

## 中緯度大気海洋結合変動が季節予測可能性に与える影響

課題責任者

中村 尚 東京大学 先端科学技術研究センター

著者

中村 尚 東京大学 先端科学技術研究センター

西井 和晃 三重大学 大学院生物資源学研究所

田口 文明 東京大学 先端科学技術研究センター

海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

小坂 優 東京大学 先端科学技術研究センター

各季節の気候平均大気循環場の形成やその周りの経年変動場の潜在的予測可能性に、中緯度の海面水温前線やその変動が果たす役割を定量的に評価するために、大気大循環モデル実験を実施した。モデル下方境界条件として与えた海面水温場は近年の衛星観測に基づく32年分で、(1) 全球で年々変動あり、(2) (1)と同じ、但し中緯度で水温勾配を南北平滑化、(3) (2)と同じ、但し北太平洋のみで南北平滑化、(4) (2)と同じ、但し北大西洋で南北平滑化、(5) 熱帯のみ変動あり、中高緯度は気候値(変動なし)、(6) 熱帯は気候値、中高緯度は変動あり、の6種類である。各々について実施した15メンバーのアンサンブル実験の相互比較から、海面水温勾配の存在で中緯度の移動性擾乱活動が強化され、擾乱に駆動される西風ジェットも高緯度側に偏倚することを明らかにした。さらに、北西太平洋の水温勾配は対流圏惑星波の強化を通じ、北極成層圏の気温低下を抑制させる可能性も示唆された。一方、北東太平洋上の対流圏循環場に存在する潜在的予測可能性の極大の形成には、熱帯海面水温変動からの遠隔影響のみならず、中緯度海面水温変動への局所的な大気応答も寄与する可能性が示唆された。

キーワード：中緯度大気海洋結合、予測可能性、アンサンブル実験、大気大循環モデル、エルニーニョ・南方振動、中緯度海洋前線帯

### 1. はじめに

温室効果気体の増加に伴う気候変化やそれに伴う極端な異常気象の発現が世界各地で顕在化しつつある。その一方、大気・海洋は内包する様々な過程の多階層相互作用に伴って常に変動して、(自然)気候変動と付随する天候異常をもたらしている。防災・減災のために世界各地の季節予報の可能性を探求するには、各地で観測される月・季節平均の大気循環偏差(平年値からの揺らぎ)が海面水温(Sea Surface Temperature; SST)や海水の分布の変動への応答としてどの程度説明され得るのかを評価する必要がある。それに関する重要な指標として「潜在的予測可能性(potential predictability)」がある。これは、SSTや海水分布の偏差が完全に把握できたとして、それに対する大気応答が実際の変動を説明できる割合であり、観測されたSSTと海水分布を下方境界条件として与えて大気大循環モデル(Atmospheric General Circulation Model: AGCM)のアンサンブル積分を行う“AMIP(Atmospheric Model Intercomparison Project)実験”から評価できる。このとき、アンサンブル平均場の年々変動は、水温(海水)変動に対する応答として潜在的に予測可能な「大気応答」成分、その平均周りのメンバー間のばらつきは、季節予測困難な「内部変動」成分と認識される。潜在的予測可能性が低い地域では、「大気応答」成分の変動に比べ「内部変動」による揺らぎが卓越するため、予報可能シグナルのS/N比が低く、数値的季節予報が難しいと評価される。従来の研究では(例えば、

Zheng et al. 2000 [1])、水温偏差に対して積雲対流活動が敏感に応答する熱帯域では、エルニーニョ・南方振動(ENSO)など大気海洋結合変動が卓越して潜在的予測可能性が高く、その影響が「大気の架け橋」として及ぶ中緯度太平洋域でもやや高いが、その他の中高緯度域では著しく低いことが示されている。

しかし、従来の評価に使用されたSSTデータは現場観測に基づくために解像度が低く、大気へ大量の熱・水蒸気を供給する西岸境界流やそれに伴う水温前線帯がきちんと表現されていない。近年、本課題に関わる研究グループは、中緯度の水温前線帯の変動が大気循環偏差を強制し得ることを、AFESを用いたAGCM実験(Okajima et al. 2014 [2])や大気海洋結合モデルCFESの長期積分の解析(Taguchi et al. 2012 [3])から見出した。なお、従来のAGCMの解像度は水温前線帯の影響を表現するには不十分であるため、従来のAGCM実験では水温前線のAGCM大気大循環に与える影響も十分評価されていない可能性がある。

