

# 強まる豪雨、未来の笑顔を守るための備え

京都大学防災研究所気候変動適応研究センター 教授 山口弘誠



## 1. 地球温暖化による豪雨の将来変化と後悔しないための適応策

近年、平成29年九州北部豪雨、平成30年7月豪雨（西日本豪雨）、令和元年東日本台風（台風19号）、令和2年7月豪雨、令和6年9月能登半島豪雨など、甚大な豪雨災害が日本各地で頻発しています。過去50年間（1976年～2025年）の降水量データを用いた気象庁の調べによると、大雨の年間発生回数は有意に増加しており、より強度の強い雨ほど増加率が大きくなっていること、また、1時間降水量80mm以上、3時間降水量150mm以上、日降水量300mm以上など強度の強い雨は、1980年頃と比較して、おおむね2倍程度に頻度が増加していることが報告されています（参考文献1）。これらの豪雨は、地球温暖化の影響によって雨量が増加しているということが科学的に示されています。今までの常識が通用しなくなっているにもかかわらず、地球温暖化は今後も進行していくことが予測されています。世界の平均気温をみると、記録的な猛暑となった2024年には産業革命前の水準を1.55℃上回り、2050年頃には2℃上昇に到達するとされています。次の世代、次の次の世代まで続く安全な社会を創り、豪雨災害から人々の命を守るため、後悔しないように将来の防災計画や温暖化への適応策について考えておく必要があります。

当研究室では将来の工学的な計画にまで利用可能な詳細かつ精緻な将来予測情報を創出するため、複数の積乱雲が列をなして構成される線状降水帯による豪雨（特に、梅雨前線などの停滞前線に伴って発生するもの、図1）を対象に、それらの将来変化予測やメカニズム解析を行っています。高解像度の領域気候モデルシミュレーション結果を用いて、温暖化が進むにつれて線状降水帯の発生頻度は全国的に徐々に増加し、将来はこれまで豪雨が発生してこなかったような北日本や北海道でも新たに発生し始めることがわかってきました（参考文献2、図2）。豪雨に対して脆弱な地域でも将来は豪雨が発生し始めるということであり、防災的にも非常に重要な意味を持つ結果です。また、将来の線状降水帯の豪雨は強度も強くなります。例えば、平成29年九州北部豪雨の雨量は現在気候の範疇ではかなり上位クラスの事例と考えられますが、将来では標準的に発生しうる豪雨の雨量であることを示しました。このように、近年、甚大な被害をもたらしてきたような豪雨は将来、より頻繁に・より強力に・初めての地域にも起こり得るということ、そして既に現在気候の範疇を超えるような豪雨が発生し始めており、今までの常識が通用しなくなっていることを強く認識する必要があることをお伝えしたいと思います。そして、河川改修やダ

