

大アンサンブル気候実験を用いた日本の都市における高温の変化傾向 Characteristics of High Temperature Change in Japan using Large Ensemble Climate Experiments

伊東瑠衣*^{1,2}, 川瀬宏明*², 今田由紀子*²
Rui ITO, Hiroaki KAWASE, Yukiko IMADA

This study indicated that the spatial distribution of change in summertime surface air temperature due to global warming is different between mean temperature and extremely high temperature in Japan. The extreme events occur under a two-tiered high-pressure system and a site-specific sea level pressure (SLP). The SLP leading the foehn-like wind changes with global warming in a different manner among sites. Thus, the regionality in the extreme temperature change appears; the increase in the temperature is large around the Pacific side of Western Japan and is small around the Sea of Japan side.

1. はじめに

高温現象は、近年、毎年のように観測記録を更新する極端な気象現象の1つである。高温現象の人間生活への影響として、農作物への影響や熱中症による死亡リスクの増大があることから、将来地球温暖化に伴って高温現象がどれほど深刻化するのかが学術的関心だけでなく社会的関心も高い。

高温現象の発生メカニズムについては、上空の高気圧の強まりと関連づけられ、すでに世界各地で調べられており (e.g., Trenberth and Fasullo 2012; Rohini et al. 2016)、日本でも 2013 年や 2018 年を対象に上層から下層までの背の高い高気圧が記録的な高温を引き起こしたとして報告されている

(Imada et al. 2014; Shimpo et al. 2019)。背の高い高気圧は近年の事例だけではなく、過去 40 年間の再解析データを用いた研究からも、夏の高温の主要要因であることが明らかにされている (Inoue et al. 2021)。さらに、地域規模の解析からは、記録的な高温の要因の1つとして、ローカルな地形由来のフェーンの寄与が指摘されている (Takane and Kusaka 2011; Nishi and Kusaka 2019)。

これらの先行研究から、高温の将来変化を明らかにするためには、全球規模から、地形を十分再現した地域規模までのマルチスケールの気候情報

が必要であり、また高温現象は低頻度事象であることから十分なアンサンブル数で構成された気候情報である必要もある。これらの課題を解決する気候情報が 2017 年に公開され (Sasai et al. 2017)、様々な極端現象の将来予測の解明に利用されている (e.g., 丸谷ほか 2018)。

本研究では、この高解像度の大規模アンサンブル情報を用いて、日本の夏の極端高温の将来予測を明らかにすると共に、先行研究で示された高温を引き起こす様々な空間規模の要因が、各地の将来予測にどのように寄与するのか、特に高温予測の地域差に着目して明らかにした。

2. 解析手法

本研究で用いる気候データは、d4PDF から NHRCM を用いてダウンスケーリングした水平解像度 5km の結果である (SI-CAT DDS5km; Sasai et al. 2017)。ダウンスケーリングの実験領域を図 1 に示す。解析に用いた気候条件は、1981 年～2010 年の気候条件に相当する過去気候条件、そして温暖化気候条件は産業革命以前の気候条件から RCP8.5 シナリオで全球平均気温 2°C もしくは 4°C 上昇した、それぞれ 2061 年～2090 年、2081 年～2110 年に相当する 2 つの条件である。1 メンバー

*1 海洋研究開発機構 rui.ito@jamstec.go.jp

Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*2 気象庁気象研究所

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

を30年間とし、全部で12メンバーの合計360年分にデータを各気候条件で解析した。さらに気候実験の検証のため、再解析データのJRA-55を境界条件として、同じ設定のNHRCMを用いて行った、1981年～2010年のダウンスケーリング実験の結果も解析した。

