

関東地方の夏季気温上昇への黒潮大蛇行時の影響

*杉本周作

東北大学大学院理学研究科

1. はじめに

日本の南の海には世界最大規模の暖流である黒潮が流れており、2017年夏に大蛇行流路に遷移し、4年を超えて継続している。大蛇行が発生すると、蛇行した黒潮と本州南岸の間の内側域に冷水塊が出現し（図1）、この冷水塊が冬の直上大気に影響すること（Xu et al. 2010; Murazaki et al. 2015）や、冬の南岸低気圧の進路の南偏に寄与すること（Nakamura et al. 2012; Hayasaki et al. 2013）などが報告されている。

前回の大蛇行が終焉を迎えた2005年以降、高解像度衛星観測データプロダクトが開発されたことで、今回の大蛇行では関東・東海沖沿岸を流れる黒潮分岐流が同定され、その影響で沿岸の水温が上昇することが示された（Sugimoto et al. 2020）（図1）。夏は南風が吹くため、大蛇行に伴う関東・東海沖沿岸昇温が近隣の諸都市に影響を及ぼすことが予想される。そこで、本研究では領域大気モデルによる数値実験を実施することで、関東地方の夏季気候に果たす黒潮大蛇行の影響評価を行った。

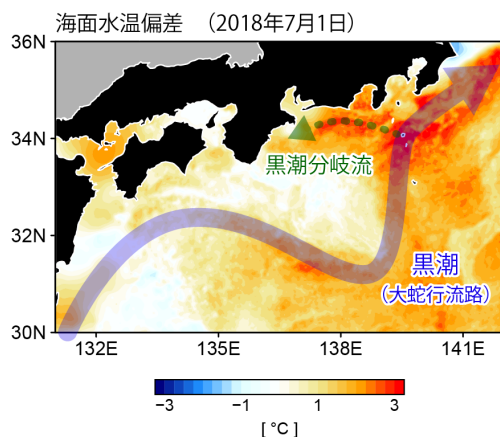


図1. 黒潮が大蛇行していた2018年7月1日の海面水温偏差。ここでは黒潮が大蛇行していない2006年から2016年の平均値を平年としている。青矢印は黒潮、緑点線矢印は黒潮分岐流を表す。NASA JPL開発のMURSSTを用いて作図。

2. 数値実験の概要

気象庁開発の領域大気モデル（Saito et al. 2006, 2007）を用い、本州南方海域および本州を覆う領域を対象に（図2）、7月の沿岸昇温感度実験を実施した。ここでは、東海沖沿岸昇温が発生した海（沿岸昇温実験）と発生しない海（非昇温実験）を用意し、それぞれの大気応答の比較を通じて日本気候への沿岸昇温の影響の同定を行った。なお、数値実験は沿岸昇温の影響を十分に解像できるように5kmの水平解像度で実施し、7つのアンサンブル実験を実施した。本研究では、7月のアンサンブル平均結果を示す。

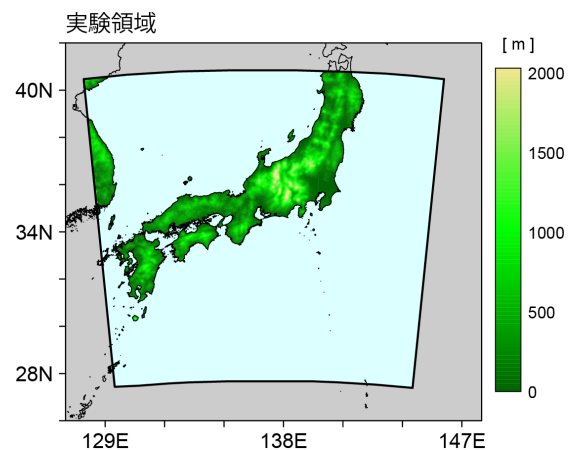


図2. 実験領域。陰影は標高を表す。

3. 結果

大蛇行期に発生する沿岸昇温に対する地上気温応答は関東から東海地方にかけての太平洋側都市で顕著であり、関東地方の気温上昇は約0.6度であった（図3a）。数値実験の妥当性を検証するために、AMeDASと比較を行った結果、大蛇行期間中の気温上昇は約0.5度であり、実験と同程度であることが確認された。夏は熱波などの影響で数日のような短い時間スケールで気温が大きく上昇することがある（Imada et al. 2019）。しかしながら、本研究のように月平均・季節平均などの長い時間スケールを調べる場合、0.6度の気温上昇は有意に大きい振幅として分類されること

