

地域気候シミュレーションで見てきた将来の高温予測

伊東瑠衣（海洋研究開発機構）

1. はじめに

昨年 2023 年は、世界全体の年平均気温が観測開始以降で最高値を記録し、地球温暖化の要因とされる大気中の温室効果ガスについては、2022 年に世界平均濃度が観測史上最高を更新したと発表され（気象庁、2023 年 11 月 15 日報道発表）、加速する地球温暖化に衝撃を受けた年となった。

欧州の気候研究グループは、パリ協定で示された世界の平均気温を産業革命以前から+1.5°Cに抑える目標について、あとどれくらいで+1.5°Cに到達するかを見積もっている（<https://climate.copernicus.eu/>）。彼らの見積もりによると、2023 年の記録的な高温を含めた過去 30 年間の気温上昇トレンドを用いると、この先ほんの 10 年足らずで、+1.5°Cの世界に達し、目標としていた世界がすぐそこまで近づいていることを明らかにした。

地球温暖化に伴ってより極端化されると言われる異常気象の中で、高温現象は日本において大雨と並んで社会的関心の高い気象現象の 1 つである。夏の高温に関しては、日々の生活への影響が見え始めており、社会システムの変化が検討され、その変化に適応することが求められつつある。

私からは、日常生活で我々がまさに実感している地上付近の気温を対象に、極端な高温現象が、今後の地球温暖化の進行に伴ってどう変化するのかについて、国内の気候変化を詳細にシミュレーションした結果を使って紹介する。

2. 地域気候シミュレーション

日本の過去から現在、現在から将来の気候変化を可視化するため、全国の地域気候研究者らが協力して、国内の詳細な気候シミュレーションを大規模に実施している。すでに様々な日本の気候情報が存在するが、今回はその中の 1 つである d4PDF（地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change）と呼ばれる気候情報を用いて解析を行った結果を紹介する。d4PDF の特徴として、多数のアンサンブル実験の結果で構成されており、ここで対象とする極端な高温現象をはじめ、発生頻度の低い異常気象の解析に適している点が挙げられる。

d4PDF は、約 60 km のモデル格子を用いた全球大気モデルによる全球気候データと、その結果を元に

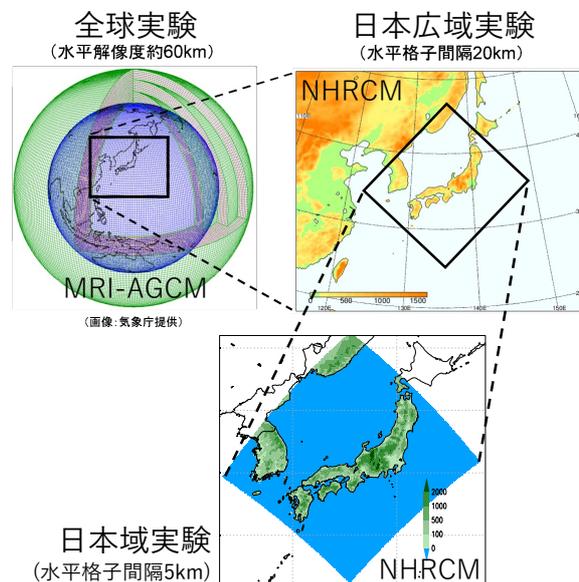


図 1 各気候実験でのシミュレーション範囲。（一部、d4PDF ホームページより）

作成された、20 km のモデル格子を用いた地域気候モデルによる日本の広域気候データで構成されている（図 1）。シミュレーションに使われる気候モデルは、全球モデルと地域モデルともに気象庁気象研究所で開発されるモデルである。我々の研究グループでは、国内のより詳細な気候情報を創出するため、同様の地域気候モデルを用いて、20 km の気候データを入力値として、さらに細かい 5 km のモデル格子を用いたシミュレーションを、特に本州を中心に実施し（Sasai et al. 2019, 山崎ほか 2019）、今回はこのデータを主な解析に用いた。なお、これらのデータは、データ統合・解析システム（DIAS）から気候予測データセット DS2022（<https://diasjp.net/ds2022/>）として公開されており、今年 1 月には同じ 5 km 分解能の地域気候モデルでシミュレーションした日本全域を網羅した気候情報も加わり、一般公開されている（Kawase et al. 2023）。

