

近年における降雨状況の実態：極端豪雨は増えているか

佐藤 正 樹

水環境学会誌 第43巻 (A) 第5号 (2020)

pp.142~147 別刷

公益社団法人 日本水環境学会

「雨」とつきあう

近年、雨にまつわる報道が増加している。2018年の西日本豪雨や2019年の台風19号による豪雨は甚大な被害をもたらした。また、東京五輪トライアスロン会場予定地では水質改善が課題となり、その原因の一つとして大雨時に処理能力を超える下水を簡易処理のみして河川に放流せざるを得ない実態も報道された。

われわれはこの現代の「雨」と上手につきあっていかなければならない。そのためには、「雨」について正しく知る必要がある。そこで本特集では、気象の観点から増加する豪雨の実態と進化する予測技術を、防災や水環境保全の観点から浸水対策や下水道での対策を、また水資源の観点から有効利用の最新状況を紹介いただく。

(ゲストエディター メタウォーター株式会社 北田 剛,
担当編集企画委員 広島大学 中井 智司)

近年における降雨状況の実態：極端豪雨は増えているか*

佐藤 正樹

1. 日本における大雨の変化傾向

近年、集中豪雨や台風による激甚災害が頻発している。2018年7月には西日本を中心に広域に集中豪雨が発生し、死者数が200人を超える激甚災害をもたらした。「平成30年7月豪雨」と命名された。2019年10月には「東日本台風」と命名された台風第19号が襲来し、関東から東北地方におよぶ広域に大雨をもたらした。80名を超える多数の死者を数え、気象記録面でも10月12日に箱根町で日本における日降水量の最高記録を更新した。2019年12月にマドリッドで開催されたCOP25において、ドイツの環境NGOが2018年の1年間に日本が世界で最も異常気象による深刻な被害を受けていたという分析結果を発表している(<https://germanwatch.org/en/17330>)。2018年、2019年の気象災害による日本の損害保険会社の保険支払額が2年連続で過去最大となる可能性も指摘されている(<https://mainichi.jp/articles/20191119/k00/00m/>

020/243000c)。

上記のような、近年の大雨による激甚災害の頻発を考えると、地球温暖化との関連が指摘される。被害をもたらす大雨について、いわゆる「ゲリラ豪雨」を思い浮かべる向きもあるかもしれないが、ゲリラ豪雨は気象学的な用語ではなく、定義もはっきりしないので、本稿ではこの用語の利用をできるだけ避けることにする¹⁾。気象庁のホームページ(https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html)では、異常気象について「ある場所(地域)・ある時期(週, 月, 季節)において30年に1回以下で発生する現象」とされている一方で、集中豪雨に関しては「同じような場所で数時間にわたり強く降り、100 mmから数百 mmの雨量をもたらす雨」と解説されている。ここでは、集中豪雨のうち、より頻度が少ない稀な大雨を極端豪雨と呼び、その近年の変化傾向を概観することにしたい。

極端豪雨として、どれくらい頻度の低い現象を念頭に置くかは、目的に応じて定義される。気象庁における統計データ²⁾にはアメダスによる1時間降水量50, 80, 200, 400 mm以上の年間発生回数について、アメダスによる観測が開始された1975年以降の変化傾向が示されている(図1)。いずれも増加トレンドが見取れる。国内51地点の104年間(1901~2004年)の日降水量の資料から、日降水量の降水階級、100 mm以上の日数、年最大降水量、累年の上位100事例の発現頻度等の様々な大雨の尺度を用いての経年変化を調べた結果によると³⁾、いずれもこの104年間に増加している(図2)。また、1000年に1度の確率で生じる稀な現象として極端豪



Masaki Satoh
博士(理学)
平成5年 東京大学理学系研究科地球物理学
専攻博士課程修了
6年 埼玉工業大学講師
17年 東京大学気候システム研究センタ
ー准教授
22年 東京大学大気海洋研究所教授
文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門)(28年)
日本気象学会賞(平成19年)

