

北西太平洋 atmospheric river の年々変動と人為起源の変化

釜江陽一 (筑波大学 生命環境系・UCSD スクリプス海洋研究所)
Wei Mei (ノースカロライナ大学・UCSD スクリプス海洋研究所)
Shang-Ping Xie (UCSD スクリプス海洋研究所)
直井萌香 (筑波大学 地球学類)
植田宏昭 (筑波大学 生命環境系)

1. はじめに

海洋上を中心に、中緯度ではフィラメント状に細長く伸びた水蒸気フラックスの帯を常に 3-5 本程度確認することができる。中緯度における南北水蒸気輸送の 9 割を担うこの水蒸気フラックスの帯は「atmospheric rivers (ARs)」と呼ばれる (Gimeno et al. 2014)。ARs は特に大陸西岸に上陸した際に地形性上昇することで、多量の降水とそれに伴う土砂災害を引き起こすことから、冬季の北米西岸や欧州、アフリカ大陸などで非常に注目されている。ARs は温帯低気圧に伴う寒冷前線前面の warm conveyor belt に沿って形成され、米国カリフォルニア州では ARs によってハワイ諸島から水蒸気が運ばれてくる様子から、パイナップルエクスプレス、ハワイアンストームとも呼ばれる。

ARs の形成過程やメソスケールの対流・降水システムは、特に事例解析的に調査が進められてきた。近年では空間的・時間的に十分な解像度の、十分に期間の長い全球大気再解析データが蓄積されたことから、ARs の気候学的な調査も進められている。Guan and Waliser (2015) は ERA-Interim 再解析データを使用して、全球の ARs の気候学的分布と、その ENSO や MJO に伴う変動を報告した。Mundhenk et al. (2016) は ARs の自動検出アルゴリズムを用いて、MERRA 再解析データから北太平洋における ARs の気候値とその変動を詳細に解析した。いずれの研究も、ARs は大陸西岸のみならず、日本を含む極東域でも頻繁に通過・上陸していることを示している。一方で、背景場の水蒸気量がもともと多い極東域では、これまで ARs の振る舞いはあまり注目されていなかった。

東アジアでは熱帯からの水蒸気流入は特に夏季に多く、それは東アジアモンスーンと密接に関係している (Knippertz and Wernli

2010)。東アジアでは、西日本を中心に梅雨期に豪雨に襲われることが多く (Matsumoto et al. 1971)、総観規模では低緯度からの水蒸気流入の重要性が指摘されている。Hirota et al. (2016) は平成 26 年 8 月の広島豪雨の事例を解析し、切離低気圧に伴う不安定や力学的な上昇流に加え、総観規模で発生していた ARs による水蒸気流入の役割を指摘している。前年の平成 25 年は 7 月から 8 月にかけて西日本・北陸・東北・北海道で豪雨災害が相次いで発生した。図 1 に 7 月の ARs 頻度 (後述の方法で算出) の気候値と平成 25 年の偏差を示す。気候学的には ARs は日本周辺を広く通過するのに対し、平成 25 年は中国東部から朝鮮半島、西日本の日本海側と東北地方で多く、豪雨イベントが発生する背景の状況に寄与していたことが示唆される。

