

# 気象庁大気海洋結合モデルを用いた季節予報実験

平井 雅之\*・石川 一郎・新保 明彦・佐藤 均・成瀬 由紀子・曾我 太三・  
森 浩俊・足立 典之・出原 幸志郎 (気象庁・気候情報課)

## 1. はじめに

気象庁では、季節アンサンブル予報システムを2003年3月から運用している。現在の季節アンサンブル予報システムでは、あらかじめ将来の全球海面水温をエルニーニョ予測に基づき推定し、これを下部境界条件として大気モデル(AGCM)により大気の変動を予測している(2段階法)。

しかし、これまでに、季節予報のように長い予測時間(リードタイム)を対象とする場合、大気と海洋の相互作用を考慮できる、大気海洋結合モデル(CGCM)を用いるべきであることが指摘されている。例えば、Kitoh and Arakawa (1999)では、AGCMでは海面水温と降水量の負相関を表現できず、結果として赤道域の降水量が過大になった。また、Wang et al. (2005)は、AGCMは局地的な海面水温偏差に敏感で、夏のアジアモンスーン域に見られる海面水温と降水量の負相関を表現できない一方、CGCMでは負相関を再現できた。

そこで、近年は、気象庁と気象研究所では、CGCMや海洋データ同化手法の改良に取り組み、CGCMを用いた予備的な予測実験を行ってきた(平原ほか2008; 成瀬ほか2008)。その結果、CGCMにより、長いリードタイムにおける予測、特に冬を予測初期とした春から夏にかけての予測精度が改善することが分かった。

そのため、気象庁では2010年2月末発表の季節予報(3か月予報、暖・寒侯期予報)から、従来の2段階法によるAGCMに替わり、

CGCMを導入することを決めた。CGCMを運用するため、大規模な季節予報実験を行った。本発表では、ここでは実験の概要と検証結果を報告する。

## 2. 季節予報実験の設定

### 2.1 AGCMとCGCMの季節予報実験の比較

季節予報実験の仕様を表1に示す。また、図1はAGCM・CGCMによる予測システムの概要を示す。ここでは、AGCMとCGCMの実験の設定のうち、重要な点を示す。

#### ・予測モデルの違い

AGCMに与える予測海面水温は、次の①②の加重平均により求める。

①持続予報(前30日平均の海面水温偏差の持続)

②統計的予測(CGCMによるNINO.3の海面水温予測から統計的に推定した全球海面水温偏差(線形長期トレンド除去後にNINO.3の海面水温偏差からの線形回帰)に線形長期トレンドを考慮)

予測時間が長いほど、統計的予測の重みが増す。

CGCMとして用いる大気海洋結合モデルのうち、大気モデルはAGCMと同等である。海洋モデルは、気象研究所海洋研究部で開発されたMRI.COM(石川ほか2005)を用いる。大気・海洋両モデルの結合間隔は1時間とする。なお、現状では、大気・海洋モデルの双方に含まれる誤差の影響で、そのまま大気モデルと海洋モデルを結合させると現実的な気候状態とは異なる方向に

シフトする。これを軽減するため、大気モデルから海洋モデルに与える海面の熱と運動量フラックスに人為的補正を加えている（フラックス修正）。フラックス修正の大きさは、予測対象月ごとの統計量として、あらかじめ算出する。

#### ・アンサンブル手法の違い

AGCMでは、大気初期摂動によるアンサンブルを行い、メンバー数は11とする。

一方、CGCMのアンサンブル手法には、初期摂動とLAF法を併用する方法を適用する。まず、予測初期値日を各月の月末または月初め頃とその15日前の2つの初期値日の組み合わせとする（表2）。ここで、1初期値日あたり、4メンバーの熱帯・中高緯度の大気初期摂動と海洋初期摂動を作成する。これにより、1初期値日当たり5メンバー、2つの初期値日の予測を組み合わせることにより、計10メンバーのアンサンブルの予測結果として評価する。

## 2.2 CGCMによる初期値・初期摂動の作成方法

### （大気・海洋の初期値の作成）

大気初期値は、JRA-25/JCDAS (Onogi et al. 2007)を用いる。海洋初期値は、気象研究所海洋研究部で開発された全球海洋データ同化システム(Multivariate Ocean Variational Estimation / Meteorological Research Institute Community Ocean Model - Global; MOVE/MRI.COM-G, 以下MOVE-G) (Usui et al. 2006; 石崎ほか 2009)を用いる。解析手法は3次元変分法を採用しており、変分法の計算時に、海域別の水温・塩分の鉛直パターンに基づく統計を考慮している点が特長である。海洋モデルを駆動する大気データには、JRA-25/JCDASを使用する。データの同化期間は10日間

