

黒潮続流域の十年規模海面水温変動に対する大気循環応答の同定

課題責任者

中村 尚 東京大学 先端科学技術研究センター

田口 文明^{*1}, 西井 和晃^{*2}, 中村 尚^{*3}^{*1}富山大学 都市デザイン学部, ^{*2}三重大学 大学院生物資源学研究科, ^{*3}東京大学 先端科学技術研究センター

近年、中緯度域の海面水温偏差に対する大気循環応答の研究が進展してきた。しかし、大気再解析データを用いたその応答のパターンや大きさの推定には、大気の内外部変動に起因する不確実性が大きい。また、大気大循環モデルによる大気応答の再現性は、大気モデルや海面水温境界条件の解像度に依存する。本研究では、海洋前線変動の影響を大気の変動に伝える際に鍵となる大気下層傾圧性の変動に着目し、大気再解析データと大気大循環モデルの大規模アンサンブル実験データを相補的に用いて、双方のデータにおいて、大気変動を海面水温変動に対する応答成分と大気内外部変動成分に切り分けることを試みた。具体的には、冬季黒潮続流域における、熱帯 SST 変動とほぼ無関係な大気下層傾圧性変動の強制応答成分を、JRA55 と大気大循環モデルの大規模アンサンブル実験の間の SVD 解析により同定した。黒潮続流域における大気下層傾圧性が十年程度の時間スケールで強化・弱化する変動が、SVD 第 1 モードとして抽出された。JRA55 から抽出された傾圧性の強制応答成分では、黒潮続流域の大気下層傾圧性の強化に対して対流圏下層のストームトラックが活発化し、対流圏上層では太平洋から大西洋に及ぶ波列状の海盆間遠隔影響を示した。

キーワード : Large ensemble, AGCM simulations, baroclinicity, storm-track, inter-basin teleconnection

1. はじめに

近年、黒潮・黒潮続流やメキシコ湾流などの中緯度域の西岸境界流に伴う海面水温 (SST) 前線帯の変動が、中緯度大気循環の変動に影響を与えることが明らかになってきた。しかし、その影響が、中緯度大気循環の内外部変動や熱帯域対流活動からの遠隔影響と比較してどれほど重要であるかは未解明である。その一因は、再解析データから中緯度海洋前線帯に対する大気応答を評価する際の不確実性と、大気モデルで応答を再現しようとする際のモデル解像度依存性にある。例えば、Smirnov et al (2015) では、高・低 2 種類の水平解像度を持つ大気大循環モデルを用いて、北太平洋親潮域での SST 偏差に対する大気応答を調査し、解像度の高いモデルでのみ顕著な大気応答が得られることを示した。一方で、彼らの研究における低解像度モデルと同等の解像度のモデルを用いた別の研究でも、顕著な大気循環応答が再現できることが報告されており (Taguchi et al 2012; Okajima et al 2014)、大気応答再現のためのモデル解像度依存性は、使用される大気大循環モデルに依存することが示唆される。また、Czaja et al (2019) は、親潮域の SST 偏差に対する大気応答を調べた複数の研究結果を整理し、大気再解析データに基づく大気応答の推定に研究ごとに大きな違いがあること、応答の振幅は、モデルが再解析データによる見積もりを過小評価する傾向にあることを示した。この結果は、大気再解析データに基づく中緯度 SST 偏差に対する大気応答の推定には、大気の内外部変動による影響が少なからず含まれ、大気循環モデルのアンサンブル平均場と比較する際に注意を要することを示唆している。

本研究では、大気再解析データと大気大循環モデルによる大規模アンサンブル過去再現シミュレーションを用

いた相補的な解析を行うことにより、両者のデータにおける中緯度大気循環変動から、中緯度 SST 変動に強制された成分を切り分け、その強制応答成分を大気モデルで再現する際のモデル解像度依存性を調べる。

