

# CMIP5 に向けた近未来気候変動予測データの検証解析

望月崇・建部洋晶・小室芳樹・坂本天(独立行政法人海洋研究開発機構)  
木本昌秀・近本喜光・渡部雅浩・森正人(東京大学大気海洋研究所)  
石井正好(独立行政法人海洋研究開発機構/気象庁気象研究所)

## 1. はじめに

21世紀気候変動予測革新プログラムにおけるチーム近未来には、初期値化による約30年先までの近未来予測実験を実施する使命がある。近未来予測では、温室効果ガスの増加による全球的な温暖化シグナルだけではなく、内部変動(特に十年スケール変動)シグナルもしっかりと予測する必要があるが、そのような実験がおこなわれるようになったのは世界的に見てもごく最近のことである(Smith et al. 2007; Keenlyside et al. 2008; Pohlmann et al. 2009)。

チーム近未来では、まず”旧版”の大気海洋結合モデルMIROC3m(T42L20)を用いて、近未来予測”試行”実験を実施した。このモデルはIPCC第4次評価報告書(AR4)/CMIP3に向けた温暖化予測実験で使用したものである。これにより特に太平洋十年規模振動(PDO)について数年に渡る予測可能性を世界で初めて実証した(Mochizuki et al. 2010)。

これを踏まえ、最近ではIPCC第5次評価報告書(AR5)/CMIP5に向け、”新版”の大気海洋結合モデルMIROC4h(T213L56)(Sakamoto et al. 2012)やMIROC5(T85L40)(Watanabe et al. 2010)を用いて、近未来予測”本番”実験を実施した。MIROC4hは、物理スキームは基本的に更新されていないが、超高解像度モデルである。一方、MIROC5では大気・海洋海氷・陸面の物理過程について、多くの計算スキームが修正もしくは新規採用された。作成された”本番”実験データは広く一般に公開される予定であり、本稿ではその基本的な品質(予測可能性)について記述する(Mochizuki et al. 2012)。

## 2. 初期値化(データ同化)実験と予測実験

初期値化としておこなうデータ同化実験の基本的な設定は、以前のMIROC3mを用いた”試行”実験時と同じであるが、更新された客観解析海洋データ(Ishii and Kimoto 2009)を用いて海洋上層の3000mまでの水温/塩分を同化するなど、いくつかの細かな修正も加えられている(Tatebe et al. 2012)。

MIROC3mに比べてMIROC4hやMIROC5は桁違いに大きな計算機資源を必要とするので、現時点では、どうしてもアンサンブル数が限られ、また初期摂動の作成手法も簡便にならざるを得ない。ここではまず、IAU手法で同化実験をおこない、3メンバー(MIROC4hを用いて1メンバー、MIROC5を用いて2メンバー)からなる同化場を作成した。その後、3ヶ月間隔のLAF法を使って、同化場の各メンバーから3個の初期値を作成した。例えば、ある年の1月1日から予測をおこなう場合には、当年1月1日に加えてその3ヶ月前の前年10月1日と6ヶ月前の前年7月1日の3個の同化スナップショットを初期条件とした。同化1メンバー当たり3アンサンブル予測が可能なので、結局9メンバー(MIROC4hを用いて3メンバー、MIROC5を用いて6メンバー)からなるアンサンブル予測場が得られた。