気候の将来変化をシミュレーションする将来予測実験は、温暖化実験の外部強制因子として第 5 期結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP5）の代表濃度経路シナリオ（Representative Concentration Pathways, RCP）8.5 シナリオを元を実施されている。今回、世界の平均気温が産業革命以前と比べて 4°C 上昇した条件での結果を中心に、6 月から 9 月の地

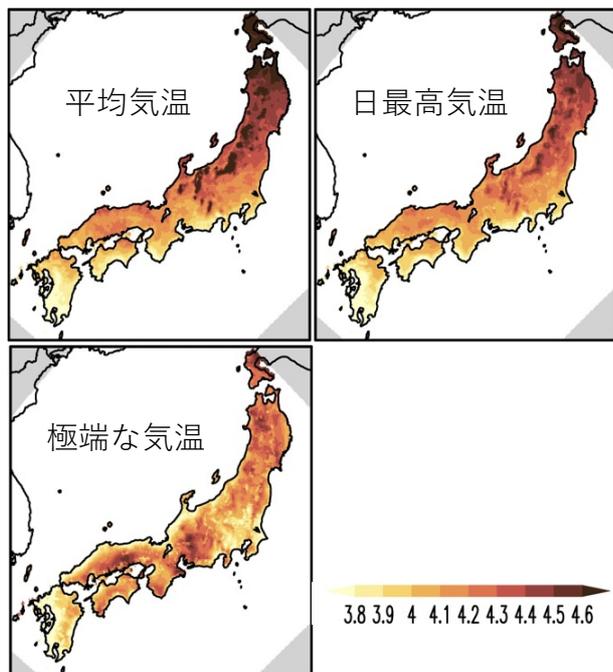


図2 世界の平均気温が4℃上昇した際の日本の気温上昇量(℃)。(Ito et al. 2022 より、一部改変)

上2mでの気温データを使って、温暖化時の日本の気温上昇の特徴を示す。ここで用いる極端な高温の定義は、日最高気温の旬別の平年値偏差で上位10%の気温を指す。

3. d4PDF が示す地球温暖化に伴う予測

3.1 地上2m気温の変化

図2に、世界の平均気温が4℃上昇した条件での平均気温、日最高気温、極端な高温に関する気温変化の空間分布を示す。平均気温については、気温上昇が高緯度地域で相対的に大きく、低緯度地域で小さいという、一般的な地球温暖化の特徴と同様の変化傾向が見られる。加えて、中部山岳域や東日本の脊梁山脈などの標高の高い地域でも、冬の積雪減少の影響によって気温の上昇が大きくなっている。日最高気温の気温変化の分布は、平均気温の分布によく類似する一方、極端な高温の分布は、平均気温の分布とは異なる。極端な高温の変化では、緯度方向の上昇量の変化は小さく、西日本の太平洋側の地域で相対的に気温上昇は大きく、日本海側で小さい特徴が見られた。つまり、地球温暖化が進行した際には、太平洋側の地域でより高温が深刻化する。なお、同様の実験システムで行われた世界の平均気温が2℃上昇した条件でのシミュレーション結果でも、同様の気温上昇の空間分布が示された。

3.2 各地域に高温をもたらす大気環境場の特徴

極端な高温が平均気温とは異なる空間分布で上昇する原因を調べるため、現在気候条件における日本各地の極端高温日での大気場の特徴を調べた。その結果、地点間で若干の分布の違いはあるものの、概ね共通して上空では大気上層から下層まで背の高い高気圧性の偏差が発生し、日本に高温をもたらす傾向を示した(図略)。一方で、地上付近の海面気圧の空間分布については地点間で異なるパターンが見られた。図3に、極端な高温が発生した日の海面気圧の空間分布について、新潟と多治見を例に示す。どちらの地点でも、それぞれの地点の両側に高気圧性偏差と低気圧性偏差が発生し、新潟では太平洋側から日本海側へ、多治見では日本海側から太平洋側へ吹く風を促す気圧配置の偏差が地上付近では発生する様子が見られた。このような気圧配置は、それぞれの地点の背後に位置する山地からの風、つまり山越え気流であるフェーンを誘発し、対象地点における気温の上昇を促すと考えられる。

したがって、極端な高温の将来変化の地域性には、各地の極端な高温日に共通して見られる上空の背の高い高気圧性偏差ではなく、各地域で特徴的な地上付近の気圧配置の将来変化に着目することが重要であることが分かる。