2. モデル実験と解析手法

大気大循環モデル AFES (Kuwano-Yoshida et al, 2010) の中解像度版 (水平解像度 T119~100km、大気上端 0.1hPa、鉛直 56 層) と高解像度版 (水平解像度 T239~50km) を用い、2 種類の海面水温境界条件を与えて、1982-2013 年の期間における計 4 種類の過去再現アンサンブル実験を行った。標準 (CNTL) 実験では、OISST (Reynolds et al, 2007) による高解像度 (0.25°) 日平均海面水温 (SST) と海氷密接度を下方境界条件として与える。一方、SST 平滑化 (SMTH) 実験では、OISST による SST を北半球中緯度域のみ平滑化した SST を与えた。CNTL 実験と SMTH 実験とも、中解像度版による実験は 15 メンバー、高解像度版による実験は 5 メンバーのアンサンブル実験を行った。大気再解析データには JRA55 (Kobayashi et al, 2015) を用いた。

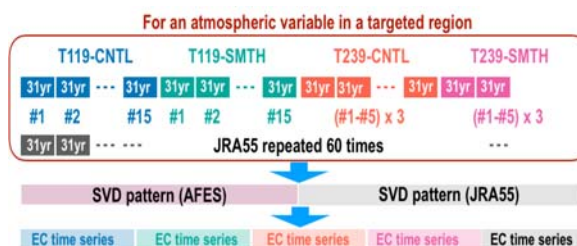


図 1 : 大気大循環モデルによるアンサンブル実験と大気再解析データを用いた大気変動の強制応答成分の抽出

中緯度海面水温偏差によって駆動された大気応答成分を抽出するために、Mori et al. (2019)が北極海氷減少に対する大気応答を評価した方法を用いた(図1)。まず、AFESを用いた4つの実験の全てのアンサンブルメンバーを連結し、着目する大気場の全時空間データを作成する。次に、この全時空間データとAFES実験のアンサンブル数だけ繰り返したJRA55による時空間データとの間でSVD解析を行う。このようにして得られたSVD固有ベクトルは、AFESとJRA55の間で時間方向に相関する共変動の空間分布を表す。AFESで計算された場合は、海面水温や海水の変動によって強制された成分と内部変動を含むが、AFESの内部変動とJRA55の内部変動は無相関であるから、SVD解析から得られたモードは、それぞれAFESとJRA55の場から強制に対する応答成分(強制応答成分)のみが抽出されたものと見なせる。SVD解析の際には、5メンバーのみ実施したAFES高解像度版による実験結果を3回繰り返し、15メンバー実施したAFES中解像度版のデータと重みが等しくなるようにした。

3. 結果

a. 抽出された下層傾圧性の強制応答成分

本研究で着目する主要な場の物理量は、黒潮続流域(KOE域; 30°-45°N, 142°E-160°W; 図2黄色矩形領域)で平均した冬季(12-2月)平均の下層925hPaにおける傾圧性である。下層傾圧性は、上空の移動性高低気圧擾乱の発達にとって重要であり、かつ海面水温変動の影響を大きく受けていると考えられる。本研究では、中緯度SSTの長周期変動に対する大気応答に着目しているため、SVD解析に先立って、下層傾圧性変動から、熱帯SST変動と相関する成分を統計的に取り除く前処理を行った。この前処理は、熱帯SST変動のEOF解析から抽出した上位5モードの主成分時系列に対する線形回帰成分を取り除き、さらに得られた偏差場に3年移動平均を施すことを行った。この前処理により、SVD解析から得られるモードは、熱帯域の変動からの影響をほとんど受けず、主に中緯度SST変動によって駆動された下層傾圧性の準十年規模変動とみなすことができる。

