

## 日本の極端高温と気候変動

今田由紀子（東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系）

### 1. はじめに

地球温暖化の進行とともに日本で発生する極端高温も増加することが予想される。しかし、個々の極端高温イベントの主要因は、ジェット気流の蛇行による下降気流の強化など、地球温暖化とは別に存在する。このような、大気に内在する偶発的な「ゆらぎ」と比較したときに、地球温暖化を含む地球規模の気候変動の影響はどの程度のものなのだろうか？

このような疑問に答えるためには気候モデルを用いた大規模アンサンブルシミュレーションが不可欠である。本講義では、気候モデルの基礎及び最新の大規模アンサンブルシミュレーションについて解説を行うとともに、その結果から見えてきた過去から将来までの日本の極端高温の変化傾向について紹介する。

### 2. 地球温暖化と日本の極端高温の現状

昨年（2023 年）の日本は、7～9 月の月平均気温が連続して記録を更新し、我々の生活が直接的な影響を受けたことは記憶に新しい。2023 年の極端高温は日本に限ったことではなく、世界各地でも熱波が頻発し、国連のアントニオ・グテーレス事務総長の「地球沸騰化」という表現が話題になった。図 1 は、1890 年以降の世界と日本の年平均気温偏差の実況値を時系列で示したものである。世界平均気温は、100 年当たり 0.76 度のペースで上昇し続けている。日本の年平均気温は、世界平均気温に比べてスピードが速く、100 年当たり 1.35 度のペースで昇温している。2023 年の記録（グラフの一番右端のデータ）は、世界・日本ともに温暖化トレンドの傾きから大きく上に飛び出しており、過去の記録に大差を付けて記録を更新していることが分かる。このような極端な状況が作り出される背景には、大気と海洋に内在する何らかの極端な「ゆらぎ」が、1 つもしくは複数重なっていたと考えられ、現在世界中の研究者がその原因の解明に乗り出している。

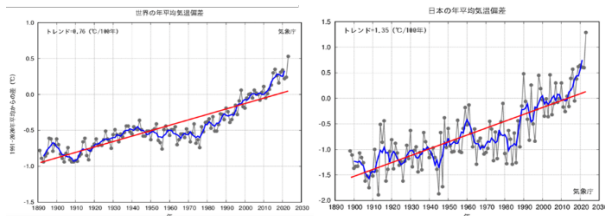


図 1 細線（黒）：各年の平均気温の基準値からの偏差、太線（青）：偏差の 5 年移動平均値、直線（赤）：長期変化傾向。基準値は 1991～2020 年の 30 年平均値。左：世界平均、右：日本平均。気象庁ホームページより。

### 3. 異常気象をシミュレーションする仕組み

#### 3.1 気候モデルとは

気候変動などの長期シミュレーションに利用される気候モデルには、大気海洋大循環モデル（Atmosphere and Ocean General Circulation Model: AOGCM）や地球システムモデル（Earth System Model: ESM）などがある。AOGCM は大気や海洋単体で動かすことも可能である。これらのモデルでは、大気と海洋を細かい格子に分割し、その一つ一つで流体力学の連立偏微分方程式を解くことで、各気象要素の次の時間ステップへの時間発展を見積もることができる。さらに、流体力学の基礎方程式に加えて、格子サイズでは表現することができない細かいスケールの現象は「パラメタリゼーション」と呼ばれる物理モデルを導入することで表現する。その代表的なものが雲である。パラメタリゼーションは、表現しようとする物理現象のプロセスや経験則に基づいて開発される。近年の AOGCM には、大気と海洋だけでなく、陸面、海氷、エアロゾル輸送モデル、大気内の化学反応モデルなどが追加され、高度化が進んでいる。ESM ではさらに、生態系を含む炭素循環を表現できるように複雑化・多様化が進んでいる。

気候モデルを動かすためには、初期値と境界条件を適切に与える必要がある。人間活動に伴う外的要因（温室効果ガスやエアロゾルの排出）は境界条件としてモデルに与えることになる。また大気と海洋の外側で起こる自然現象（太陽活動、火山活動）の影響についても、境界条件として与える。特に地球温暖化の数値シミュレーションは、与えた境界条件を満たすような連立微分方程式の解を求める境界値問題であるので、境界条件の与え方は結果に大きく影響する。一方、境界値問題においては、初期値の情報は重要な意味を持たないため、多くの地球温暖化シミュレーションでは現実的に起こりうる範囲内で初期値をランダムに与えている。

