじめに

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 大気海洋結合大循環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。その第一版が SINTEX-F1 季節予測システムであり、2005年にそのプロトタイプが完成して以来、主に熱帯域のエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の予測において世界最先端の成果を発表してきた(Luo et al. 2005, 2007, 2008; Jin et al. 2008)。更に、ニンガルーニーニョやカリフォルニアニーニョといった沿岸ニーニョ現象（大陸の西岸沖合で、東西 100km スケールで発生する地域性の強い気候変動現象で、大気海洋相互作用を伴い発達するため、中緯度域において新たな季節予測可能性の根源になりうると期待される現象ら）の予測にも成功している(Doi et al. 2013, 2015a,b)。

最近では、気候モデルを高度化(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のプロトタイプを開発し、亜熱帯域の予測精度の向上に成功した(Doi et al. 2016)。また、その初期値作成スキームに、3次元の水温/塩分の海洋観測データ(ARGO、係留ブイ、船舶観測など)(Good et al.

2013)を3次元変分法(3DVAR)で同化するプロセスを新たに加え、主に、熱帯インド洋亜表層の初期値化とインド洋ダイポールモード現象の予測の精度向上に成功した(Doi et al. 2017)。

このように、ダイナミカルな季節予測システムの精度を向上させるには、その基盤となる大気-海洋-陸面-海水結合モデル及び、その初期値作成プロセスの高度化が重要である。それらに加えて、新たなアプローチとして考えられるのが、予測アンサンブルメンバーの多数化である。例えば、アンサンブル平均値の決定論的な予測スキルスコアの向上の可能性として、(Scaife et al. 2014)の成果がある。冬季の北大西洋振動 NAO は季節予測にとって重要な現象ではあるが、アンサンブル平均値の標準偏差とアンサンブルスプレッドの比(signal-to-noise 比)が小さいため予測可能性が低いとされている。彼らは、実際に計算した 24 アンサンブルメンバーの予測から subset を作り、統計論的に予測スキルを評価した場合、アンサンブルメンバーを 80 程度まで増やすことで、アンサンブル平均値による NAO インデックスの予測スキルが緩やかなカーブで向上していくことを示唆した。多数の予測アンサンブルメンバーを平均することで、初期値の不確実性に起因するランダムな予測エラーを大幅に減らすことができるため、signal-to-noise 比が比較的小さい中緯度の予測には、アンサンブルメンバーを増やすことが有効だと期待される。

また、確率論的な予測スキルの向上の可能性としては、(Barnston and Mason 2011)の成

果がある。彼らは、別のシステムで予測された海表面水温を使って複数の大気モデルを駆動し、100 アンサンブルメンバーによる季節予測実験を実施した。発生確率が15%以下の極端な climate event について、確率論的な予測に成功した。これは、アンサンブルの多数化によって確率密度をより精緻に捉えることができ、そのテイル部分にあたる極端ゆえに発生確率が稀なイベントを捉えることが可能となったことに起因すると思われる。極端現象の発生は、農作物や水管理などに多大な影響を与え、人々の生活の安全・安心を脅かすことが知られている。従って極端現象の季節予測情報の創出は社会応用面でもイノベーションが期待される。

このように予測アンサンブルメンバーの多数化のメリットは示唆されているもの、主に計算コストの高さから、従来の SINTEX-F 季節予測システムや、世界の現業予報機関の季節予測システムは 10-20 程度のアンサンブルメンバーで構成されていることがほとんどである (Kirtman et al. 2014; Tompkins et al. 2017)。そこで、本研究では約 100 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、その効果を practical に調べた。著者らの知る限り、単体の気候モデルでこのような大規模アンサンブルで季節の過去再予測実験を実施したのは世界初である。

2. 予測アンサンブルメンバーの多数化

基本となるのは、SINTEX-F2 季節予測システムで、初期化に海洋 3DVAR を導入した 12 アンサンブルメンバーである (F2-3DVAR; (Doi et al. 2017))。この 12 アンサンブルメンバーで準リアルタイムの季節予測実験をオペ

レーショナルに実行している。同化する海表面水温の観測データが 2 種(水平解像度 0.25 度の daily データと水平解像度 1 度の weekly データ)、同化の強さ 3 種(1-,2-,3-日緩和)、海洋モデルの鉛直混合スキームの補正(Sasaki et al. 2012)の有無で 2 種の計 12 種で構成されている。従って初期値アンサンブルと物理アンサンブル両方の側面を持っていると言える。1983-2015 年の各 6/1 を予測開始日とした 12 メンバーを基本とし、Lagged Average Forecasting (LAF) 法(Hoffman and Kalnay 1983)で予測開始日を 2-9 日までずらし、108 アンサンブルメンバーを作成した。最大 8 ヶ月先まで予測実験を実施し、基本の 12 アンサンブルメンバーの予測と比較した。