図2a-bに、黒潮続流域の冬季平均下層傾圧性のAFESアンサンブル(全実験結合)とJRA55の間のSVD第1モードの空間分布を示す。このモードは2つのデータの共分散の87.5%を説明し、どちらのデータに於いても黒潮続流域における変動の分布が、下層傾圧性の気候値の分布と良く一致しており、SVD第1モードの空間パターンは、傾圧性の強弱変動を表していることが分かる。この黒潮続流域におけるSVD第1モードの固有ベクトルに、傾圧性偏差を射影して得られたSVD第1モードの展開係数時系列を図2cに示す。AFESアンサンブル実験から得られた展開係数 EC_{AFES} は、そのアンサンブル平均 \overline{EC}_{AFES} を赤い太線で、アンサンブル平均からの2標準偏差分のばらつきを赤い陰影で表した。AFESアンサンブル実験から得られた展開係数が各メンバー毎にばらつくのは、海面水温変動強制に対する応答として抽出された傾圧性変動モードの

空間分布が、傾圧性変動の内部変動成分の特徴的な空間分布と似た構造を持つためと考えられる。そのため、傾圧性変動の場をSVD固有ベクトルに射影した展開係数は、強制応答成分だけでなく、若干の内部変動成分も含むことになる。その場合、展開係数のアンサンブル平均時系列 \overline{EC}_{AFES} を強制応答成分、そのばらつきが内部変動成分とみなすことができる。AFESに基づく展開係数をアンサンブル平均した強制応答成分時系列 \overline{EC}_{AFES} とJRA55に基づく時系列 \overline{EC}_{JRA} は、高い相関($r=0.80$)を示し、JRA55の展開係数が表す傾圧性SVD第1モード変動の約65%が、海面水温変動による強制応答成分であると考えられる。

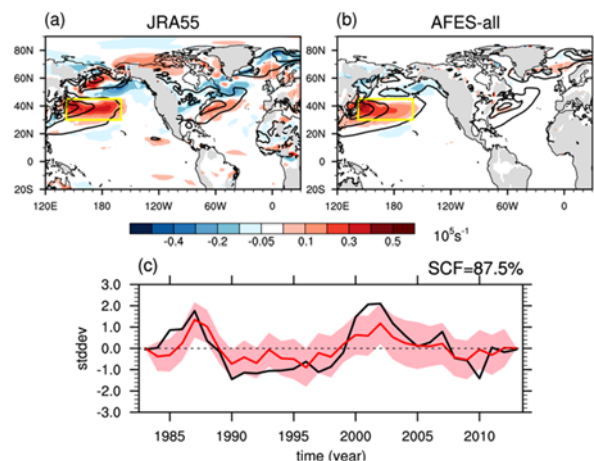


図2：期間1982-2013年における黒潮続流域(黄色矩形)冬季(12-2月平均)大気下層(925hPa)傾圧性についてのJRA55とAFESアンサンブル実験(4実験結合)のSVD第1モード。(a)JRA55での傾圧性の展開係数への線形回帰係数分布(b)AFESアンサンブル実験(4実験結合)での傾圧性の展開係数への線形回帰係数分布(c)展開係数時系列(黒: JRA55, 赤: AFES, 太線は展開係数のアンサンブル平均, 陰影は2標準偏差分のばらつき)(a-b)の黒等値線は、期間1982-2013年における冬季傾圧性気候平均場。

b. 下層傾圧性の強制応答モードに伴う大気循環偏差

下層傾圧性の強制応答モード(AFESアンサンブルとJRA55の間で抽出されたSVD第1モード)に伴う大気循環偏差を、展開係数に回帰した偏差として評価した(図3)。JRA55での大気場はJRA55の展開係数 EC_{JRA} に、AFESの実験結果は、4つの実験の全てアンサンブル平均場をAFESのアンサンブル平均展開係数 \overline{EC}_{AFES} に回帰した。JRA55とAFESの双方で、下層傾圧性が黒潮続流域で増大するのに従い、850hPaの周期7日未満の総観規模擾乱による北向き渦熱輸送も増加する(図3b, d)。これは対流圏下層のストームトラック活動度がより活発になるとともに、鉛直上向き波活動度フラックスが強まることを意味する。JRA55での対流圏上層のジオポテンシャル高度場偏差(図3b, e)を見ると、対流圏下層の渦熱輸送(上向き波活動度フラックス)の増加に応答して、太平洋上空から偏西風の下流方向にあたる北米大陸と北大西洋にかけて、波列