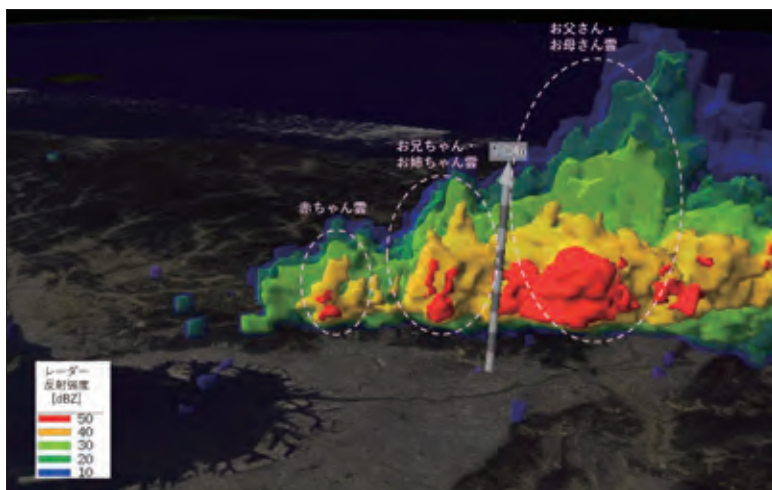


図1 気象レーダーで捉えた線状降水帯（積乱雲のファミリー）：立体表示

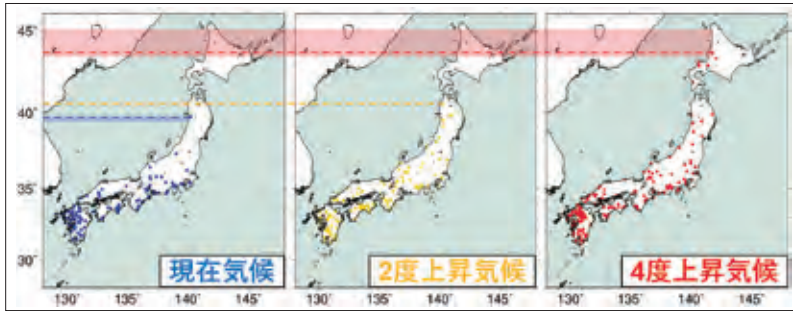


図2 梅雨前線に伴う線状降水帯の発生位置に関する将来変化

ムの再開発など大規模なハード対策を実現するためには数十年規模の時間を要することを考慮に入れると、後悔しない地球温暖化への適応として、今まさに手を打たなければならないタイミングであると意識することが重要だと考えています。

## 2. ゲリラ豪雨はやりすぎた人間活動のしっぺ返し？

豪雨をもたらす洪水・氾濫に対して、これまで人類は水を治める（＝治水）技術を培って人類の生命と財産を守ってきました。とりわけ、明治時代以降、堤防などの西洋からの土木技術を導入し生命と財産を守ると同時に、ある意味で人と自然を規定する（切り分ける）という解釈をしてきたように思います。昨今、全国各地で毎年のように激甚な豪雨災害が発生していますが、上述した地球温暖化だけではなく、都市のヒートアイランド化によって豪雨が強まっていることが指摘されていて、今後もその傾向が強まると推測されています。地球温暖化も都市のヒートアイランド化もそこには人間活動が大きく影響していて、人類が自然に対してやり過ぎてきた結果のしっぺ返しが起こっているのではないかと考えます。もう少し具体的に言うと、高層の建物群があることで風が乱れやすくなり地表面の熱や運動量が上空へ運ばれやすくなります。熱は浮力を生むため、また、気流渦も鉛直上向きの力を生むため、それぞれ積乱雲の発達に寄与します。図3は都市域の上空で気流渦が発生している場所を数値シミュレーションによって表現したものです（参考文献3）。私はこれを“豪雨のタネ”と呼んでいます。上空に豪雨のタネがたくさん貯まっていることが分かんと思いますが、その起源をたどると、豪雨のタネの一部は都市の地表面から発生していることがわかってきました。つまり、ゲリラ豪雨のような孤立積乱雲においては、都市における人間活動が豪雨を促進してきたことを示唆しています。この問題を解決すべき責務は人類自身にあり、人間は“自然の懐”の中で住ませてもらっているという意味を深く考究する必要があると考えます。

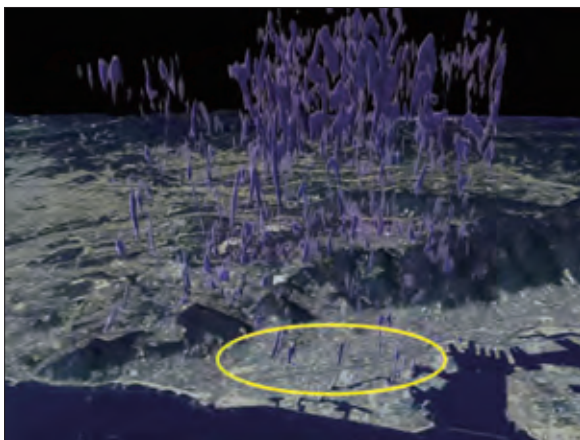


図3 豪雨のタネのシミュレーション（紫色が豪雨の発達を促進させる気流渦）

## 3. 豪雨を鎮める気象制御

気候変動に対する適応策の一つとして、“気象制御”が着目されています。地上に降り注ぐ雨となる前に、気象そのもの（今回の場合は雨雲）を制御しようとする取り組みです。治水に対する言葉として、治雲（ちうん）と呼んでいます。気象制御によって豪雨を減らすことができれば、気候変動の新しい適応策になると考えられます。気象は自然の一部であり人が介入してはならないという考え方もありますが、これまで人類は人々が暮らしやすいように自然である大地をあらゆる方法で変えてきました。大地を変えることは許されて空を変えることは許されないという考えは、私は道理が通っていない

