

令和元年6月28日現在

機関番号：81103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16190

研究課題名(和文)北極・南極における大気水循環の近年変化の解明

研究課題名(英文)Recent changes in atmospheric water cycles in the Arctic and Antarctic

研究代表者

大島 和裕(Oshima, Kazuhiro)

公益財団法人環境科学技術研究所・環境影響研究部・任期付研究員

研究者番号：40400006

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、近年の気候変動が顕著な北極と南極における大気水循環の調査を行った。北極では気温上昇によって水蒸気が増加する一方で、南極では大気循環場の影響を受けて水蒸気が過去40年間でなだらかに減少していることが明らかになった。また、極域へ運ばれる水蒸気輸送の総量には長期変化はみられないものの、地域ごと・季節ごとに異なる近年変化を示し、低気圧活動が部分的に影響していることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

両極域では、近年の気候変動に伴って大気・海洋・陸域の様々な変化が観測されているが、その一翼を担う水循環に関する研究はあまり調査が進んでいない状況であった。そこで本課題では極域大気水循環を調査した。ここで得られた成果は、最近注目度の高い極域の気候変動に対して、大気水循環の観点から新たな知見を加えるとともに、極域の将来予測へつなげる基礎研究になると期待できる。

研究成果の概要(英文)：We examined atmospheric water cycles in the Arctic and Antarctic regions and their changes under climate change. Our study using meteorological reanalysis data indicated that the amount of water vapor over the Arctic was clearly increasing due to the warming. We found that the water vapor over the Antarctic was gradually decreasing during the past four decades in association with the changes in large-scale atmospheric circulation. While there were no significant long-term changes in total poleward moisture transport into both polar regions, the recent changes in those moisture transports showed regional and seasonal differences, which were partly associated with cyclone activities.

研究分野：気候学

キーワード：北極 南極 大気水循環 気候変動 水蒸気輸送 極域

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の北極と南極で観測されている気候変動は、水蒸気量や低気圧活動を変化させ、極域水循環に影響を及ぼしていると予想される。しかしながら、北極海の海水減少に伴う気温上昇や南極上空の大気循環場の変化が、北極海への淡水ソースである北極海上の降水量と、氷床の涵養量である南極大陸上の降水量へ及ぼす影響は必ずしも明らかになっていない。極域水循環は次のような共通した特徴を持つことを踏まえて本研究を行った。北極域および南極域は水蒸気の収束域となっており、すなわち周囲から集まった水蒸気が凝結して降水をもたらす (Peixoto and Oort, 1983 等)。両極域へ運ばれる水蒸気輸送には低気圧活動が大きく寄与しており、その水蒸気輸送の年々変動には北極振動・南極振動と呼ばれる半球規模で卓越する大気循環変動が影響を及ぼす (Oshima and Yamazaki 2006 等)。そこで本課題では、過去 40 年間の気象データ解析によって、極域の降水をもたらす水蒸気輸送の近年変化を定量的に評価し、さらにその輸送プロセスと変動要因を議論した。本研究成果は、最近注目度の高い極域の気候変動に対して、大気水循環の観点から新たな知見を加えるとともに、極域気候変動の将来予測へつなげる基礎研究になると期待できる。

2. 研究の目的

北極と南極の両極域では、近年の気候変動に伴って大気・海洋・陸域の様々な変化が観測されているが、その一翼を担う水循環に関する研究はあまり調査が進んでいない状況であった。本課題は、我々の先行研究 (Oshima and Yamazaki 2004, 2006) を踏まえ、両極域における大気水循環に関する近年変化の解明を目的として実施した。

3. 研究の方法

(1) 使用データ

本研究で扱う気象データとして大気再解析データセットを使用した。4 つの気象関連機関で作成された再解析データ (ヨーロッパ中期気象予報センター ECMWF: ERA-Interim), 日本気象庁 JMA: JRA-55/JRA-25, 米国環境予測センター NCEP: CFSR/CFSv2, 米国航空宇宙局 NASA: MERRA/MERRA-2) を整備し、海洋地球研究船「みらい」の北極航海で実施した観測データと比較して検証を行った。この比較は観測を実施した 2013 年から 2015 年まで各年の 9 月に限られるものの、再解析データは太平洋側北極海 (チュクチ海) における現地の気温や水蒸気量、風速の変動を概ね再現できていることが確認できた。