3. 結果

まずは、季節予測において最も重要であるエルニーニョ現象の予測精度について調べた。過去最大級のエルニーニョ現象が発生した 1997/98 年の Nino3.4 を 1997 年 6/1 から予測した場合を図 1 で示す。12 アンサンブル予測と、108 アンサンブル予測を比較すると、アンサンブル平均値はほぼ変わらず観測を過小評価しているが、Nino3.4 が 2.5°C を超える確率は 1/12(約 8%)から 14/108(約 14%)へと上昇している。

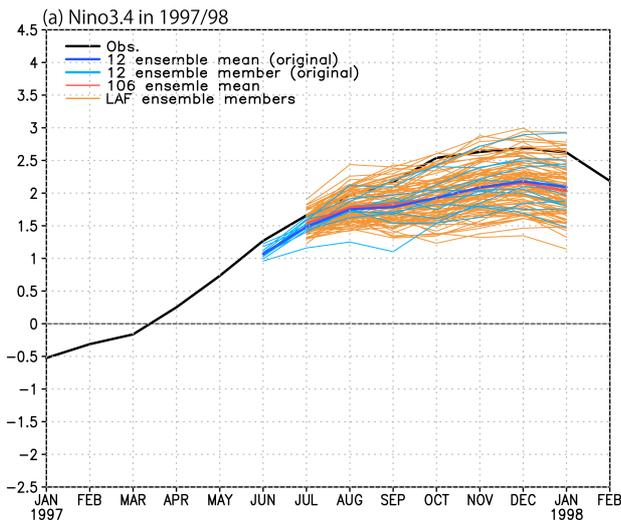


図 1: 過去最大級のエルニーニョ現象が発生した 1997/98 年の Nino3.4(°C)の時系列。黒色線: 観測, 太い青色線:1997年6/1から予測した 12 アンサンブル平均, 細い水色線:基本の各 12 アンサンブル, 赤色線:108 アンサンブル平均, 細いオレンジ線:LAF 法で増やした 96 アンサンブル。

次に過去 33 年間のイベントに対して、12 アンサンブル予測と、108 アンサンブル予測に対して、アンサンブル平均値の決定論的予測スキルや、発生確率が 10%及び 30%以下のイベントに対する確率論的な予測スキルを比較したが、有意な差は得られなかった。これは現在準リアルタイムで予測実験をしている 12 アンサンブルの予測でも、エルニーニョ予測に対しては充分であることを実証したことになる(少なくとも同システムにおいて)。

次に、インド洋ダイポールモード現象についても同様に調べた。この現象は 1999 年に発見されて以来、多くの研究によりアジア、アフリカ、オセアニア等の季節予測において極めて重要であることが明らかになっているが、その予測精度は未だエルニーニョ現象ほどには高くない。今回、12 から 108 アンサンブルにしても、アンサンブル平均値の決定論的予測スキルに有意な差は得られなかった。しかし、発

生頻度が 10%以下の極端なイベントに対する確率論的予測スキルは向上した(95%の有意水準)。

7-8 月平均の地上 2m 気温偏差の全球分布を 6 月初旬から予測した場合の予測精度についても調べた。アンサンブル平均値の決定論的予測スキルや、発生頻度が 30%以下のイベントに対する確率論的予測スキルは、100 アンサンブルにしても有意な差は見られなかった。しかし、発生頻度が 10%以下の極端な正イベントに対する確率論的予測スキルは中緯度域を中心に有意に向上した(図 2)。