状の高度場偏差が確認できる。高度場偏差の符号は、黒潮流域の傾圧性強化に対して、太平洋状では正の PNA(Pacific North American)パターンを、大西洋上では負の NAO(North Atlantic Oscillation)パターンを示す。この対流圏上層の波列状の応答の地表面での現れを海面気圧の偏差(図3c, f)で見ると、傾圧性強化に対して、アリューシャン低気圧が強化し、アイスランド低気圧が弱化する海盆間遠隔影響を示唆する。このような北太平洋と北大西洋間の海面気圧のシーソーパターンは、アリューシャン・アイスランド低気圧シーソー (Aleutian-Iceland Seesaw, AIS) と呼ばれる海面気圧の年々変動にも見られることが知られている(Honda et al 2001)。

黒潮流域の傾圧性強化に対する太平洋から大西洋に及ぶ海盆間遠隔影響は、AFES 実験の結果にも確認できるが、その空間分布や偏差の位相は JRA55 の結果と異なる。JRA55 では大西洋でストームトラック活動度が弱まる(太平洋と逆位相)であるのに対して、AFES では、太平洋と大西洋の両海盆でストームトラック活動度は強まる(図3a, d)。

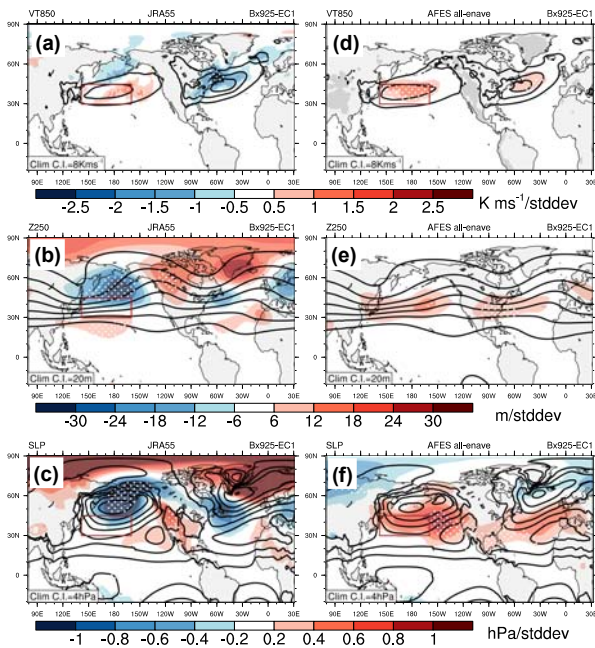


図3: 黒潮流域冬季大気下層傾圧性 SVD 第1モードに伴う大気循環偏差。(a) JRA55 の850hPaにおける周期7日未満の総観規模擾乱による北向き渦熱輸送の展開係数 EC_{JRA} への線形回帰係数分布。(b) (a)と同じ、ただし250hPaにおけるジオポテンシャル高度。(a)と同じ、ただし海面気圧。(e-f) (a-c)と同じ、ただしAFESアンサンブル(4実験結合)平均場の展開係数のアンサンブル平均時系列 EC_{AFES} への線形回帰分布。黒等値線は気候平均場、ハッチは相関係数が95%で有意な領域を示す。

c. モデル解像度依存性

AFES の4つの実験ごとに別々に、アンサンブル平均された傾圧性偏差を、AFES のアンサンブル平均展開係数 EC_{AFES}

に回帰することで、中緯度 SST 変動に対する大気下層傾圧性応答のモデル解像度及び SST 境界条件に対する依存性を調べた(図4)。下層傾圧性の強制応答モードの空間構造は、SST 境界条件の平滑化の有無に大きく依存する。すなわちCNTL 実験で抽出された下層傾圧性の強制応答成分は、特に高解像度版を用いた実験において、黒潮流域の微細な渦・海洋前線構造を反映しているのに対し、SMTH 実験ではそれらの微細構造がほとんど持たない南北に幅の広い(10°程度)大規模な前線帯の構造を持つ。JRA55 から推定された下層傾圧性の強制応答成分は、AFES の SMTH 実験で抽出されたものと似た構造を示す。これは、JRA55 (のメインプロダクト)を作成する際に用いられた大気大循環モデルの境界条件として、空間構造が滑らかな SST プロダクトが用いられたことによると考えられる。