そこで本課題では、過去30年蓄積された衛星観測による高分解能のSSTを、従来よりも高い水平解像度で設定したAFESの下方境界条件として与えたアンサンブル実験に基づき、水温前線の気候平均場形成に対する役割と中緯度大気場の潜在的予測可能性を再評価することを目的とする。また、「大気の架け橋」を介した熱帯の変動の中緯度への遠隔影響が被る変調が潜在的予測可能性に及ぼす影響も評価する。

## 2. 数値実験

アンサンブル実験にはAFES (AGCM For Earth Simulator; Kuwano-Yoshida et al. 2010[4]) 中解像度版 (T119;100km 相当、鉛直56層、モデル上端 $\sim 0.1\text{hPa}$ )を用いた。下方境界条件として衛星観測によるOISST海面水温・海水データを32年分与えた。この解像度は $0.25^\circ$ で、水温前線から大気循環への強制が捉えられている。一方、感度実験では空間平滑化したSST場を与えることで、水温前線からの影響を人為的に抑制した。参照実験は全球にOISSTを与えた「Global Ocean-Global Atmosphere (GOGA 実験)」である。また、熱帯( $20^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{S}$ )のみにOISST観測値(年々変動あり)、中高緯度域にその気候値(年々変動なし)をそれぞれ与える「Tropical Ocean-Global Atmosphere (TOGA 実験)」,逆に中高緯度域にはOISST観測値、熱帯域のみに気候値を与える「Midlatitude Ocean-Global Atmosphere (MOGA 実験)」もそれぞれ実施した。さらに、GOGA実験に対応させ、中高緯度域のみ水温勾配を人為的に平滑化させた「中緯度SST平滑化実験」も実施した。加えて、平滑化領域を北太平洋、北大西洋に限定した実験も実施した。平成28年度にはこれら6種についてそれぞれ15メンバーの積分が完了している。

## 3. 結果

以下、北太平洋中緯度にて大気の内変動や熱帯からの遠隔影響が顕著な北半球冬季(12~2月)に関する結果を紹介する。図1は中緯度SST勾配を人為的に平滑化した3種の実験と、GOGA実験との冬季300hPa東西風場の差として、各海域の水温前線からの海盆・半球規模の影響を示す図となっている。北太平洋上、北大西洋上とともに西風が極側で強化、赤道側で弱体化しており、海洋前線がその直上の西風軸を高緯度側へ偏倚させていることを示している。この偏倚は移動性擾乱活動が各海盆で強化されたことを反映している(図略)。これらの西風と移動性擾乱の変化は、東西一様な水惑星実験において与える水温前線帯の緯度を変化させたOgawa et al. (2012[5]; 2016[6])の結果と整合的である。なお、各海盆の海洋前線の存在はその直上の西風のみならず、別の海盆上でも弱いながらも有意な同傾向の西風の変化も引き起こしているが、この「遠隔影響」の機構は明らかでない。

さらに、成層圏気温分布の差として明瞭なのは、北太平洋の中緯度水温前線への応答としての北極上空における最大 $1.5^\circ\text{C}$ 程度の高温偏差である(図略)。水温勾配の下で気候平均場として存在する対流圏惑星波の増幅が極

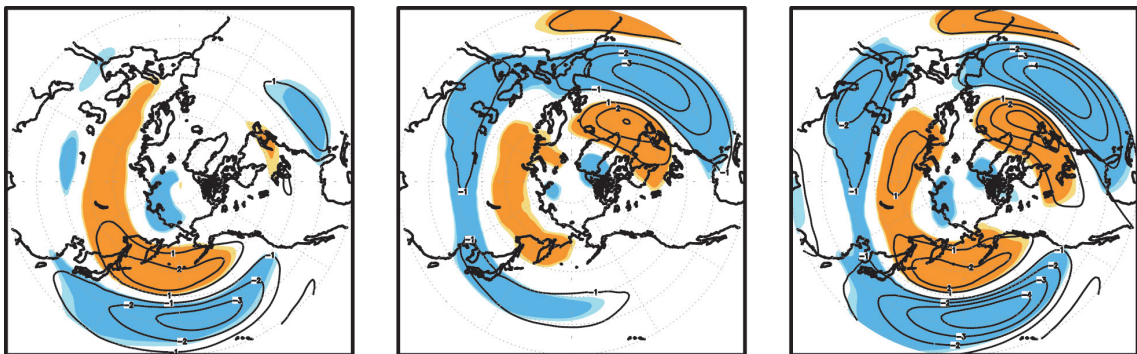


図1 OISSTを下方境界条件として与えたAFESの15メンバーのアンサンブル実験に基づく12~1月平均300hPa西風についてのGOGA実験と(左)北太平洋水温平滑化実験、(中)北大西洋水温平滑化実験、(右)中緯度水温前線平滑化実験、との差(GOGA実験-平滑化実験、線:m/s)。色(暖色系が正)は90または95%有意な差を表す。