* Recent Trends of Extreme Precipitation around Japan

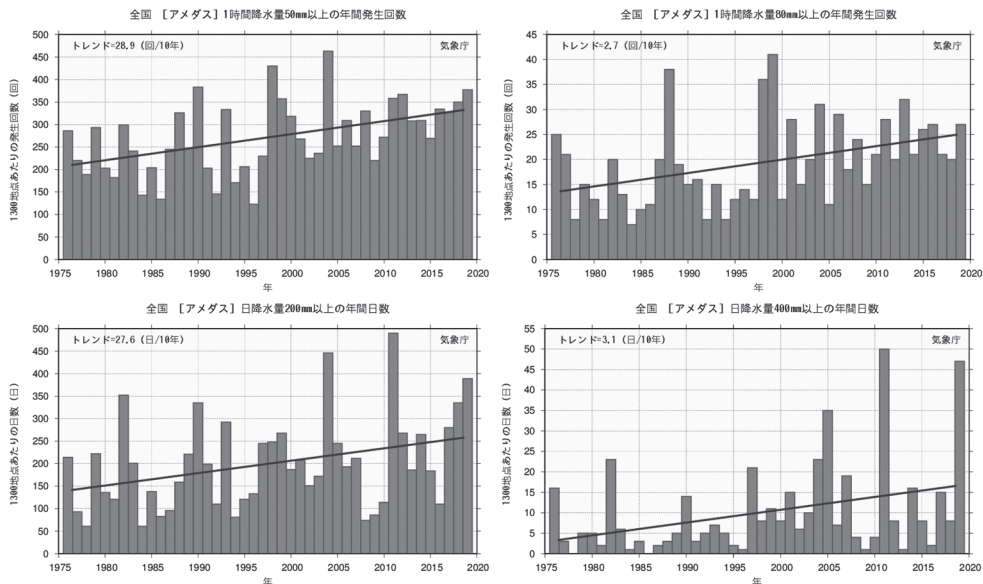


図1 1976-2018年期間の全国のアメダスの1時間降水量50(左上), 80(右上), 200(左下), 400(右下) mm以上の年間発生回数の変化²⁾。棒グラフは全国のアメダスによる観測値を1300地点あたりに換算した値, 直線は長期変化傾向を示す。出典:「気候変動監視レポート2018」(気象庁ホームページより)。

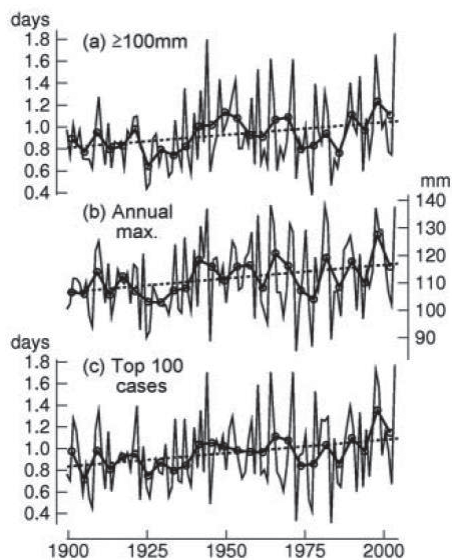


図2 1901-2004年期間の極端豪雨の経年変化: 100 mm以上の日数, 年最大降水量, 累年の上位100事例の発現頻度の時系列を示す³⁾。横軸は年。

雨を定義すると, 極端豪雨にともなう降水量は気温1度の昇温ごとに6-7%の増加という関係が得られており⁴⁾, 温暖化にともなう降水の増加傾向を示唆している。

日本における極端豪雨の事例として, 気象庁では, 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おり, そのうちで平成以降に生じた事例を表1に示す。平成年間だけ限っても, 近年の平成16年以降にはほぼ毎年のように顕著事例が発生しており, 近年の極端豪雨の増加を印象づけている。台風にともなう最近10年の顕著事例を表2に示す。とくに, 2019年10月の台風第19号(「東日本台風」)による関東・甲信から東北にかけての大雨, 2015年台風第18号にともなう関東・東北での大雨等は記憶に新しい。これらの豪雨は, 近年, いわゆる「線状降水帯」にともなう発生することが多く,

表1 平成以降に気象庁が名称を定めた気象現象からの豪雨事例(気象庁ホームページより改変 https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/meishou/meishou_ichiran.html)。

平成5年8月豪雨	平成5年7月31日～8月7日	「8・6水害」, 「鹿児島水害」。鹿児島市(鹿児島県)の土砂災害・洪水等。
平成16年7月新潟・福島豪雨	平成16年7月12日～13日	「7.13新潟豪雨」。
平成16年7月福井豪雨	平成16年7月17日～18日	福井県の浸水害・土砂災害等。
平成18年7月豪雨	平成18年7月15日～24日	「平成18年7月鹿児島県北部豪雨」。諏訪湖(長野県)周辺の土砂災害・浸水害, 天竜川(長野県)の氾濫等。
平成20年8月末豪雨	平成20年8月26日～31日	名古屋市・岡崎市(愛知県)の浸水害等。
平成21年7月中国・九州北部豪雨	平成21年7月19日～26日	「平成21年7月21日豪雨」, 「山口豪雨災害」。
平成23年7月新潟・福島豪雨	平成23年7月27日～30日	五十嵐川・阿賀野川(新潟県)の氾濫等。
平成24年7月九州北部豪雨	平成24年7月11日～14日	八女市(福岡県)・竹田市(大分県)の土砂災害・洪水害, 矢部川(福岡県)の氾濫等。
平成26年8月豪雨	平成26年7月30日～8月26日	台風第12号, 第11号と前線による大雨と暴風。
平成27年9月関東・東北豪雨	平成27年9月9日～11日	「鬼怒川水害」。台風第18号等による大雨。鬼怒川(茨城県)・渋井川(宮城県)の氾濫等。
平成29年7月九州北部豪雨	平成29年7月5日～6日	朝倉市・東峰村(福岡県)・日田市(大分県)の洪水害・土砂災害等。
平成30年7月豪雨	平成30年6月28日～7月8日	前線及び台風第7号による大雨等。「西日本豪雨」。広島県・愛媛県の土砂災害, 倉敷市真備町(岡山県)の洪水害など, 広域的な被害。
令和元年房総半島台風	令和元年9月	房総半島を中心とした各地で暴風等による被害。台風第15号。
令和元年東日本台風	令和元年10月	東日本の広い範囲における記録的な大雨により大河川を含む多数の河川氾濫等による被害。台風第19号。