とする。解析日を5日ずらした2系統のシステムを用意することで、5日ごとに海洋解析場を求め、これを海洋初期値とする。

### （大気・海洋の初期摂動の作成）

CGCMでは、大気のみならず、海洋にも初期摂動を与える。大気・海洋の初期摂動は以下のように作成する。

大気初期摂動は、成長モード育成法 (Breeding of Growing Mode method; 以下、BGM法) (Toth and Kalnay 1993, 1997)により作成する。大気初期摂動は、北半球の中・高緯度 ( $20^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ ) と熱帯 ( $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ) のそれぞれの領域に関する大気初期摂動の和により求めている。北半球の中・高緯度では、特に傾圧不安定波動の不確実性に関わる初期誤差を推定するため、500hPa高度の誤差成長をもとに初期摂動を求めている。一方、熱帯では、気候情報課と京都大学防災研究所の共同研究において開発された方法(佐藤ほか2006; Chikamoto et al. 2007)を採用する。この方法では、熱帯の季節内振動と関連した、比較的長い時間スケールで成長する摂動パターンが抽出できる。

海洋初期摂動に関しては、海洋モデルに与える大気の外力（大気から海面への熱・運動量・水フラックス）に熱帯大気初期摂動を加算または減算したものをを用いて、初期摂動を含む海洋初期値を求める。熱帯大気初期摂動を参照している理由は、熱帯大気初期摂動が熱帯の季節内振動と関連した、比較的長い時間スケールで成長する摂動パターンが抽出できるためである。これを海洋初期摂動の作成に利用することで、エルニーニョ予測の精度向上に寄与する海洋初期摂動が得られることが期待される。

表1 AGCMとCGCMの季節予報実験の仕様

		現在の季節予報システム (AGCM)	今回導入する季節予報システム (CGCM)
システムの概要		大気モデル+予測海面水温(2段階法)	大気海洋結合モデル(1段階法)(ただし、フラックス修正あり)
モデルの概要	大気モデル解像度	気象庁全球モデル TL95(約180km)/40層	気象庁全球モデル TL95(約180km)/40層
	海洋モデル解像度 計算領域	なし	MRI.COM(石川ほか2005) 東西1°×南北0.3~1°/50層 75°N-75°S
モデルの初期値・境界条件など	大気初期値	JRA-25/JCDAS(Onogi et al. 2007)	
	海洋初期値	なし	全球海洋データ同化(MOVE-G; Usui et al. 2006; 石崎ほか2009)
	海面水温	COBE-SST(Ishii et al. 2005) 持続予報、トレンド、統計的予報の組み合わせ、不確実性を考慮	海洋モデル領域外(極域)は、COBE-SSTの気候値
	陸面初期値	気候値(陸面解析)	
	海氷	気候値(COBE-SST)	
	二酸化炭素濃度	一定	近年の増加トレンドを考慮
アンサンブル手法	手法の概要	大気SV法(高野1994)	初期摂動(大気BGM法+海洋初期摂動)とLAF法の組み合わせ
	アンサンブルメンバー数	11(1初期値日)	10(2初期値日、1初期値日あたり5メンバー)
実験対象期間		1984~2005年(22年間)	1979~2008年(30年間)

表2 季節予報実験における初期値月と実際の予測初期値日の対応

初期値月	V0703C	CGCM*	初期値月	V0703C	CGCM*
1月	1/10	1/1, 前年12/17	7月	7/10	6/30, 6/15
2月	2/10	1/31, 1/16	8月	8/10	7/30, 7/15
3月	3/10	3/2, 2/15	9月	9/10	8/29, 8/14
4月	4/10	4/1, 3/17	10月	10/10	9/28, 9/13
5月	5/10	5/1, 4/16	11月	11/10	10/28, 10/13
6月	6/10	5/31, 5/16	12月	12/10	12/2, 11/17

