

近年の日本の豪雨や高温事例に地球温暖化が与えた影響 ～ d4PDF による Event Attribution 研究の進展 ～

今田 由紀子（気象研究所）、川瀬 宏明（気象研究所）

1. はじめに

近年、大規模な災害を伴う豪雨が多発している。記憶に新しいのは令和2年7月に九州を中心に大きな被害が出た「令和2年7月豪雨」である。特に球磨川流域に形成された線状降水帯により、球磨川が氾濫し、甚大な被害が発生した。気象庁は、顕著な災害を起こした自然現象について名称を定めることとしているが、ここ数年を振り返ってみると、「令和元年東日本台風」「平成30年7月豪雨」「平成29年九州北部豪雨」「平成29年7月九州北部豪雨」「平成27年9月関東・東北豪雨」「平成26年8月豪雨」など、ほぼ毎年のように何らかの豪雨が発生している。豪雨の直接の要因は、台風や梅雨前線、線状降水帯など様々であるが、近年観測している地球温暖化の寄与が指摘され始めている。

一方で、気温や降水量は年々変動が大きいため、近年猛暑や豪雨が多いからと言って、必ずしもそれが温暖化の影響とは限らない。実際に発生した豪雨や猛暑などの極端現象に地球温暖化に寄与を調べる手法は「イベント・アトリビューション(Event Attribution: EA)」(異常気象の要因分析)と呼ばれる(森, 2013)。EAは、全球気候モデルを用いて、極端現象が発生した時期の状態と、そこから過去の地球温暖化に関連する要素(温室効果ガスの排出や海面水温の上昇等)を除いた状態で、大量のアンサンブル実験を行い、実際に発生した極端現象に相当する事例の発生確率の変化から温暖化の寄与を評価する手法である(Stott et al. 2004)。日本では、文部科学省の創生プログラム(平成24～28

年度)と統合プログラム(平成29年度～)の中でEA手法の開発が行われ、日本で実際に発生した極端現象に適用してきた(図1)。熱的效果が直接反映される猛暑事例についてはEAの実施が容易であるのに対し、日本で発生する豪雨に対するEAはこれまで困難とされ、ほとんど行われてこなかった。その理由として、日本の豪雨は急峻な地形の影響を受けるほか、メソスケールの降水システムを解像する必要があるため、一般的にイベント・アトリビューションで用いられる全球気候モデルでは再現が難しいことが挙げられる。また、単に気温上昇に伴う水蒸気の増加だけでなく、その水蒸気を降水として落下させる働きをする循環場の影響を強く受けるため、内部変動によるゆらぎ幅が大きい循環場の変動が邪魔して、温暖化による影響が相対的に検出しにくくなることが挙げられる。

この課題を解決するために、「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)」(Mizuta et al. 2016)の枠組みを拡張し、気象研究所全球大気モデル及び気象研究所非静力学地域気候モデルを併用したEAを実施することで、地球温暖化が平成29年7月九州北部豪雨及び平成30年7月豪雨の発生確率に対するEAが初めて実現した(Imada et al. 2020)。

このような従来のEAは、多量のアンサンブル計算を行うことで、極端現象の発生頻度を確率的に評価するため、「確率的アプローチ」、「Risk-based Event Attribution」などと呼ばれる。

この手法では、実際に発生した極端現象そのものを忠実に再現するわけではなく、また、たとえ領域モデルを併用したとしても、現状ではモデルの解像度には限界がある。

これに対して、高解像度モデルを用いて実際の極端現象を忠実に再現した上で、地球温暖化の影響を量的に評価する手法が提案されている。これを量的アプローチと呼ぶ。この手法は、Shepherd et al. (2018) の中で言及されている Storyline EA の一つとして位置づけられる。Kawase et al. (2020)は、この手法を用いて、1980

年以降の気温上昇が平成30年7月豪雨の降水量を6.7%増加した可能性があることを示した。また、令和元年台風第19号(Hagibis)の大雨についても実施し(Kawase et al. 2021)、令和2年7月豪雨についても取り組みを始めている。