がわかった。

気温上昇の要因としては、水平熱輸送と放射の影響が主たる候補である。そこで、関東地方でそれぞれについて検討を行った結果、放射のみに有意な応答が同定された。この放射は、短波と長波から成り、それぞれ上向きと下向きの成分、すなわち4成分で構成される。そこで、これら成分間の比較・検討を行ったところ、下向き長波放射のみが関東地方で有意な応答を示すことがわかった。この下向き長波放射の増減は、雲量と水蒸気の2変量を主に反映する。ただ、雲量については関東地方で有意な信号が得られなかったので、水蒸気に焦点をあてることにした。その結果、東海沖沿岸昇温が発生するときほど関東地方で水蒸気が増え、領域平均で約2.3mm増加することがわかった。水蒸気は強力な温室効果気体であるため、その増加が下向き長波放射の増加、および気温上昇に寄与した可能性が指摘される。そこで、気温上昇への水蒸気の影響を評価するためにAllan et al. (2004)を参考に診断解析を行った。誌面の都合上詳細は割愛するが、診断解析の結果、関東地方での水蒸気量増加(2.3mm)に伴う気温上昇は約0.42度と見積られ、この数値は実験で得られた気温上昇の約7割相当であった。続いて、関東地方への水蒸気輸送過程を明らかにするために、水蒸気フラックスを算出し、その振る舞いを調べた。図3bは大気下層でのフラックス差を表している。この図より、沿岸昇温が起こる時期には、東海沖から関東地方にかけて水蒸気が輸送されている様子が明白である。なお、対流圏内の他の高度や鉛直積分値を用いても同様の分布が得られることは確認してある。続いて、関東に輸送される水蒸気の供給源を同定するために蒸発量を調べた。ここでは蒸発量の指標として潜熱フラックスを使用した。解析の結果、沿岸昇温域ほど蒸発が活発であることがわかった(図3c)。以上より、関東地方の気温上昇のメカニズムとして、大蛇行に伴う東海沖沿岸昇温により蒸発が盛んになり、関東地方に流れこむ水蒸気が増加し、その結果、局所的温室効果による地表面への下向き長波放射の増加を通じて気温が上昇するという解釈を得た。

気温上昇をもたらした水蒸気は湿度上昇にも寄与

する。それゆえに、関東地方は暑い夏になるだけではなく蒸し暑い夏になることが予見され、この蒸し暑さは日々の暮らしで感じる不快さに関係する。そこで、Kinouchi et al. (2021)に基づいて気温と湿度からなる不快指数を計算し、ほとんどの人が不快に感じる80以上の日を不快日としてその日数を比較した。実験結果としては、沿岸昇温時ほど太平洋側の都市で不快日が増え(図3d)、関東地方では沿岸昇温があるときの不快日は13.1日で、沿岸昇温がないときに比べて約2倍弱も増加することがわかった。つまり、沿岸昇温、すなわち、大蛇行が発生すると関東地方は不快な気候になることを表している。

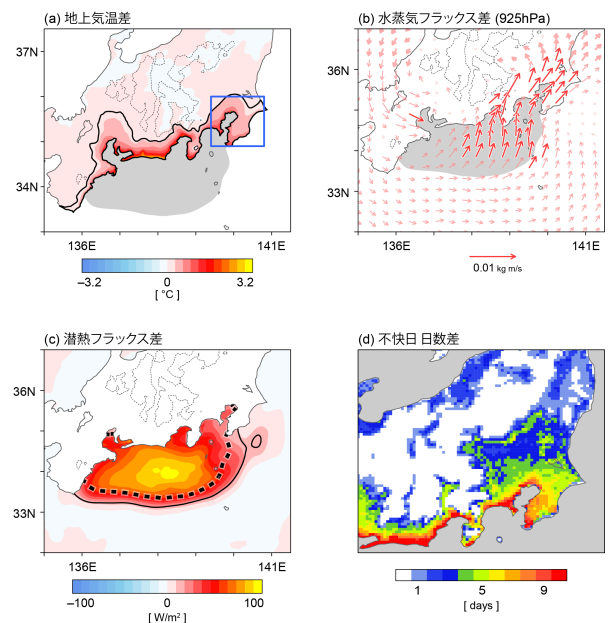


図3. (a) 沿岸昇温実験と非昇温実験の地上気温差。東海沖の灰陰影は実験境界値として配置した沿岸昇温域を、黒実線は90%信頼区間で有意な領域を表す。(b, c, d) (a)と同様、ただし、925hPa面高度水蒸気フラックス差、潜熱フラックス差、不快日の日数差をそれぞれ示す。なお、(c)の黒点線は(a)の灰領域と同様に沿岸昇温域を表す。

一連の研究により、関東・東海沖水温、すなわち、大蛇行に伴う分岐流による沿岸昇温が日本、とくに関東周辺の夏の気候に影響を及ぼすことが明らかになった。一方で、日本の夏季気候は、Pacific-Japan (PJ) パターンやWest Asia-Japan (WJ) パターン、エルニーニョ現象などの気候変動の影響も強く受けるとされている。そこで、夏季日本気候への関東・東海沖水温変動の影響の特異性を提示するために、ERA5大気再