線状降水帯のメカニズムや予測研究が精力的に行われている⁵⁾。いわゆる「ゲリラ豪雨」に関しては, まとまった統計資料の解析は気象庁では行われていない。

表2 日本における最近10年間の顕著台風事例（気象庁ホームページより改変 http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index_1989.html）。

2011年 台風第12号	2011年 8月30日～9月5日	紀伊半島を中心に記録的な大雨。
2011年 台風第15号	2011年 9月15日～9月22日	西日本から北日本にかけての広い範囲で、暴風や記録的な大雨。
2012年 台風第16号	2012年 9月15日～9月19日	沖縄地方から近畿地方太平洋側にかけて大雨・暴風。
2013年 台風第18号	2013年 9月15日～9月16日	四国地方から北海道の広い範囲で大雨。
2013年 台風第26号	2013年 10月14日～10月16日	西日本から北日本の広い範囲で暴風・大雨。
2014年 台風第8号	2014年 7月6日～7月11日	沖縄地方、九州南部・奄美地方で暴風・大雨。
2014年 台風12号、第11号	2014年 7月30日～8月11日	四国を中心に広い範囲で大雨。（平成26年8月豪雨）
2014年 台風第18号	2014年 10月4日～10月6日	東日本太平洋側を中心に大雨。沖縄・奄美と西日本・東日本の太平洋側を中心に暴風。
2015年 台風第18号	2015年 9月7日～9月11日	関東、東北で記録的な大雨。（平成27年9月関東・東北豪雨）
2016年 台風第7号、第11号、第9号、第10号	2016年 8月16日～8月31日	東日本から北日本を中心に大雨・暴風。北海道と岩手県で記録的な大雨。
2017年 台風第18号	2017年 9月13日～9月18日	南西諸島や西日本、北海道を中心に大雨や暴風となった。
2017年 台風第21号	2017年 10月21日～10月23日	西日本から東日本、東北地方の広い範囲で大雨。全国的に暴風。
2018年 台風第21号	2018年 9月3日～9月5日	西日本から北日本にかけて暴風。特に四国や近畿地方で顕著な高潮。
2018年 台風第24号	2018年 9月28日～10月1日	南西諸島及び西日本・東日本の太平洋側を中心に暴風。紀伊半島などで顕著な高潮。
2019年 台風第19号 「令和元年東日本台風」	2019年 10月10日～10月13日	記録的な大雨、暴風、高波、高潮。

2. 極端豪雨の気候変化のメカニズム

上記のような大雨、極端豪雨の増加は、地球温暖化の進行と関係があると考えられている。一般に、気温が高いほど、空気中に含むことができる水蒸気量は多くなり、これに比例して降水量が増加する理解されている。温度と空気中に含まれる水蒸気圧の関係をあらわす関係式は、Clausius-Clapeyron の関係と呼ばれている（CC 関係と略す）。室温 25℃では、温度が1度上昇すると、飽和水蒸気圧は6%程度増加する。しかし、空気中に含まれる水蒸気がそのまま降水になるわけではないので、水蒸気と降水の関係は、このような単純な比例関係では説明できない。実際には、長時間の気候スケールでは、エネルギー収支によって降水量が制約されており、水蒸気が大気中で凝結する際に放出する潜熱と大気中の放射冷却のバランスによって説明される。二酸化炭素ガスなどの温室効果ガスが増加すると大気中の放射冷却が増加し、これにバランスするために降水量が増加するというのが正しい説明である。しかしこのようなバランスは、長期間の広領域で平均した関係であるため、個々の降水イベント、とくに極端豪雨に関してはこのようなバランスの議論は成り立たない。そこで、様々な降水現象の温度に対する変化を論じる際には、温度と降水の関係をあらわす CC 関係を基準に相対的な変化がどのようになるかが論じられている。温度1度の変化に対して、CC 関係よりも増大する降水の関係がある場合には、super Clausius-

