

シベリア三大河川における大気・陸域水循環の解明と、 北極の大気－海洋－陸域相互作用研究への展望

大島和裕¹, 朴昊澤¹, 吉川泰弘², 緒方香都^{3,4}, 立花義裕³

¹ 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

² 北見工業大学 社会環境工学科

³ 三重大学 大学院生物資源学研究所

⁴ 気象庁 中部航空地方气象台

シベリア三大河川における大気・陸域水循環

シベリアの水循環は北極気候システムの一翼を担う。シベリア三大河川（図 1）を含む北極陸域の河川は淡水の大きな供給源であると同時に、栄養塩や有機物を運び海洋の生態系、物質循環にも関わる。河川水に加えて、上空からの降雪または降水として、また北極海と太平洋や大西洋との間の海流による塩分輸送によって北極海へ淡水が供給される。これらの淡水供給により、ほぼ閉じた海である北極海の表層には低塩分層が形成され、表層だけが効率的に大気から冷やされて凍りやすい状況となる（例えば大島 2014, 2015）。

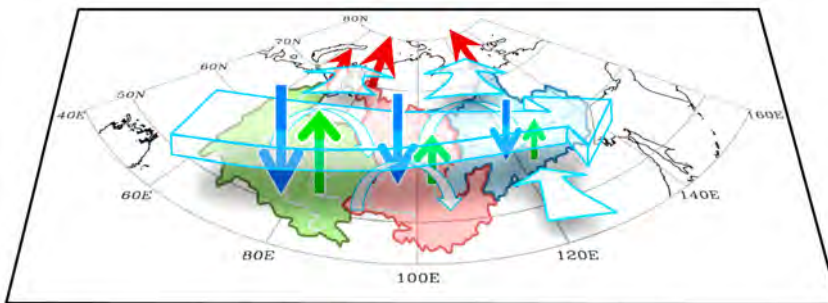
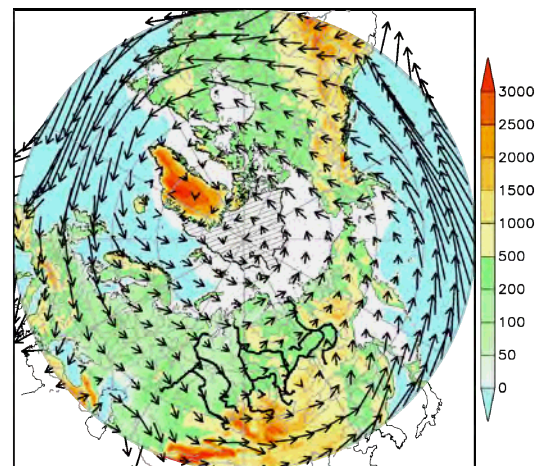


図 1 シベリアにおける大気・陸域水循環の地域的な特徴を示す模式図。陸域の陰影は、シベリア三大河川の流域（緑：オビ、赤：エニセイ、青：レナ）。青、緑、赤、白の矢印は、それぞれ降水量、蒸発散量、河川流量、降水の再循環を含む大気水蒸気輸送。矢印の長さとは、フラックスのおおよその違い（Oshima et al. 2015 より）。

シベリア域の降水は、一部は蒸発散によって大気に戻り、残りが河川水として北極海に注ぐ。よって降水量と蒸発散量の差 ($P-E$) は河川流量に対応しており、 $P-E$ の変動は上空の水蒸気輸送の影響を強く受ける（Zhang et al. 2012, 大島 2014, Oshima et al. 2015）。夏季の $P-E$ はオビ川からレナ川中流域にかけて負であり、この地域の蒸発散が降水の再循環や北極海への水蒸気輸送のソースとなっていることを示唆する。先行研究ではシベリア域の気温や降水量、蒸発散量にみられる東西の気候学的な地域差が示されているが、Oshima et al. (2015) では水蒸気フラックスの時間成分解析から、降水をもたらす水蒸気輸送過程が流域ごとに異なることを明らかにした（図 1）。東のレナ川では低気圧活動、西のオビ川では季節風に伴う水蒸気輸送が影響し、真ん中のエニセイ川では両者が寄与する。また先行研究では $P-E$ と河川流量の変動にずれがあったが、この地域に適した季節的な時間ラグを考慮することでずれは小さくなり、河川流量の年々変動には $P-E$ が支配的であることを明確に示した。

過去 70 年間に観測された河川流量データは、先行研究と同様に 1980 年代から 90 年代半ばにかけてレナ川とオビ川の流量が負相関であることを示し、これには大気循環の東西シーソーパターンが影響していた。一方で 1990 年以降は相関が弱く、1950 年代半ばから 60 年代にかけては正相関であった。さらに長期の過去 200 年間の年輪から復元された流量データにおいても正相関や負相関、無相関の期間がみられ、レナ川とオビ川の関係は年代ごとに異なっていた。興味深いことに、過去 200 年間の年輪復元流量の 15 年移動相関は負に偏って分布した。また AGCM のコントロール実験および CMIP3 マルチ気候モデルの 20 世紀再現実験、産業革命前コントロール実験による夏季シベリアの東部と西部における降水量の相関も負の期間が多く、東西

図 2 夏季北半球中高緯度域における水蒸気輸送と海水分布。矢印は大気の水蒸気輸送（鉛直積分した水蒸気フラックス）の 7 月の平年値（1980 年～2009 年までの平均）。北極の白い領域は 2012 年 3 月の海水分布、北極海中心部のハッチは最小を記録した 2012 年 9 月の分布。陸域のカラーは標高、灰色線および黒線（シベリア三大河川）は河川網（大島 2015 より）。