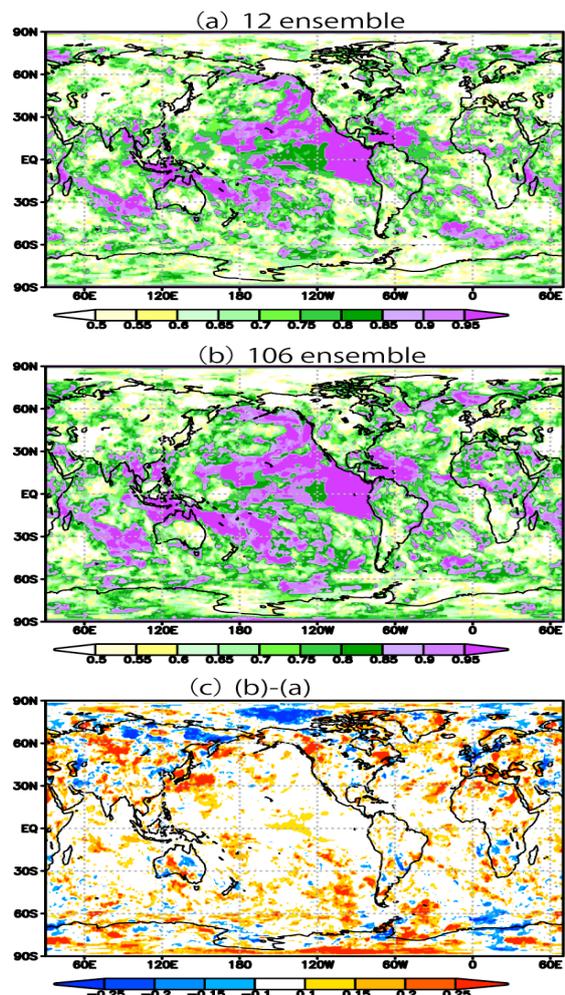


図 2: (a)7-8 月平均の地上 2m 気温偏差を 6 月初旬から予測した場合の、10% terciles の正イベントの ROC スコアスキル。0.5 以下は精度無しで、1 に近い程精度が高い。解析期間は 1983-2015 年。(a) オペーション化した F2-3DVAR の 12 アンサンブルの結果。(b) LAF によりアンサンブル数を 108 に増やし

た結果。(c) (b)–(a)

4. まとめと今後の課題

季節予測のアンサンブルを12から108まで多数化することによって、発生確率が10%以下の極端な climate event の確率予測精度が向上した。今後はアンサンブル空間(並行世界間)を考慮した詳しいプロセス解析や予測情報の社会応用研究を進めたい。

Reference:

- Barnston, A. G., and S. J. Mason, 2011: Evaluation of IRI's Seasonal Climate Forecasts for the Extreme 15% Tails. *Weather Forecast.*, **26**, 545– 554.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2013: Predictability of the Ningaloo Niño/Niña. *Sci. Rep.*, **3**, 2892,
- , S. K. Behera, and T. Yamagata, 2015a: An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **120**, 1388– 1396.
- , C. Yuan, S. K. Behera, and T. Yamagata, 2015b: Predictability of the California Niño/Niña. *J. Clim.*, **28**, 7237– 7249.
- , S. K. Behera, and T. Yamagata, 2016: Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **8**, 1847–1867.
- , 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.
- Good, S. A., M. J. Martin, and N. A. Rayner, 2013: EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **118**, 6704– 6716.
- Hoffman, R., and E. Kalnay, 1983: Lagged averaged forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus A*, **35**, 100– 118.
- Jin, E. K., Æ. J. L. Kinter, I. I. I. Æ. B. Wang, I. K. Æ. B. P. Kirtman, Æ. J. K. Æ. A. Kumar, J. L. Æ. J. Schemm, and Æ. J. S. Æ. T. Yamagata, 2008: Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean – atmosphere models. 647– 664.
- Kirtman, B. P., and Coauthors, 2014: The North American multimodel ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **95**, 585– 601.
- 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**, 4474– 4497.
- , —, —, and T. Yamagata, 2007: Experimental forecasts of the Indian Ocean dipole using a coupled OAGCM. *J. Clim.*, **20**, 2178– 2190.
- , S. Behera, Y. Masumoto, H. Sakuma, and T. Yamagata, 2008: Successful prediction of the consecutive IOD in 2006 and 2007. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, 1– 6.
- 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**, 681– 707.
- Sasaki, W., K. J. Richards, and J. J. Luo, 2012: Role of vertical mixing originating from small vertical scale structures above and within the equatorial thermocline in an OGCM. *Ocean Model.*, **57– 58**, 29– 42.
- , —, and —, 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**, 443– 453.
- Scaife, a. a., and Coauthors, 2014: Skillful long range prediction of European and North American winters. *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 2514– 2519,
- Tompkins, A. M., and Coauthors, 2017: The Climate-system Historical Forecast Project: providing open access to seasonal forecast ensembles from centers around the globe. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, BAMS-D-16-0209.1.