Clapeyron 関係（超 CC 関係と略す）と呼ばれる⁶⁾。日本においては、アメダスの観測地点 981 ヲ所の 36 年間（1979-2014 年）の1時間当たりの雨量について調べ、そのうち0.1%の頻度で生じる極端豪雨の温度依存性はほぼ CC 関係に従うことが示されている⁴⁾。世界的には、地域によっては、極端豪雨の温度依存性が超 CC 関係を示す場合がある^{7, 8)}。

温暖化による極端豪雨の変化は、熱力学的要因と力学的要因に分けて考えることができる。熱力学的要因は、CC 関係に従い、1度の昇温に対して6%程度の降水の増加をもたらすことになる。力学的要因は、極端豪雨をもたらす大規模場や総観規模・メソ擾乱等の循環の変化をとまうもので、熱力学的効果を凌駕する雨の増大をもたらすものである。例えば、集中豪雨は、一般に数十 km スケールのメソ対流システム（Meso-scale Convective System；MCS）によってもたらされる。これらは台風や温帯低気圧、梅雨の前線といった千 km スケールの総観規模の擾乱の内部で発生し、さらに、より大きな1万 km スケールの大気循環（モンスーン循環やハドレー循環等）の大規模場の変化がこれらの総観規模の擾乱の変調をもたらす。極端豪雨の変化について、これらの様々なスケールの気象擾乱の構造や性質の温暖化による変質を考慮する必要がある。しかし、一般にこのような擾乱は年々の変動が大きいので、温暖化変化における力学効果についての観測的な検出や将来変化の定量的な予測は難しい。次節では、とくに、大雨をもたらす台風について過去の変化および温暖化にもなって予想される変化を概観する。

3. 台風の変化

台風は大雨、暴風、高潮等の被害を広域にもたらし、激甚気象災害として最も社会的に関心もたれる気象事象である。台風は、西北太平洋で発生する熱帯低気圧のうち強度が強いものの名称である。台風や、より一般的に世界的な視野での熱帯低気圧について、過去の変化、将来の予測について、精力的な研究が進められている。過去については、年々変動に加えて、事例数の制約、長期間の記録の不正確性、台風の多様性のために、明確な変化を抽出することが難しい。将来について、台風を正確に表現する1~10 km スケールの高解像の気候数値シミュレーションモデルを用いて、数十~百年スケールの長期間かつ多数事例（アンサンブル）の数値予測が必要であり、現在の最先端のスーパーコンピュータでもまだ限定的な結果しか得られていない。

