

MIROC5 を用いた季節予測システムによる 2 タイプのエルニーニョの予測可能性

今田 由紀子(東工大)・木本 昌秀(東大・AORI)・石井正好(気象研)・
渡部雅浩(東大・AORI) and team SPAM

1. はじめに

El Niño/Southern Oscillation (ENSO) は年々変動の中でも最大級の気候現象であり、全球の気候に影響を及ぼす。従来、ENSO は熱帯太平洋東部の冷舌付近に変動の中心を持つ振動現象として知られて来たが、20 世紀の終わりごろから、日付変更線近くに変動の中心を持ち両側に逆符号の偏差を伴う新型のエルニーニョが頻繁に観測されるようになり、新型のエルニーニョ (warm-pool エルニーニョ等通称複数, 例えば Kug et al. (2009) として近年盛んに研究が進められている。

一方で、近年の計算技術の発達に伴い、Atmosphere and Ocean General Circulation Model (AOGCM) を用いた季節予測が可能となり、ENSO を初めとする熱帯域の大規模スケールの現象の予測スキルは飛躍的に向上した (例えば, Jin et al. 2008)。新型エルニーニョの季節予測可能性に関する研究は始まったばかりであり、季節予測スキルを左右する背景の物理メカニズムにまで踏み込んで従来型のエルニーニョとの違いを議論した研究はまだ存在しない。

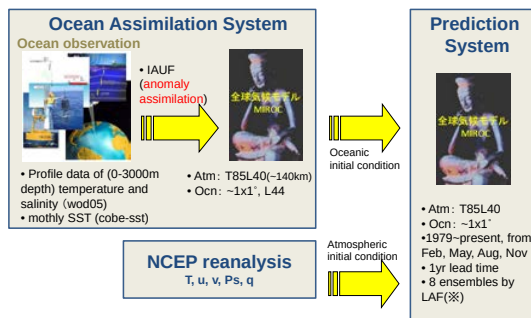


図 1. MIROC を用いた季節予測システム SPAM の概念図。

本研究では、東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同で開発した AOGCM MIROC5 (Watanabe et al. 2010) を用いて構成された季節予測システムの事後予測実験結果を用いて、従来型・新型エルニーニョの双方の予測可能性の評価と、予測スキルを左右する背景のメカニズムを明らかにすることを目的としている。また、MIROC による季節予測システム特有の ENSO 予測の特徴とその原因についても言及する。

2. 季節予測システムの概要

本研究で使用した季節予測実験結果は、AOGCM MIROC5 をベースとした実験的季節予測システム (System for Prediction and Assimilation by MIROC; SPAM) によるものである。大気モデルの水平解像度は T85 (約 140 km)、海洋モデルの水平解像度は経度方向に 1.4°、緯度方向に 0.5 (赤道付近) ~1.4°である。

モデルの初期値化の過程では、三次元変分法を用いて観測の海面水温 (SST: Sea Surface Temperature)、表層水温、表層塩分濃度の偏差成分を 1945 年 1 月から同化し (アノマリ同化)、LAF (Lagged Average Forecast) 法を用いて 8 アンサンブルメンバーの初期値を作成している。

予測実験は、大気初期値に NCEP 再解析、海洋初期値にアノマリ同化実験の結果を用い、年 4 回 (2 月、5 月、8 月、11 月) の各月 1 日からスタートして 1 年後までの予測値を出力する。現在、1979 年から 2011 年までの初期値を利用した事後予測実験結果が利用可能である。これらの実験設定は

World Climate Research Programme (WCRP) の Climate-system Historical Forecast Project (CHFP) のプロトコルに準じており, SPAM の成果を CHFP に提出する準備が現在進められている. 図 1 に SPAM の概念図を示す.