ように思います。ただやはり大切なことは、やりすぎるとしっぺ返しが起こるということを念頭に、自然と共に生きるという範疇において気象制御を実施すべきであるということです。そのためには気象制御の価値をしっかりと見極めることが重要です。

我が国においては、内閣府が主導するムーンショット型研究開発・目標8のもと、2050年までに激甚化しつつある豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現するための研究プロジェクトが2022年に始まりました。私の研究チームも、ゲリラ豪雨と線状降水帯を対象として、それらの豪雨の発生・発達過程に介入することによって豪雨の強度や発生頻度を抑制するための研究開発に取り組んでいます。図4に研究の全体像を示します。我々が目指している制御は、豪雨を自由自在に操るような制御ではありません。日本には森羅万象に神を感じる古来の考え方があり、雨に対しても雨乞いや晴れ乞いといった祈りの風習や神話が伝えられてきています。自然や豪雨に対して畏敬と畏怖の念を抱きつつも、将来強まる豪雨から大災害の発生を抑えるため、どうしても必要なときの切り札として発動する制御だと考えています。すなわち、“自然の懐”の範囲で豪雨を治めることを目指すことが重要であり、「豪雨を鎮める」ための技術として豪雨制御を位置づけたいと考えています。

さて、現在までは、数値シミュレーションによって豪雨制御の実現可能性を調べてきました。過去にあった実際の豪雨イベントに対して、仮に何らかの介入を行っていたとしたら豪雨を抑制することができたのかどうかについて調べてきました。成果の一例として、図5に示すように、2008年神戸都賀川のゲリラ豪雨を対象として、仮想的に風の抵抗体となる大型の発電用風車を2台設置したところ、ゲリラ豪雨のピーク降雨強度が190mm/hから157mm/hへと変化し、約17%の抑制効果を得られることを示しました（参考文献4）。17%という数字は一見すると大きい値ではないと感じるかもしれませんが、数字以上に大きな減災効果を得ることができます。また、線状降水帯についても介入効果を調べましたが、ゲリラ豪雨よりも規模が大きいことから、より大きな介入や効果的な介入が必要となります。そこで図6に示すように、“洋上カーテン”と呼んでいる新しい介入手法を検討しています。図7には平成29年九州北部豪雨を対象として、仮想的に1km四方の洋上カーテンを設置したところ、線状降水帯の雨量が115mmから76mmへと変化し、約34%の抑制効果を得られることを示しました（参考文献5）。介入手法は、風車や洋上カーテン以外にも、図6に示すようなクラウドシーディング、増風機といった手法についても検討を進めています。このようにシミュレーション上で大きな抑制効果を得られる可能性が見えてきましたので、今後は、実証実験を進めていく予定にしています。ただし、気象を変化させるということはあらゆる人や自然に影響を及ぼすため、まずは小規模でかつ海上等の比較的影響度の小

さいところから開始します。それから、倫理的な課題については、ELSI（Ethical, Legal and Social Issues；倫理的・法的・社会的課題）だけではなく、RRI（Responsible Research and Innovation；責任ある研究とイノベーション）の重要性を掲げています。すなわち、技術中心的な考え方ではなく、社会像中心的な