図3は1900年から2014年の115年間にわたり、地上

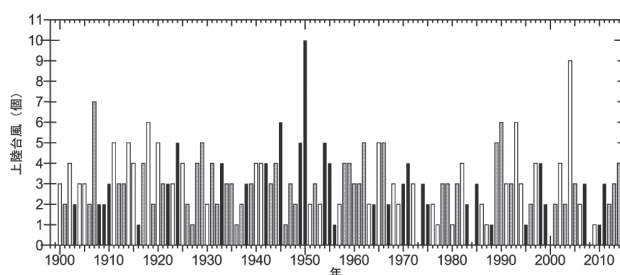


図3 1900-2014年期間の年別台風上陸数⁹⁾。白抜きバーはエル・ニーニョ年、黒のバーはラ・ニーニャ年、灰色のバーはそれ以外の年を表す。

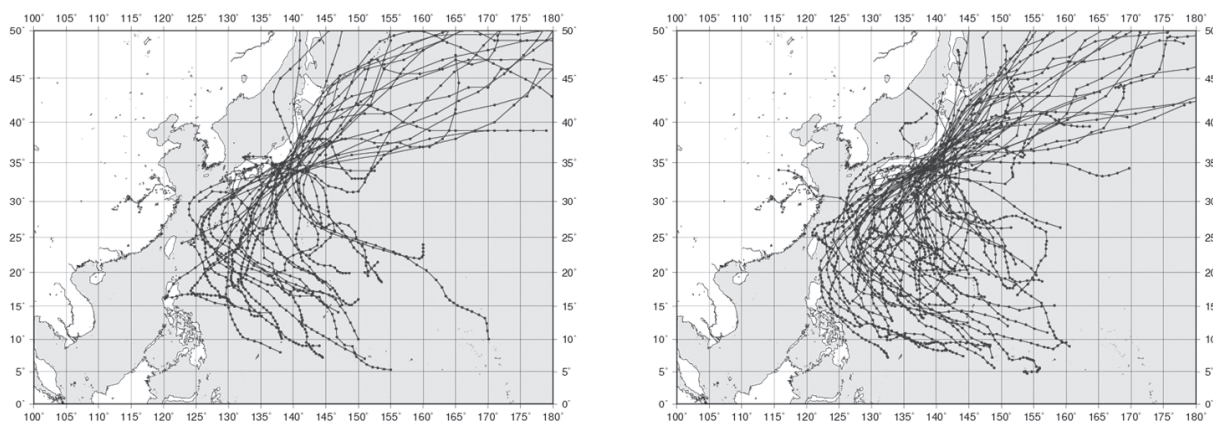


図4 1980-1999年(左), 2000-2019年(右)期間に東京に接近した台風の経路の比較¹⁰⁾。

気象観測データに基づく統一した定義を用いることで、均質な基準で上陸台風を検出した手法による、日本本土における年別台風上陸数を示す⁹⁾。この図からは、過去100年にわたって顕著な変化傾向が表れているようには見えず、台風の地球温暖化による変化傾向を検出することの難しさを示している。一方、日本の南部に限れば、最近の解析では、日本に襲来する台風が増加する傾向が表れている¹⁰⁾。図4に示すように、東京に接近した台風(東京都心から300 km以内を通過した台風)は、過去40年間の前半と後半を比べると、年平均で1.55から2.35に増加した。東京に接近した台風としては、昨年2019年については、千葉に暴風被害をもたらした台風15号(「房総半島台風」)、東日本の広域に大雨被害をもたらした「東日本台風」が記憶に新しい。

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書(AR5)によれば、世界的にみると、地球温暖化にともなって台風等の熱帯低気圧の発生数の総数は減少するものの、強度が強い熱帯低気圧の相対的な頻度は増加し、また、熱帯低気圧にともなう降水は増加すると考えられている¹¹⁾。現在、2021年の発行をめざして、第6次報告書(AR6)の準備が進められており、また、世界気象機関(WMO)のワーキンググループでも、台風の気候変化の最近の研究の知見についてまとめられている^{12, 13)}。最近の研究では、熱帯低気圧が最大強度をとる緯度は、とくに西北太平洋で高緯度側にシフトする傾向が表れており、また、移動速度が遅くなる傾向が検出されている¹⁴⁻¹⁶⁾。日本の南方海上で発生する台風は、従来は最大強度のピークを迎えた後、衰弱過程で日本に襲来していたが、今後はよりピークに近い状態で日本に接近することを意味する。また、台風の移動速度が遅くなると、台風にともなう降水の持続時間が長くなり、総降水量がより増加する傾向になる。

2019年の「房総半島台風」, 「東日本台風」の接近の際には、日本近海の海面水温が比較的高い状態になっており、勢力があまり弱まらずに関東付近に上陸した。「房総半島台風」の上陸時の勢力は960 hPa, 最大風速40 m s⁻¹で、最発達時の955 hPa, 45 m s⁻¹からわずかにしか弱まっていなかった。「東日本台風」は、最発達時には915 hPa, 55 m s⁻¹, 上陸時には955 hPa, 最大風速40 m s⁻¹であった。気象庁では風速54 m s⁻¹以上の台風について「猛烈な台風」と分類しているが、「東日本台風」は最

盛期にはこのクラスにまで発達していた。また、米国の階級分類の最大クラスの台風(1分平均最大風速67 m s⁻¹以上)について、近年日本では「スーパー台風」と呼ばれるようになってきた¹⁷⁾。2013年にフィリピンに襲来した台風ハイランはこれに含まれるもので、日本の南洋上では、年に1-2個の台風はこのクラスまで発達する。今後、地球温暖化が進行すると、「スーパー台風」が勢力を衰えないまま日本に襲来する危険性が指摘されており¹⁸⁾、大雨・暴風・高潮等で甚大な被害をもたらすことが危惧されている。

過去の記録からは明確なシグナルは見いだせないものの、将来の熱帯低気圧の変化に関して、地球温暖化とともに地球全体の発生数は減少する一方、強度の強い熱帯低気圧の相対的な頻度は高まり、熱帯低気圧にともなう降水も増す可能性が指摘されている¹¹⁾。これらの将来予測は、台風の内部構造を解像可能な数十 km 程度以下のメッシュサイズで全球を覆う数値シミュレーションモデルによる予測によるもので、多くの数値モデルの結果は同様な傾向を示しているが、一部の数値モデルでは、上記とは異なるふるまいをする結果もあり、将来予測の難しさを示している¹³⁾。上記に述べたCC関係により、温度の昇温により大気中に含まれる飽和水蒸気量は増加する。個々の熱帯低気圧だけを取り出せば、地球温暖化で想定される海面水温が昇温した条件の下では、最大強度は強くなるのが理論的に示すことができる¹⁹⁾。しかし、全球的な熱帯低気圧の気候学的な性質に関しては、大気大循環の変化の影響を受けるため、主に数値シミュレーションの結果によって説明されているが、一般的な理論・メカニズムは限定的である。温暖化の進行とともに熱帯低気圧の発生数の変化に関しては、以下のように理解される^{20, 21)}。地球全体の平均的な降水量は、放射冷却とバランスする制約のため、地球温暖化とともに(温度に比例する程度で)増大する。熱帯低気圧の平均的としては、昇温により強度が強くなる傾向にあり、それにともなう降水は(CC関係のように指数関数的に)より増大する。仮に、熱帯低気圧による降水の全球的な降水に占める割合が変わらなるとすれば、全球平均的な降水量の増加量に比べて熱帯低気圧一個当たりの平均降水量の増加が大きいため、熱帯低気圧の発生数は減少することになる。この傾向は、全球非静力学モデルNICAMによる現在気候・将来気候に関する30年積分の結果と整合的であり、