#### 3.2 大規模アンサンブルシミュレーション

地球温暖化の数値シミュレーションでは、「アンサンブル」という概念が重要になってくる。前節でも触れた通り、地球温暖化のシミュレーションでは、境界条件に対する純粋な応答成分を取り出すことが第 1 の目的である。しかし、一本の長期シミュレーションの結果には、境界条件に対する応答に加え、自然が自発的に作り出す内部変動成分が含まれている。この内部変動成分を除去し、純粋な強制応答を

取り出すためには、初期値をランダムに振った大量のシミュレーションを並行して実施し、偶発的に発生する自然の内部変動をなるべくたくさんの種類生成する。これらの平均を取ることで、ランダムな内部変動成分は相殺し、純粋な境界条件に対する強制応答成分を取り出すことができるようになる。

一方、一つ一つのアンサンブルメンバーが作り出す結果の幅は、「不確実性」と呼ばれる。不確実性の成因には様々な種類があるが（自然変動の幅、モデルの違いによる幅、境界条件に与えるシナリオの違いによる幅 etc.）、同一のモデルで初期値を振ることによって生まれるアンサンブルメンバーの幅は、現実にも起こり得る自然変動の幅を表している。この幅の中で、両端付近に現れているメンバーこそが、異常気象を再現しているメンバーになる。つまり、気候モデルを用いて異常気象を調べるためには、なるべくたくさんのアンサンブルシミュレーションを実施し、その中でも特に極端な状況を再現したメンバーに注目することになる。

現在、日本の気象・気候に特化した大規模アンサンブルデータセットとして広く活用されているのが、文部科学省・気候変動リスク情報創生プログラムの下で 2015 年に完成した「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（d4PDF）」である（Mizuta et al. 2017）。d4PDF には、1951 年から現在までの過去再現実験のほか、非温暖化実験、2°C 昇温実験、4 度昇温実験が収録されている（詳細は図 2 を参照）。次章では、d4PDF を活用して日本の猛暑を調べた結果を紹介する。

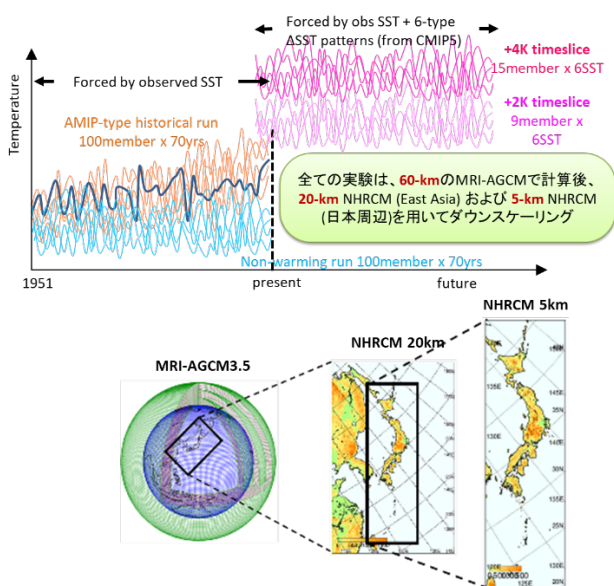


図 2 d4PDF のシミュレーションの概要。

### 3.3 イベント・アトリビューション

近年、日本では猛暑や大雨が頻繁に発生しており、地球温暖化の影響が疑われているが、冒頭で述べた通り、目の前で起こった実際の極端なイベントに対して温暖化の影響を定量的に評価することは容易ではない。そこで、前節で紹介した大規模アンサンブルシミュレーションを駆使することで、一つの異常気象に対する気候変動の影響を評価する手法が考案された。このアプローチは「イベント・アトリビューション」と呼ばれ、特に大型計算機の性能が飛躍的に向上した 2010 年頃から盛んに行われるようになった（Pall et al. 2011）。イベント・アトリビューションでは、人間活動に伴う地球温暖化が進行している現実的な境界条件を与えた場合と、人間活動による産業化がなかったと仮定した仮想の境界条件を与えた場合の 2 種類の大規模アンサンブルシミュレーションを活用する（図 2 の橙色および水色の実線）。実際に異常気象が発生した時期に注目し、全アンサンブルメンバー中の何メンバーで似たような異常気象が発生したかを数えることで、注目する異常気象の発生確率を見積もることができる。温暖化あり・なしの 2 種類のシミュレーション群の発生確率に明らかな差が見いだされれば、その違いは人間活動に伴う地球温暖化によるものと照明することができる。次章では、近年日本で発生した猛暑イベントに対してイベント・アトリビューションを適用した例を紹介する。