\* CGCMでは、2つの初期値日の予測を組み合わせる。

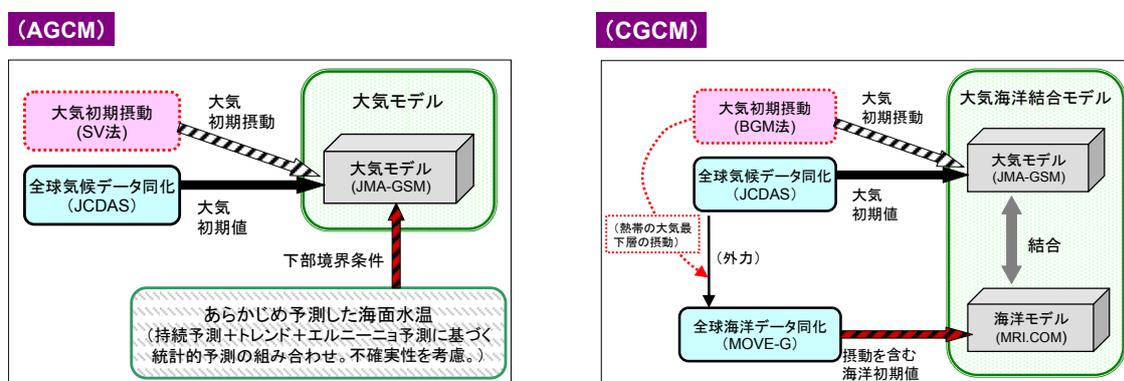


図1 季節アンサンブル予報システムの概要

左がAGCM、右がCGCMによる季節予報実験を示す。緑・水色・赤で示した過程は、数値予報モデル・データ同化・初期摂動の作成を意味する。

### 3. 検証に用いるデータ

ここでは、AGCMとCGCMの予測精度を比較する。比較の対象期間は、両者の予測結果のそろそろ1984～2005年（22年間）とする。但し、CGCMのみを評価する際は、1979～2007（または2006）年初期値の予測を評価対象とする。

検証に用いる解析値は、大気解析値に関しては、JRA-25/JCDASを用いる。ただし、降水量は、全球降水気候計画によるデータ（GPCP version 2; Alder et al. 2003）を用いる。また、海面水温は、COBE-SSTを用いる。

## 4. 検証結果

### 4.1. 系統誤差

図2は、2月初期値月の夏（6～8月）の気温の帯状平均と降水量の系統誤差を示す。CGCMの方が、対流圏下層の気温を低く予測する傾向が見られる。一方、降水量は、AGCMに見られる太平洋熱帯域の東部やインド洋熱帯域を中心に降水過多の傾向をCGCMにより緩和できている。

