

平成 29 年 5 月 18 日

北海道大学 北極域研究センター長 殿

氏 名 星 一平

## 終了報告書

・派遣支援先 機関名： University of Toronto (国名：カナダ)・受入研究者 Paul Kushner

・研究課題名 (和文・英文)

(和文) 地球温暖化における成層圏突然昇温の変調(英文) Understanding of Stratospheric Sudden Warming modulation under global warming

・派遣支援期間：平成 29 年 1 月 4 日 ~ 平成 29 年 5 月 3 日

## 1. 派遣支援期間中の研究実施状況及びその成果

## ・活動の概要

派遣支援者は、トロント大学に約4ヶ月間滞在し、近年の成層圏突然昇温の発生頻度とその特徴、また、それに対して近年の境界条件変動がもたらす影響について、再解析データと数値実験を用いて調査した。数値実験の解析においては、当初予定していた実験結果に加え、境界条件に差異を与えた複数の感度実験の結果も使用することで、下部境界の変動が大気場に及ぼす影響を定量的に評価した。実験設定の詳細と解析結果については、次節に記述する。現地では、派遣開始直後に受入れ研究者の Paul Kushner 教授と研究計画について打ち合わせを行い、また、Kushner 教授の研究グループセミナーにて派遣支援者のこれまでの研究成果を発表した。Kushner 教授をはじめ、当グループには大気循環、気候変動分野で研究を行う研究者、学生が多数在籍しており、滞在期間を通して活発な議論を行うことができた。派遣期間に実施した研究は、今後も Kushner 教授との共同研究として解析を続け、将来的に投稿論文としてまとめる予定である。

また、派遣期間中はワシントン D.C.で開催されたワークショップ” Arctic Change and Its Influence on Mid-Latitude Climate and Weather” に参加した。このワークショップでは、近年の”北極温暖化が引き起こす中緯度低温化（北極-中緯度間気候リンク）”に関する研究を行う研究者・学生、100名以上が一同に介し、最新の研究成果と今後の科学コミュニティの方向性について議論を行った。ポスター発表で

は、北極気候変動を専門とする研究者・学生と活発な議論を行うことができ、大変有意義なワークショップとなった。派遣期間の後半に参加した”European Geosciences Union General Assembly 2017”では、大気科学分野の研究発表を幅広く聴講した。実施したポスター発表では、特に成層圏の波動力学を専門とする研究者の方々と議論を交わし、有意義なアドバイスを受けることができた。

#### ・研究背景

冬季の成層圏には、数日の間に気温が 20~30 度も急激に上昇する現象、成層圏突然昇温(Stratospheric Sudden Warming; SSW) が存在する。この昇温現象は対流圏から成層圏への惑星波の上方伝播が極端に強まる事で発生し、同時に、元々成層圏で卓越する西風（極渦; 30~40m/s）が東風へと逆転する。さらに、そのシグナルは下方に伝播することで対流圏循環場の変調を引き起こすため[Baldwin and Dunkerton, 2001]、対流圏の気候とその予測への重要性が認識されている。

この SSW の発生頻度に着目すると、1990 年代の沈静化に対して、2000 年以降は毎年のように発生している。この変動は SSW の十年規模変動として知られており、大気循環自体が持つ内部変動的性質として理解されてきた。対して、大気下部境界の変動である南方振動(El Nino Southern Oscillation; ENSO) は、惑星波の上方伝播の強制要因として作用する事で SSW の発生頻度の増加に寄与する事が議論されている[Bulter and Polvani, 2011]。近年の研究では、北極温暖化やそれに伴う海氷減少も惑星波の上方伝播を強める事が指摘されており[Kim et al., 2014; Wu and Smith, 2016]、それらが SSW の発生頻度に影響を及ぼしている事も推測される。しかし、それらと SSW との関係はこれまで調べられていない。そこで本研究では、近年の気候変動に伴う海面水温、海氷分布の変動が SSW の発生頻度に及ぼす影響を定量的に評価すること、またそのプロセスを理解することを研究目的とした。