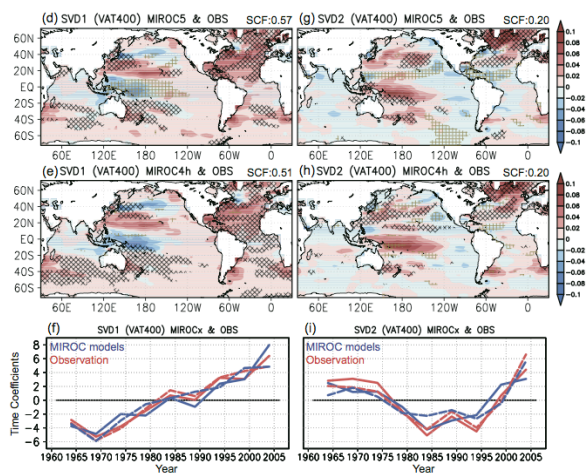
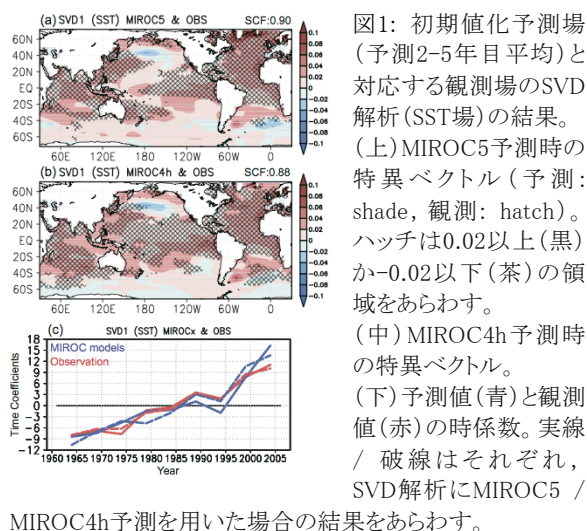
CMIP5の実験設定に従い、1961年1月1日から5年毎にいずれも10年先までの過去予測実験をおこなった。同様に、2006年1月1日から2035年までの過去+将来予測実験もおこなった。なお、外部強制力として与える放射条件データも(温室効果ガス濃度や火山変動、太陽活動変動など)もAR5向けに更新されており、ここでは歴史的なデータに加え、RCP4.5シナリオを用いた。

## 3. 予測可能な変動は何か

特異値分解(SVD)解析は2つの時空間変動場から同時に変動しているような成分を取り出す手法であるから、観測場と初期値化予測場に対して適用すれば、予測可能な変動(観測場と予測場で似たような変動)の時空間構造が抽出できるはずである。そこで、5年毎の初期値化予測のアンサンブル平均値(予測2-5年目の4年平均値)と、対応する観測値(Ishii and Kimoto 2009)にSVD解析を施した。なお、10年スケールの予測可能性を議論する場合には、予測2-5年目の4年平均場に注目することが多い(e.g., van Oldenborgh et al. 2012)。1年目はエルニーニョ現象のような年々変動成分の予測

スキルの影響を強く受けるし、予測期間の後半になればなるほど初期値化のインパクトが薄れていくことが容易に想像されるためである。

SVD解析を海面水温 (SST) 場に施した場合、第1モードは (MIROC4hを用いた予測値と観測値の場合も、MIROC5を用いた予測値と観測値の場合も、いずれも) いわゆる地球温暖化シグナルをあらわす (図1)。また寄与率 SCF は MIROC5 予測では90%、MIROC4h 予測では88% であることから、SST 場における予測可能な変動成分は、ほとんどが地球温暖化シグナルであると言える。第2モード以下の変動成分の寄与率 SCF はいずれも非常に小さく、残念ながら内部変動による SST 変動を全球的に大きな振幅で予測することはあまり期待できない。



さて、SVD解析を海洋上層 (100-400m) 平均水温 (VAT400) 場に施した場合はどうだろうか (図2)。第1モードはやはり地球温暖化シグナルを表現するものの、寄与率 SCF は50-60% 程度でしかない。そして第2モードの寄与率 SCF も20% と小さくない。第2モードの時空間構造は、PDO と大西洋数十年規模振動 (AMO) の組み合わせのような変動をあらわしている。よって、PDO や AMO と関係が深い海洋上層水温変動はある程度大きな振幅で予測可能であり、またいろいろな内部変動のなかで PDO や AMO の予測可能性が最も高いと期待される。