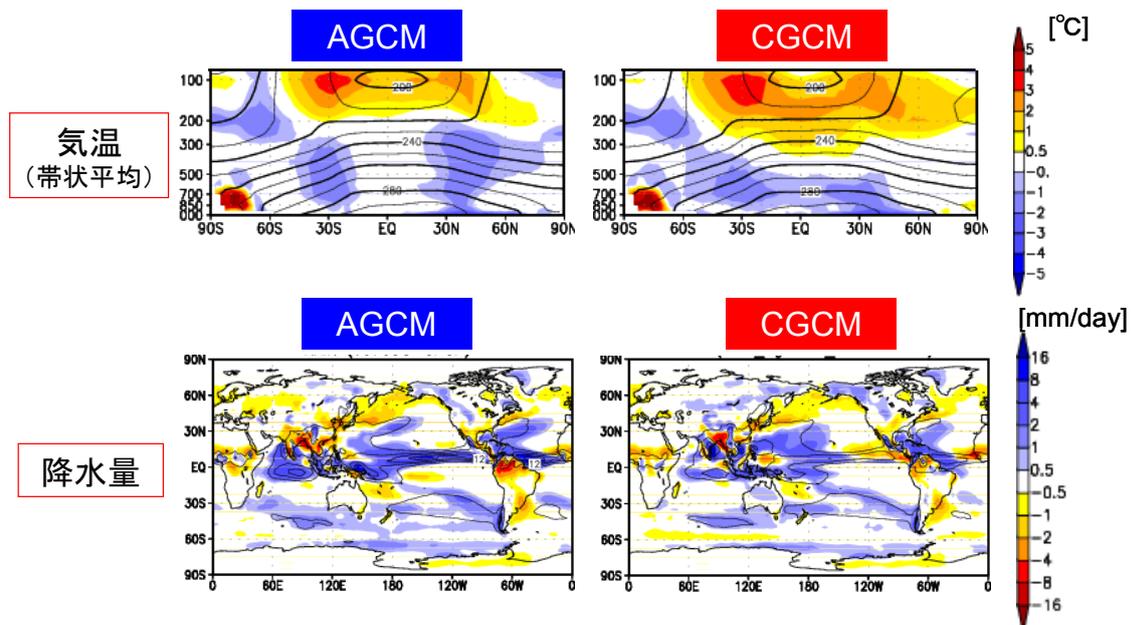


図2 2月初期値月の夏の予測における、気温の帯状平均（上）と降水量（下）の系統誤差。左がAGCM、右がCGCMによる季節予報実験を示す。検証の対象期間は1984～2005年。

### 4.2. CGCMによる海面水温の予測精度

ここでは、予測精度を予測値（アンサンブル平均）の平年偏差と実況値の平年偏差の相関係数（アノマリー相関係数）で評価する。図3は、NINO3.4(5°S～5°N, 170°W～120°W)の海面水温のアノマリー相関係数を、持続予測と比較したものである。CGCMのアノマリー相関係数は、全般に持続予測よりも大きい。春から夏に持続性が著しく悪くなる上、エルニーニョ/ラニーニャ現象の終息期と重なるため、一般に、アノマリー相関係数に見られる太平洋赤道域東部の海面水温の予測精度は低くなる（例えばJin et al. 2008）。CGCMでもこの時期は予測精度が相対的に低くなるが、持続予測に比べると格段に良い。また、Jin et al. (2008)による1980～2001年のNINO3.4の海面水温のモデル相互比較の調査結果と比べても、CGCMのアノマリー相関に見られる予測精度はほぼトップレベルとなっている。

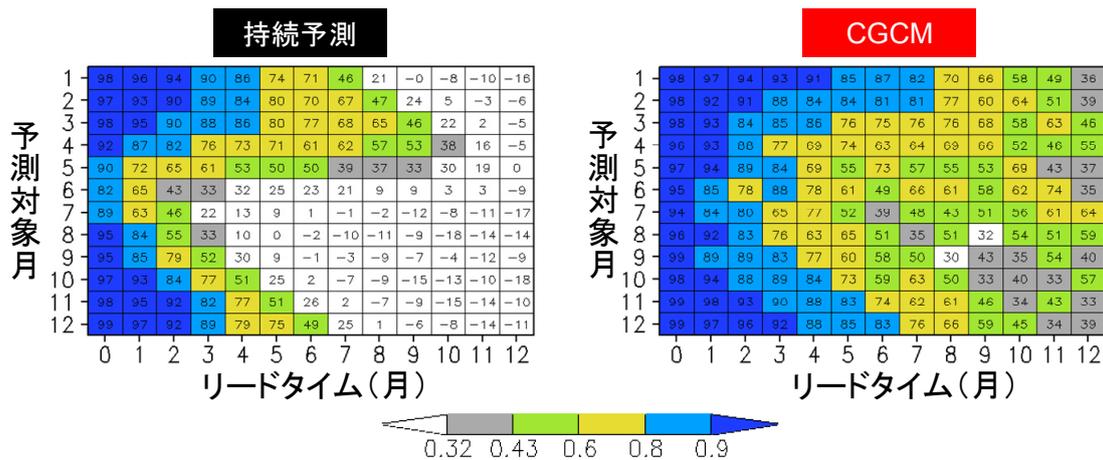


図3 予測対象月（縦軸）・リードタイム（横軸）別のNIN03.4の海面水温のアノマリー相関係数。  
 左が持続予測、右がCGCMによる季節予報実験を示す。図中の格子内の数字は、アノマリー相関係数を100倍した値を示す。検証の対象期間は1979～2007年。なお、有意水準5%、1%（片側）のt検定で評価した場合、アノマリー相関係数がそれぞれ0.32, 0.43以上のおとき、各要素の偏差の予測結果と解析結果の間に、統計的に有意な正の相関があるといえる。

### 4.3. 大気の前測精度

図4は、2月初期値月の夏の850hPa気温のアノマリー相関係数を示す。CGCMのアノマリー相関係数は、熱帯を中心に改善し、太平洋熱帯域から東南アジアにかけては、アノマリー相関係数が0.6以上となる。但し、高緯度ではCGCMでもAGCMと同様に予測が難しいことが分かる。