(2) 長期トレンド

水蒸気輸送の解析では、主に ECMWF (ERA-Interim) の再解析データを使用し、1979 年から 2016 年まで 38 年間 (約 40 年間) の地表面気温、海面気圧、水蒸気輸送 (大気中の全層で積算した水蒸気フラックス、東西成分と南北成分) および、水蒸気量 (大気中の全層で積算した水蒸気量である可降水量) の月平均データを解析した。各変数に対して、最小二乗法による線形回帰で、過去約 40 年間の長期トレンド (長期変化傾向) を算出した。また、それらのトレンドに対して Mann-Kendall 検定を行い、統計的有意性を評価した。年平均の解析に加え、季節ごと (1~3 月, 4~6 月, 7~9 月, 10~12 月: それぞれ北半球では冬, 春, 夏, 秋, 南半球では夏, 秋, 冬, 春に対応) の解析を行った (Oshima and Yamazaki 2017)。

(3) 近年変化

まず 1981 年から 2010 年までの平均を気候値で定義した。次に近年変化を調べるため、2011 年から 2017 年までを近年と定め、その近年期間の平均と気候値との偏差を算出した。また、水蒸気輸送 (水蒸気フラックス) を定常成分と擾乱成分の 2 つの成分に分けて解析した。定常成分は 1 ヶ月平均のデータから計算され、季節風に伴う水蒸気輸送を示す。擾乱成分は 1 ヶ月平均よりも短い時間スケールの変動の成分で (6 時間ごとのデータから計算される)、低気圧活動に伴う水蒸気輸送を示す (詳細は Oshima and Yamazaki 2004 を参照)。

4. 研究成果

両極の大気水循環について、(1) 過去 40 年間の長期トレンド、(2) 水蒸気トレンドに対する気温変化の寄与および (3) 近年変化の地域的な差異の結果を以下に示す。また大島・山崎 (2017) のレビュー等から見てきた (4) 最近の極域水循環研究の動向について最後に概観する。

(1) 過去 40 年間の長期トレンド

両極へ運ばれる水蒸気輸送と、両地域の気温および水蒸気量に対する過去 (約) 40 年間 (1979 ~ 2016) の長期変動を調査した。図 1 にその結果を示す。北極と南極のいずれにおいても極域へ運ばれる水蒸気輸送に長期トレンドはみられなかった。北極については他の研究でも同様の結果が得られている (Dufour et al. 2016)。一方で、両極域の水蒸気量には統計的に有意な長期トレンドがみられた。北極では、先行研究でも指摘されているように気温上昇に伴って水蒸気が増加していた (図 1a)。この結果は季節ごとの時系列においても同様であった。南極では、水蒸気が過去 40 年間でなだらかに減少する傾向を示した (図 1b)。南極の季節ごとの時系列では、夏と秋に水蒸気の減少トレンドが現れ、夏は統計的に有意な気温の低下トレンドと対応した。

秋は統計的に有意ではないものの、気温トレンドは負符号であった。先行研究では、夏には南極振動が強化する傾向、秋にはアムンゼン海低気圧が深まる傾向が、南極域の大気循環場の変化として指摘されている。このように南極上空の大気循環場が長期的に変化した結果として、夏には南極域全体で低温傾向となり水蒸気の減少傾向が現れ、秋にはロス海とその周辺での低温傾向となり水蒸気の減少傾向が現れたと解釈できる。結果として、南極では夏と秋に長期トレンドがあるため、年平均でも水蒸気が減少傾向を示すことが分かった。