#### 4. 予測可能な変動に対する予測スキル

SVD解析によれば高い予測可能性が期待される変動は、地球温暖化シグナル、AMO、PDOの3つであった。実際、全球平均地上気温偏差の予測2-5年目平均値時系列は観測値とよく合う (図3a)。

AMOの時間変動は、大西洋の領域平均SST時系列を用いて定義することが多い。ここでは北大西洋高緯度 (60-10W, 40-60N) と南大西洋中緯度 (30W-10E, 10-40S) の水温差で定義した (Murphy et al. 2010)。MIROC5、MIROC4h いずれのケースも1970-80年代の負偏差と最近の正偏差をよく表現している (図3b)。

PDOの時系列は観測される北太平洋VAT400場 (20-70N) のEOF1に射影した時系列で定義した (c.f., Mochizuki et al. 2010)。MIROC5による予測は不確定性が大きいものの、1970年代後半の負から正への変化をなんとか表現している (図3c)。一方、MIROC4h 予測は特に期間前半 (1960-1980年頃) の結果が悪く、全般的に観測値とあまり一致しない (図3c)。

より統計的な解析として、予測 (一部同化結果を含む) と観測の4年平均値のアノマリ相関を予測リード時間 (年) ごとに描いた (図4) ところ、地球温暖化シグナルが大部分を占める全球平均地上気温は常に高い予測スキルを示した。

AMOとPDOについてはいずれもMIROC5予測のほうがMIROC4h 予測よりもスキルが高い (図4)。MIROC5 予測の場合、AMOでは予測7-10年目であっても95% 有意な予測ができており、PDOも予測3-6年目までは90% 有意な予測ができています。これらはMochizuki et al. (2010) が示した、数年規模のPDO 予測可能性や、十年規模の北大西洋高緯度域水温予測可能性

と整合的である。なお、定義からAMO時系列とPDO時系列は地球温暖化成分を含んでいるが、ここでの大まかな予測可能性の検証解析においては大きな問題を引き起こすことはない。

MIROC4h予測の場合、AMOは数年程度のスキルを示すが、PDOに関しては予測1-4年目平均値でさえも有意な予測ができていない。この低スキルの理由のひとつは、MIROC4hのアンサンブル数が3メンバーしかないことであろう。実際、Mochizuki et al. (2010) の結果を使ってアンサンブル数と予測スキルの関係を調べてみると、10アンサンブル平均値で数年程度だったPDOスキルは、3アンサンブル平均値では2-3年程度に落ちる(e.g., Chikamoto et al. 2012)。