図5は、2月初期値月の夏の850hPa流線関数のアノマリー相関係数を示す。夏のCGCMの前測では、北西太平洋、南西太平洋、北東太平洋で予測精度の大幅な向上が見られる。特に、北西太平洋における予測精度の向上は、東アジアの天候の前測を考える上で、大きな意義がある。また、図は省略するが、冬の前測でも南半球側の亜熱帯を中心に予測精度が向上している。

熱帯の大気循環場の前測精度の向上は、熱帯の降水量の前測精度の向上と関連している。図6は、北西太平洋モンスーン領域における夏の降水量のアノマリー相関係数を示す。AGCMは、初期月が古くリード

タイムが長いほど、アノマリー相関係数が急速に減少する。一方、CGCMでは2月初期値月でも高い値を維持している。

### 4.4. 海洋の変動パターンとエルニーニョ現象に対する大気の前測

図7は、2月初期値月の夏の海面水温前測に関する経験直交関数(EOF)モードを示す。AGCMの第1モードの変動パターンは、解析の第1モードのエルニーニョ/ラニーニャ現象に関わるパターンと類似している。但し、寄与率が61.5%と解析(17.6%)に比べて極めて高い。第2モードは、長期トレンドと類似したパターン(図略)が見られる。そして、第1,2モードの寄与率を合わせると、ほぼ100%になる。これらの特徴は、第2.1節に示したAGCMにおける前測海面水温の作成方法を考慮すると納得できる。一方、CGCMは、第1,2モードとも解析と類似しているものの、第1モードの太平洋赤道域の中部から東部の偏差域が、南北に狭く、西へ延びすぎている。この影響

は、エルニーニョ／ラニーニャ現象に対する降水量の応答（図8）にも現れる。すなわち、解析では海洋大陸付近と太平洋赤道域東部の降水量偏差のコントラストが明瞭である一方、CGCMでは海洋大陸付近より西方のインド洋熱帯域に偏差の極大が見られる。

ーニョ／ラニーニャ現象に関わる変動パターンが解析に見られるパターンとややずれていることが分かった。このことは、今後調査すべき課題である。また、現状では、大気・海洋の結合時にフラックス修正を用いている。今後は、フラックス修正が不要なシステムの開発が必要である。

### 5. まとめと今後の課題

2010年2月に導入予定のCGCMを用いた季節予報実験に基づく検証結果について示した。CGCMでは、季節予報に重要な、偏差の年々変動の予測精度の向上を確認できた。特に、夏の北西太平洋領域の予測精度には、従来のAGCMの予測に比べ明瞭な改善が確認できた。但し、CGCMでは、エルニ

謝辞

CGCMの季節予報実験に用いた、CGCM、MOVE-G及び海洋初期摂動作成手法の構築には、気象研究所海洋研究部の藤井陽介氏、松本聡氏、及び、気象研究所気候研究部の安田珠幾氏の尽力がきわめて大きい。

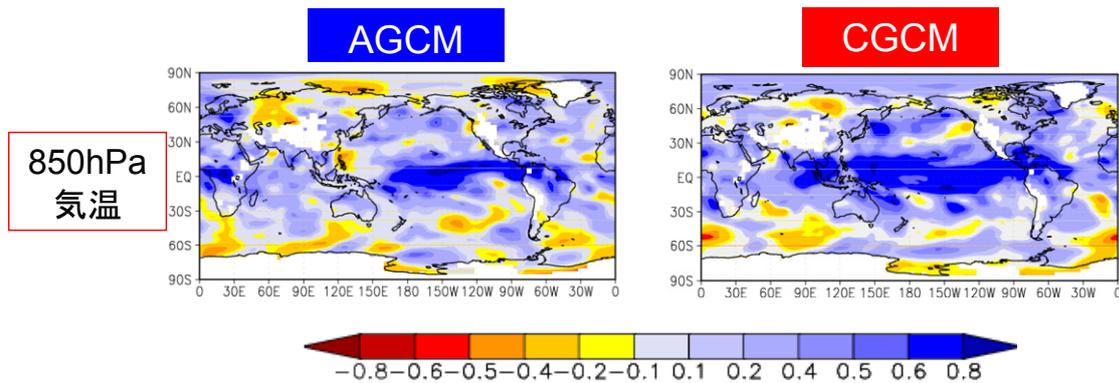


図4 2月初期値月の夏の予測における、850hPa気温のアノマリー相関係数。左がAGCM、右がCGCMによる季節予報実験を示す。検証の対象期間は1984～2005年。