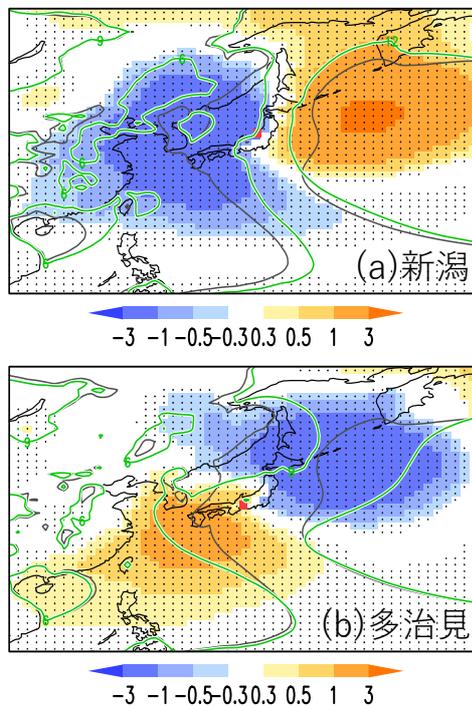


図3 現在気候条件での極端な高温日における地上気圧配置の平年偏差(hPa)。色塗りが平年偏差、黒線が平年値、緑線が極端な高温日。(Ito et al. 2022 より、一部抜粋)

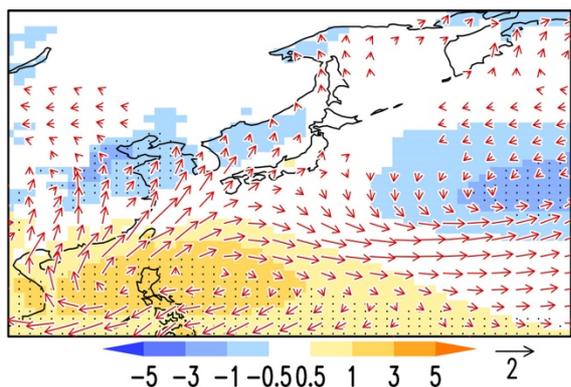


図4 世界の平均気温が4℃上昇した際の夏の地上気圧配置の変化 (hPa)。色塗りが海面気圧の変化、矢印が風の変化を示す。(Ito et al. 2022 より)

3.3 高温日の特徴づける大気環境場の将来変化

新潟の高温事例に見られる西日本付近での低気圧性偏差は、台風との関連が示唆される。実際に、新潟で観測された最高気温の上位 10 事例における地上気圧配置を見てみると、図 3a で低気圧性偏差が広がる地域には台風が存在していた。d4PDF が示す熱帯低気圧の将来変化を調べた先行研究において、北西太平洋域での強い熱帯低気圧の発生頻度は増える一方で、熱帯低気圧の発生総数は減少すると示されている (Yoshida et al. 2017)。北西太平洋域において熱帯低気圧が将来発生しにくくなれば、日本付近に接近する台風が減少することになる。これらの減少は図 3a に示す気圧パターンの発生頻度の減少につながり、その結果、新潟での極端な高温の上昇が抑制されたと考えられる。

一方、多治見の事例では、日本の南側に広がる高気圧性循環に着目すると、将来、夏の平均的な気圧配置の変化として、日本の南海上で高気圧性の循環が強まること予想されている (図 4)。夏の平均的な高気圧循環の強化が、多治見に極端な高温をもたらす気圧パターンを強化するため、多治見の極端な高温の上昇をさらに押し上げることになる。

このような新潟と多治見に見られる極端高温日の気圧配置の特徴は、太平洋側と日本海側のそれぞれの地域に広く見られ、同様のメカニズムで太平洋側と日本海側の高温の将来予測に地域差をもたらす結果となった。

3.4 将来予測の信頼度の地域差

極端な高温変化に影響を及ぼす要因の地域間の違いは、高温予測の不確実性、つまり予測の信頼度に関する地域間の違いにもつながる。

日本海側の地域では、前述の通り、高温の将来予測には台風予測が鍵となっていた。d4PDF では北西太平洋域における熱帯低気圧の発生頻度が減少すると予測されているものの、世界の様々な気候モデルによる予測結果をまとめた報告書である IPCC AR6 (気候変動に関する政府間パネル 第 6 次評価報告書) では、この地域における熱帯低気圧の発生頻度の予測には不確実性が残ると記されている。したがって、d4PDF では日本海側の高温上昇が将来抑えられると示したものの、台風予測の不確実性に伴って、この高温予測の信頼度は未だ高いとは言えない。