このような2つの評価手法の詳細については図2を参照されたい。以下では、d4PDFの誕生により飛躍的に進展した確率的アプローチ、及び、速報性に優れていることから近年注目を集めている量的アプローチを用いた最新の研究をレビューする。



図1 文部科学省創生プログラムおよび統合プログラムで実施した日本の極端現象のEAの一覧

	確率的アプローチ	量的アプローチ ※平成30年7月豪雨の例
モデル	MRI-AGCM 60km & NHRCM 20km (d4PDFを延長)	NHRCM (5km, 2km)
計算期間	1951年～現在	イベントの期間のみ
メンバー数	100 (ランダム初期値)	20 (5LAF初期値×4気温トレンド)
境界条件	SST・海氷はCOBE-SST2 外部強制はCMIP5	外部境界条件はJRA55
非温暖化実験設定	EOF第1モードで定義されるSST・SICトレンドを除去。SITはSICとSSTから推測。外部強制は1850年レベルに固定	外部境界条件から気温の過去38年の線形トレンドを除去(領域平均、鉛直プロファイル)
計算・解析に要する時間	～1ヶ月半	半月程度
体制	スパコン: ES3 人員: (全球) 気象研1名+大学等4名 (領域) 気象研1名+SE1名 ストレージ: JAMSTEC	スパコン: 気象研スパコン 人員: 気象研1名 ストレージ: 気象研

図2 EAの2種類のアプローチの詳細

2. 近年の日本の豪雨の EA

(1) 確率的アプローチ

ここでは、平成 30 年 7 月豪雨（瀬戸内地域の大雨）、平成 29 年 7 月九州北部豪雨（九州西部の大雨）、及び台風が連続で九州に接近した平成 5 年の九州東部の大雨を対象に、発生確率に対する地球温暖化の寄与を定量的に見積もった結果を紹介する（Imada et al. 2020）。

50 年に 1 度レベルの大雨の発生確率を、d4PDF の気候再現実験（HIST）と非温暖化実験（Non-W 実験）で比較すると、平成 30 年 7 月の瀬戸内地域においては約 3.3 倍に、平成 29 年 7 月の九州西部においては約 1.5 倍になっていた（図 3a および b）。一方で、平成 5 年の台風起因の豪雨については、両実験間に有意な差は見られなかった（図 3c）。

平成 29 年 7 月の九州西部や平成 30 年 7 月の瀬戸内地域の大雨において、発生確率に明瞭な差が見られた要因として、いずれの年も海面水温のパターンがそれぞれの地域に水蒸気を収束させる循環パターンを作り易い状況に固定されていたために、温暖化に伴う水蒸気増加の影響が検出し易い状況になっていたと考えられる。平成 29 年の九州西部の例では、総観場の水蒸気の収束以外に、九州山地による地形効果も、水蒸気増加の効果を際立たせる役目をしてきた。一方、HIST 実験と Non-W 実験において、背景場となる循環パターン（図 4a）の発生確率には、ほとんど違いが見られなかった（図 4b）。

これに対し、台風起因の豪雨の場合は、台風の接近自体の不確実性が大きいことや、モデルによる台風の再現が不十分であることから、温暖化の影響の検出は難しいと考えられる。これらの結果は、d4PDF の長期間の気候再現実験と非温暖化実験の結果を比較した Kawase et al. (2019)の結果とも整合的であった。