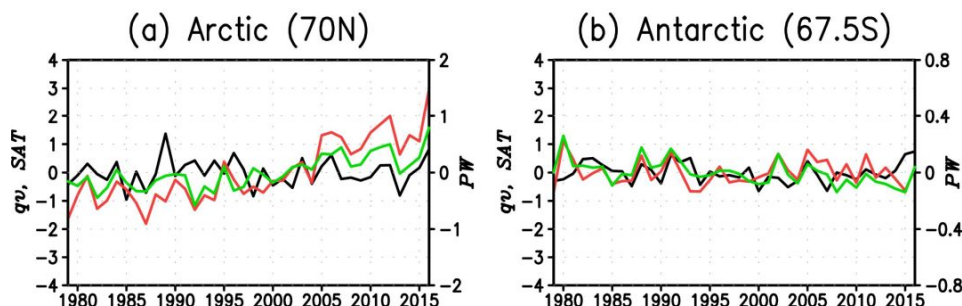


図1 両極域へ運ばれる水蒸気輸送（黒線, kg/m/s）と、各地域における水蒸気量（緑線, mm）および気温（赤線, °C）の1979年から2016年まで（約40年間）の時系列。（a）は北極の結果で、北極海を囲む北緯70°で東西平均した水蒸気フラックスと、北緯70°以北で領域平均した水蒸気量と気温を示す。（b）は南極の結果で、南極氷床を囲む南緯67.5°で算出したそれぞれの値である。水蒸気輸送と気温は左軸、水蒸気量は右軸に示した。また各時系列は全期間平均からの偏差を示す。

(2) 水蒸気トレンドに対する気温変化の寄与

両極域の長期トレンドの解析で明らかになった水蒸気トレンドには、気温変化による飽和水蒸気量の変化が影響していると考えられる。相対湿度が一定と仮定すると、1°Cの気温上昇で7%の飽和水蒸気量の増加が見込まれる。そこで過去40年間の水蒸気量の変化割合が、気温変化によって見積もられる飽和水蒸気量の変化割合でどの程度説明できるかを調べた。飽和水蒸気量の見積もりには Tetens の式を用いた。両者の変化割合を比較すると、北極の夏の水蒸気量の増加は、気温上昇から見積もられる飽和水蒸気量の増加とほぼ同じ割合であった。よって、気温上昇で水蒸気の増加を説明できることが確認できた。他の季節における北極の水蒸気量の増加割合は飽和水蒸気量の増加分よりも低かった。また、南極の夏と秋にみられた水蒸気量の減少割合は気温低下による飽和水蒸気量の減少割合よりも大きかった。したがって、北極では夏以外の季節に、また南極では夏と秋に飽和水蒸気量が減少し、相対湿度の減少傾向を示す。すなわち、両極では季節的に過去40年間の相対湿度が減少し、乾燥傾向であることを示唆する。この結果に関しては他のデータ等との比較が必要であろう。

(3) 近年変化の地域的な差異

水蒸気輸送の近年変化について水平分布と、極向き水蒸気輸送の緯度分布を解析することで、地域的な特徴を調査した。両極ともに地域ごとに、また月々でそれぞれ異なる水蒸気輸送の変化を示した。幾つかの結果を以下に紹介する。

北極では9月にバレンツ海・カラ海に中心を持ち、北欧から中央シベリアまで東西に伸びる高気圧偏差が現れ、この影響で北大西洋から極向き水蒸気輸送が強まり、大西洋から北極海への水蒸気流入が強まる傾向がみられた。また北極海上では、大西洋から北極点の方向へ流入し、さらに太平洋側へ流出する輸送の偏差がみられた。1月にもバレンツ海・カラ海に中心を持つ高気圧偏差が現れ、西シベリアからグリーンランド海に広がる分布であった。この高気圧偏差に伴って、グリーンランドの東側で極向き水蒸気輸送が強まる偏差がみられた。バレンツ海・カラ海に現れた高気圧偏差は、海水減少や WACE (Warm Arctic/Cold Eurasia) パターン（例えば Hori and Oshima 2018）と関係していることが考えられ、この点は今後の研究課題である。