図4 豪雨を鎮める気象制御に関する研究の全体フレームワーク

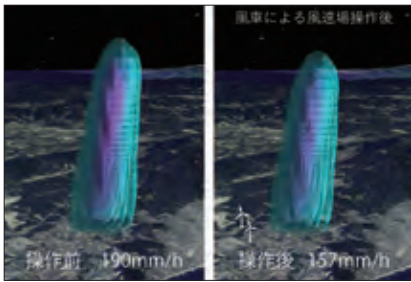


図5 ゲリラ豪雨に対する風車による豪雨抑制シミュレーション

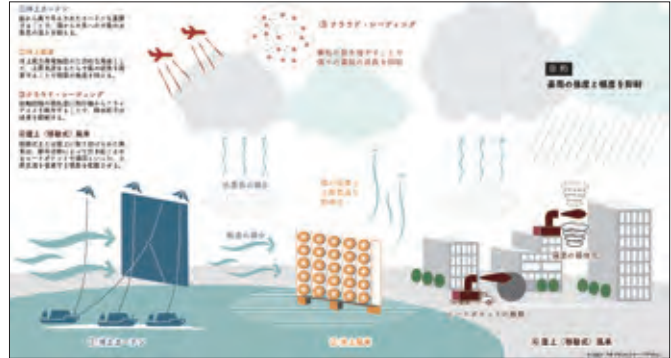


図6 豪雨への介入手法

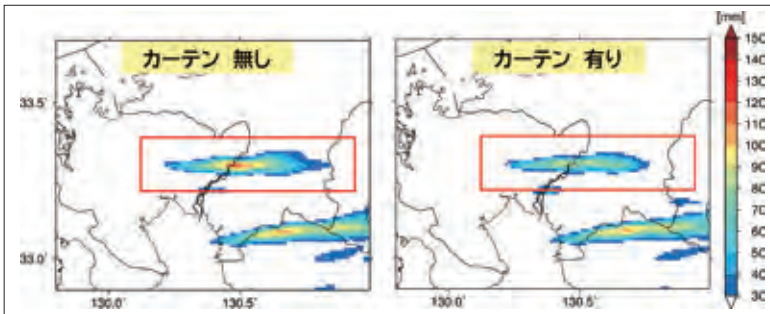


図7 線状降水帯に対する洋上カーテンによる豪雨抑制シミュレーション

考え方です。技術開発ありきで社会問題を解決するのではなく、目指すべき社会像ありきでそれを効果的に推進するための技術開発と社会問題解決であることを目指しています。そのために、豪雨を含む気象と人間社会と技術の3つの関係を位置づけるための概念的な

考え方として“気象コモンズ”という概念を打ち出しています(参考文献6)。地域住民が新しい制御技術を通して気象資源を主体的に活用・保全しながら、豪雨と共に暮らしていくための協働のしくみとして捉える概念です。気象は、「私」や「公」のものだけではなく、「共」のものでもあると位置づけます。そして、豪雨と人間が共生する未来社会を描いていきたいと思います。

社会の考え方の転換が重要であると考えており、まずはコミュニティを広げる必要があります。制御技術に関して、操作手法はもっと多くのアイデアが必要です。土木や気象の分野以外の未知の技術が豪雨制御に使える可能性を大いに秘めています。それから、豪雨制御を実施するためには公共に資するという目的関数のもと受益者・受苦者の合意形成が必要であり、社会全体の議論が必要です。2050年の豪雨制御の実現に向けて、夢の技術開発と防災の責務を両立していきたいと思います。

#### 【参考文献】

- 1 気象庁 (2026), 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化, [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme\\_p.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html)
- 2 Naka Y and Nakakita E (2023), Comprehensive future projections for the line-shaped convective system associated with Baiu front in Japan under RCP scenarios using regional climate model and pseudo global warming experiments. Front. Earth Sci.
- 3 山口弘誠, 土橋知紘, 中北英一 (2019), 都市気象LESモデルを用いた渦管形成とその起源となる熱的上昇流の解析, 京都大学防災研究所年報, 第62号B, pp.468-492.
- 4 山口弘誠, 西村太一, 中北英一 (2024), 2008年神戸都賀川豪雨を対象とした風速場操作による気象制御LES実験, 土木学会論文集, 80 (16), pp.1-7.
- 5 Yamaguchi, K., S. Nishimura, and E. Nakakita (2024), Weather modification simulation of line-shaped convective system torrential rainfall by introducing offshore curtain, 京都大学防災研究所年報, 第67号B, pp.156-167.
- 6 Hatori, T., C. Rupprecht, C. Berthelsen, M. Simon, R. Itsukushima, T. Iwahori, K. Kagohashi, K. Kobayashi, T. Ohno, M. Onishi, T. Takada, N. Tamura, K. Yamaguchi, A. Yoshida (2025), Commoning the Weather: Weather commons for a post-1.5°C world, npj Climate Action 4, 105.