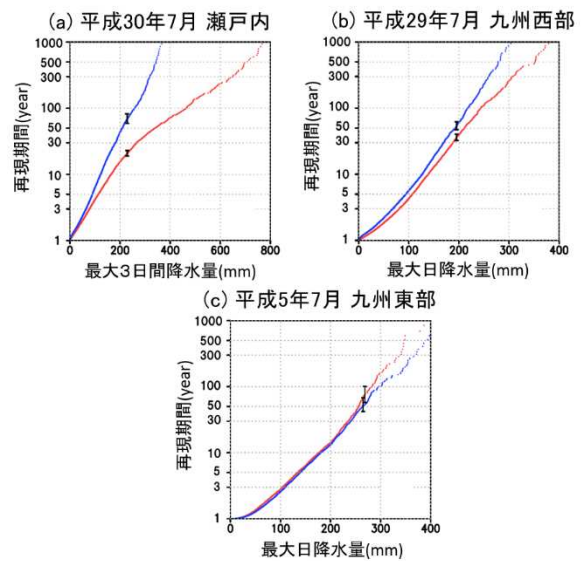
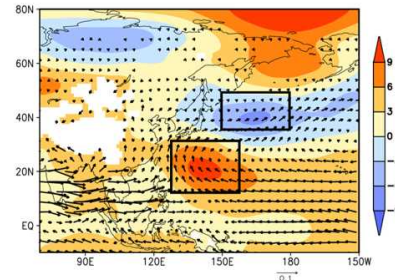


図 3 確率降水量（横軸）に対する再現期間（縦軸）。(a)平成 30 年 7 月の瀬戸内地域の期間最大 3 日間降水量、(b)平成 29 年 7 月の九州西部の月最大日降水量、(c)平成 5 年 7 月の九州東部の月最大日降水量。

(a) 850hPaのアノマリ(HIST 100メンバー)



(b) 気圧場の南北パターン指標の出現確率

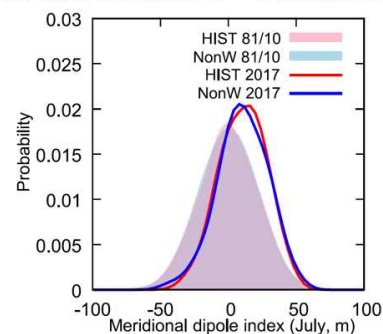


図 4 平成 29 年 7 月九州北部豪雨時に見られたパターンとその出現確率の変化。(a)平成 29 年 6 月 28 日-7 月 8 日の 850hPa 高度場と水蒸気フラックスの気候値 (1981-2010 年) からのアノマリ。(b)850hPa 高度場の南北パターン指標の出現確率。赤は HIST 実験、青色は Non-W 実験の結果を示す。

(2) 量的アプローチ

ここでは、量的アプローチを用いた令和元年台風第19号に伴う豪雨に対する温暖化の影響を調べた研究(Kawase et al. 2021)を紹介する。

令和元年台風第19号(以後、台風第19号と呼ぶ)によってもたらされた豪雨を再現するために、気象庁メソ客観解析(MA)を境界値として、気象庁非静力学モデルを駆動した(再現実験:CTL)。格子間隔は5km、初期値は2019年10月9日00,03,06,09UTCの4つを用いた。降水量の検証には解析雨量を用いる。

次に、気象庁55年長期再解析データ(JRA-55)をもとに、日本周辺(130E-150E, 25N-40N)で平均した1980年から2019年までの気温及び海面水温(SST)の線形トレンドを計算した。ここでは10月から8月の各月平均値と、8月から10月と9月から11月の3ヶ月平均値を用いる。MAから気温トレンドを抜いたデータをNHMの境界値として与え、近年の気温上昇を除去した実験を実施した。これを気温上昇除去実験(NonW40)と呼ぶ。また、SSTのみを変えた実験も実施した(NonW40_SST)。

一方、Hagibisの大雨は地形の影響も大きく受けたことが報告されている(気象庁, 2019)。地形の効果を調べるために、地形を除去したCTL及びNonW40実験も実施した。それぞれCTL_NOTP、NonW40_NOTPと呼ぶ。

また、前節で用いたd4PDFのHISTとNonWの差から、工業化以降の気温上昇を求め、NonW40と同様にMAから気温上昇を除去した実験を行った(NonW_NAT)。

CTLは台風第19号が南海上から北上し、関東を通過するまでのコース及び強度をよく再現した。CTLと解析雨量を比較すると、CTLは積算降水量の地域分布をよく再現していることが分かる(図5a,b)。CTLとNonW40で計算された降水量を比較すると、台風の中心付近及