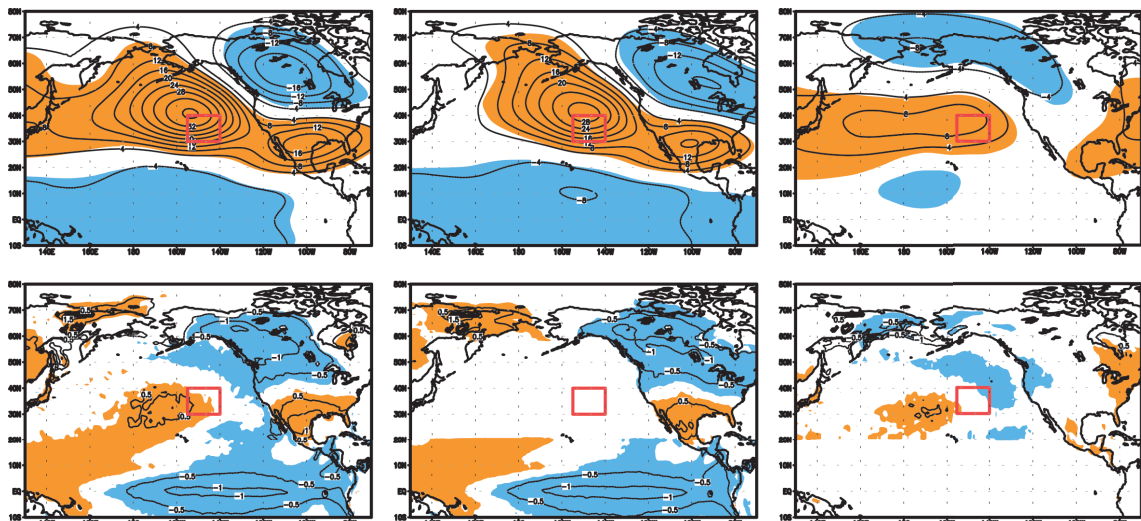


図2 北緯30-40度、西経140-155度で平均したアンサンブル平均12~1月平均500hPa高度場への回帰と相関。(上段)500hPa高度場、(下段)地表面温度。(左)GOGA実験、(中)TOGA実験、(右)MOGA実験。色は95%有意な相関。

東対流圏の気圧の谷の深化として現れ、その影響としての成層圏への波動伝播の強化(図略)が極域成層圏気温を上昇させたと考えられる。

次に潜在的予測可能性に関する解析結果について説明する。GOGA 実験では北東太平洋上に DJF 平均 500hPa 高度場の潜在的予測可能性の極大が存在している(図略)。それぞれの実験で、この領域平均(北緯 30-40 度、西経 140-155 度)高度場と他の領域の高度場と海面水温との相関を図 2 に示す。GOGA 実験と TOGA 実験では、この高度場変動がいわゆる太平洋・北米(PNA)パターンに似通っており、かつ熱帯太平洋の海面水温偏差を伴うことから、熱帯からの遠隔影響によると考えられる。GOGA 実験の中緯度北太平洋の水温偏差は実際はその直上の大気変動が引き起こしたと考えられる。ただし、MOGA 実験における高度場偏差と水温偏差パターンにも GOGA 実験における偏差パターンとの類似性が見いだせる。この結果は熱帯からの遠隔影響としての大気偏差によって中緯度北太平洋に形成された水温偏差が、もとの大気循環偏差を強化するように働く可能性を示唆している。そして、これらの過程を通じて中緯度水温変動が潜在的予測可能性を高めるよう寄与する可能性も示唆される。