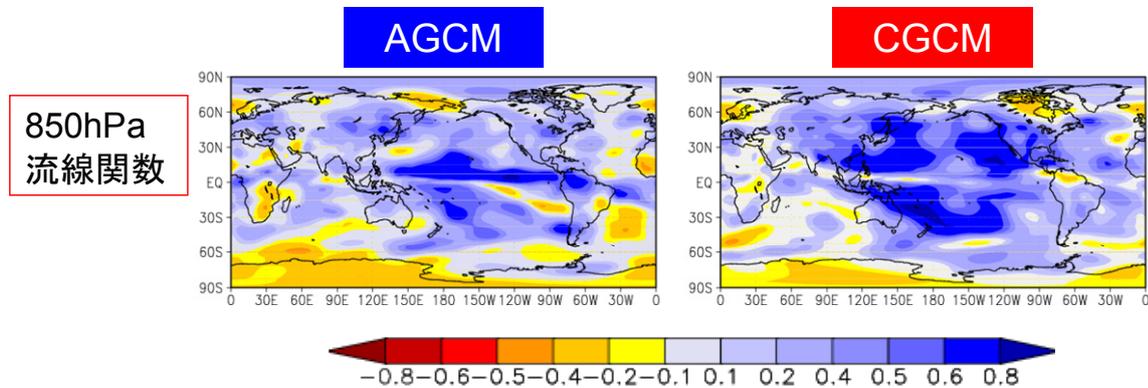


図5 図4と同じ。但し、850hPa流線関数。

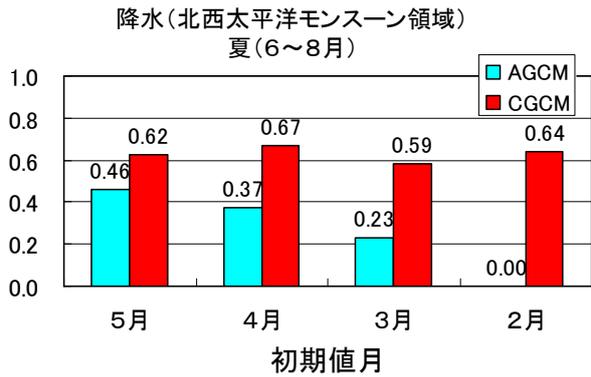


図6 初期値月別の、夏の北西太平洋モンスーン領域の降水量のアノマリー相関係数。  
水色が AGCM、赤が CGCM による予測。統計期間は 1984~2005 年の 22 年間。

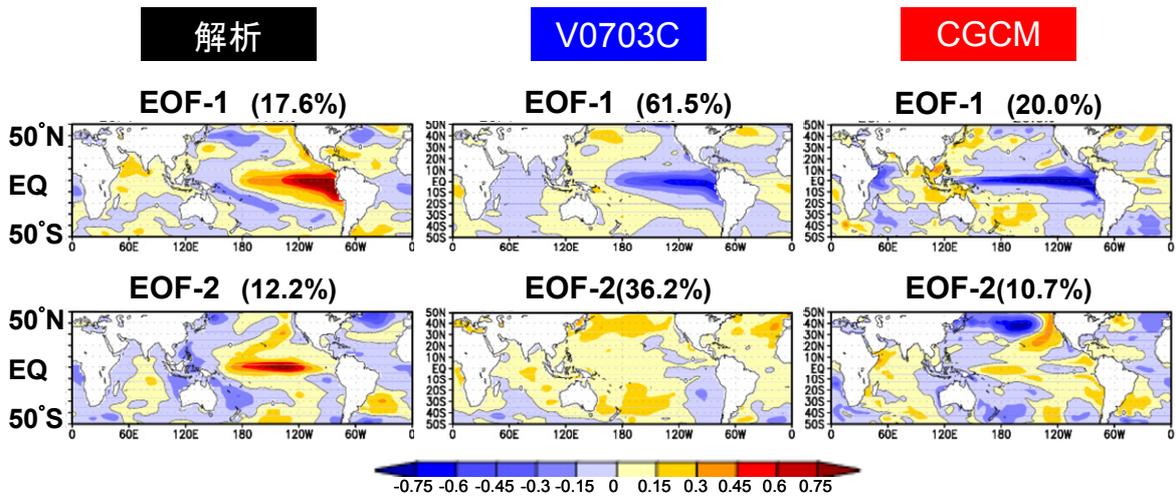


図7 2月初期値月の夏の海面水温予測の EOF モード。  
上が第1モード、下が第2モードを示す。左から、解析、AGCM、CGCM における EOF モード。統計期間は 1984~2005 年の 22 年間。