#### ・使用データ、実験設定

本研究で使用した観測データは、海面水温(Sea Surface Temperature; SST)と海氷密接度(Sea Ice Concentration; SIC)のデータとして、Met Office Hadley Centre により作成された Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set ver1 (HadISST1) [Rayner et al., 2003] を使用した。併せて、北極域研究推進プロジェクト(ArCS)により行われた数値実験の結果も解析に使用した。大気大循環モデル(Atmospheric general circulation model; AGCM)には、海洋研究開発機構により開発された AGCM for Earth Simulator (AFES) ver4.1 [Ohfuchi et al., 2004] を、成層圏全層を再現した使用で用いた。過去の境界条件変動により強制された大気循環場を再現するために、CNTL 実験として、海面水温、海氷分布、温室効果気体等に観測された年々変動をそれぞれ与えた上で 1979 年から 2014 年までの積分が行なわれた。この CNTL 実験に対して、海氷分布のみ(FSIC)、全球の海面水温のみ(FSST)、熱帯域の海面水温のみ(FTSST) を気候値(1980-1999 年平均値)に固定して同様に計算を行なった実験を感度実験として用いた。大気の内変動による結果のばらつきを除去するために、全て 30 メンバーで実験が行われている。2000 年から 2014 年までの平均場に関して、CNTL 実験とそれぞれの感度実験との偏差を求めることで、近年の境界条件変動がもたらす大気場応答を評価した。

## ・得られた結果

数値実験の結果を用いて、近年の境界条件が成層圏循環の変動に及ぼす影響を定量的に評価した。図 1 には、境界条件として使用した海氷密接度と海面水温に関して、2000 年以降(2000-2014 年)における冬平均場と気候値(1980-1999 年)との差を示す。冬季の海氷密接度(図 1a)は、グリーンランド東側の海域を除き、北半球全域で減少傾向にあり、特にバレンツ・カラ海においてその減少は顕著である。海面水温偏差場では(図 1b)、北大西洋に強い一様な昇温偏差が見られる。対して太平洋では、負の太平洋十年規模変動(Pacific Decadal Oscillation; PDO)のパターンとなっている。特に熱帯域に着目すると、海面水温分布はラニーニャ傾向と捉える事が出来る。

このような境界条件を踏まえ、次に、大気場の応答を調べた。図 2 は、2000 年以降の境

界条件変動による北緯 60° での東西平均東西風の応答を示している。近年の海氷減少による応答として、12 月に成層圏で西風偏差、1, 2 月には東風偏差となっている(図 2a)。さらに、この東風偏差は 2 月にかけて対流圏まで到達している。海面水温変動による応答としては、海氷変動に伴う応答と同様に、冬の前半である 12, 1 月に西風偏差、対して 1 月下旬に東風偏差となっている(図 2b)。海面水温変動による応答としては、より強い西風偏差を形成している点の特徴である。続いて、熱帯域での海面水温変動による大気応答に着目すると、冬を通して西風偏差となっていた(図 2c)。これより、全球の海面水温変動による大気応答としてみられた初冬の西風偏差は、主に熱帯域の変動に起因し、対して、1 月下旬に発生した東風偏差は中高緯度の海面水温偏差に寄与すると考えられる。

平均場における東西平均東西風の応答を踏まえて、次に、SSW の発生数を実験ごとに見積もる事で、境界条件変動が SSW 発生数に及ぼす影響を評価した。ここで、SSW の定義には、Charlton and Polvani [2007] による大昇温の定義(10hPa、北緯 60° での東西平均東西風が負となった事例)を用いた。また、SSW が検出された日を central day とした。一度 SSW が発生し、東西風が西風に回復して以降 2 週間以内に再び東風となった場合は、それらを同一のイベントとした。

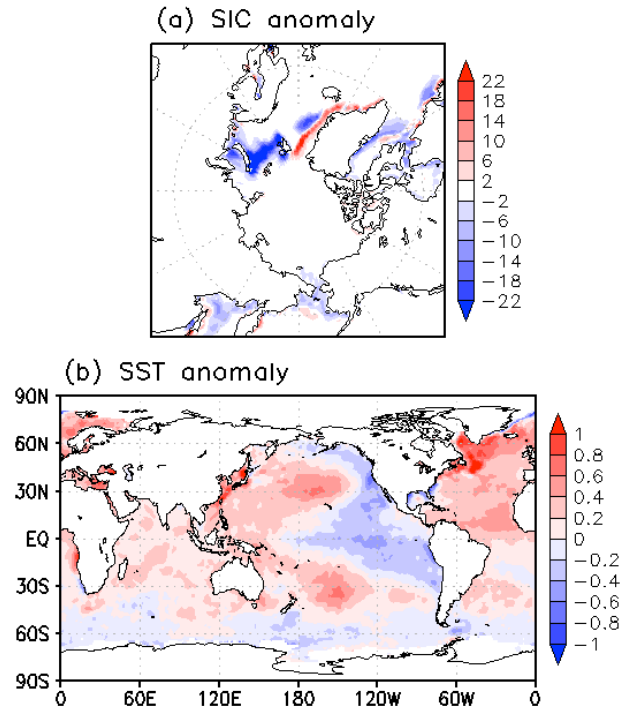


図 1 数値実験に境界条件として使用した、(a) 海氷密接度[%]と、(b) 海面水温[°C]における、2000/01～2013/14 年平均と 1979/80～1999/2000 年平均の偏差。冬(12～2月)平均場を示す。HadISST1 による。

