

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26340018

研究課題名(和文) 北方河川流出量は海水減少に影響している

研究課題名(英文) Assessing influences of river discharge on declining Arctic sea ice

研究代表者

朴 昊澤 (PARK, Hotaek)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター・主任研究員

研究者番号：10647663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、北極海に流入する河川流出量と熱フラックス、及び海水減少に及ぼすその影響を評価することを目的とする。今まで海水減少に影響する因子として河川流出量に関する視点がない。観測データと数値モデルを統合して、流出量と熱フラックスの輸送量を定量的に評価し、流出量と海水減少の関係を調べた。北極河川の水温が上昇しており、北極海に流入する河川水の熱フラックスも増加傾向にあった。その熱フラックスは、北極海の沿岸域において夏の海水温を1-5℃上昇させ、また海水減少に対して10-20%の寄与率を示した。特に、春季において海水減少に対する河川水の熱フラックスの影響が顕著であった。

研究成果の概要(英文)：This study aims to evaluate quantitatively discharge and heat flux flowing from the Arctic terrestrial rivers to the Arctic Ocean and their influences on the declining Arctic sea ice. So far, studies dealt with the relationship between the declining sea ice and river discharge are rarely found. This study quantitatively evaluated changes in discharges and heat fluxes from the Arctic terrestrial rivers and also examined their influences on the retreating sea ice combining observational data and numerical model. The model simulated warming river temperature, resulting in increases in the river heat fluxes. The increased river heat fluxes did warm the surface water of the shelf sea to 1-5℃, which had a contribution rate of about 10-20% to the declining sea ice. The contribution was significant in the spring season that the spring peak discharge is appeared due to snow melted water.

研究分野：北極環境学

キーワード：北極の海水減少 河川流出量 河川水の熱フラックス 数値モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 北極陸域には、100 以上の小・中・大河川があり、北極海に河川水を供給している。その流出量の約 6 割を主要大河川が占めている。実際、流出量の観測データは大河川に限られている。そのため、観測データが欠如している小・中流域の流出量は、再解析データ、または水文モデルを用いて推定される。しかし、再解析データから流出量を直接推定することは不可能である。大気水収支法から求められる降水量と蒸発散量の差である正味降水量を、流出量の代わりに使う傾向がある (Zhang et al. 2013)。一方、水文モデルの適用の例も、ほとんどが大河川に限られている (Su et al. 2006)。そのため、全北方河川から北極海に流入する河川流出量が定量的に評価されていない。特に、小・中流域の流出量に関しては“不確定性”が大きい。したがって、河川流出量の総量を知ることが必要不可欠である。

(2) 気温上昇は河川水の水温に影響する。実際、北極陸域の川の水温は上昇傾向を表しており (Park et al. 2017)、その結果、北極海に流入する熱エネルギーも増加している (Liu et al. 2005)。また、水温上昇は河川水の早期融解と結氷の遅延をもたらしている (Park et al. 2016)。現在、北極陸域の気温は、春・秋期に著しく上昇している (Bekryaev et al. 2010)。従って、水温上昇、河川氷プロセスの変化、そして北極海に流出する熱エネルギーの増加が考えられる。しかし、河川水の水温の観測データは極めて少ない。そのため、河川水を通して北極海に流れて行く熱エネルギーについてはほとんど評価されていない。

(3) 北極海の海水面積は、早いスピードで減少し続けている。海水面積の減少は、地球気候システムに大きく影響するため、その重要性に関する認識は高い。海水面積の減少トレンドは明確な事実であるが、経年変化の中での減少パターンは、地域によって大きく異なってくる。また、結氷による回復パターンにおいても地域による差がある。その違いは、気候、海洋の物理・化学的環境、及び河川流出量などの影響が考えられる。しかし、海水変動の地域的相違に河川流出量を結びつけて研究した例はほとんどない。

2. 研究の目的

(1) 北極河川の流出は、淡水、熱、栄養物質及び土砂堆積物を同時に運んで、北極海の物理的・生化学的環境に強く影響する。過去数十年間、河川流出量は、増加傾向にあり (Park et al. 2017)、大気中の水蒸気量の増加による降水量の増加 (Zhang et al. 2013)、永久凍土の融解 (Yang et al. 2002) などがその原因とされてきた。北極河川の流出量は、融雪水が流出する春期にピークに達し、その後、急激に減少し続ける他地域の流出パターンと大きく異なる。年間流出量の約 6 割を占