南極では、前述のように秋にアムンゼン海低気圧が深まる長期トレンドがあるが、近年変化（2011~2017）としても3月と5月にアムンゼン海低気圧が深まる偏差がみられ、その影響によって南極半島の西側で極向き水蒸気輸送が強まる偏差を示した。また1月にはベリングハウゼン海からアムンゼン海に広がる高気圧偏差、6月にはベリングハウゼン海で低気圧偏差が現れ、それぞれに対応する水蒸気輸送の偏差がみられた。

さらに、水蒸気輸送を定常成分と擾乱成分に分けて解析した結果、上記のような北極および南極への水蒸気輸送の近年変化には部分的に擾乱成分が寄与しており、すなわち低気圧活動が影響していたことが分かってきた。

(4) 最近の極域水循環研究の動向

最近の大気の水蒸気輸送に関する研究では、Atmospheric river (大気の川) と呼ばれる現象が注目されている。これは強い水蒸気輸送を指し、低気圧に伴い幅が狭くフィラメント状に長く伸びた形状をとる。従来は北米西海岸や中緯度が主な調査対象であったが、最近では北極と南

極を対象とした研究でも取り上げ始めている。

南極の沿岸域では、Atmospheric river による強い降雪イベントが年に数回観測され、そのような数少ないイベントの降雪が年間の涵養量の大部分を担っていることが指摘されている (Gorodetskaya et al. 2014 等)。また内陸に位置するドームフジ基地は通常、寒冷で晴天であるが、1997 年 6 月に急激な気温上昇と強い降雪が観測された。この現象も Atmospheric river として見ることができ、昭和基地に接近した低気圧の進行方向前方の東側に中緯度から高い水蒸気量の領域が細長く南極大陸に伸びている様子がみとれる (図 2, 大島・山崎 2017)。北極においては、シベリアから北極海へ移動した低気圧に伴って Atmospheric river による強い水蒸気輸送と、さらに熱も輸送されることが観測され、モデルを組み合わせた研究によって、そのプロセスが示された (Komatsu et al 2018)。これらの結果は、発達する低気圧に伴う Atmospheric river イベントによって間欠的で爆発的に北極海と南極大陸へ水蒸気と熱が輸送されることを示す。

前述のように我々の研究を含めた従来の研究では、水蒸気輸送を定常成分と擾乱成分に分けて解析と議論が行われてきた。このうち Atmospheric river は擾乱成分に含まれる。しかし、擾乱成分としての水蒸気輸送は 1 ヶ月間や季節内で発生するある程度まとまった数の低気圧の活動によって水蒸気が運ばれる輸送 (フラックス) を想定している。一方、Atmospheric river は 1 つ 1 つの低気圧による単発的なイベントとしての強い水蒸気輸送である。このような個々のイベントが、北極や南極の全体や広域にどの程度寄与し、どのような地域差があるのか、今後の研究が待たれるところである。また、両極域における水蒸気輸送の年々変動には、北極振動・南極振動に伴う定常成分の輸送が影響する (大島・山崎 2017 等)。これに対して、北極では近年、低気圧活動の変化が報告されていることから、これまで水蒸気輸送の変動として支配的であった定常成分に加え、擾乱成分の寄与が増し、Atmospheric river のような極端現象が影響することも考えられる。Atmospheric river のような単発的なイベントを介した水蒸気輸送は極端現象に直接つながると考えられ、地球温暖化に伴う将来変化においても、鍵のプロセスとなる可能性があり、極域気候変動の将来予測にとっても重要であると考えられる。

Precipitable water (mm), vertical integrated moisture flux (kg/m/s) and mean sea level pressure (hPa) on 00Z 18 Jun 1997

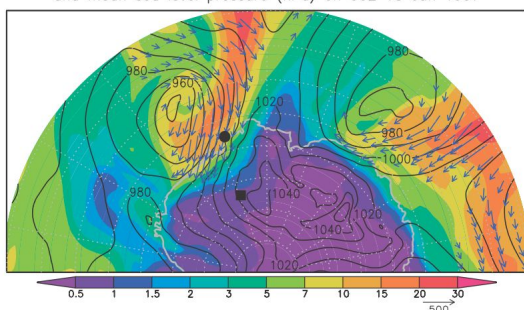


図 2 南極大陸上でブロッキングが発生した 1997 年 6 月 18 日 00UTC における水蒸気量 (可降水量, カラー, mm), 水蒸気輸送 (水蒸気フラックス, ベクトル, kg/m/s) および海面気圧場 (コンター, 10hPa 間隔)。は昭和基地, はドームフジ基地の位置を示す。