#### 4. まとめと今後への発展

上記のように、従来よりも解像度の高い AGCM と SST データを用いた評価から、水温前線の存在が対流圏の大気大循環場のみならず成層圏循環場に影響を与えること、そして中緯度北太平洋域の大気変動場の潜在的予測可能性への同海域の SST 変動からの寄与が明らかにされた。次年度は海面水温前線の大気影響のより精緻な評価のため、AFES 高解像度版(T239; 40km 相当)を用いた実験を実施の予定である。また中緯度域における大気海洋相互作用の影響も考慮するために、CFES 中解像度版(T119; 100km 相当)を用い熱帯海面水温を観測された変動で束縛するペースメーカー実験も開始する予定である。

#### 謝辞

本研究は文部科学省北極域研究プロジェクト ArCS と科学技術振興機構(JST) Belmont Forum 国際共同研究(InterDec) との一環として実施されたものである。

#### 文献

- [1] Zheng, X, H. Nakamura, and J. A. Renwick, “Potential Predictability of Seasonal Means Based on Monthly Time Series of Meteorological Variables”, *Journal of Climate*, 15, 2591-2604, 2000.
- [2] Okajima, S., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, and A. Kuwano-Yoshida, “Assessing the importance of prominent warm SST anomalies over the midlatitude North Pacific in forcing large-scale atmospheric anomalies during 2011 summer and autumn”, *Journal of Climate*, 27, 3998-3903, 2014.
- [3] B. Taguchi, H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya, and A. Goto, “Seasonal evolution of atmospheric response to decadal SST anomalies in the North Pacific subarctic frontal zone: Observations and a coupled model simulation”, *Journal of Climate*, 25, 111-139, 2014.
- [4] Kuwano-Yoshida, A., T. Enomoto, and W. Ohfuchi, 2010: An improved cloud scheme for climate simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136, 1583–1597, doi:10.1002/qj.660.
- [5] F. Ogawa, H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, and A. Kuwano-Yoshida, “Dependence of the climatological axial latitudes of the tropospheric westerlies and storm tracks on the latitude of an extratropical oceanic front”, *Geophysical Research Letters*, 39, L05804, 2012.
- [6] F. Ogawa, H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, and A. Kuwano-Yoshida, “Importance of mid-latitude oceanic frontal zones for the annular-mode variability: Inter-basin differences in the southern annular-mode signature”, *Journal of Climate*, 29, 6179-6199, 2016.



# Impacts of Extratropical Coupled Ocean-Atmosphere Variability on Seasonal Predictability

Project Representative

Hisashi Nakamura      Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Authors

Hisashi Nakamura      Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Kazuaki Nishii      Graduate School of Bioresources, Mie University

Bunmei Taguchi      Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo  
Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Yu Kosaka      Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

We have performed a set of ensemble experiments using an atmospheric general circulation model (AGCM) to evaluate the role of midlatitude oceanic fronts in the formation of climatological-mean atmospheric circulation and also the role of oceanic variability in the seasonal potential predictability of the atmospheric circulation. The AGCM is forced with satellite-observed high-resolution SST with its interannual variability included in some region and masked with climatological SST in other regions. In additional experiments, midlatitude SSTs are meridionally smoothed. Those experiments reveal that oceanic fronts act to enhance transient eddy activity and shift westerly jet poleward. Especially, the oceanic front over the North Pacific amplifies tropospheric planetary waves and warms up polar stratospheric temperatures. We also found that maximum of potential predictability over the eastern North Pacific is contributed not only by remote influence from the tropical ocean but also by local SST variability in the midlatitude ocean. Our results suggest that earlier studies underestimated the role of the midlatitude ocean in the formation and variability of the atmospheric circulation and high-resolution SST boundary condition needs to be prescribed in AGCMs.

**Keywords:** extratropical ocean-atmosphere coupling, potential predictability, Atmospheric general circulation model, El Niño Southern Oscillation, extratropical oceanic front

## 1. Introduction

“Potential predictability” (PP) is a quantity that evaluates how much of monthly or seasonal-mean atmospheric variability is explained by external forcing like variability of sea surface temperature (SST) and sea ice. This can be estimated by a series of ensemble experiments using AGCM with observed SST and sea ice prescribed as its lower boundary condition. Interannual variability of the simulated ensemble-mean fields can be considered as predictable atmospheric “response” to SST and sea ice variability, while variability across ensemble members as unpredictable “internal variability”. It has been shown that the atmospheric PP is large over the tropics where atmospheric convection is sensitive to the SST variability, while it is moderate over the extratropical North Pacific where tropical ocean variability affects the atmospheric circulation through the “atmospheric bridge”, and is very low in other extratropical regions (Zheng et al. 2000[1]). However, in earlier studies, the resolution of AGCM and SST boundary condition was relatively low, the latter unable to well represent SST fronts associated with westerly boundary currents, leading to underestimation of ocean to the atmosphere heat fluxes, hence of their impact on the atmospheric circulation, whereas our recent studies have shown