める融雪水は、海水が融解する前に流出し、沿岸域の海水の表面に水と土砂堆積物などを運ぶ。流出水の高い熱量と土砂堆積物の高い日射吸収は、海水の融解に大きく影響する (Dean et al. 1994)。秋期の河川流出量は、沿岸域の水温を暖めて海水の結氷に影響する。一方、海水が海岸から後退する夏期には、海水と河川流出量の関係が、春・秋期に比べて強くない。しかし、海水減少に対する河川流出量の影響を評価した研究はほとんどない。特に、河川水の熱フラックスに関する情報・理解は乏しい。気候モデルにおいても、海水変動に対する河川流出量の影響を考慮していない場合が多い。そのため、河川水の熱フラックスが計算できるモデルを開発した。

(2) 本研究は、観測データセットと数値モデルを用いて、衛星観測データが有効である 1979-2013 年の期間について、環北極スケールにおいて河川から北極海に流入する流出量と熱フラックスを定量化し、海水変動に対する流出量の影響を明らかにすることを目的とした。北極河川は、バレンツ海からポーフート海まで連なって分布し、異なる環境条件下にある。そのため、流出量の地域的相違が発生する。この違いは、北極海の淡水・熱収支に影響を与え、海水変動の地域的相違をもたらす。特に、多量の流出水が発生する春期において、その地域的違いはより著しくなる。その理解の向上のために、北極河川を 4 つの領域に区分し (図 1)、各領域における流出量と熱フラックスの長期及び季節のトレンドを解析し、海水変動に対するその影響を評価するほか、その地域的特性を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

(1) 流出量の計算には、水、熱、CO₂ のシミュレーションが可能な陸面過程モデル (CHANGE、Park et al. 2016) を使用する。当モデルは、分布型水文モデル、植生動態モデル、積雪及び凍土プロセスを装着しているため、気候の変化と、人為的影響による地表状態の変化が、流出量に及ぼす影響の評価ができる。また、分布型水文モデルの中には、河川水の水温予測のアルゴリズムを装着したことで、河川氷の季節変化と河川水の熱フラックスの算出が可能になった。モデルの入力気象データとして、緯度・経度 0.5 度の空間スケールを持つ WATCH データセット (<http://www.eu-watch.org>) を利用した。

(2) 融雪水の流出は、海水の融解開始より若干早くスタートする。その時間の差は、流出量が海水プロセスに直接影響する期間であり、河川流出量と海水との相互関係において非常に重要なポイントである。海水変動に対する流出量の影響は地域的に異なる。そのため、北極海域を 4 つの領域に分割して (図 1)、各領域において海水面積と海水面の表面温度の月別変化量を、NOAA が提供する衛星

データを用いて算出する。海水に対する河川流出量の影響が相対的に大きい春期を対象にして集中的に解析した。

4. 研究成果

(1) 河川の流出量と水温の変動を計算する陸面過程モデル CHANGE を環北極河川に適用して、1979-2013 年の間における北極海に流入する流出量と水温の計算を行った。河川流出量と水温の計算結果は、主要大河川の出口での観測データと比較を行い、モデルがそれらの季節及び経年変化を良く計算したことを確認した (Park et al. 2016, 2017)。北極河川の水温は、河川流出量のトータルに対する各河川の流出量の重み付けで年平均値を求めた。モデルの計算結果は、河川の水温が明確に上昇傾向 ($0.16^{\circ}\text{C}/\text{dec}$) にあること、その上昇は気温上昇が顕著であった 2000 年以降明らかであることを示す (図 1)。また、同期間において河川流出量も明らかに増加していた。その増加は、北米よりユラシア河川において顕著であった。水温上昇と流出量の増加の結果、北極海に流入する河川水の熱フラックスも増加していた (図 1)。河川水の熱フラックスの平均値 2.2TW は、パロークヤノンから北極海に流入する熱フラックス (2.0TW) に相当する量であり、決して少量のエネルギーではないことを示す。