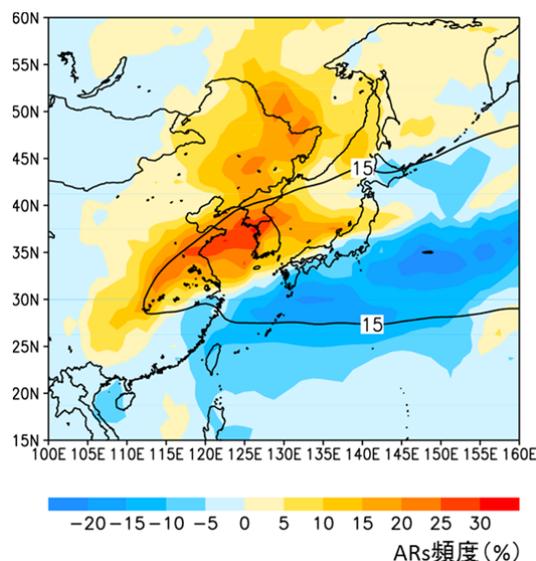


図 1. JRA-55 の 6 時間値から算出した 7 月の ARs 頻度 (%) の (等値線) 気候値と (陰影) 平成 25 年の偏差。

本研究では、全球再解析データおよび大規模アンサンブル実験データセットを使用し、北西太平洋における ARs の気候学的な特徴と、その変動要因を調査する。

2. 手法

ARs を始めとした中緯度の極端な現象は、大気の内変動の影響を強く受ける。今回はサンプル数を増やすため、全球再解析データに加えて、d4PDF (Mizuta et al. 2016; Kamae et al. 2016) を用いる。60km 解像度の MRI-AGCM3.2 に、歴史的な放射強制と海面水温 (SST)、海氷を与えた AMIP 型の積分を 1951-2010 年の 60 年間実施し、さらに初期値と境界条件に摂動を加えた 100 メンバーアンサンブルが構築されている。データ量が膨大であるため、今回は 10 メンバーを使用する。

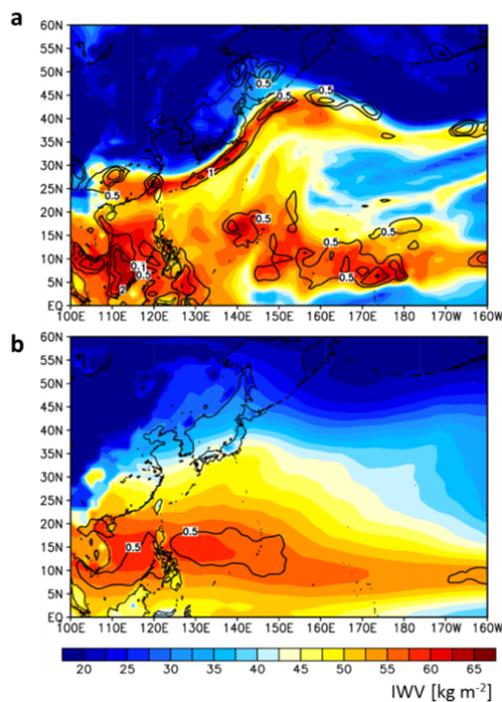


図 2. (上) d4PDF の特定のメンバーの 8 月のスナップショットと (下) 気候値。陰影は可降水量、等値線は降水量 (mm hr^{-1}) を示す。

ARs の検出にはいくつかの手法が提案されている (Gimeno et al. 2014) が、本研究では Mundhenk et al. (2016) の手法を用い

る。JRA-55 と d4PDF の 6 時間値から、対流圏の鉛直積算水蒸気フラックスの水平成分の絶対値 (IVT) を用いる。IVT の気候値からの偏差のクラスターが、ある条件を満たすときに ARs に判別される。判別の条件にはクラスターの水平規模、長さ、長さ/幅の比、軸の傾きなどを用いている。

図 2 に d4PDF の特定のアンサンブルメンバーの水蒸気量と降水量のスナップショットを示す。気候値に比べ、寒冷前線の通過に伴って低緯度から大量の水蒸気が北東方向へ輸送され、水蒸気輸送に沿って降水帯が形成されており、ARs がよく再現されていることがわかる。このような水蒸気輸送の摂動から ARs を判別し、格子ごとにその頻度を算出した。

3. 結果

図 3 に d4PDF から求めた北西太平洋における ARs 頻度の季節ごとの気候値を示す。大まかな分布は JRA-55 から求めた気候値や、先行研究の結果と整合的である。北太平洋に分布する ARs は北東太平洋だけでなく、北西太平洋にも多く存在し、中国東部や朝鮮半島、日本にも上陸していることがわかる。全体的な分布は冬季から春季に西進、夏季に北進、秋季に東進、冬季に南進し、日本周辺では 6、7 月にピークを迎える (非図示)。その季節変化は梅雨前線を伴う東アジアモンスーンと大まかに整合する。ARs の頻度のピークの緯度は梅雨前線の南側に位置しており (非図示)、梅雨前線の南側に流入する水蒸気フラックスや豪雨 (例えば平成 24 年 7 月九州北部豪雨) の位置関係と整合する。