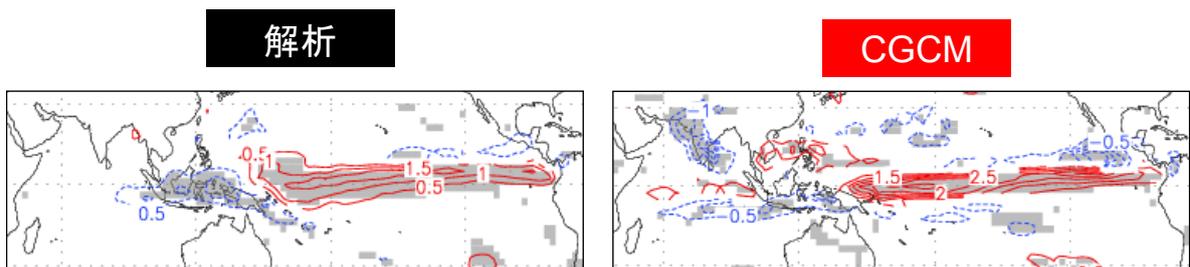


図8 NINO.3 海面水温に対する降水量の線形回帰係数。  
左が解析、右が CGCM による 2月初期値月の夏の予測。統計期間は 1979~2006 年の 28 年間。

## 参考文献

- Adler, R. F., G. J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P. Arkin, E. Nelkin, 2003: The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.*, **4**, 1147-1167.
- Chikamoto, Y., H. Mukougawa, T. Kubota, H. Sato, A. Ito, and S. Maeda, 2007: Evidence of growing bred vector associated with the tropical intraseasonal oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04806, doi:10.1029/2006GL028450.
- 平原 翔二・後藤 敦史・前田 修平・佐藤 均・成瀬 由紀子・伊藤 明・新保 明彦・高谷 祐平・安田 珠幾, 2008: 日本の天候に関連した夏季インド洋の大気海洋変動および大気海洋結合モデル(JMA/MRI-CGCM)にみられる予測可能性について. 第6回「異常気象と長期変動」研究集会.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865-879.
- 石川一郎, 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 安田珠幾, 石崎廣, 2005: 気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)解説. 気象研究所技術報告, **47**.
- 石崎士郎, 曾我太三, 碓氷典久, 藤井陽介, 辻野博之, 石川一郎, 吉岡典哉, 倉賀野連, 蒲地政文, 2009: MOVE/MRI.COMの概要と現業システムの構築. 測候時報, **76** 特別号, S1-S15.
- Jin E. K., James L. Kinter III, B. Wang, C.-K. Park, I.-S. Kang, B. P. Kirtman, J.-S. Kug, A. Kumar, J.-J. Luo, J. Schemm, J. Shukla and T. Yamagata, 2008: Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models. *Clim. Dyn.*, **31**, 647-666.
- Kitoh, A., and O. Arakawa, 1999: On overestimation of tropical precipitation by an atmospheric GCM with prescribed SST. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2965-2968.
- 成瀬由紀子・高谷祐平・佐藤均・伊藤明・新保明彦・前田修平・安田珠幾, 2008: エルニーニョ予測モデルによる東アジアの夏の予測～1月末初期値の夏(JJA)の予測～. 長期予報研究連絡会研究会「長期予報と大気大循環」
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- 高野清治, 1994: アンサンブル予報. 平成6年度長期予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14-28.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3297-3319.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda, and M. Kamachi,

2006: Meteorological Research Institute  
Multivariate Ocean Variational  
Estimation (MOVE) System: Some early  
results. *Adv. Space Res.*, **37**, 806-822.

Wang, B., Q. Ding, X. Fu, I.-S. Kang, K.  
Jin, J. Shukla, and F. Doblas-Reyes,  
2005: Fundamental challenge in  
simulation and prediction of summer  
monsoon rainfall, *Geophys. Res. Lett.*,  
**32**, L15711, doi:10.1029/2005GL022734.