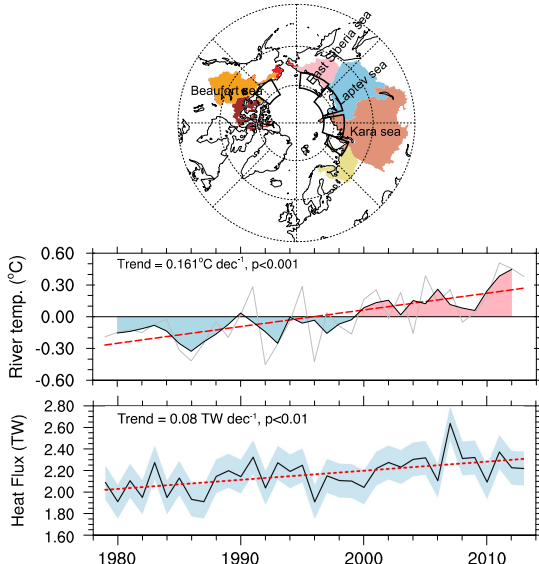


図 1. 研究対象になった四つの北極海域、及び CHANGE モデルにより計算された全北極河川の水温の年平均の偏差値と熱フラックスの経年変化。

(2) 北極域の気温は上昇し続けている。特に、融雪が発生する春季においてその上昇が顕著である。春季の気温上昇の結果、早期の融雪及び河川氷の融解が進んでいる (Park et al. 2016)。これらの変化は、北極河川の特有の現象である春季のピーク流量のタイミングを早めることに影響した。また、冬季の積雪量の増加 (Park et al. 2015) によってそのピーク流量も増加していた。春季の気温

上昇及び早期の河川氷の融解は、河川水への熱伝導を高めて水温上昇に寄与する。実際、CHANGE モデルは春季の北極河川水の水温が上昇していたことを予測した (Park et al. 2017)。水温上昇と河川流出量の増加の結果、北極海に流出する河川水の熱フラックスが増加し、北極海沿岸域の海水融解に対してその影響が考えられる。

(3) 海水融解に対する河川水の熱フラックスの影響を調べるために、四つの領域において 5 月の海水密接度 (SICEC) と海水表面温度 (SST) との関係と比較した (図 2)。気温上昇及び流出量の増加による河川水の熱フラックスの増加は、海水温の上昇をもたらし、海水融解に寄与する。実際、四つの領域において河川水の熱フラックスは海水密接度の減少率及び海水の表面温度と高い相関を示した。北極の海水の融解は、陸域と接している沿岸域から始まる。その時期、日射量は少なく、気温も低いため、海水融解に対する大気からの熱エネルギーの影響は相対的に低い。その時、河川から流入する多量の熱フラックスが海洋を温め、海水の融解に及ぼすその寄与率が相対的に高くなる。図 2 が示す相関はある特定の領域に限らず全領域において高い。それは、春季の北極海の熱収支及び海水融解に及ぼす河川水の熱フラックスの影響が重要であることを強調する。

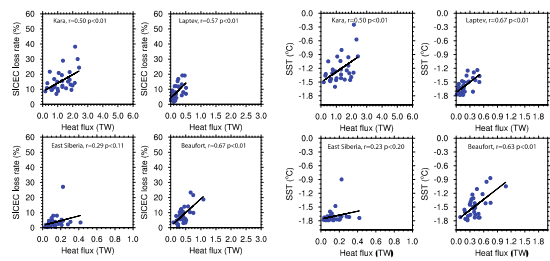


図 2. 四つの研究領域において CHANGE モデルにより計算された 5 月の河川水の熱フラックスに対する海水密接度 (SICEC) の減少率と海水表面温度 (SST) との関係。

(4) 北極海の熱収支及び海水融解の時・空間変動に対する河川水の熱フラックスの影響を調べるために、CHANGE モデルにより計算された河川流出量と水温を海洋領域モデルに入力値として与えて、モデル実験を行った。流出量と水温を与えた実験と両者を与えない両実験の差で、海水融解及び海水温に対する河川水の熱フラックスの影響を評価した。河川水の熱フラックスは、河川の出口から 200km の海域内の海水融解に影響しており、その影響が年平均 $10\text{--}20\%$ に達していた。また、河川水の熱フラックスは同領域において 8 月の海洋の表層水の水温を $1\text{--}5^{\circ}\text{C}$ 上昇させたことが明らかになった。これらの結果は、従来言及された海水に対する河川水の影響を定量化したものであり、その影響の実体を明らかにした重要な知見であると言える。

(5) 研究期間中に河川水の流出量、水温及

び河川氷の変動を計算するモデルを開発したことにより、北極海に流入する河川流出量と熱フラックスを計算することができ、海水減少に対する河川水の熱フラックスの影響を評価することができた。さらに、CHANGEモデルを海洋領域モデルと結合して、海水減少に対する河川水の熱フラックスの影響を時・空間的に評価できたことは、当初予定していた研究計画を超えた成果であると言える。

<引用文献>

Bekryaev, R. V., I. V. Polyakov, V. A. Alexeev, Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming, *Journal of Climate*, 23, 2010, 3888-3906