数値計算の結果をよく説明している。すなわち、温暖化とともに、個々の台風にもなう降水量は増大し、より強度の強い台風が発生する可能性が高まるが、全体としては台風の発生頻度は減少することが予想される。

台風は強度が強いと、中心付近が晴天域となる「眼」をとともなう。眼の周囲の眼壁付近が最も風速が強く、積乱雲による降水も強い。また、その周囲にはレインバンドにもなう降水域が500 km以上の大きさにわたって広がっている。このような、眼壁、レインバンド、暴風域・強風域等の台風の内部構造に関しても、地球温暖化にもなっている変化に関心もたれている。台風の水平的な広がりサイズについて、過去の記録に関しては明瞭な傾向は検出されていないが、高解像度の数値モデルの結果によれば、温暖化とともに広がることを予測されている²²⁾。台風にもなう降水は、台風内部にもなう直接的な降水の他、台風から離れた場所での遠隔域でも顕著な降水（PREと呼ばれる）をとともなうこともあり、様々な要因で降水が引き起こされる。個々の事象の降水は、台風の経路、台風の持続時間、流入する水蒸気量、地形等によって影響を受ける。

4. メソ対流システムの変化

極端豪雨を引き起こす母体となるメソ対流システム（MCS）や線状降水帯についても、地球温暖化の影響に関心もたれる。一般に、このようなMCSにもなう降水量は、地球温暖化の進行とともに増加傾向にあり、今後もさらに増加することが予想されている。豪雨や竜巻、雹、雷等をとともなう降水システムをシビアストーム（severe thunderstorm）と呼び、とくにアメリカにおいて地球温暖化にもなう変化について研究が進められている²³⁻²⁵⁾。シビアストームについては、台風のように客観的な定義が確立されておらず、また竜巻や雹が過去データに関して観測的に検出できていない可能性もあり、統一的な変化傾向を検出することは難しい。例えば、竜巻については、近年増加傾向にあるが、近年における稠密な観測網によって、より検出されやすくなった効果もあり、実際に起こっている変化なのかははっきりしない。

シビアストームや線状降水帯は、大気より大規模な環境場のある条件のもとで発生しやすい傾向があり、大規模場とこれらのストームとの関係によっても気候変化を論じる試みがなされている。一般に、これらのストームは、鉛直方向の成層安定度、鉛直シア等の要素によって、起こりやすくなる条件があることが知られている。線状降水帯については、この他、下層での水蒸気流入量等を加えた6要素の条件によって起こりやすいことがわかっており、気象庁の現業予報において利用されている^{5, 26)}。過去や将来のシビアストームの変化傾向について、これらの大規模場の指標の変化の観点から解析されている²⁷⁾。地球温暖化の進行とともに、暖候期に加えて、春先にシビアストームが起こりやすい条件が発生するようになり、1年のうちのより長期間、シビアストームが発生する可能性が増加することが予測されている。

5. イベント・アトリビューション

異常気象や極端豪雨は、気候システムのなかの自然な揺らぎである「内部変動」によっても生じるため、個別

の事象（イベント）が、人間活動にもなう地球温暖化によるものだという原理的にできないとされてきた。しかし、人間活動による気候変動が、観測されたような異常気象や極端豪雨の発生確率や強度をどの程度変えてきたかは、数値モデルの解析結果を用いることで定量評価でき、このような手法を「イベント・アトリビューション」と呼ばれる²⁸⁾。イベント・アトリビューションには、地球温暖化による猛暑や豪雨の発生頻度の変化を確率的に評価する方法^{29, 30)}と、実際に起こった現象を正確に再現したうえで、地球温暖化の影響を量的に評価する方法がある。後者はストーリーラインアプローチと呼ばれている。ストーリーラインアプローチの視点から、2018年の「西日本豪雨」の要因をアンサンブル数値実験の結果を用いて解析した結果によると³¹⁾、実際に観測された初期値からスタートした実験と、1980年以降の昇温トレンドを除いた実験を比べたところ、「西日本豪雨」規模の降水が起こる確率は、昇温によって7%程度高まることを示した。また、フィリピンを2013年に襲来した台風ハイランについて、イベント・アトリビューションの手法で高潮に対する温暖化効果を評価したところ³²⁾、20%程度高潮の水位が高くなる可能性があることを示した。このように、様々な極端気象現象について、イベント・アトリビューションの手法で温暖化効果を評価することが可能となっている。地球温暖化の効果は、特定の顕著気象現象を強化するだけでなく、豪雨発生頻度を増加させた可能性も指摘されている。最近の研究によると、とくに九州西部が豪雨の発生頻度が増加しやすい地域であると指摘されている³³⁾。これらの研究は、地球温暖化による極端気象の激甚化の兆候はすでに表れていることを意味する。また、温暖化がより進行した場合に、同様な気象現象がどのように変質するのかについても、試算することが可能である。今後、近未来に、極端豪雨等のさらなる激甚化を評価するとともに、それに対する防災・減災上の対応についても進めていく必要がある。