解析データ (Hersbach et al. 2020) を用いて統計解析を行った。既存の研究で指摘されているように、PJパターンは東北地方の太平洋側 (図4b)、El Niño現象は九州地方に有意な影響を与える (図4f)。また、WJやEurope-Japan (EJ1, EJ2) パターンについては、日本への有意な影響は同定されない (図4c, d, e)。図4aは、本研究が注目した沿岸昇温についての結果である。

この図より、関東・東海沖の水温変動は、関東から東海地方にかけての太平洋側都市の気温に有意な影響を及ぼしていることは明瞭であり、本研究の実験結果を支持するものでもある。以上より、関東・東海沖水温は夏季日本気候にとって重要な要素であることが明らかになった。

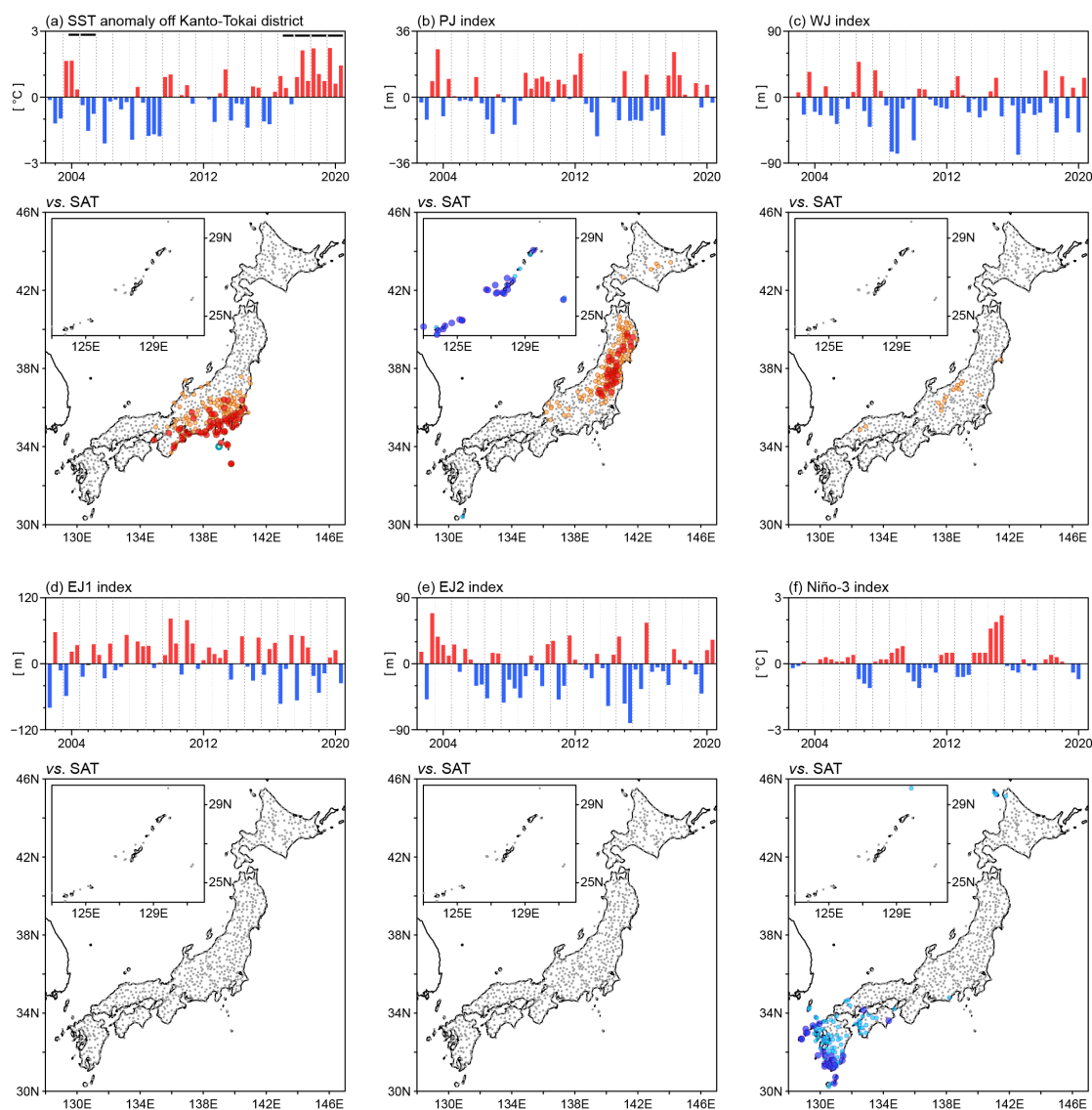


図4. 2003年から2020年までの6-8月のAMeDAS観測地上気温と(a)関東・東海沖海面水温 (139°E, 34°N)、(b) PJ指数、(c) WJ指数、(d) EJ1指数、(e) EJ2指数、(f) Niño-3 指数との相関係数分布図。赤・青丸は統計的に有意な正・負相関が得られた観測地点を表す。また、有意水準5%で有意な相関係数は濃い色、10%は薄い色で示されている。(a)の時系列中の横棒は大蛇行期間を表す。なお、各指数はWakabayashi and Kawamura (2004)をもとにERA5から算出している。