3. SST 指標を用いた予測スキル評価

ここでは, ある固定領域における SST 偏差の観測と予測値間の相関係数 (Anomaly Correlation Coefficient; ACC) の値を予測スキルの指標として, MIROC5 の季節予測システムの性能を評価する. 一般的に ENSO の予測スキルを評価する際には, NINO3.4 海域 ($5^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W}-120^{\circ}\text{W}$) が用いられる. 図 2 に, 予測開始月毎に SPAM の予測スキル (星印) を世界の先端システムの結果 (実線, Jin et al. (2008) による) と比較した結果を示す. 多くのモデルは, ENSO の成長期に当たる年後半の予測スキルが高く, 春先にかけてスキルが低下する特徴を示している. この春先にスキルが低下する特徴は“spring barrier”と呼ばれ, 東太平洋赤道域の温度躍層が深くなる春先に大気海洋の結合強度が弱化する事等が影響を与えていると考えられている (Blumenthal, 1991 他). これに対し SPAM の予測結果は, spring barrier が顕著に現れず, 年間を通して季節依存性が一定しており, 他の多くのモデルと異なる特徴を示している. この MIROC 特有の予測傾向については 4 章において考察する.

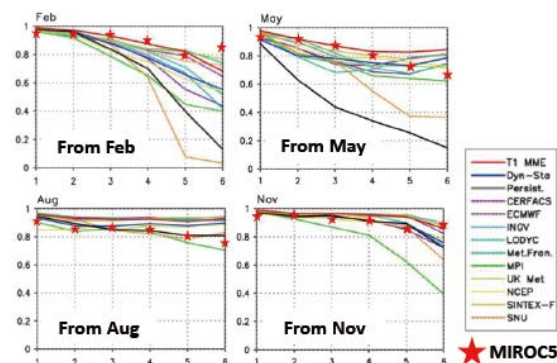


図 2. NINO3.4 の ACC スキル. Jin et al. (2008) の Fig. 8 に加筆. 星印が SPAM の結果を示す.

次に, 従来型のエルニーニョと新型のエルニーニョの予測可能性を区別するため, NINO3.4 海域より東に位置する NINO3 海域 ($5^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W}-90^{\circ}\text{W}$) における平均 SST 偏差を従来型, Ashok et al. (2007) による EMI インデックス ($[10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$, $165^{\circ}\text{W}-140^{\circ}\text{W}]-1/2[15^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{W}-70^{\circ}\text{W}]-1/2[10^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{W}-145^{\circ}\text{W}]$) を偏差が西寄りになる新型のエルニーニョの指標として ACC スキルを見積もる. 図 3 に, 予測開始月と予測期間の関数として各 ACC スキルをプロットした結果を示す. 参考のため, Hendon et al. (2009) によって解析された, AOGCM POAMA (by the Centre for Australian Weather and Climate Research) による季節予測の結果も併せて記している.

Hendon らによる NINO3 指標の解析では (図 3 左上), どの月から予測を開始したケースにおいても, 予測対象月が春先に差し掛かる時点で予測スキルが落ち込む spring barrier の特徴が現れている. これに対し EMI 指標の予測スキル分布には spring barrier の特徴は顕著に現れていない (図 3 右上). このことから Hendon らは, ENSO 予測における spring barrier は従来型の ENSO に特有のもので, 近年の新

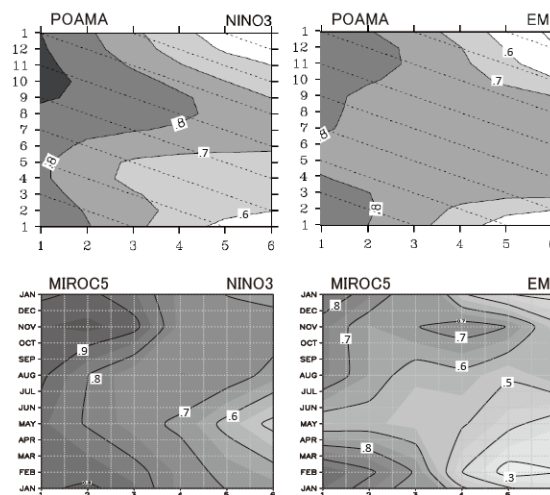


図 3. 予測開始月 (縦軸) と予測期間 (横軸) に対する ACC スキルのプロット. 左: NINO3, 右: EMI. 上段: Hendon et al. (2009, Fig. 3) による POAMA モデルの結果, 下段: SPAM の結果.