Dean, K. G., W. J. Stringer, K. Ahlnas, C. Searcy, T. Weingartner, The influence of river discharge on the thawing of sea ice, Mackenzie River Delta: albedo and temperature analyses, *Polar Research*, 13, 1994, 83-94

Liu, B., D. Yang, B. Ye, S. Berezovskaya, Long-term open-water season stream temperature variations and changes over Lena River basin in Siberia, *Global and Planetary Change*, 48, 2005, 96-111

Park, H., A. N. Fedorov, M. N. Zheleznyak, P. Y. Konstantinov, J. E. Walsh, Effect of snow cover on pan-Arctic permafrost thermal regimes. *Climate Dynamics*, 44, 2015, 2873-2895

Park, H., Y. Yoshikawa, K. Oshima, Y. Kim, T. Ngo-Duc, J. S. Kimbal, D. Yang, Quantification of warming climate-induced changes in terrestrial arctic river ice thickness and phenology, *Journal of Climate*, 29, 2016, 1733-1754

Park, H., Y. Yoshikawa, D. Yang, K. Oshima, Warming water in Arctic terrestrial rivers under climate change, *Journal of Hydrometeorology*, 2017, doi:10.1175/JHM-D-16-0260.1

Su, F., J. C. Adam, K. E. Trenberth, D. P. Lettenmaier, Evaluation of surface water fluxes of the pan-Arctic land region with a land surface model and ERA-40 reanalysis, *Journal of Geophysical Research*, 111, 2006, doi:10.1029/2005JD006387

Yang, D., D. L. Kane, L. D. Hinzman, X. Zhang, T. Zhang, H. Ye, Siberian Lena River hydrologic regime and recent change, *Journal of Geophysical Research*, 107, 2002, doi:10.1029/2002JD002542

Zhang, X., J. He, J. Zhang, I. Polyakov, R. Gerdes, J. Inoue, P. Wu, Enhanced poleward moisture transport and amplified

northern high-latitude wetting trend, *Nature Climate Change*, 3, 2013, 47-51

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

Park, H., Y. Yoshikawa, D. Yang, K. Oshima, Warming water in Arctic terrestrial rivers under climate change, *Journal of Hydrometeorology*, 査読有、2017, 55 ページ、doi:10.1175/JHM-D-16-0260.1

Park, H., Y. Yoshikawa, K. Oshima, Y. Kim, T. Ngo-Duc, J. S. Kimbal, D. Yang, Quantification of warming climate-induced changes in terrestrial arctic river ice thickness and phenology, *Journal of Climate*, 査読有、Vol. 29, 2016, pp. 1733-1754、doi:10.1175/JCLI-D-15-0569.1

Park, H., Y. Kim, J. S. Kimball, Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments, *Remote Sensing of Environment*, 査読有、Vol. 175, 2016, pp. 349-358、doi:10.1016/j.rse.2015.12.046

[学会発表](計 5 件)

Park, H., K. Oshima, Y. Yoshikawa, Impacts of the Arctic river heat flux on declining sea ice, *International Symposium on the Cryosphere in a Changing Climate*, 2017年2月13日、Wellington (New Zealand)

Park, H., D. Yang, Climate warming induced changes in terrestrial Arctic river ice thickness and phenology, *American Geophysical Union 2016 Fall Meeting*, 2016年12月15日、San Francisco (USA)

Park, H., K. Oshima, Y. Yoshikawa, D. Yang, Possible implications of terrestrial river discharge with Arctic coastal ice, *American Geophysical Union 2015 Fall Meeting*, 2015年12月17日、San Francisco (USA)

Park, H., K. Oshima, Y. Yoshikawa, D. Yang, Increases in pan-Arctic river water temperature and heat flux to the Arctic Ocean, *The Fourth International Symposium on the Arctic Research*, 2015年4月28日、富山国際会議場(富山県、富山市)

朴 昊澤、吉川泰弘、大島和裕、北極大

河川の氷厚と水温環境の変化、日本気象学会
2014 年秋季大会、2014 年 10 月 22 日、福岡
国際会議場（福岡県、福岡市）

6 . 研究組織

(1)研究代表者

朴 昊澤 (PARK, Hotaek)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極
環境変動総合研究センター・主任研究員

研究者番号： 1 0 6 4 7 6 6 3

(2)研究分担者

大島 和裕 (OSHIMA, Kazuhiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極
環境変動総合研究センター・研究員

研究者番号： 4 0 4 0 0 0 0 6