4. おわりに

近年、海流が気候に及ぼす影響に注目が集まっている。そこで本研究では、黒潮のその役割を解明するために黒潮大蛇行に伴う黒潮分岐流に起因する関

東・東海沖沿岸昇温に着目した。気象庁非静力学大気モデルを用いて沿岸昇温感度実験を実施した結果、黒潮沿岸昇温域上で蒸発が盛んになり、この水蒸気が夏季季節風により関東地方に流入し、温室効果に

に伴い下向き長波放射が増加することで気温が上昇することを明らかにした。本成果は、関東地方の夏の気候形成に果たす海からの水蒸気輸送の重要性を示したものである。なお、本研究の詳細はSugimoto et al. (2021)に記載されている。

近年、大気中の水蒸気は地球温暖化の進行とともに増加していることが指摘されている。本研究の結果を加味すると、今後、黒潮の流れ方によっては関東地方が一層厳しい夏になることが懸念される。また、本研究では関東地方に注目したが、本実験結果は黒潮大蛇行の影響が東海地方も含めた広範囲に及びうることを示している(図3a)。2020年8月17日に静岡県浜松市で国内最高気温(41.1度)が記録された。このときも沿岸昇温は発生しており、浜松沖の海水温は例年より3度以上も高い状態であった。それゆえに、この記録的猛暑の要因の一つに黒潮大蛇行の影響が示唆される。今後、熱中症のリスクの低減においては、黒潮の動向、および黒潮に伴う海水温の変化を様々な観測プラットフォームで監視し、その変動メカニズムを理解することが必要になる。

本研究の話題の中心は黒潮分岐流である。しかしながら、この黒潮分岐流の強さ、幅、厚さなどの多くのことが未だ謎に包まれている。そこで、我々の研究グループは、2021年5月末に新青丸観測航海(KS-21-9次航海)を実施した。今後、本航海で採取したデータの解析を進めるなかで黒潮分岐流やその大気場への影響について多くの知見が得られるであろう。黒潮大蛇行の継続期間は4年7ヶ月になり(2022年2月執筆時点)、観測史上1位の記録(1975年8月から1980年3月までの4年8ヶ月)が眼前に迫っている。新記録樹立の瞬間に立ち会えることを願うとともに、大蛇行の観点から気候に果たす海洋の役割についての理解の進展に資する研究が多く実施されることを期待している。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費(18K03737、19H05704)の支援により実施した。

参考文献

Allan, R. et al., 2004: Simulation of the Earth's radiation

budget by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 40-year re-analysis (ERA40). *J. Geophys. Res.*, 109, D18107, doi:10.1029/2004JD004816.

Hersbach, H., et al., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 64, 29–2049.

Hayasaki, M., et al., 2013: Response of extratropical cyclone activity to the Kuroshio large meander in northern winter. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2851–2855.

Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shiogama, and M. Arai, 2019: The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. *SOLA*, 15, 8–12.

Kinouchi, T., 2001: A study on thermal indices for the outdoor environment. *Tenki*, 48, 661–671.

Murazaki, K., H. Tsujino, T. Motoi, and K. Kurihara, 2015: Influence of the Kuroshio Large Meander on the climate around Japan based on a regional climate model. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 93, 161–179.

Nakamura, H., A. Nishina, and S. Minobe, 2012: Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan. *J. Climate*, 25, 7772–7779.

Saito, K., et al., 2006: The operational JMA non-hydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 1266–1298.

Saito, K., et al., 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 85B, 271–304.

Sugimoto, S., B. Qiu, and A. Kojima, 2020: Marked coastal warming off Tokai attributable to Kuroshio large meander. *J. Oceanogr.*, 76, 141–154.

Sugimoto, S., B. Qiu, and N. Schneider, 2021: Local atmospheric response to the Kuroshio large meander path in summer and its remote influence on the climate of Japan. *J. Climate*, 34 (9), 3571–3589.

Wakabayashi, S., and R. Kawamura, 2004: Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous summer climate in Japan. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 82, 1577–1588.

Xu, H., H. Tokinaga, and S.-P. Xie, 2010: Atmospheric

effects of the Kuroshio large meander during 2004–
05. *J. Climate*, **23**, 4704–4715.