極端高温(TXtop)は、6月～9月の日最高気温の旬別平年値偏差の上位10%とした。この定義によって、各気候条件で4356事例が極端高温事例として抽出された。

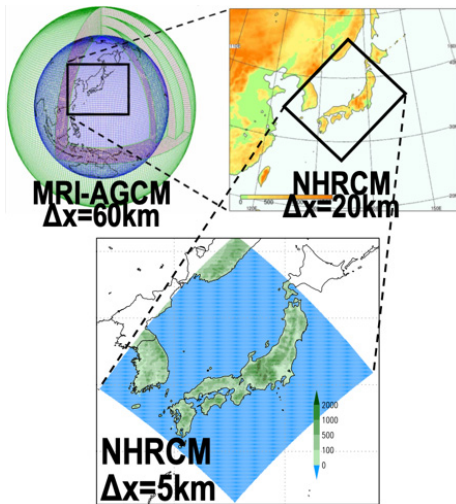


図1：ダウンスケーリング気候実験の各計算領域と解像度。NHRCMの計算範囲の色は各モデルで再現した標高(m)。

3. 結果

3.1 温暖化に伴う極端高温の変化の特徴

図2に、全球平均気温が4℃上昇した温暖化条件下における、6～9月の日平均気温(ΔTAS)、日最高気温(ΔTX)、そして極端高温(ΔTXtop)の変化を示す。ΔTASとΔTXの空間分布はよく似ており、低緯度地域よりも高緯度地域で気温上昇は大きく、また中央アルプスなどの山岳域でも上昇は大きい(図2a, b)。この空間分布の特徴は、IPCCで報告される地球温暖化の一般的な気温変化の空間分布と一致しており(IPCC AR6 2021; Lee et al. 2021)、主に地球温暖化の熱力学効果による気温変化の特徴を示している。

一方、ΔTXtopは、ΔTASやΔTXとは異なる空間分布を示す(図2c)。日本海側で気温上昇は小さく、それに比べて、主に西日本の太平洋側で上昇は大きい。図2d, eに、平均気温の上昇に対する日最高気温と極端高温の上昇の違いを示す。これらの図から、ΔTXtopが示す気温変化の太平洋側

と日本海側のコントラストがより明瞭になり、平均気温、つまり地球温暖化の一般的な特性とは異なる地域分布で極端高温は上昇する。

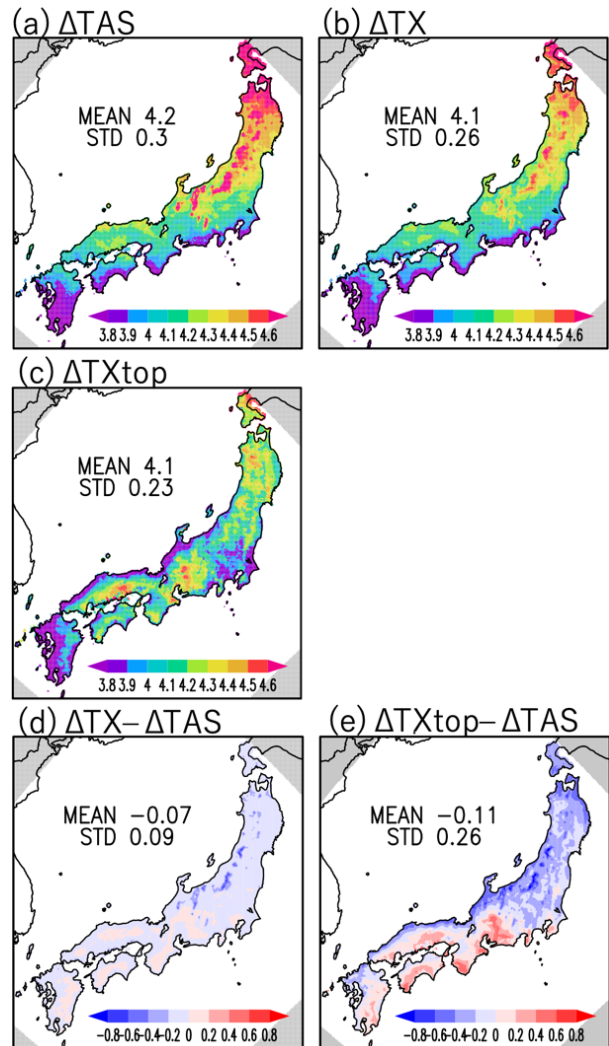


図2：全球平均気温4℃上昇時の地上気温変化(°C)。各図内の数値は、シェード部分の平均値(MEAN)と標準偏差(STD)。(Ito et al. 2022から引用)

3.2 現在気候条件での極端高温の環境場

極端高温の将来変化の特徴的な分布の要因を明らかにするため、まずは現在気候の結果を用いて、極端高温の発生の環境場について示す。

図3は、新潟と宮崎のTXtop時におけるZ200とT850の平年偏差の合成図である。どちらの事例でも上層では日本全体を覆う高気圧偏差が卓越する(図3a, b)。Z200の東西風速を見ると、この高気圧偏差の位置で北へ曲がる傾向が見られ、亜熱帯ジェットの高気圧偏差の北への蛇行に起因して高気圧偏差が生じていた。下層では、新潟と宮崎の上空に高温の気塊が広がる。高温気塊の中心位置が、新

潟では北海道付近に、宮崎では西日本付近に存在して両者の間で異なるものの、どちらの高温気塊も日本上空に広く分布している。よって上層から下層まで気温は高い傾向であった。