<引用文献>

- Dufour, A., Zolina, O., and Gulev, S.K., Atmospheric Moisture Transport to the Arctic: Assessment of Reanalyses and Analysis of Transport Components. *Journal of Climate*, 29: 5061-5081, doi:10.1175/JCLI-D-15-0559.1, 2016.
- Gorodetskaya, I.V., M. Tsukernik, K. Claes, M.F. Ralph, W.D. Neff, and N.P.M. Van Lipzig, The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 41(17), 6199-6206, doi:10.1002/2014GL060881, 2014
- Hori, M.E. and K. Oshima, Robustness of the Warm Arctic/Cold Eurasian Signature within a Large Ensemble Model Experiment. *SOLA*, 14, 69-73, doi:10.2151/sola.2018-012, 2018.
- Komatsu K.K., V.A. Alexeev, I.A. Repina, and Y. Tachibana, Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air, *Scientific Reports*, 8, 2872, doi:10.1038/s41598-018-21159-6, 2018.
- Oshima, K., and K. Yamazaki, Difference in seasonal variation of net precipitation between the Arctic and Antarctic regions. *Geophysical Research Letters*, 33, L18501, doi:10.1029/2006GL027389, 2006.
- Oshima, K., and K. Yamazaki, Seasonal Variation of Moisture Transport in the Polar Regions and the Relation with Annular Modes. *Polar Meteorology and Glaciology*, 18, 30-53, 2004.
- Peixoto, J.P. and A.H. Oort, The atmospheric branch of the hydrological cycle and climate. In Street-Perrott, Beran, Ratcliffe and Reidel (eds.) "Variations in the Global Water Budget", 5-65, 1983.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- Oshima, K. and K. Yamazaki, Atmospheric hydrological cycles in the Arctic and Antarctic during the past four decades, *Czech Polar Reports*, 7(2), 169-180, doi:10.5817/CPR2017-2-17, 2017. 査読有り

〔学会発表〕(計 11 件)

Oshima, K., Seasonal and Interannual Variations of Atmospheric Water Cycle in Siberia and Polar Regions, 8th EGU Leonardo conference, 2016.

大島和裕, 山崎孝治, 両極域における水蒸気量とその輸送の長期トレンド, 日本気象学会 2017 年度秋季大会, 2017 年.

Oshima, K., M.E. Hori, Y. Kawai, K. Sato, J. Inoue, Performance of objective analysis data over the Pacific Arctic Ocean in summer based on meteorological observations during the R/V “Mirai” Arctic cruises, 5th International Conference on Reanalysis, 2017.

大島和裕, 堀正岳, 山崎孝治, 北極と南極へ流入する水蒸気輸送の近年変化の地域的特徴. 日本気象学会 2018 年度秋季大会, 2018.

Oshima, K., M.E. Hori, and K. Yamazaki, Regional characteristics of the recent moisture transport into the Arctic and Antarctic, AGU Fall Meeting 2018, 2018.

〔図書〕(計 2 件)

大島和裕, 山崎孝治, 南極・北極域の水蒸気輸送過程. 気象研究ノート第 233 号「南極氷床と大気物質循環・気候」, 山内・平沢編, 第 2 章, 37-50, 日本気象学会, 2017 年.

Oshima, K., and K. Yamazaki, Atmospheric water cycle. In Ohta, Hiyama, Iijima, Kotani and Maximov (eds.) “Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia”, Chapter 2, 25-42, ISBN 978-981-13-6317-7, Springer, 2019.

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

大島 和裕 (OSHIMA KAZUHIRO)

環境科学技術研究所・環境影響研究部・研究員

研究者番号: 40400006