型エルニーニョは影響されにくいことを示唆した。さらに、予測開始後数か月間は従来型のエルニーニョの方が高い予測可能性を示す傾向にあるが、半年先にはその傾向が逆転することも指摘している。しかし、それらの理由については陽に述べられていない。

一方、MIROC の NINO3 指標の ACC スキルの分布図は、年後半に予測を開始した場合の方が予測可能性が高くなるものの、予測対象月の季節に依存するような予測可能性の低下は見られず、予測開始月の季節のみに結果が依存していることが分かる（図 3 左下）。EMI 指標も同様の傾向を示しているが、期間を通して NINO3 指標より予測可能性が低い（図 3 右下）、このことから、MIROC が spring barrier に影響を受けにくく、予測可能性の低下傾向の季節依存性が小さいという特徴を持つことが分かる。

以上の解析から、従来型のエルニーニョに比べて新型のエルニーニョの予測が難しいこと、新型エルニーニョは spring barrier に影響を受けにくいこと、さらに MIROC は spring barrier に影響を受けにくく他のモデルに比べて季節依存性が小さいことが示唆された。しかし、指標を用いた解析では、ENSO の非対称性（ラニーニャでは新型旧型の違いが明瞭に観測されない）を考慮することは不可能である。さらに、上述したような予測可能性の違いを生む物理的背景を理解するためには予測に伴う各ケースの循環場の変化を調べる必要がある。そこで次章では、予測ケースを ENSO のタイプ毎に分類して、合成解析を行うことを試みる。

4. エルニーニョタイプ毎の合成解析

ENSO タイプ毎に予測誤差がどのように成長するのかを調べるため、予測開始時に場が ENSO のどのような位相にあるかによって予測ケースを分類して合成解析を行った。分類の詳細を表 1 に示す。ここでは、予測開始月を従来型エルニーニョ、新型エルニーニョ、ラニーニャそれぞれの成長期、衰退期、及び平年値に分類し、従来型成長期 11 ケー

ス、新型成長期 12 ケース、ラニーニャ成長期 19 ケース、従来型衰退期 9 ケース、新型衰退期 6 ケース、ラニーニャ衰退期 27 ケースを得た。以降では特に、従来型・新型エルニーニョの成長期 2 ケースに注目していく。

図 4 に、ケース毎に見積もった 1 ヶ月・4 ヶ月・7 ヶ月予測の ACC の空間分布を示す。従来型エルニーニョでは東太平洋を中心とした偏差が大きい場所において高い予測可能性が半年後まで存在しているのに対し、新型エルニーニョでは中央太平洋に予測可能性が残るものの、半年後の ACC は従来型に比べると低い。このことから、新型エルニーニョの予測が従来型に比べて難しいことが確認される。

次に、両タイプのエルニーニョの発達過程において海水温偏差がどのように予測されているかを調べるため、図 5・図 6 に予測開始からの経過月毎に合成した偏差パターンと、対応する月の観測の合成偏差を示した。図 5 が従来型、図 6 が新型のエルニーニョの成長過程である。観測される従来型エルニーニョの発達過程では（図 5 下）、温度躍層に沿っ

表 1 予測開始月の分類。赤：エルニーニョ，青：ラニーニャ，塗りつぶし：成長期，斜線：衰退期

	Feb	May	Aug	Nov
1979				
1980				
1981				
1982		OT	OT	OT
1983	OT	OT	OT	
1984				
1985				
1986			OT	OT
1987	OT	OT	OT	OT
1988	OT			
1989				
1990				
1991		WP	WP	WP
1992	WP	WP		
1993	OT	OT		
1994			WP	WP
1995	WP			
1996				
1997		OT	OT	OT
1998	OT	OT		
1999				
2000				
2001				
2002			WP	WP
2003	WP			
2004			WP	WP
2005	WP			
2006				WP
2007				
2008				
2009			WP	WP
2010	WP			
2011				