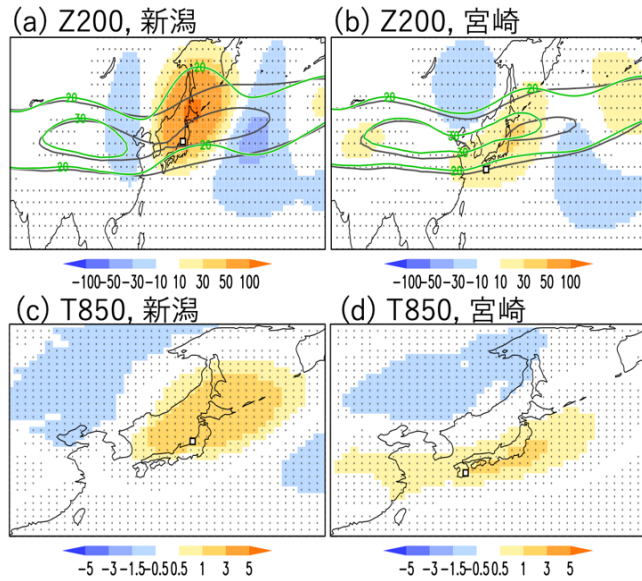


図3：新潟と宮崎の極端高温事例の (a, b) Z200 (m) と (c, d) T850 (K) の年偏差。点は偏差が統計的有意な箇所。(a, b) コンターは東西風速で、緑が極端高温事例、黒が平年値。(Ito et al. 2022 から引用、一部変更)

図4には、地上付近の気圧配置に関する海面更生気圧 SLP について、図3と同様、新潟と宮崎の TX_{top} 時の分布を示す。Z200 と T850 とは異なり、2つの事例の間で空間分布の明瞭な違いが確認できる。それぞれ対象地点の両側に高気圧偏差と低気圧偏差のダイポールパターンが現れる。新潟では地点の北側に高気圧偏差、宮崎では南側に高気圧偏差で、低気圧偏差はそれぞれその逆の位置に生じる。このダイポールのパターンは、各地点の背後の山からの風を促すパターンであり、地上付近では、いわゆるフェーンを促す場になっていた。

これらの各地点の高温時における上層から地上近くまで特徴は JRA-55 からのダウンスケーリング実験の結果からも確認した。

したがって、d4PDF の気候実験でも、近年の高温現象で確認される、二段重ねの高気圧と地上付近のフェーンが極端高温の発生要因であることが確認できた (Shimpo et al. 2019; Takane et al. 2017; Takane and Ito 2021)。そして、地上付近の SLP パターンが地点間で異なることから、 ΔTX_{top} の地域

分布は SLP パターンの温暖化に伴う変化が寄与していることが分かり、次節では SLP の将来変化、そして ΔTX_{top} との関係性を明らかにする。

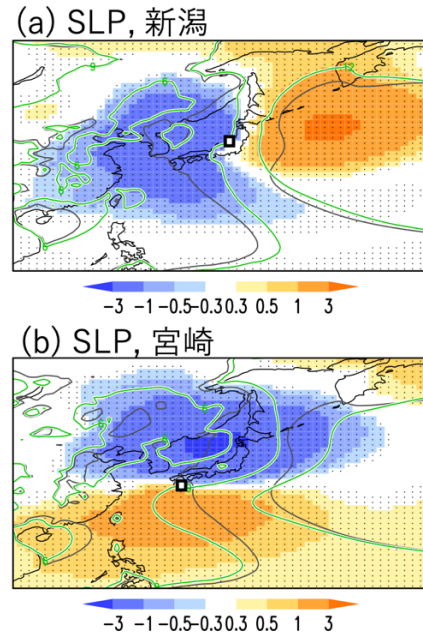


図4：新潟と宮崎の極端高温事例の SLP の年偏差。点は偏差が統計的有意な箇所。(Ito et al. 2022 から引用、一部変更)

3.3 SLP 変化と極端高温の関係

温暖化に伴う SLP 変化と ΔTX_{top} の関係を調べるため、TX_{top} の発生に寄与する SLP パターンの指標化をおこなった。その手順を以下に示す。