一方、太平洋側の地域では、将来、日本の南の海上で高気圧性循環が強まることで、これらの地域の高温が深刻化することが示された。夏の平均的な気圧配置の変化を d4PDF だけでなく世界各国のモデル予測を用いて調べた結果を図 5 に示す。図は、日本周辺の夏の気圧配置変化の空間分布について、モデル間の類似度をプロットのばらつき具合で表して

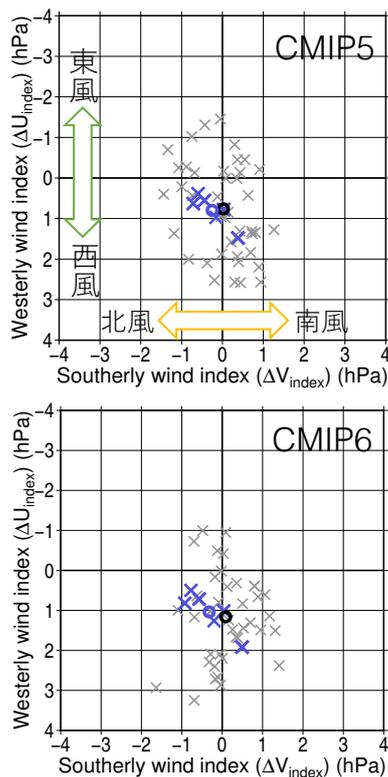


図 5 風変化の指標で概算した世界の気候モデル (CMIP5, CMIP6) が予測する日本周辺の夏の地上気圧配置の変化。灰×が世界各国のモデル、黒丸がそれらの平均。青×が d4PDF の少しづつ条件の異なる予測結果、青丸がそれらの平均。上段と下段で青のプロットは同じ。(Ito et al. 2020 および Ito et al. 改訂中より)

いる。x 軸と y 軸に示す南北風と東西風の 2 つの風の指標を使って、日本上空でどの風向からの風が強まるかを定量化することで、各モデルの空間分布をおおよそ把握できるようになっている（手法の詳細は Ito et al. (2020) を参照）。d4PDF の結果は、原点から下方に位置する西風変化を示しており、これは図 4 に示した日本の南で高気圧性循環が強まることによる日本での西風強化と対応する。同様に CMIP5 の結果を見ると、各モデルの結果は原点を中心に四方にばらつき互いに異なるため、空間分布の予測には不確実性があることが分かる。一方、第 5 期から第 6 期 (CMIP6) へ予測情報が更新されると、相対的に図の下方に分布が偏り、d4PDF の結果に各国の結果が近づく傾向が見られる。したがって、日本の南の高気圧性循環が強まる将来予測は、近年の気候情報の更新によって予測不確実性が減少し、これに伴って太平洋側の地域における高温が将来深刻化する可能性が高まったとすることができる。

4. イベントアトリビューション

地球温暖化に伴う高温の変化については、将来予測だけでなく、最近の高温イベントについても科学的理解を進めている。とりわけ人為起源の温暖化の影響を定量的に評価するイベントアトリビューション (Event Attribution, EA) は国内外で活発に行われている。国内の高温イベントに対して行なった EA では、2022 年の猛暑について、初めて地上 2 m での気温に対する温暖化寄与を定量化し、日常生活に密接に関係する気象要素には、すでに温暖化の影響が顕在化していることを明らかにした (Ito et al. 2023)。以下に詳細を紹介する。

4.1 2022 年の猛暑イベント

2022 年は 6 月下旬から 7 月初旬にかけて、日本上空では高気圧が非常に発達し、記録的な猛暑となった。東日本から西日本にかけて高温が観測され、特に首都圏では、平年を 10°C 以上も上回る最高気温を記録し、東京では 35°C を超える猛暑日が 9 日連続で発生するなど、厳しい暑さとなった。

4.2 地域気候モデルを用いた EA

人為起源の温暖化寄与を評価するため、前述の気候予測実験と同じ実験システムを使って、対象の 2022 年の夏の大気場の再現実験が行われた。ここでは起こり得た気象場の可能性を 100 パターン作成す