て暖水偏差が東進し、海面に達してエルニーニョが最盛期を迎える。これに対し新型エルニーニョの発達期には（図6下）、温度躍層に沿った海水温偏差は同様に存在するものの海面に達することなく減衰し、初期に中央太平洋の海面付近にあった正偏差が温度躍層から独立して発達していく様子が分かる。Kug et al. (2009)では、このような新型エルニーニョの発達プロセスについて、貿易風偏差によって生じる東西移流が SST 偏差を成長させる正のフィードバックメカニズムを提唱している。前述したように、予測の spring barrier は温度躍層の季節変化に関連していると言われていることから、温度躍層と独立に発達する新型のエルニーニョは spring barrier に影響を受けにくくなるものと考えられる。

一方、予測における従来型エルニーニョ発達期の偏差の振る舞いは、観測と異なる挙動を示している（図5上）。予測初期には観測と同様に海面から約 100m までの深さに暖水偏差が分布しているものの、モデルが再現する温度躍層の位置から外れている。これは、MIROC の季節予測システムの初期化過程においてアノマリデータ同化が採用されていることに原因がある。アノマリ同化手法は本来季節スケールよりも十年規模スケールの予測を行うために考案されたもので、モデルが再現する誤差を含んだ状態の気候値に偏差成分のみを同化することで、予測値がドリフトすることを避ける目的で用いられる。しかし、季節スケールの予測においては full 同化の方が有利であることから、季節予測システムにアノマリ同化手法を採用する例は少ない。

SPAM は将来的なシームレス予測を見据え

て開発されたため、季節予測においてはこの初期値化過程が MIROC の最も特徴的な点であると言える。

MIROC が再現する気候値の温度躍層は温度勾配が弱く、観測よりも深いというバイアスを持っている。従って、同化された実際の観測による海水温偏差はモデルの温度躍層より浅い位置に存在することになり、温度躍層からのフィードバックが働きにくくなっている。その結果、海面付近の温度偏差は観測の新型エルニーニョの場合と同様水平移流の効果によって成長し、予測が進むにつれて西にシフトし、半年後には新型エルニーニョの特徴と区別がつかなくなる。MIROC の ENSO 予測が spring barrier の影響を受けにくいのもこのためであると考えられる。

新型エルニーニョの発達期については、予測においても観測と同様の偏差パターンを示しているが、振幅は過小評価される傾向があることが分かる（図6上）。

最後に、新型エルニーニョの予測可能性が従来型より低い理由については、大気ノイズの影響による S/N 比の低下が考えられる。通常、赤道域大気下端の大気ノイズは、対流の活発な西太平洋域において大きくなる（図略）。したがって、従来型よりも西側に発生する新型エルニーニョの SST 偏差は大気ノイズの影響を受けやすくなる。さらに発達のメカニズムが海洋内部の変動と独立して大気からのフィードバックに強く依存することから、大気ノイズに影響を受ける割合はより大きいものと考えられる。

5. まとめ

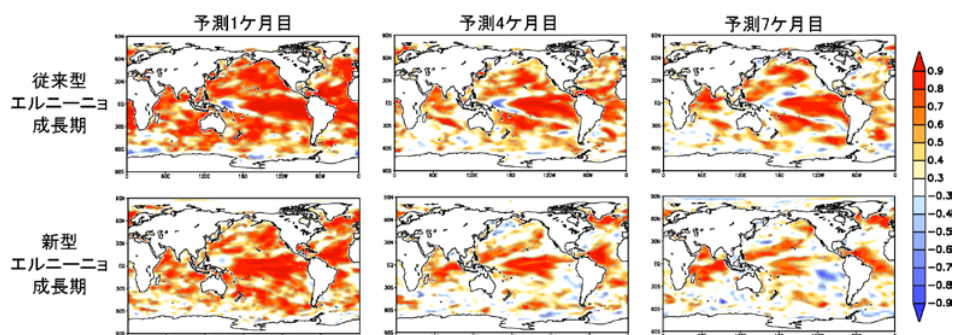


図4. 予測開始後1ヶ月目、4ヶ月目、7ヶ月目の SST 偏差の ACC スキル分布。上：従来型エルニーニョの発達期に予測を開始したケース、下：新型エルニーニョ発達期に予測を開始したケース。