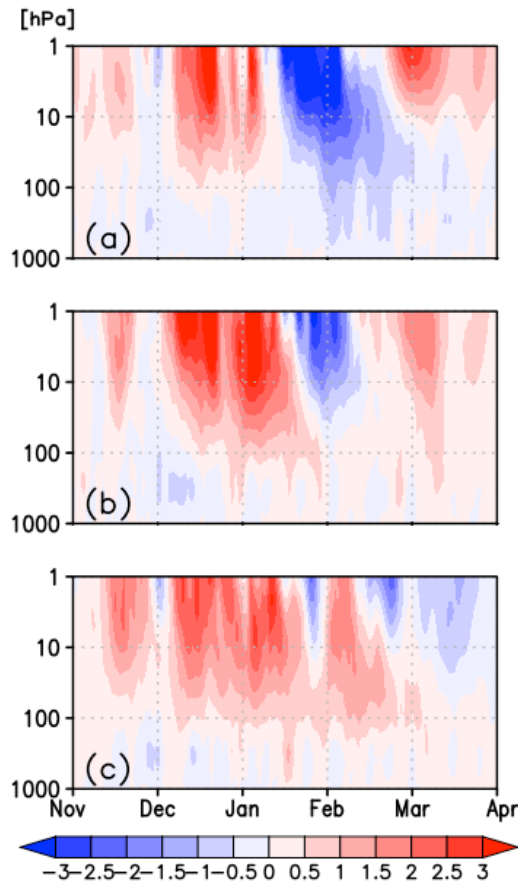


図 2 2000 年代(2000/01~2013/14)の平均場における、北緯 60° の東西平均東西風[m/s]の偏差。偏差は、観測された近年の (a) 海氷変動(CNTL-FSIC)、(b) 全球の海面水温変動(CNTL-FSST)、(c) 熱帯域の海面水温変動(CNTL-FTSST)がもたらす応答を示す。

図 3a は、月ごとの SSW 発生頻度の偏差を示す。ここで、各月の SSW の発生数は、それぞれの月に central day が含まれる場合のみをカウントした。近年の海氷減少による応答として、SSW 数は 12 月に減少し、2 月に増加する結果となっており、これらは、東西平均東西風の平均場における変動(図 2a)と対応している。3 月における SSW 数の減少は、2 月において頻発化した SSW が 3 月まで持続する事によると考えられる。全球の海面水温変動は、冬を通して概ね SSW の減少に寄与していた。また、熱帯域の海面水温変動による影響としても冬を通して SSW 数の減少に寄与しており、特に 2 月においては特に大きな減少がみられた。

これら成層圏循環の変動を力学的に駆動する惑星波上方伝播の強度を調べるために、100hPa 面において北緯 40-80° で平均した Eliassen-Palm (E-P) フラックスの鉛直成分を見積もった。日毎に計算した E-P フラックスの月平均値を、CNTL 実験と各実験での偏差としてそれぞれ図 3b に示す。海氷減少による応答である冬の前半(12 月)の SSW 数の減少と冬の後半(2 月)の SSW 数の増加と対応して、E-P フラックスは 12 月に負偏差、1、2 月に正偏差となっていた。また、海面水温の変動による大気応答として、

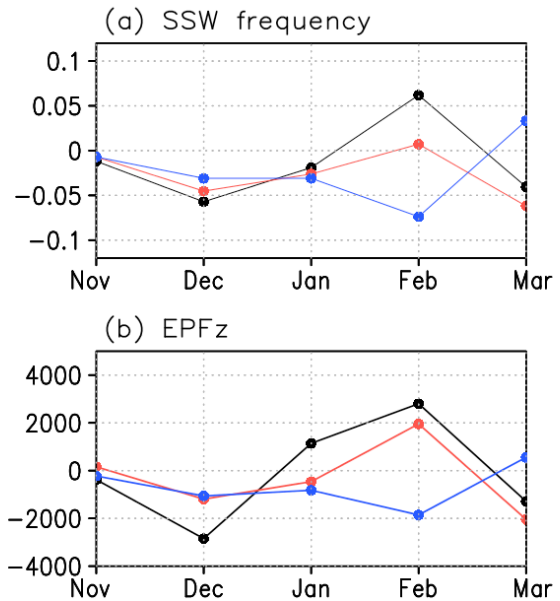


図 3 数値実験で再現された 2000 年代(2000/01~2013/14)の(a) 月ごとの SSW の発生頻度の偏差[回/年]と、(b) 100hPa 面における北緯 40-80° で平均した E-P フラックス鉛直成分の偏差。それぞれの線は海氷変動(黒)、全球の海面水温変動(赤)、熱帯域の海面水温変動(青)に伴う偏差を示す。