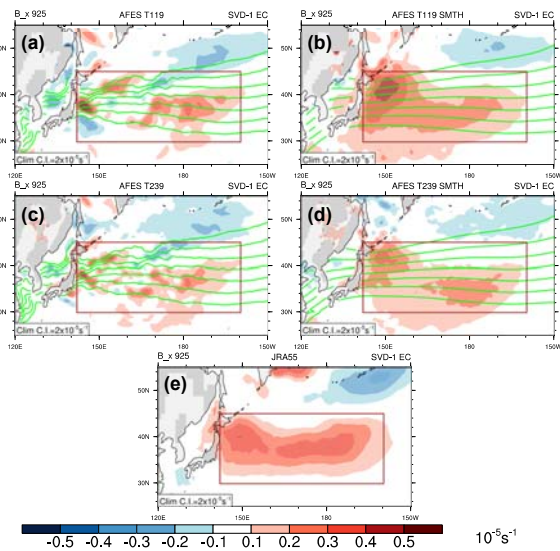


図4: 黒潮流域冬季大気下層傾圧性 SVD 第1モード空間分布のモデル解像度・境界条件依存性:(a)AFES 中解像度版 CNTL 実験でのアンサンブル平均冬季大気下層傾圧性のアンサンブル平均展開係数への回帰係数分布。(b) (a)と同じ、ただしAFES 中解像度版 SMTH 実験。(c) (a)と同じ、ただし、AFES 高解像度版 CNTL 実験。(d) (a)と同じ、ただし、AFES 高解像度版 SMTH 実験。(e) (a)と同じ、ただし JRA55 での気下層傾圧性の展開係数 EC_{JRA} への回帰係数分布。(a-d)の緑線は海面水温の気候値。

JRA55 と AFES 各実験における下層傾圧性の全変動と強制応答モードの振幅を、展開係数の分散で評価した(図5)。AFES のどの実験についても、JRA55 における傾圧性の全分散を60%以上過小評価していることが分かった。一方、強制応答モードの振幅(アンサンブル平均展開係数の分散)は全分散の25~50%ほどを占め、モデル解像度が高いほど、また境界条件の SST が微細構造を保持するほど、強制応答成分の分散比が大きいことが確認できた。これは、海洋前線や海洋渦に伴う SST の微細構造が、大気モデル

による大気下層傾圧性の強制成分、さらにそれに対する上空の大気循環偏差の応答にとって重要であることを示唆している。

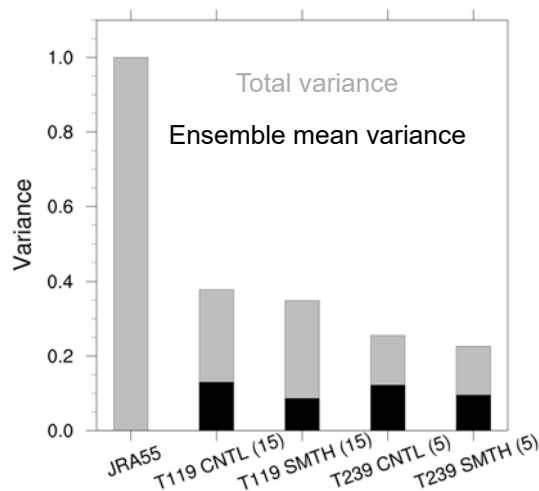


図5：黒潮続流域冬季大気下層傾圧性 SVD 第1モード展開係数の分散。灰色が全分散、黒がAFES各実験のアンサンブル平均場の分散を示す。全てJRA55の全分散で標準化してある。