- (1) 現在気候条件で、対象地点の TX と SLP の間で空間相関 (SCOR) を求める。
- (2) SCOR の絶対値が 0.1 より大きい領域を抽出する。
- (3) 過去、全球2度上昇、全球4度上昇の3つの気候条件のそれぞれで、SLP の気候平均場 (SLP_c) もしくは TX_{top} 時の平均偏差場 (SLP_x) を使って、(2)で抽出した2領域での SLP 差を求める (それぞれ dSLP_c、dSLP_x と定義)。

dSLP_c と dSLP_x は水平気圧勾配であり、値が大きいほど勾配は大きくなって、フェーンを促すパターンが強化することを表す。

3つの気候条件で求めた dSLP_c および dSLP_x と ΔTX_{top} との関係について、14 地点について調べた結果を図5に示す。なお、縦軸の極端高温変化 ΔTX_{top} は ΔTAS との差で示す。まず図5aに示す dSLP_c との関係を見ると、赤で示した太平洋側の地点では、宮古や熊谷を除いて、温暖化とともに

dSLPc が大きくなる、つまりフェーンを促すパターンが強化し、 ΔTX_{top} は大きい。全球気温 4 度上昇時の SLP の気候平均場の変化を見ると、日本の南の海上で高気圧性循環が強まることが予測され、日本では南西風変化～西風変化が強まる。この風変化は太平洋側の地域にとってはフェーンを促す風であることから、太平洋側の地域では極端高温の上昇が相対的に大きくなったと考えられる。図 5 a の青で示した日本海側の地点については、パターンはやや弱いかほぼゼロで SLP の気候平均場変化との関係は、太平洋側の地点と比べて弱い。

続いて、図 5 b に示す極端高温時の SLP である dSLPx の変化と極端高温の変化を見ると、太平洋側の地点については dSLPx の変化は小さい一方、日本海側の地点については減少傾向が見られ、フェーンの弱まりと極端高温の上昇が抑えられる関係が見られる。新潟の最高気温上位 10 位の天気図を確認すると、どの事例でも図 4 a に示した低気圧偏差場には台風が存在していた。つまり、日本海側の地点の極端高温の変化が dSLPx の変化と関係づけられるのは、台風のような一過性の現象で極端高温が発生しているためである。Yoshida et al.

(2017) では、d4PDF の解析から、北太平洋域での熱帯低気圧の発生頻度は、温暖化に伴い減少傾向であると示されており、日本に接近する台風の減少が、日本海側の地点の極端高温の上昇の抑制にも繋がったと考えられる。

太平洋側と日本海側の極端高温変化をもたらす背景場の違いは、各地域の高温予測の不確実性の違いにも寄与する。太平洋側の地域に高温強化をもたらす日本の南海上の高気圧性循環は、CMIP5 のマルチモデル平均による予測でも同様の傾向を示している (Ito et al. 2020)。さらに CMIP6 の予測ではモデル間のばらつきが低減し、かつ MRI-AGCM の予測に近づくことを確認した。つまり、太平洋側の高温の上昇は予測不確実性が小さい。一方、日本海側の地域に高温抑制をもたらす台風予測は、IPCC AR6 の報告から未だ不確実性は残るとされており (IPCC 2021)、これに伴い日本海側の高温予測も左右されることになる。

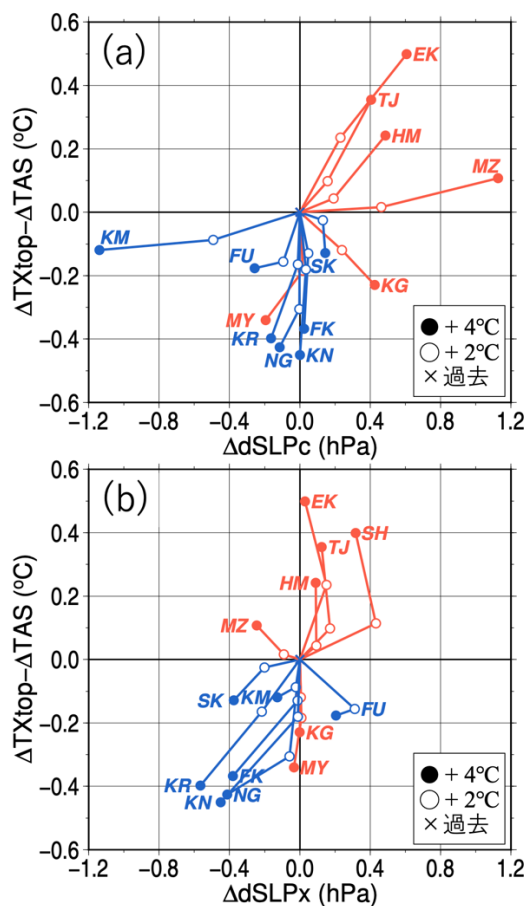


図 5 : SLP 変化と極端高温の関係。(a) SLP の気候平均場 ($dSLP_c$) との関係。(b) 極端高温時の SLP 気候偏差場 ($dSLP_x$) との関係。赤は太平洋側の地点、青は日本海側の地点。(Ito et al. 2022 から引用、一部変更)