び東側において、CTLの降水量が多いことが分かる。関東甲信地方で平均した期間積算降水量は、CTLがNonW40に比べて10.9%多くなった。下層の気温上昇量はおよそ1度であったことを考えると、降水量の増加率は、気温上昇に伴う飽和水蒸気量の増加率(7%/1K)よりも大きかった。また、NonW_NATとの比較では13.6%の差が見られた。

降水の増加率が大きくなった要因の一つとして、台風の強化が挙げられる(図6)。CTLの台風の中心気圧は、NonW40に比べて低くなっており、SSTのみを変えたNonW40_SSTでも類似の変化が見られた。以上の結果は、SSTの寄与が大きかったことを示唆している。

一方、地形を除去した実験(CTL_NOTP)は、CTLに比べて降水量が減少したことに比べ、気温上昇除去実験(Non40_NOTP)との差も小さくなった。つまり、地形が降水量の増加率を増幅させた可能性がある。

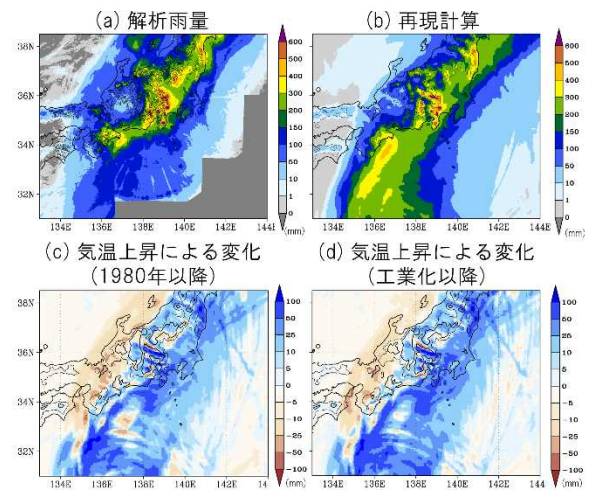


図5 期間積算降水量と気温上昇による変化。(a) 解析雨量, (b)CTL (4実験の平均)。等値線は標高500mと1000m, (c)CTLとNonW40との差, (d)CTLとNonW_NATとの差。青色はCTLが多い領域を示す。

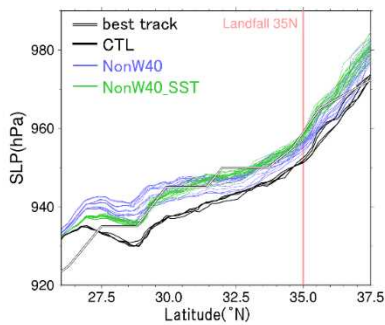


図6 台風の中心気圧の緯度変化
初期時刻と気温上昇トレンドを変えた HIST 4 実験(黒線)、NonW40(青線)と NonW40_SST(緑線)の 20 実験の結果を示す。黒縁付白線は台風のベストトラックデータの中心気圧。赤線が上陸時のおおよその緯度。

詳細は割愛するが、Kawase et al. (2020)では、前節で取り上げた平成 30 年 7 月豪雨に対して量的アプローチを実施しており(手法の詳細は図 2 右列を参照)、1980 年以降の気温上昇が平成 30 年 7 月豪雨の降水量を 6.7%増加させた可能性があることを示した。このように、確率的アプローチと量的アプローチ両方を組み合わせることで、地球温暖化の影響をより多角的に捉えることができ、豪雨増加のメカニズムにまで踏み込んだ研究ができるようになるだろう。

3. 近年の日本の極端高温の EA

Imada et al. (2019)では、d4PDF を用いて 2018 年 7 月の日本の猛暑に対する EA を行ない、実際の 2018 年 7 月の気候下においては、猛暑の発生確率が約 20%であったのに対し、地球温暖化の影響がなかったと仮定した場合においては、ほぼ 0%であったと推定した。さらに、d4PDF の地域気候モデルが出力した日本の各地点の気温の大規模アンサンブルデータをもとに、日本の猛暑地点数が地球温暖化とともに加速的に増加して行くことを示した(詳細は割愛)。