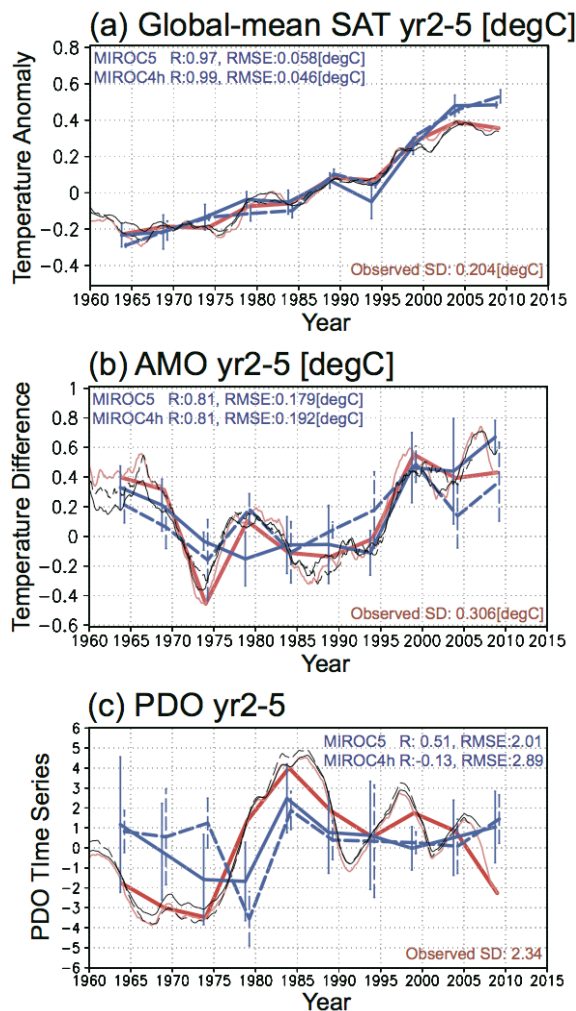


図3: 4年平均(予測2-5年目)の(a)全球平均地上気温偏差, (b)AMO指数, (c)PDO指数(いずれも定義は本文参照)の時系列。青実線/青破線/赤線はMIROC5予測値, MIROC4h予測値, 対応する観測値をそれぞれあらわす。

また、観測されるAMOやPDOの振幅と、予測値のRMSEを比較した場合、MIROC5/4h予測が示すスキルは、アノマリ相関が示すものと同程度であった(図5)。

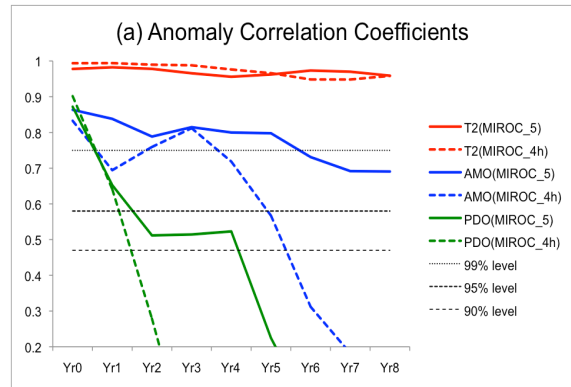


図4: 4年平均の(赤)全球平均地上気温偏差, (青)AMO指数, (緑)PDO指数のアノマリ相関。実線/破線はMIROC5予測/MIROC4h予測の結果をそれぞれあらわす。横軸は予測のリード時間(年)をあらわして、Yr3が予測2-5年目平均値に相当する。

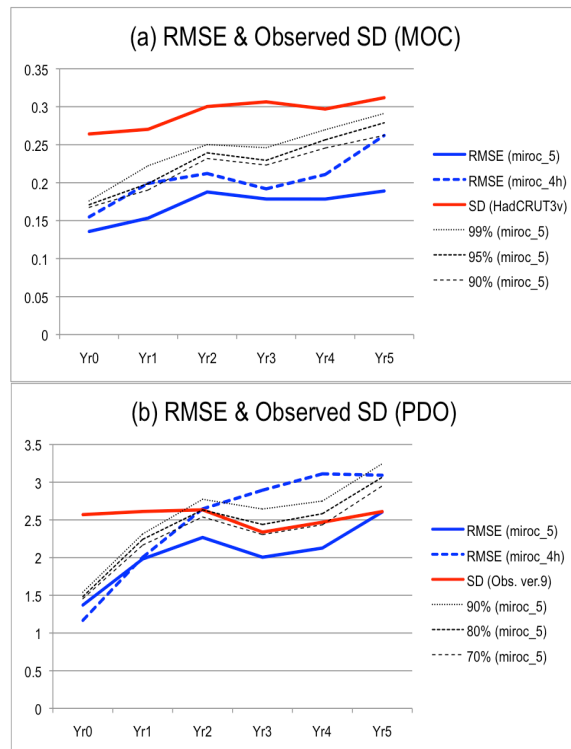


図5: 4年平均の(a)AMO指数と(b)PDO指数のRMSE値。青実線/青破線はMIROC5予測/MIROC4h予測の結果をそれぞれあらわす。赤線は対応する観測値に見られる標準偏差。横軸は予測のリード時間(年)をあらわして、Yr3が予測2-5年目平均値に相当する。