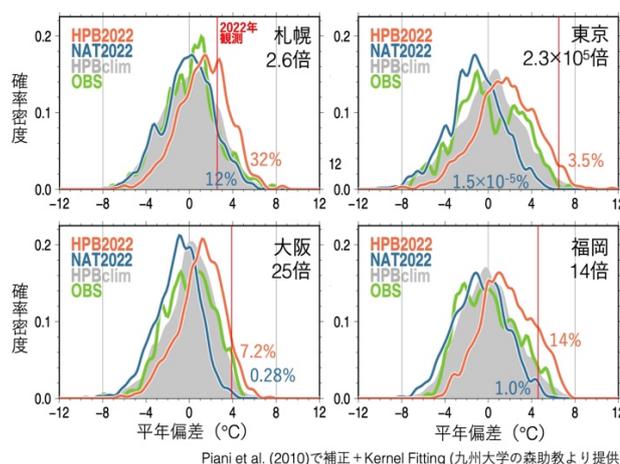


図 6 平均気温の密度分布。HPB2022 が 2022 年の再現実験、NAT2022 がその非温暖化実験の結果で、HPBclim と OBS がそれぞれ平年値の実験結果と観測値である。赤線が対象イベントの期間平均気温で、この気温を超える確率が各気候条件での高温発生確率であり、それぞれ数値として図内に示す。(気象年鑑 2024 年版より)

るアンサンブル実験を、観測データに基づく 2022 年の再現条件と、この条件から人為起源の効果のみを取り除いた非温暖化条件のそれぞれに対して実施し、これらの実験結果の比較から温暖化の寄与を算出した。

図 6 には、2022 年の猛暑時における主要 4 都市での平均気温の発生確率に関する密度分布を示す。今回のイベントで特に高温を観測した東日本から西日本にかけての東京、大阪、福岡では、2022 年の条件でも高温の発生確率は低く、稀な現象であったことが分かる。さらに人為起源の温暖化の影響がない条件では、特に連日猛暑日となった東京では高温の発生確率はほぼゼロ%で、人為起源の温暖化の寄与がなければ 2022 年の猛暑が発生する可能性はほぼなかったことを明らかにした。

5. おわりに

今回、国内の特に気温が非常に高くなる高温イベントについて地球温暖化との関係を示した。高温現象を表す別の定義である熱波は、気温が高くなることに加えて、時間方向の連続性が特性として加わるため、その将来予測については改めて現在鋭意解析中である。

国内の高温研究は応用分野への展開も進んでいる。環境省と気象庁は 2023 年から熱中症警戒アラート

の運用を開始し、今年から熱中症特別警戒アラートの発表を開始した。このアラートの判断基準に用いられる暑さ指数について、将来 30 年もしくは 50 年に 1 度の極端な値がどれくらいの頻度で出現するのか、どこまで深刻化するのかといった観点で研究が進行中である。高温による健康被害の対策はすでに喫緊の課題であり、我々は健康被害の軽減に向けて気候学の立場から貢献しつつ、将来変化も含めて理解を進めているところである。

謝辞

本成果は、文科省気候変動予測先端研究プログラム (JPMXD0722680734、JPMXD0722680395)、地球環境データ統合・解析プラットフォーム事業 (JPMXD0721453504) の下で得られ、また環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (JPMEERF20231007) にも助成いただきました。また一部、科研費 23K00982 の成果も含まれます。

参考文献

- Copernicus Products: <https://climate.copernicus.eu/how-close-are-we-reaching-global-warming-15degc>.
- Ito, R., H. Kawase, 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, T. Nakaegawa 2020: Seasonal characteristics of future climate change over Japan and the associated atmospheric circulation anomalies in global model experiments. *HRL*, 14, 130–135.
- Ito, R., H. Endo, T. Ose, T. Nakaegawa: Future atmospheric surface circulations and their impact on the regional climate of Japan based on the CMIP6 projections and observed statistics. (改訂中)
- Kawase, H., and Coauthors 2023: Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario. *JGR: Atmospheres*, 128.
- Sasai, T., and Coauthors 2019: Future projection in extreme heavy snowfall events with a 5-km large ensemble regional climate Simulation. *J. Geophys. Res.*, 124, 13,975–13,990.
- Yoshida K, M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami, M. Ishii. 2017: Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations.

- Geophysical Research Letters* 44: 9910–9917.
- 山崎剛, 佐々井崇博, 川瀬宏明, 杉本志織, 大楽浩司, 伊東瑠衣, 佐々木秀孝, 藤田実季子, 2019: 5km 力学的ダウンスケーリングデータセット (SI-CAT DDS5TK) の概要. *シミュレーション*, 38(3), 145–149.
- 気象庁 2023: 世界の主要温室効果ガス濃度は観測史上最高を更新. 気象庁, 2023 年 11 月 15 日
https://www.jma.go.jp/jma/press/2311/15b/GHG_Bulletin_19_20231115.html
- 気象年鑑 2024, (一財) 気象業務支援センター, 263pp.