4. まとめ

冬季黒潮続流域における、熱帯 SST 変動とはほぼ無関係な大気下層傾圧性変動の強制応答成分を、JRA55 と大気大循環モデルの大規模アンサンブル実験の間での SVD 解析を行うことで同定した。JRA55 とモデルの傾圧性の共分散の SVD 第1モードは、黒潮続流域における大気下層傾圧性の十年規模での強弱変動を表す。JRA55 から抽出された傾圧性の強制応答モードに伴って、正偏差の場合は対流圏下層のストームトラック活動度が強化され、対流圏上層では、太平洋から大西洋に及ぶ波列上の海盆間遠隔影響を示した。この対流圏上層の応答は、海面気圧では、アリューシャン・アイスランド低気圧シーズンとで知られる空間構造を示した。この結果は、黒潮続流域の SST 変動によって引き起こされた大気下層傾圧性の十年規模変動によって、太平洋-大西洋の大気循環背景場の変動を通じて、アリューシャン低気圧とアイスランド低気圧の勢力が負相関する年々変動を変調している可能性を示す。

謝辞

本研究は、文部科学省 (MEXT) の ArCS Program、及び科学技術振興機構 (JST) の Belmont Forum 国際共同研究事業 InterDec、環境省の環境研究総合推進費 2-1904、日本学術振興会科学研究費助成事業 新学術領域 19H05701、JP19H05702 の援助を受けた。

文献

- [1] Czaja, A., Frankignoul, C., Minobe, S. et al. "Simulating the Midlatitude Atmospheric Circulation: What Might We Gain From High-Resolution Modeling of Air-Sea Interactions?" *Curr Clim Change Rep* 5, 390-406 (2019)
- [2] Smirnov, D., M. Newman, M. A. Alexander, Y. Kwon, and C. Frankignoul, "Investigating the Local Atmospheric Response to a Realistic Shift in the Oyashio Sea Surface Temperature Front." *J. Climate*, **28**, 1126-1147 (2015)
- [3] Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya, and A. Goto, "Seasonal evolutions 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 (2012)
- [4] Okajima, S., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, 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, 3889-3903 (2014)
- [5] Kuwano-Yoshida, A., Enomoto, T. and Ohfuchi, W., "An improved PDF cloud scheme for climate simulations." *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 136: 1583-1597 (2010)
- [6] Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, "Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature." *Journal of Climate*, 20, 5473-5496 (2007)
- [7] Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, "The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics." *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48 (2015)
- [8] Mori, M., Y. Kosaka, M. Watanabe, H. Nakamura, and M. Kimoto, "A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling", *Nature Climate Change*, 9, 123-129 (2019)
- [9] Honda, M., H. Nakamura, J. Ukita, I. Kousaka, and K. Takeuchi, "Interannual seesaw between the Aleutian and Icelandic lows. Part I: Seasonal dependence and life cycle." *J. Climate*, 14, 1029-1042. (2001)

Identifying the Atmospheric Circulation Response to Decadal SST Variability in the Kuroshio Extension

Project Representative
Hisashi Nakamura
The University of Tokyo

Research Center for Advanced Science and Technology,

Authors

Bunmei Taguchi ^{*1}, Kazuaki Nishii ^{*2}, Hisashi Nakamura ^{*3}

^{*1}Faculty of Sustainable Design, University of Toyama, ^{*2}Graduate School of Bioresources, Mie University, ^{*3}Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

A forced component of extra-tropical-ocean-driven atmospheric circulation anomaly over the western North Pacific is extracted with a joint analysis of an atmospheric reanalysis and large ensemble AGCM simulations with two different resolutions and two different SST boundary conditions. Decadal-scale pulsing of near-surface baroclinicity is forced by a large-scale SST dipolar pattern straddling the KOE region. Associated with the leading forced mode, lower-tropospheric storm track activity is enhanced over the KOE region, which is accompanied by upper-tropospheric geopotential height anomalies that extend into the Atlantic sector.