that variability of the extratropical SST fronts can significantly modulate the atmospheric circulation (Okajima et al. 2014 [2]; Taguchi et al. 2012 [3]). We here reevaluate the role of the extratropical SST fronts and ocean variability in the formation of climatological-mean atmospheric circulation as well as in the atmospheric PP using a modern AGCM forced with satellite-observed SST dataset, which has a higher resolution than previously used.

## 2. Experimental design

We use AFES (AGCM For Earth Simulator; Kuwano-Yoshida et al. 2010[4]) configured at horizontal resolution T119 (~100km), with 56 vertical levels covering from the surface to ~0.1hPa. The prescribed SST is OISST compiled on a 0.25°x0.25° grid. Our 15-member ensemble experiments consist of six different types of experiments according to the prescribed SST: (i) “Global Ocean-Global Atmosphere (GOGA) experiment” forced with observed SST globally, (ii) “Tropical Ocean-Global Atmosphere (TOGA) experiment” with interannually-varying SST only in the tropics, and daily climatological SST in the extratropics, (iii) “Midlatitude Ocean-Global Atmosphere (MOGA)” with interannually-varying SST only in the extratropics and daily

climatological SST in the tropics, (iv) “GOGA with smoothed SST” (same as (i) but with meridionally smoothed SST in midlatitudes), (v) As in (iv) but smoothed only in the North Pacific, (vi) As in (iv) but smoothed only in the North Atlantic.

### 3. Results

We first focus on wintertime-mean circulation (December through February). AGCM experiments reveals that SST fronts tend to shift the westerly jet axis poleward in association with enhancement of transient eddy activity. Especially over the Far East, this poleward shift of the westerly jet accompanies amplification of the tropospheric planetary waves, leading to enhanced upward propagation of planetary waves into the stratosphere, which results in warming of the polar stratosphere.

Second, we examine the role of oceanic variability in the seasonal potential predictability. There is a maximum of PP of 500-hPa geopotential height over the eastern North Pacific in GOGA and TOGA experiments. In both experiments, the height variability around the maximum is associated with the circulation pattern similar to the Pacific North American (PNA) pattern and tropical SST anomalies, which suggests that the maximum PP is contributed by remote influence from the tropical oceanic variability. On the other hand, the height variability in MOGA experiment accompanies SST anomalies over the midlatitude North Pacific and circulation anomalies, both of which have some similarity to those anomalies observed in GOGA experiment over the North Pacific. The results suggest that the circulation anomaly over the North Pacific once forced by tropical ocean variability, induces SST anomalies in midlatitudes via the atmospheric bridge, which in turn locally reinforces the original circulation anomalies.

### 4. Conclusions

By conducting a set of ensemble AGCM experiments forced with various SST boundary conditions, we have demonstrated a significant role of extratropical SST fronts and SST variability in formation and variability of the extratropical atmospheric circulation. We plan to extend our experiments using a higher-resolution AGCM and coupled GCM, which should evaluate more realistic role of fine structure of SST variability and the extra-tropical air-sea interaction.

### References

- [1] Zheng, X, H. Nakamura, and J. A. Renwick, Potential Predictability of Seasonal Means Based on Monthly Time Series of Meteorological Variables, *J. Climate*, 15, 2591-2604, 2000.
- [2] Okajima, S., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, and A. Kuwano-Yoshida, Assessing the importance of prominent warm SST anomalies over the midlatitude North Pacific in forcing large-scale atmospheric anomalies during 2011 summer and autumn, *J. Climate*, 27, 3998-3903, 2014.
- [3] B. Taguchi, H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya, and A. Goto, Seasonal evolution of atmospheric response to decadal SST anomalies in the North Pacific subarctic frontal zone: Observations and a coupled model simulation, *J. Climate*, 25, 111-139, 2014.
- [4] Kuwano-Yoshida, A., T. Enomoto, and W. Ohfuchi, 2010: An improved cloud scheme for climate simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136, 1583–1597, doi:10.1002/qj.660.