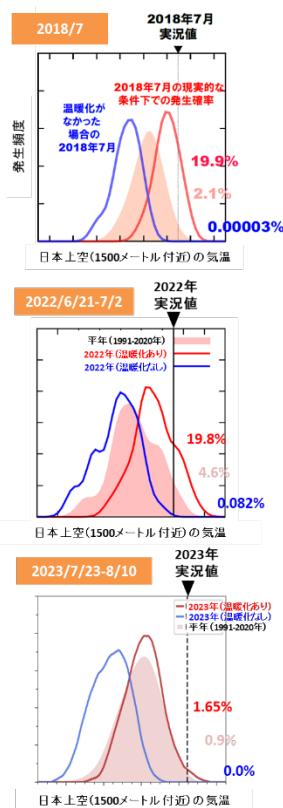


図 3 実線は、2018 年 7 月（上段）、2022 年 6 月 21 日から 7 月 2 日（中段）、2023 年 7 月 23 日から 8 月 10 日（下段）の日本域上空約 1,500 m の気温の確率密度分布（PDF）。赤線の PDF は現実の条件下におけるモデル実験、青線の PDF は地球温暖化が起こらなかった想定でのモデル実験。陰影で示した PDF は平年値の期間（2020 年以前は 1981～2010 年、2021 年以降は 1991～2020 年）の 30 年分のデータから作成。

#### 4. 日本の猛暑と気候変動の関係

##### 4.1 過去から現在までの気候変動の影響

ここでは、2018年7月、2022年6月下旬から7月初め、および2023年7月下旬から8月上旬の日本の猛暑を例に、過去から現在までの気候変動がどの程度それらのイベントの発生確率に影響を及ぼしていたかを調べた結果を紹介する。

日本付近で猛暑が深刻化する背景には、この時期に発達する2種類の高気圧が例年以上に張り出して日本の上空を覆う状況が多く、この事例に共通して見られる。2種類の高気圧とは、北西太平洋で発達する大気下層の太平洋高気圧と、チベット高原を中心として広範囲に発達する対流圏上層のチベット高気圧である。これらが猛暑の直接的な引き金であることは間違いないが、このような背景の下、地球温暖化はどの程度影響を与えていたのだろうか？

各イベントについて、d4PDF を用いて評価した結果を図3に示す。いずれに事例でも、地表付近の平均気温は統計開始以来1位を記録し、同じく日本上空の気温も記録を更新していた。2018年および2022年の事例では、現実の海面水温の状況などを条件として与えた100本の実験では、日本上空に2種類の高気圧が張り出しやすい状況が作り出されたことで、観測されたような猛暑の発生確率は約20%（およそ5年に1回の頻度）にまで増加していた。一方、2023年の事例では、海洋の様々な条件が複雑に重なり合った結果、たとえ地球温暖化が進行している場合でも発生確率は1.65%（およそ60年に1回）と非常に極端な現象であったことを示している。

次に、地球温暖化が起こらなかったと仮定した場合の100メンバーの実験結果を見てみる。図3のいずれのグラフにおいても、非温暖化実験から得られたPDFは大きく低温側に移動しており、2022年の事例では、実際の気温の実況値を超える確率は0.082%（およそ1200年に1回）、地球温暖化によって発生確率が240倍になっていたと見積もられた。2018年および2023年の事例では、観測された気温を超える確率はほぼ0%となり、人間活動による地球温暖化がなければ、これらの記録的な猛暑は起こり得なかったことを意味している。一見当たり前の結果のように感じるかもしれないが、「地球温暖化がなければほぼ0%」という数字は深刻な意味を持つ。一昔前までは、地球温暖化がなかったと仮定した世界でも、高気圧が極端に発達すれば到達できる気温の範囲に留まっていた事例がほとんどであった。その範囲に収まらないほどの猛暑事例が出現するようになったのはここ数年のことである。

##### 4.2 将来変化

d4PDF を用いると、地球温暖化の進行とともに日本の猛暑地点数がどれくらいのペースで増加していくかを推定することも可能である。図4は、横軸に地球平均気温、縦軸に日本の猛暑地点数を取って、d4PDFの非温暖化実験、過去再現実験、および2°C昇温実験の結果シミュレーション結果（アンサンブルメンバーの頻度分布）をプロットしたものである。灰色のエリアは、非温暖化実験と過去再現実験の過去の変化傾向を外挿して得られる将来変化の幅であり、2°C昇温実験の結果の幅とよく一致していることが分かる。