特に熱帯域の変動が冬を通して E-P フラックスの抑制に寄与していた。全球の海面水温変動による応答と比較すると、12、1 月における E-P フラックスの負偏差は両者が概ね一致しており、この期間の海面水温変動がもたらす惑星波の上方伝播の抑制には熱帯域の変動が支配的に寄与していると考えられる。対して 2 月においては、全球の海面水温の変動は E-P フラックスの強化をもたらしており、熱帯域の変動は E-P フラックスの抑制に寄与することを考慮すると、中高緯度の海面水温の変動が E-P フラックスの強化に強く寄与していると考えられることができる。

以上をまとめると、2000 年以降の境界条件の変動が SSW の発生頻度に及ぼす影響を、数値実験を用いて定量的に評価した結果、特に近年の海氷減少は 2 月において惑星波の上方伝播の強化と SSW の頻発化を引き起こしていることが示された。しかし、12 月においては惑星波の上方伝播の弱化による SSW 数の減少をもたらしており、冬 (12~2 月) 平均としては SSW の発生数に大きな変化は見られなかった。また、海面水温の変動による影響としては、冬を通して SSW 数の減少に寄与していた。これには熱帯域での変動が主として寄与しており、先行研究が示すラニーニャ現象的な海面水温偏差による惑星波上方伝播の抑制という結果と整合的であった。最近の研究で報告されている、負の PDO のパターンが SSW 発生頻度の低下に寄与するという結果とも整合的である [Kren et al., 2016]。対して、2 月には初冬とは異なった特徴を示しており、中高緯度の海面水温変動が惑星波の上方伝播の強化に寄与している可能性が示唆された。

#### ・今後の展望

これまでの解析により、2000 年以降に観測された境界条件変動と、SSW 発生頻度を含めた成層圏循環の応答との関係を、数値実験の結果の解析から示した。しかし、SSW を引き起こす惑星波伝播時の空間構造に関しては、明快な結果を得られていない。現在、数値実験の結果と再解析データの両方を用いて解析を進めている。さらに、本報告書に記載した結果は 2000 年以降の平均場に注目して行った解析の結果である。数値実験の結果を用いて調べることで、年ごとに境界条件の変動と SSW との関係性を調べる事が可能である。特に、ENOS に関しては年々変動が大きく、その成層圏循環への影響を評価するためには、年ごとの解析を行う必要があると考える。これらは今後の課題であり、帰国後も引き続き同様の目的で研究を実施していく。

#### ・参考文献

- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton (2001), Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, 294, 581–584, doi:10.1126/science.1063315.
- Butler, A. H., & Polvani, L. M. (2011). El Niño, La Niña, and stratospheric sudden warmings: A reevaluation in light of the observational record. *Geophysical Research Letters*, 38, L13807, doi:10.1029/2011GL048084.
- Charlton, A. J., and L. M. Polvani (2007), A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and

- modeling benchmarks, *Journal of Climate*, 20(3), 449-469.
- Kim, B.-M., S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and H.-J. Yoon (2014), Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss, *Nat. Commun.*, doi:10.1038/ncomms5646.
- Kren, A., D. Marsh, A. Smith, and P. Pilewskie (2016), Wintertime Northern Hemisphere response in the stratosphere to the Pacific decadal oscillation using the Whole Atmosphere Community Climate Model, *J. Climate*, 29, 1031–1049, doi:10.1175/JCLI-D-15-0176.1.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, and K. Ninomiya (2004), 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator—Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator), *J. Earth Simulator*, 1, 8–34.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan (2003), Global analysis of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *J. Geophys. Res.*, 108, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Wu, Y., and K. L. Smith (2016), Response of Northern Hemisphere midlatitude circulation to Arctic amplification in a simple atmospheric general circulation model, *J. Clim.*, 29, 2041–2058, doi:10.1175/JCLI-D-15-0602.1.

## 2. 派遣支援期間中の研究発表概要

[学会発表、ポスター]

- Hoshi, K., J. Ukita, M. Honda, T. Nakamura, K. Yamazaki, Modulation of Stratospheric Sudden Warming properties associated with sea-ice reduction in the Barents-Kara Sea, European Geosciences Union General Assembly 2017, X5-215, Vienna, Austria, April, 2017.
- Hoshi, K., J. Ukita, M. Honda, T. Nakamura, K. Yamazaki, Influence of Barents-Kara sea-ice reductions on Stratospheric Sudden Warmings, Arctic Change and Its Influence on Mid-Latitude Climate and Weather, Session 1, Washington D.C., United States of America, February, 2017.