図 3 に示した長方形の中で平均した ARs 頻度の JJA 平均値は、大きな年々変動を示す (非図示)。また、d4PDF のアンサンブル平均の変動は JRA-55 の年々変動と高い相関 ($R=0.68$) を示し、境界条件として与えている SST の変動に対する ARs の強制応答の重要性が示唆される。ただし 1979 年より以前に限定すると相関は低く、観測データの精度や密度が低いことが影響していることが示唆される。

北西太平洋域の夏季 ARs 頻度は赤道太平洋と有意な相関を示さず、太平洋との同時相関は限定的である。一方で北インド洋の SST

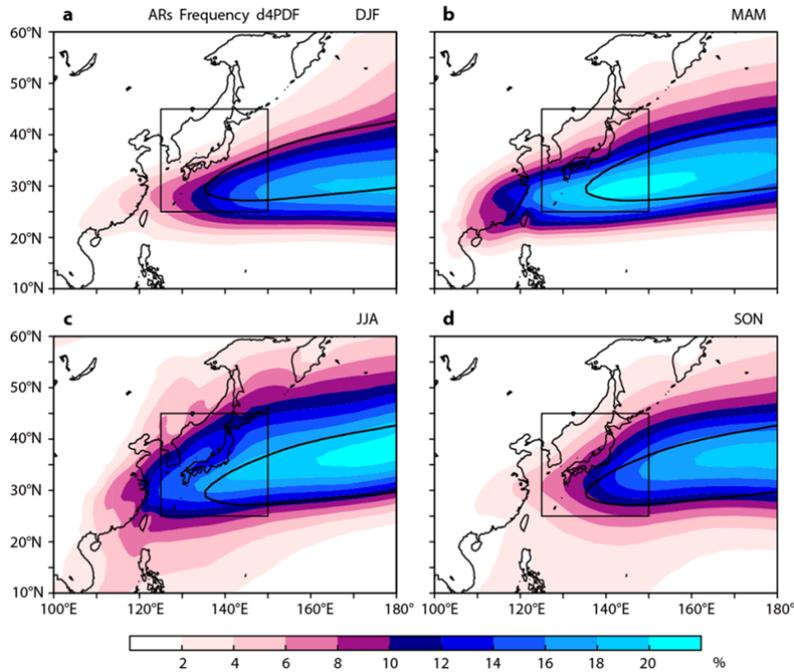


図 3. d4PDF の 6 時間値から算出した ARs の気候学的分布。(a) DJF、(b) MAM、(c) JJA、(d) SON 平均値。等値線は年平均値 (14%) を示す。

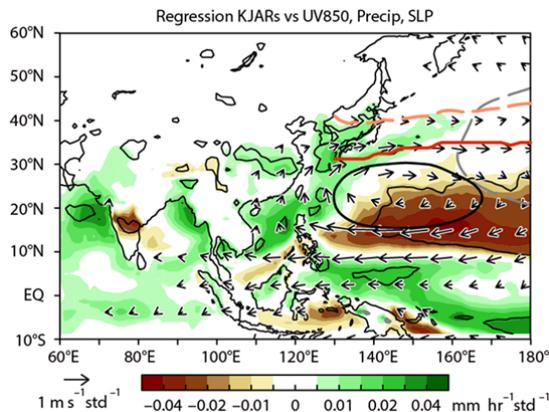


図 4. 図 3 の長方形で示した北西太平洋域における夏季 ARs 頻度の年々変動に回帰した夏季降水量 (陰影)、850hPa 面の風 (ベクトル)、海面更正気圧 (太い等値線)。橙の破線と赤い実線は 850hPa 面の東西風の気候値、回帰係数が極大となる緯度を示す。

とは高い正の相関を示し、北インド洋から南シナ海にかけての SST が高い年に東アジアではより多くの ARs が通過する。

夏季に北西太平洋で ARs の頻度が多い年

には、インド洋から南アジアにかけての対流圏上層が温暖で、チベット高気圧が強く、東アジアモンスーンが強い傾向がある。下層の循環場は、亜熱帯西部北太平洋に高気圧偏差が存在し (図 4)、中国東部から朝鮮半島、日本で南西風偏差と正の降水量偏差が分布し、より強い夏季東アジアモンスーンに伴ってより多くの水蒸気が流入していることがわかる。この循環場の偏差に伴う ARs 頻度の正偏差は、梅雨前線の南側に中心を持ち、梅雨期の水蒸気流入とそれに伴う豪雨イベントの特徴とよく一致する。下層風偏差の軸は気候値に比べて南側に確認され、下層風の軸と ARs の軸の変動がよく対応している先行研究の結果と整合する。