図4の結果から、日本の猛暑地点数は地球全体の温暖化に大して指数関数的に増加していくことが示唆され、例えパリ協定の目標である2度目標が達成されたとしても、日本の猛暑地点数は平均で4000地点以上、1.5度目標が達成された場合でも3000地点以上と推定され、これは現在の平均的な猛暑地点数と比較するとそれぞれ約1.8倍、1.5倍に相当する。1.5度昇温の世界は目前に迫っており、地球温暖化の緩和策を加速する必要性に加えて、猛暑に対する備えをより一層強化することが急務である。

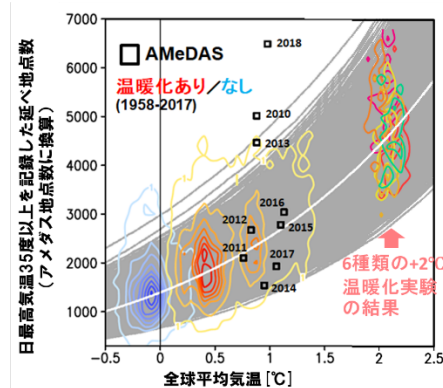


図4 全球平均気温の昇温量（横軸）と日本の年間の延べ猛暑地点数（縦軸）で張られる平面上に、d4PDFのアンサンブルメンバーの頻度分布をプロットしたもの。寒色系は非温暖化実験、暖色系は過去再現実験、6色の実線が重なっている部分は2度昇温実験の結果。

#### 5. おわりに

d4PDFの登場により、日本の極端気象現象の研究は飛躍的に発展した。領域気候モデルによる高解像度化の技術も進展し、近年では都道府県レベルの極端高温や線状降水帯を解像できるようになってきた（e.g., Ito et al. 2023, Kawase et al. 2023）。これらのデータは気候変動の分野だけでなく、水文や農業などの影響評価や応用研究の分野、さらには国や地方自治体の政策決定の現場でも実際に活用された実績が増えてきている。また近年は、異常気象の発生直後にイベント・アトリビューションの結果を公表する即時的イベント・アトリビューションが社



会から求められており、日本を含む各国が「オペレーショナル・イベント・アトリビューション」システムの開発に乗り出している (Kawase et al. 2022)。

ここでは地球温暖化と異常気象に注目して研究成果を紹介したが、d4PDF の活用法はこれだけにとどまらず、地球温暖化以外の気候変動と異常気象の関係、ローカルな異常気象とグローバルな気候の因果関係を探るグローバル研究 (Imada et al. 2020; Kawase et al. 2019)、気候極端現象の発生確率の予測可能性研究 (Imada et al. 2021) など、多様な研究にブレークスルーをもたらす可能性を秘めている。本講演が皆さんのアイデアを刺激し、新しい研究が生まれることを期待したい。

#### 参考文献

- Imada, Y. and H. Kawase, 2021: Potential seasonal predictability of the risk of local rainfall extremes estimated using high-resolution large ensemble simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL096236.
- Imada, Y., H. Kawase, H. Watanabe, H. Shiogama and M. Arai, 2019: The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. *SOLA*, 15A, 8 – 12.
- Imada, Y., H. Kawase, M. Watanabe, M. Arai, and I. Takayabu, 2020: Advanced event attribution for the regional heavy rainfall events. *npj Climate and Atmospheric Science*, 3, 35.
- Ito, R., Y. Imada, and H. Kawase, 2023: Regional characteristics of attribution risk on the record-high temperature event of 2022 rainy season in Japan. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104, E2121–E2126.
- Kawase, H., Y. Imada, H. Sasaki, T. Nakaegawa, A. Murata, M. Nosaka, and I. Takayabu, 2019: Contribution of historical global warming to local - scale heavy precipitation in western Japan estimated by large ensemble high - resolution simulations. *J. Geophys. Res.*, 124, 6093-6103.
- Kawase, H., M. Nosaka, S. I. Watanabe, K. Yamamoto, T. Shimura, Y. Naka, Y.-H. Wu, H. Okachi, T. Hoshino, R. Ito, S. Sugimoto, C. Suzuki, S. Fukui, T. Takemi, Y. Ishikawa, N. Mori, E. Nakakita, T. J. Yamada, A. Murata, T. Nakaegawa, and I. Takayabu, 2023 : Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario. *J. Geophys. Res. Atmosphere*, 128, e2023JD038513.
- Kawase, H., S. Watanabe, Y. Hirockawa, and Y. Imada, 2022: Timely Event Attribution Strategy in Japan: An Example of Heavy Rainfall in July 2020. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103, S118–S123, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0192.1>.
- Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita and M. Kimoto, 2017: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 1383 – 1398.
- Pall, P., T. Aina, D.A. Stone, P.A. Stott, T. Nozawa, A.G.J. Hilberts, D. Lohmann and M.R. Allen, 2011: Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470, 382 – 386.