シーソーパターンと関係していた。AGCM の相関は年輪復元流量や CMIP3 モデルの結果よりも負に偏っていた。これらの結果はシーソーパターンが大気の内変動であることを示す。したがって、大気の内変動として夏季シベリア上空に現れる東西シーソーパターンによって、シベリアの東部と西部の降水量は負相関となり、結果としてレナ川とオビ川の河川流量は負相関になりやすい傾向にあることが分かった。以上のシベリア河川に対する一連の研究から、シベリア域の大気と陸域をつなぐ水循環にとって、大気の水蒸気輸送が長期変動をコントロールする鍵であると言えるだろう。

北極の陸域から海洋をつなぐ河川

北極域の河川は秋に結氷して、冬に氷は成長し、春に融解する季節変化を繰り返す。この河川氷の季節変化は前述の流量変動に影響を及ぼす。これまでの河川氷の研究では観測が主要河川に限られていたため、北極の広域を対象とした影響評価は困難であったが、Park et al. (2016) では河川氷のスキームを陸面過程モデル (CHANGE) に結合することで河川の氷厚とその季節変化、また河川水温のシミュレーションが可能となった。CHANGE による実験の結果、北極河川では近年の昇温によって最大氷厚は平均の 166cm から過去 31 年間 (1979～2009) に 24cm (14%) 薄くなり、河川の結氷期間は平均の 147 日から同期間に 9 日間 (6%) 短くなったことが分かった。従来は気温による影響が言われてきたが、近年の河川氷厚と地温の変化に対しては積雪による断熱効果が強く影響することが感度実験から明らかになった。特に他地域よりも積雪の変化が大きかったシベリア域でこの影響は顕著であった。このような積雪の影響は海洋においても重要である。その他、近年陸域で観測されている凍土融解や森林劣化による河川への影響なども考えられる。

北極の大気－海洋－陸域相互作用

近年北極域では北極温暖化増幅と呼ばれる大きな昇温と海氷減少に伴って大気、海洋、陸域の様々な変化が観測された。海氷減少は大気大循環や低気圧の影響を受けるとともに、海水温や海流、海洋構造などの海洋状況の影響も受けている。一方、海氷減少の影響として、冬季シベリアの気温や積雪、大気循環、低気圧経路、極端現象などの変化、また成層圏を介した中緯度への影響が最近の研究で指摘されている。これらの大気の変化は水蒸気輸送 (図 2) を変え、さらには陸域水循環への影響が予想される。しかしながら、これらの海洋 (海氷) から大気への影響は、海氷が年間で最小となる 9 月 (図 2) 以降の冬に観測されることが多く、大気の水蒸気量が大きく水循環な活発な夏とはずれており、夏に焦点をあてた研究は今後の課題である。陸域から海洋をつなぐ河川に関しては、Park et al. (2016) の結果をもとに解析を進めており、ローカルではあるが春に河川から海氷への影響を示唆する結果が得られている。これは解析を進め別の機会に発表する。

北極域では、最近 10 年間に様々な変化が観測され、色々なことが解明されたが、未解決なことも多い。北極含む北半球中高緯度域の大気、海洋、陸域の種々の現象 (図 3) が現在どのように変わりつつあり、今後どのようになるか (なりそうか)、またそれらがどのように関連しているか、引き続き観測とデータ解析からひとつひとつをつなぐ物理過程の解明を目指す。

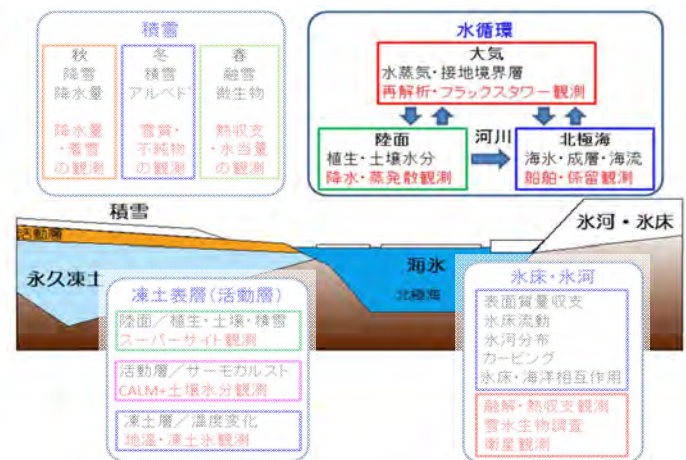


図 3 北極の大気－海洋－陸域システムにおける水循環を介した相互作用 (北極環境研究の長期構想 2014 を修正)。

参考文献

- Oshima, K., Y. Tachibana and T. Hiyama: Climate and year-to-year variability of atmospheric and terrestrial water cycles in the three great Siberian rivers. *Journal of Geophysical Research*, 120, doi:10.1002/2014JD022489. 2015
- 大島和裕：シベリア域における大気陸域水循環。気象研究ノート第 230 号「北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動」, 飯島慈裕, 佐藤友徳編, 12-26, 日本気象学会, 2014 年 10 月
- 大島和裕：シベリアに関係する北極の気候。「シベリア 温暖化する極北の水環境と社会」, 檜山哲哉, 藤原潤子編, 84-88, 京都大学学術出版会, 2015 年 3 月
- Park, H., Y. Yoshikawa, K. Oshima, Y. Kim, T. Ngo-Duc, J.S. Kimball and D. Yang: Quantification of warming climate-induced changes in terrestrial Arctic river ice thickness and phenology. *Journal of Climate*, accepted on December 18, 2015
- 北極環境研究の長期構想, テーマ 4「氷床・氷河, 凍土, 降積雪, 水循環」, 42-52, 北極環境研究コンソーシアム, 2014