4. まとめと議論

ARs の多い年に確認される亜熱帯西部北太平洋の高気圧偏差は、エルニーニョが発達した翌年に、北西太平洋大気海洋相互作用、およびインド洋のキャパシタ効果を介して形成される (Xie et al. 2016)。ARs の多い年の温暖なインド洋とそれに伴う活発な夏季東アジアモンスーンは、熱帯太平洋・イン

ド洋の大洋間変動モードの役割が大きく、北西太平洋における ARs の予測可能性が高いことを示している。

巨大アンサンブルデータセット d4PDF は、AMIP 実験の他に、人為的な温暖化トレンドを境界条件から除いた非温暖化実験、CMIP5 の大気海洋結合モデルから得られる複数の SST 昇温パターンを加味した温暖化実験の結果も提供している (Mizuta et al. 2016; Kamae et al. 2016)。これらの実験結果を併用することで、①過去の長期的な ARs 頻度のトレンドや十年規模の変動に対する自然変動と人為的な影響の寄与の分離、②温暖化時の堅牢な ARs 頻度の変化傾向、③SST 上昇パターン依存性、を検証することができる。

ARs は中緯度の水循環において極めて重要な役割を果たす。ARs が検出されたタイムステップの総観規模の気圧配置を分類し、さらに下層循環場、降水強度の合成解析を行うことで、ARs に伴う豪雨などの社会的リスクとその変動を検証することができると思われる。

ARs はまた、高緯度の熱・水収支にも極めて大きな影響力を持つ。ローカルな熱・水の供給源に限られる極域では、低緯度から温暖・湿潤な空気塊が流入することが、大気・海洋・海氷・氷床に大きく影響する (Serreze and Barry 2011)。例えば春先に北極域に大量の水蒸気が流入すると、下向き長波を介して海氷融解のタイミングを早めることが指摘されている (Mortin et al. 2016)。北西太平洋のみならず、ARs の振る舞いとその役割を明らかにすることは、気候学的・水文学的・地球システム学的に重要な課題であると言える。

謝辞

本研究は文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムの支援を受けた。本研究では、創生プログラムのもとで作成された、地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース (d4PDF) を使用した。ARs 検出プログラムは B. D. Mundkenk 氏から提供された。

参考文献

Gimeno, L., R. Nieto, M. Vázquez, and D.

- A. Lavers, 2014: Atmospheric rivers: A mini-review. *Front. Earth Sci.*, **2**, 2.1–2.6.
- Guan, B., and D. E. Waliser, 2015: Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 12514–12535.
- Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Kato, and S. Arakane, 2016: Roles of an Atmospheric River and a Cutoff Low in the Extreme Precipitation Event in Hiroshima on 19 August 2014. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 1145–1160.
- Kamae, Y., and Coauthors, 2016: Forced response and internal variability of summer climate over western North America. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-016-3350-x.
- Knippertz, P., and H. Wernli, 2010: A Lagrangian climatology of tropical moisture exports to the Northern Hemispheric extratropics. *J. Climate*, **23**, 987–1003.
- Matsumoto, S., K. Ninomiya, and S. Yoshizumi, 1971: Characteristics of the Baiu front with heavy rainfall. *J. Meteor. Soc. Japan*, **49**, 267–281.
- Mizuta, R., and Coauthors, 2016: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60km global and 20km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, submitted.
- Mortin, J., G. Svensson, R. G. Graversen, M.-L. Kapsch, J. C. Stroeve, and L. N. Boisvert, 2016: Melt onset over Arctic sea ice controlled by atmospheric moisture transport. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 6636–6642.
- Mundhenk, B. D., E. A. Barnes, and E. D. Maloney, 2016: All-season climatology and variability of atmospheric river frequencies over the North Pacific. *J. Climate*, **29**, 4885–4903.
- Serreze, M. C., and R. G. Barry, 2011: Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global Planet. Change*, **77**, 85–96.
- Xie, S.-P., Y. Kosaka, Y. Du, K. Hu, J.S. Chowdary, and G. Huang, 2016: Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv. Atmos. Sci.*, **33**, 411–432.