Keywords : Large ensemble, AGCM simulations, baroclinicity, storm-track, inter-basin teleconnection

1. Introduction

Despite increasing evidence for extra-tropical sea surface temperature (SST) front influence on the atmospheric circulation variability, it remains to be clarified how significant such influence is, which is particularly related to the resolution dependency and the uncertainty of the atmospheric response to underlying SST forcing. Smirnov et al. (2015) compared AGCM simulations at two different horizontal resolutions and succeeded to obtain a distinct local atmospheric response to prescribed SST in Oyashio Extension (OE) only in the higher resolution AGCM. Meanwhile, several studies reproduced the observed atmospheric circulation responses in lower resolution models (Taguchi et al, 2012; Okajima et al 2014). Czaja et al (2019) classified studies that examined both the observed and simulated atmospheric response to meridional shift of OE in terms of the amplitude of upper tropospheric geopotential height response, showing that the estimate of the observed atmospheric response has large uncertainty among the studies, while simulated response is smaller than the observed response. In this study, we aim at separating the atmospheric response from internal variability that inevitably included in the observational estimate and examining the resolution dependency of the estimated forced component of atmospheric circulation response.

2. Method

In this study we use ensemble AGCM simulations and atmospheric reanalysis data complementary. We have performed 4 sets of AGCM simulations using AFES (AGCM for the Earth Simulator; Kuwano-Yoshida et al 2010 and references therein), with two different SST boundary conditions and two different horizontal resolutions. The control run is integrated for the

period 1982-2013 with high-resolution satellite-observed daily SST (OISST; Reynolds et al 2007) and the smoothed run is forced with a similar SST field but the one in which mid-latitude SST is smoothed out. We have 15-member ensemble for T119 (~100km) resolution and 5-member ensemble for T239 (~50 km) resolution.

To extract forced component of atmospheric variability driven by the extratropical SST anomaly, we follow a methodology which was recently applied by Mori et al. (2019) for the atmospheric response to Arctic sea-ice reduction. Specifically, we first concatenate each of the 31-year simulations from all the ensemble members from all the 4 experiments. Here we repeat high-resolution T239 ensemble members 3 times to make each of 4 experiments have the same weight for the analysis. We obtain totally 1860 years of simulated data. We also repeat 31-years of JRA55 data 60 times to make it to have the same data length as the simulations. Then we perform SVD analysis for an atmospheric field of interest in a targeted region between the AGCM simulation and JRA55. This analysis yields a temporally co-varying patterns for AGCMs and JRA55 as components that are forced by lower boundary conditions such as SST and sea-ice.

3. Result

a. Extracted forced component of Near-surface baroclinicity

We applied SVD analysis to winter-time (December through February; DJF) mean near-surface (925 hPa) baroclinicity in the Kuroshio-Oyashio Extension (KOE; 30°-45°N, 142°E-160°W) region between the 60 times repeated JRA55 and 60 members AGCM simulations from all 4 experiments merged. Since we are interested in the atmospheric response to low-frequency extra-tropical SST anomalies, we statistically remove signals

correlated to each of the 1st PC (Principal component) through the 5th PC of tropical SST anomalies from the near surface baroclinicity and then apply 3-year running mean to the filtered field prior to the SVD analysis. Thus, the extracted SVD mode represents quasi-decadal variability largely unrelated to tropical forcing. The resulting first SVD pattern (SVD-1) shows enhancement of climatological mean near-surface baroclinicity over the KOE region both in JRA55 and AFES, which explains 87.5% of covariance of the baroclinicity between JRA55 and AFES. Expansion coefficient (EC) time series of both the data, whose correlation is 0.80, display decadal time-scale, implying influence of underlying oceanic variability on the atmospheric near surface baroclinicity.