MY: 宮古、KG: 熊谷、HM: 浜松、TJ: 多治見、SH: 白浜、EK: 江川崎、MZ: 宮崎、NG: 新潟、KN: 金沢、FK: 福井、KR: 倉吉、SK: 境、FU: 福岡、KM: 熊本。

4. まとめ

都市を含めた日本の夏の極端高温について、温暖化に伴う変化の特徴を調べた。その結果、極端高温の変化は、平均気温変化の空間分布とは異なる地域分布を示すことを明らかにした。地球温暖化に伴う極端高温の変化は、主に西日本の太平洋側の地域では平均気温の上昇よりも上昇が大きく、日本海側の地域では小さくなる。このような地域差の特徴は、地上付近の気圧配置の変化が関係しており、それぞれの地域にフェーンをもたらす環境場の将来変化に応じて極端高温の変化に地域差が生じる。太平洋側の地域については、温暖化に伴う気候平均場の変化として、日本の南海上で高気圧性循環が強まることが予測されており、それに伴う風変化が、太平洋側の地域にとってはフェ

ーンを促す変化となるため高温が強化される。一方、日本海側の地域の高温発生には台風に伴う太平洋側から日本海側の風場が寄与する。d4PDFでは、北太平洋域での台風頻度の現象が予測され、それに伴い日本に接近する台風が減少するため、高温が抑制される。これらの背景場の違いは、その背景場の予測不確実性に依りて、地域ごとの高温予測の信頼性にも地域差をもたらす。

以上、極端高温の将来予測には、平均気温変化に見られる地球温暖化の熱力学効果だけでなく、気圧配置の変化となる力学効果が重要であることが明らかにした。

なお、本研究で明らかにした地域ごとの高温予測について、総観規模での気圧配置の変化との関係だけでは十分説明できない地域もあることを確認しており、今後の研究課題として引き続き取り組んでいる。

謝 辞

本研究は、文部科学省の地球環境データ統合・解析プラットフォーム事業および気候変動予測先端研究プログラム（JPMXD0721453504, JPMXD0722680734）の助成の下で実施した。主な解析データは、同省 SI-CAT プログラムの下、地球シミュレータ上で行った実験結果である。

参 考 文 献

- 丸谷靖幸, 原田守啓, 伊東瑠衣, 川瀬宏明, 大楽浩司, 佐々木秀孝 2018: 気候変動影響評価に向けた気候モデルおよび影響評価モデルの不確実性の評価. 土木学会論文集 B1(水工学), 74(5), 109–114.
- Imada, Y., H. Shioyama, M. Watanabe, M. Mori, M. Kimoto, and M. Ishii, 2014: The contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, S52–S54.
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2391 pp., https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf.
- Ito, R., H. Kawase and Y. Imada 2022: Regional differences in summertime extremely high temperature in Japan due to global warming. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 61, 1573–1587.
- Ito, R., T. Ose, H. Endo, R. Mizuta, K. Yoshida, A. Kitoh, and T. Nakaegawa, 2020: Seasonal

- characteristics of future climate change over Japan and the associated atmospheric circulation anomalies in global model experiments. *Hydrol. Res. Lett.*, 14, 130–135.
- Lee, J. Y., and Coauthors, 2021: Future global climate: Scenario-based projections and near-term information. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, V. Masson-Delmotte et al, Eds., Cambridge University Press, 552–672.
- Nishi, A., and H. Kusaka, 2019: Effect of foehn wind on record-breaking high temperature event (41.18C) at Kumagaya on 23 July 2018. *SOLA*, 15, 17–21.
- Rohini, P., M. Rajeevan, and A. K. Srivastava, 2016: On the variability and increasing trends of heat waves over India. *Sci. Rep.*, 6, 26153.
- Sasai, T., and Coauthors, 2019: Future projection of extreme heavy snowfall events with a 5-km large ensemble regional climate simulation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 13975–13990.
- Shimpo, A., and Coauthors, 2019: Primary factors behind the heavy rain event of July 2018 and the subsequent heat wave in Japan. *SOLA*, 15A, 13–18.
- Takane, Y., and H. Kusaka, 2011: Formation mechanisms of the extreme high surface air temperature of 40.98C observed in the Tokyo metropolitan area: Considerations of dynamic foehn and foehnlike wind. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1827–1841.
- Trenberth, K. E., and J. T. Fasullo, 2012: Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010. *J. Geophys. Res.*, 117, D17103.