## 5.まとめ

”新版”の大気海洋結合モデルMIROC4hとMIROC5を用いて、IPCC-AR5/CMIP5に向けた近未来気候変動予測データを作成したので、特に過去予測結果を解析して予測可能性を検証した。初期値化を施した場合には、地球温暖化シグナルに加えて、(特にMIROC5を用いた場合には)AMOは十年程度、PDOは数年程度の予測可能性が実証された。これに関連して、特に北大西洋高緯度や北太平洋の海洋フロント域において、局所的な水温変動に対する予測性能が高い(Mochizuki et al. 2012)。これらは”旧版”のMIROC3mを用いた近未来気候変動予測”試行”実験結果とも整合的である。

MIROC4h用いた場合にはアンサンブル数が少ないので、有意性の議論が難しく、また予測性能が低く見積もられてしまっている。これらの問題を少しでも和らげるために、現在、計算機資源を考慮しながら追加実験も実施中である。アンサンブル数を増やしたり、(5年おきではなく)1年おきの10年過去予測実験によってケース数を増やしたりする努力をしている。

一方、IPCC-AR5/CMIP5では(世界の他機関による近未来予測結果も含めた)マルチモデル解析がおこなわれることを考慮すれば、MIROC4h単体でアンサンブル数が少ないことは必ずしも悲観的にならなくてもよいだろう。実際、MIROC3m/4h/5のそれぞれを別システムとみなして”MIROCマルチモデル解析”をおこなうと、アンサンブル数も増え、モデル固有のエラーも和らぎ、いずれかひとつのシステムを用いた場合よりも予測性能が確かに向上するとの結果が得られている(Chikamoto et al. 2012)。

## 謝辞

本研究は「21世紀気候変動予測革新プログラム」としておこなわれたものである。また、科研費若手B-23740362も貢献した。

## 参考文献

1. Chikamoto, Y., et al., 2012: An overview of decadal climate variability in a multi-model ensemble by climate model MIROC, *Clim. Dyn.*, *submitted*.
2. Ishii, M., and M. Kimoto, 2009: Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT

- and MBT depth bias corrections, *J. Oceanogr.*, **65**, 287-299.
3. Keenlyside, N. S., M. Latif, J. Jungclauss, L. Kornblueh, and E. Roeckner, 2008: Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector, *Nature*, **453**, 84-88.
4. Mochizuki, T., et al., 2010: Pacific Decadal Oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **107**, 1833-1837.
5. Mochizuki, T., et al., 2012: Decadal prediction using a recent series of MIROC global climate model, *J. Meteor. Soc. Japan*, *in press*.
6. Murphy, J., et al., 2010: Towards prediction of decadal climate variability and change, *Procedia Environmental Sciences*, **1**, 287-304.
7. van Oldenborgh, G. J., F. J. Doblas-Reyes, B. Wouters, and W. Hazeleger, 2012: Decadal prediction skill in a multi-model ensemble, *Clim. Dyn.*, *in press*.
8. Pohlmann, H., J. H. Jungclauss, A. Kohl, D. Stammer, and J. Marotzke, 2009: Initializing decadal climate predictions with the GECCO oceanic synthesis: Effects on the North Atlantic, *J. Climate*, **22**, 3926-3938.
9. Sakamoto, T. T., et al., 2012: MIROC4h - a new high-resolution CCSR / NIES / JAMSTEC atmosphere-ocean coupled model, *J. Meteor. Soc. Japan*, *submitted*.
10. Smith, D. M., S. Cusack, A. W. Colman, C. K. Folland, G. R. Harris, and J. M. Murphy, 2007: Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model, *Science*, **317**, 796-799.
11. Tatebe, H., et al., 2012: Initialization of the climate model MIROC for decadal predictions by assimilating ocean hydrography, *J. Meteor. Soc. Japan*, *in press*.
12. Watanabe, M., et al., 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity, *J. Climate*, **23**, 6312-6335.