6. 結語

本稿では、近年の日本における極端豪雨について概観した。アメダスの観測結果によると、1時間に50 mm以上の降水を観測した回数は、過去45年で増加傾向にある。極端豪雨をもたらす台風やシビアストーム・線状降水帯についての性質、地球温暖化にもなう変化についても紹介した。台風については、近年、日本付近に接近する台風が増加傾向にある。イベント・アトリビューションの手法により、個々の気象現象について、地球温暖化の影響度を評価することが可能であり、2018年の「西日本豪雨」は地球温暖化の効果により有意に激甚化したことが示されている。近未来における極端豪雨、激甚災害の変化についても、定量的に評価することが可能であり、今後、起こりうる極端豪雨について理解するとともに、防災上の対応についても準備を進めることが急務である。

謝辞

原稿の作成にあたり、新野宏氏（東京大学）、川瀬宏明氏（気象研究所）から有意義なコメントをいただきました。山口宗彦氏（気象研究所）から図4の利用に関してご協力いただきました。

ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 小倉義光, 2009. お天気の見方・楽しみ方 (16) ゲリラ豪雨という言葉をなくそう. 天気 56(7), 63-71.
- 2) 気象庁, 2019. 気候変動監視レポート 2018. URL: https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2018/pdf/ccmr2018_all.pdf (2020年4月時点).
- 3) Fujibe, F., Yamazaki, N., Kobayashi, K., 2006. Long-Term Changes of Heavy Precipitation and Dry Weather in Japan (1901-2004). *Journal of the Meteorological Society of Japan* 84 (6), 1033-1046. doi:10.2151/jmsj.84.1033.
- 4) Fujibe, F., 2016. Annual variation of extreme precipitation intensity in Japan: Assessment of the validity of clausius-clapeyron scaling in seasonal change. *SOLA* 12, 106-110. doi:10.2151/sola.2016-024.
- 5) 津口裕茂, 2016. 線状降水帯. 天気 63(9), 727-729.
- 6) Trenberth, K.E., Dai, A., Rasmussen, R.M., Parsons, D.B., 2003. The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84(9), 1205-1217.
- 7) Lenderink, G., Barbero, R., Loriaux, J.M., Fowler, H.J., 2017. Super-Clausius-Clapeyron Scaling of Extreme Hourly Convective Precipitation and Its Relation to Large-Scale Atmospheric Conditions. *Journal of Climate* 30(15), 6037-6052. doi:10.1175/JCLI-D-16-0808.1.
- 8) Lenderink, G., Fowler, H.J., 2017. Understanding rainfall extremes. *Nature Climate Change* 7, 391. doi:10.1038/nclimate3305.
- 9) 熊澤里枝, 筆保弘徳, 久保田尚之, 2016. 1900年から2014年における日本の台風上陸数. 天気 63(11), 855-861.
- 10) Yamaguchi, M., Maeda, S., 2020. Increase in the number of tropical cyclones approaching Tokyo since 1980. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 98, accepted. doi:10.2151/jmsj.2020-039.
- 11) Christensen, J.H., Kumar, K.K., Aldrian, E., An, S.I., Cavalcanti, I.F.A., Castro, M., de, Dong, W., Goswami, P., Hall, A., Kanyanga, J.K., Kitoh, A., Kossin, J., Lau, N.C., Renwick, J., Stephenson, D.B., Xie, S.P., Zhou, T., 2013. Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 12) Knutson, T., Camargo, S., Chan, J., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., 2019. Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part I. Detection and Attribution. *Bulletin of the American Meteorological Society* 100, 1987-2007. doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0189.1.
- 13) Knutson, T., Camargo, S., Chan, J., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., Wu, L., 2020. Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II. Projected Response to Anthropogenic Warming. *Bulletin of the American Meteorological Society* 101, E303-E322. doi:10.1175/BAMS-D-18-0194.1.
- 14) Yamaguchi, M., Chan, J.C.L., Moon, I.-J., Yoshida, K., Mizuta, R., 2020. Global warming changes tropical cyclone translation speed. *Nature Communications* 11(1), 47. doi:10.1038/s41467-019-13902-y.
- 15) Kossin, J.P., 2018. A global slowdown of tropical-cyclone translation speed. *Nature* 558(7708), 104-107. doi:10.1038/s41586-018-0158-3.
- 16) Kossin, J.P., Emanuel, K.A., Camargo, S.J., 2016. Past and Projected Changes in Western North Pacific Tropical Cyclone Exposure. *Journal of Climate* 29(16), 5725-5739. doi:10.1175/JCLI-D-16-0076.1.
- 17) 坪木和久, 2018. スーパー台風. 天気 65(6), 73-74.