最新の研究として、2019/2020 年の大暖冬を対象とした EA を実施している。同じく d4PDF を用いて日本周辺の大気下層の気温を対象に

EA を実施した結果を図 7 に示した。この時期、対流圏上層には、インド洋西部の対流活動活発に伴うロスビー波列が見られ、日本域に高気圧性偏差を形成し、日本域の高温の要因となっていたが、d4PDF はこの偏差パターンを良く再現していた(図 7 左)。全球モデルの HIST 実験と Non-W 実験の出力を比較した結果、地球温暖化が進行している現実の状況下では、この高温イベントが発生する確率は約 12%、温暖化が起こらなかったと仮定した条件下では 0.11%と推定され、人為起源の地球温暖化によってこの年の暖冬の確率が約 100 倍になっていたことが示された(図 7 右)。

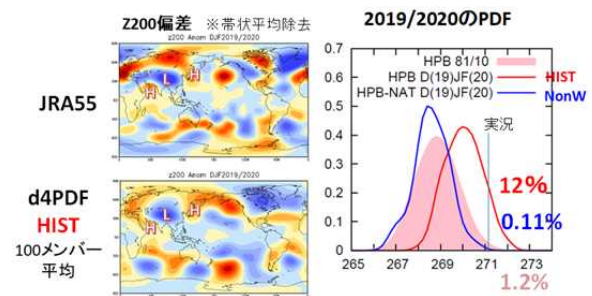


図7 2019/2020 の循環場と EA の結果

2019/2020 年 12~1 月の 200hPa 面のジオポテンシャル高度偏差(単位:m)。左上: JRA-55、左下: HIST 実験の 100 メンバー平均。右図: 日本上空で平均した 850hPa 面の気温の確率密度分布。赤線(青線)は 2019/2020 冬季の HIST 実験(NonW 実験)の結果、陰影は平年(HIST 実験 1981~2010 年)の確率密度分布。

4. おわりに

確率的アプローチと量的アプローチには得手不得手がある。確率的アプローチでは大量のアンサンブル計算を実施する必要があるため、極端イベント発生直後に社会が求める情報に即座に対応することができないため、このような目的では、即時性に優れた量的アプローチが利用されているのが現状である。また、量的アプローチではより正確に現象を再現することから、実際に発生したイベントと時々刻々の比較ができることも利点である。一方、量的アプ

ローチでは、境界条件をイベントが発生した際の循環場に固定するため、地球温暖化に伴う力学場の変化は議論の対象外で、熱力学的な効果による変化しか議論することができないのに対し、確率的アプローチでは両方の効果を考慮した分析が可能である。両方の手法を組み合わせることで、地球温暖化の影響をより多角的に捉えることができ、さらには、豪雨増加のメカニズムにまで踏み込んだ研究ができるようになるだろう。

参考文献

- Imada et al., 2014: The contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013 [in “Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective”], BAMS, 94 (9), S52–S54.
- Imada et al., 2019: The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. SOLA, 15A, 8–12, DOI:10.2151/sola.15A-002.
- Imada et al. 2020, Advanced risk-based event attribution for heavy regional rainfall events, NPJ Climate and Atmospheric Science, 37, 3–37.
- Kawase et al., 2019: The Heavy Rain Event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming [in “Explaining Extreme Events of 2018 from a Climate Perspective”], BAMS, 101, S109–S114.
- Kawase et al., 2019: Contribution of historical global warming to local-scale heavy precipitation in western Japan estimated by large ensemble high-resolution simulations, J. Geophys. Res., 12, 6093–6103.
- Kawase et al. 2021, Enhancement of extremely heavy precipitation induced by Typhoon Hagibis (2019) due to historical warming, SOLA, in press.
- 気象庁, 2019, 報道発表「令和元年台風第19号とそれに伴う大雨などの特徴・要因について」
- 気象庁, 2020, 気候変動監視レポート 2019
- 森正人ほか, 2013, Event Attribution (イベントアトリビューション), 天気, 60, 57–57.
- Shepherd, et al., 2018: Storylines: An alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. Climatic Change, 151, 555–571.
- Stott et al., 2004: Human contribution to the European heatwave of 2003. Nature, 432, 610–613.