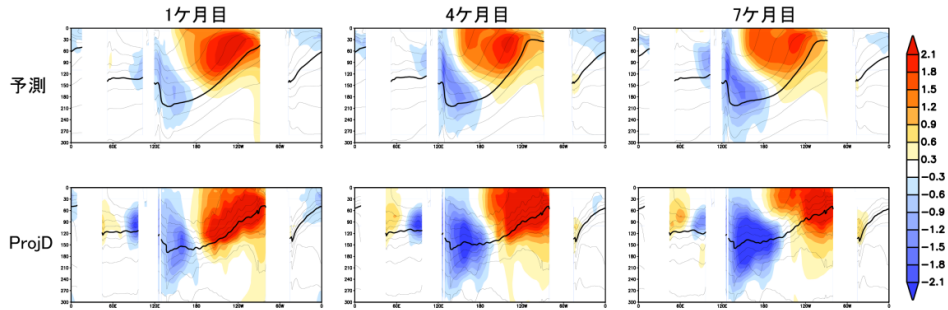


図 5. 予測開始後 1 ヶ月目、4 ヶ月目、7 ヶ月目の海水温偏差の合成図. 上: 従来型エルニーニョの発達期に予測を開始したケース, 下: 上段に対応する ProjD の海水温偏差の合成図.

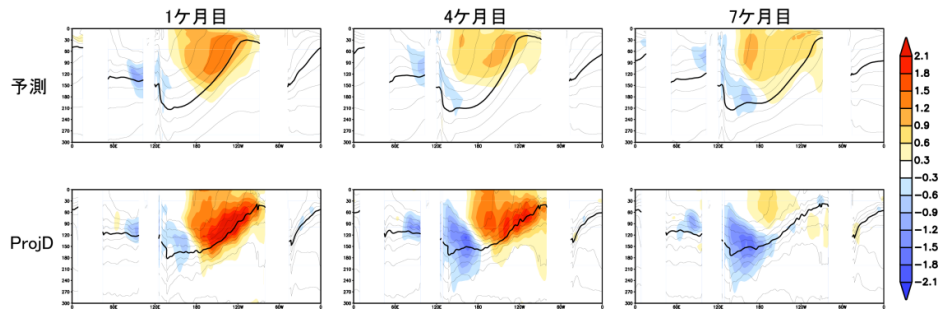


図 6. 図 5 と同様. ただし、新型エルニーニョ発達期に予測を開始したケース.

本研究では、大気海洋結合モデル MIROC による季節予測システムを用いて、近年報告されている 2 タイプのエルニーニョの予測可能性の違いとその背景にある物理プロセスを明らかにした。一般的に、従来型のエルニーニョに存在する予測の **spring barrier** は、新型エルニーニョには顕著に現れないと言われている。これは、新型エルニーニョの発達過程が、**spring barrier** の原因と言われる温度躍層の季節変動から独立して、大気からのフィードバックに依存していることが分かった。一方、新型エルニーニョの場合、大気への依存度が強い上に発生場所が対流の活発な西寄りに位置するため、大気ノイズによる予測可能性の低下が避けられない。

MIROC の季節予測システムでは、初期化過程にアノマリ同化を導入しているという特徴があるため、初期値において同化される暖水偏差の位置とモデルが再現する気候値の温度躍層の位置との間にずれが生じ、温度躍層からのフィードバックが効きにくくなる。その結果、他国のモデルと比べて **spring barrier** の影響を受けにくいという特徴が見られた。

本研究では太平洋を中心として解析を行っ

たが、図 4 において ACC スキルを空間的に見積もったことで、他の海域においても従来型・新型のエルニーニョ間で予測可能性の違いが見られることが分かった (e.g., インド洋, 熱帯大西洋西部など). これらの興味深い点に着目して今後も研究を進めていく予定である。

参考文献

- Blumenthal, M. B., 1991: Predictability of a coupled ocean-atmosphere model. *J. Clim.*, **4**, 766-784.
- Jin, E. K., and coauthors, 2008: Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models. *Clim. Dyn.*, **31**, 647-664.
- Kug, J.-S., F.-F. Jin, and S.-I. An, 2009: Two types of El Nino events: Cold tongue El Nino and warm pool El Nino. *J. Clim.*, **22**, 1499-1515.
- Watanabe, M., and coauthors, 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability and climate sensitivity. *J. Clim.*, **23**, 6312-6335.