b. Atmospheric fields associated with EC-1 of baroclinicity

Atmospheric fields associated with the leading forced mode of near-surface baroclinicity can be expressed by regressions on the EC-1 for JRA55 and on ensemble mean EC-1 for all the 4 AGCM experiments combined. When the forced near-surface baroclinicity over the KOE region is increased, the lower tropospheric storm track activity, as measured with poleward heat flux due to sub-weekly synoptic eddies, is enhanced, which imply enhanced upward flux of wave activity. Responding to the enhanced upward wave activity, the upper-tropospheric geopotential height regression pattern in JRA55 displays a wave-train-like circulation anomalies over the Pacific that further extend downstream into North Atlantic sector.

c. Resolution dependency

We examine the forced atmospheric response separately for each of 4 AFES experiments and JRA55 and discuss their dependency on the model resolution and fine-scale structure in the SST boundary condition. Ensemble mean, near-surface baroclinicity fields are regressed on the corresponding ensemble mean ECs separately for each AFES experiment and JRA55. The regressed baroclinicity in JRA55 shows a broad structure of the leading mode pattern similar as AFES's SST-smoothed experiments. This is partly because JRA55 is generated with a SST field which lacks fine scale structures. Meanwhile, AFES CNTL experiments, particularly at T239 resolution, exhibit fine-scale baroclinicity structure in the KOE region, representing a signature of underlying, high-resolution OISST.

We further evaluate quantitatively the total and forced (ensemble mean) variance of ECs separately for each AFES experiments and JRA55. It turned out that the total variance is underestimated by more than 60% in any of the 4 AFES experiments than that of JRA55. While variance of forced component of baroclinicity is not much different across 4 experiments, it is slightly larger in CNTL experiments than in SMTH, indicating the influence of local SST finescale structure.

4. Summary

The forced component of the low-frequency, tropical SST-unrelated, near-surface baroclinicity variability in the Kuroshio-

Oyashio Extension (KOE) region is extracted with SVD analysis between JRA55 and large ensemble AGCM simulations. The 1st SVD mode of JRA55-AGCM covariance is characterized by the decadal-scale pulsing of near-surface baroclinicity that is forced by a large-scale SST dipolar pattern straddling the KOE region. Associated with the leading forced mode, lower-tropospheric storm track activity is enhanced over the KOE region, which is accompanied by upper-tropospheric geopotential height anomalies that extend into the Atlantic sector, signifying a surface expression of Aleutian-Icelandic low seesaw. The inter-basin response is, however, not in agreement between JRA55 and AGCM ensemble. This could indicate either model error in representing the response or incomplete separation of “forced” response in the reanalysis.

Acknowledgement

This study is supported in part by MEXT through the ArCS Program and by JST through Belmont Forum CRA “InterDec”, by Japanese Ministry of Environment through the Environment Research and Technology Development Fund 2-1904 and by the JSPS through Grants-in-Aid for Scientific Research 19H05701 and JP19H05702 (on Innovative Areas 6102).

References

- [1] Czaja, A., Frankignoul, C., Minobe, S. et al. “Simulating the Midlatitude Atmospheric Circulation: What Might We Gain From High-Resolution Modeling of Air-Sea Interactions?” *Curr Clim Change Rep* 5, 390–406 (2019)
- [2] Smirnov, D., M. Newman, M. A. Alexander, Y. Kwon, and C. Frankignoul, “Investigating the Local Atmospheric Response to a Realistic Shift in the Oyashio Sea Surface Temperature Front.” *J. Climate*, **28**, 1126–1147 (2015)
- [3] Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya, and A. Goto, “Seasonal evolutions 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 (2012)
- [4] Okajima, S., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, 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**, 3889–3903 (2014)
- [5] Kuwano-Yoshida, A., Enomoto, T. and Ohfuchi, W., “An improved PDF cloud scheme for climate simulations.” *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **136**: 1583–1597 (2010)
- [6] Reynolds, R. et al. “Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature.” *Journal of Climate*, **20**, 5473–5496 (2007)
- [7] Mori, M., Y. Kosaka, M. Watanabe, H. Nakamura, and M. Kimoto, “A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling”, *Nature Climate Change*, **9**, 123–129 (2019)