- 18) Tsuboki, K., Yoshioka, M.K., Shinoda, T., Kato, M., Kanada, S., Kitoh, Akio., 2015. Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change. *Geophysical Research Letters* 42(2), 646-652.
- 19) Emanuel, K.A., 1988. The Maximum Intensity of Hurricanes. *Journal of the Atmospheric Sciences* 45(7), 1143-1155.
- 20) Satoh, M., Yamada, Y., Sugi, M., Kodama, C., Noda, A.T., 2015. Constraint on future change in global frequency of tropical cyclones due to global warming. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 93(4), 489-500. doi:10.2151/jmsj.2015-025.
- 21) 佐藤正樹, 山田洋平, 杉正人, 小玉知央, 野田暁, 2019. 全球非静力学モデル NICAM による台風研究. 号外海洋 62, 62-67.
- 22) Yamada, Y., Satoh, M., Sugi, M., Kodama, C., Noda, A.T., Nakano, M., Nasuno, T., 2017. Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model. *Journal of Climate* 30(23), 9703-9724. doi:10.1175/JCLI-D-17-0068.1.
- 23) Kossin, J.P., Hall, T., Knutson, T., Kunkel, K.E., Trapp, R.J., Waliser, D.E., Wehner, M.F., 2017. Ch. 9: Extreme Storms. *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*. In: U.S. Global Change Research Program (Eds.), *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*. Washington, DC, USA, 257-276.
- 24) Rasmussen, K.L., Prein, A.F., Rasmussen, R.M., Ikeda, K., Liu, C., 2017. Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-017-4000-7.
- 25) Prein, A.F., Liu, C., Ikeda, K., Trier, S.B., Rasmussen, R.M., Holland, G.J., Clark, M.P., 2017. Increased rainfall volume from future convective storms in the US. *Nature Climate Change* 7 (12), 880-884. doi:10.1038/s41558-017-0007-7.
- 26) Kato, T., 2020. Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named as "senjo-kousuitai", causing localized heavy rainfall in Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 98(3), accepted. doi:10.2151/jmsj.2020-029.
- 27) Allen, J.T., 2018. Climate Change and Severe Thunderstorms. *Climate Science*. doi:10.1093/acrefore/9780190228620.013.62.
- 28) 森正人, 今田由紀子, 塩竈秀夫, 渡部雅浩, 2013. Event Attribution (イベントアトリビューション). 天気 60(5), 57-58.
- 29) Imada, Y., Watanabe, M., Mori, M., Kimoto, M., Shioyama, H., Ishii, M., 2013. Contribution of atmospheric circulation change to the 2012 heavy rainfall in southwestern Japan. In "Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective". *Bulletin of the American Meteorological Society* 94, S52-S54. doi:10.1175/BAMS-D-13-00085.1.
- 30) Imada, Y., Shioyama, H., Watanabe, M., Mori, M., Ishii, M., Kimoto, M., 2014. The contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013. In "Explaining extreme events of 2013 from a climate perspective". *Bulletin of the American Meteorological Society* 95, S52-S54.
- 31) Kawase, H., Imada, Y., Tsuguti, H., Nakaegawa, T., Seinino, N., Murata, A., Takayabu, I., 2019. The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming. In "State of the climate in 2018". *Bulletin of the American Meteorological Society* 100, S15-S19. doi:10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1.
- 32) Takayabu, I., Hibino, K., Sasaki, H., Shioyama, H., Mori, N., 2015. Climate change effects on the worst-case storm surge: a case study of Typhoon Haiyan. *Environmental Research Letters* 10(6), 64011. doi:10.1088/1748-9326/10/6/064011.
- 33) Kawase, H., Imada, Y., Sasaki, H., Nakaegawa, T., Murata, A., Nosaka, M., Takayabu, I., 2019. Contribution of Historical Global Warming to Local-Scale Heavy Precipitation in Western Japan Estimated by Large Ensemble High-Resolution Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124(12), 6093-6103. doi:10.1029/2018JD030155.