

排熱の削減により都市型の局地降水を制御

—都市型豪雨による災害の軽減のために—

概要

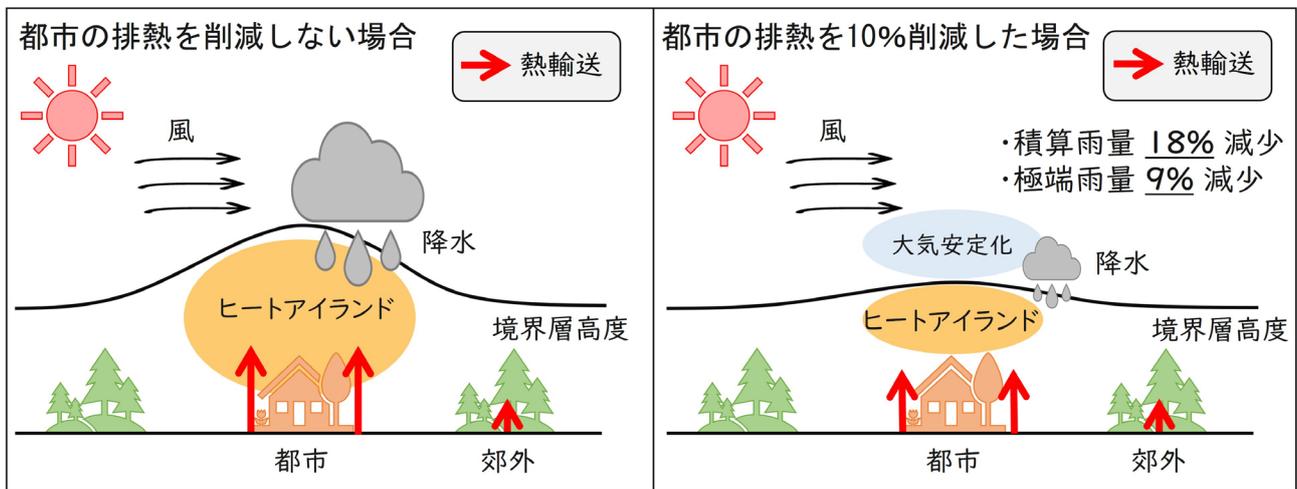
都市化や地球温暖化の影響によって、都市型の気象災害の激甚化が懸念されています。中でも、豪雨災害は毎年のように繰り返し発生することから、その対策は社会的に重要な課題です。

京都大学防災研究所 入江健太 研究員（研究当時、現：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構）と 竹見哲也 教授の研究グループは、都市型豪雨災害の軽減を目標として、夏季の午後に急速に発達する積乱雲とそれによる局地的な降水を制御するには、ビルや地面からの熱の放出量を都市部において削減することが有効であることを、スーパーコンピュータを使った計算機シミュレーションによって明らかにしました。

シミュレーションでは、ビルからの熱排出や道路からの熱放出を削減することを想定し、都市部での排熱量を徐々に削減した時に、夏季の午後に生じる積乱雲の発達とそれによる局地的な降水がどのように変化するかを調べました。大阪都市部で生じた局地的な降水事例を対象として分析した結果、20 km 四方の範囲で排熱を 10%削減すると、上位 0.1%の強さの降水が 9%、降水の積算量が 18%削減でき、排熱量の削減率を大きくするほど、降水の強さや量を徐々に減少させることが可能であることを示しました。

今後は、局地的に強い降水が予測される場合に、いつ・どの範囲で・どの程度の量で排熱を削減すれば効果的に降水の強さや量を制御できるのか、といった研究が必要です。

本研究成果は、2025 年 5 月 12 日に国際学術誌「*Theoretical and Applied Climatology*」にオンライン掲載されました。



本研究の概要図

1. 背景

近年の都市開発によって、都市の風環境や熱環境が変わりつつあります。加えて、地球温暖化の影響で、世界各地で気温の上昇傾向が続いています。都市化と地球温暖化が並行して進行していくと、猛暑や局地豪雨といった都市型災害の激甚化が懸念されます。特に、積乱雲による短時間強雨により、排水機能が不十分な場合には道路等人工的な地表面で浸水が生じたり、アンダーパス等微小な低地に水が集中することで被害が生じたりといった災害に繋がります。このように、短時間強雨による災害の形態は、都市の構造が大きく影響を及ぼします。こういった都市型気象災害への対策として、都市の高温化現象（ヒートアイランド現象）を緩和したり、気候変動に対する適応策を考えたりといった様々な取り組みが大切です。そういった対策のひとつとして、激しい気象擾乱そのものの勢力を弱めること、すなわち気象制御の方法が考えられます。

このような背景のもと、内閣府が主導しているムーンショット型研究開発制度により、「2050年までに、激甚化しつつある台風や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」という気象制御に係る研究が進行中です。このムーンショット・気象制御研究の中で、局地豪雨や集中豪雨を制御するための研究プロジェクト「ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御」では、風車・増風機・洋上カーテン・雲粒シーディングといった様々な技術を使って、豪雨発生に至る気流や熱の輸送を改変したり、豪雨に至る雨雲の発達を抑制したりして、豪雨災害を抑止・軽減を図ろうという計画です。

このムーンショット型研究プロジェクトの一環として実施している「熱に対する操作手法の開発」の課題のもと、今回の研究では、ビルからの熱排出や道路からの熱放出など都市の人工的な地表面からの排熱を削減することにより、都市で急発達する積乱雲に伴う局地降水を制御できるのかどうか、制御できるとすれば排熱をどの程度削減すればいいのか、といったことを計算機シミュレーションにより調べました。

2. 研究手法・成果

本研究では、台風や前線の影響を受けないような夏季の午後の気象条件において、局地的に生じる降水現象を対象として、日々の天気予報で用いられるようなタイプの数値気象モデルを用いて京都大学スーパーコンピュータで計算機シミュレーションを実行しました。大阪都市部で夏季の午後に急発達する積乱雲と局地的な降水現象として、2023年8月27日に発生した事例を選びました。図1(a)にこの日の14時10分の気象レーダーによる降水分布を示します。大阪市内の気象観測点を中心とした半径10kmの範囲（ピンク色の円）に降水が発生していることが分かります。この事例を今回の研究の対象としました。この降水現象について、まずは実際に起こった状況を再現することを試み、次に、都市部からの排熱量を減らすと、降水量がどのように変化するかについてシミュレーションしました。

シミュレーションに用いた数値気象モデルは、Weather Research and Forecasting (WRF)モデルというものです。こういった夏季の午後に局地的に急発達する積乱雲は、台風や前線といった大きな強制力を受けないことから、いつ・どこで発生するのかを予測したり再現したりすることが大変難しいです。そのため、初期条件を複数パターン（計8通り）に変えて、複数のシミュレーションを実行して、最初に、急発達する積乱雲の再現を試みました。

シミュレーションの結果を図1の(b)から(i)に示します。図1の(b)から(i)は、それぞれ異なる初期条件から始めたシミュレーションの結果を示しています。これらの結果から、実際の局地的な降水分布（図1(a)）と類似した降水分布が計算機シミュレーションで得られたことが分かります。

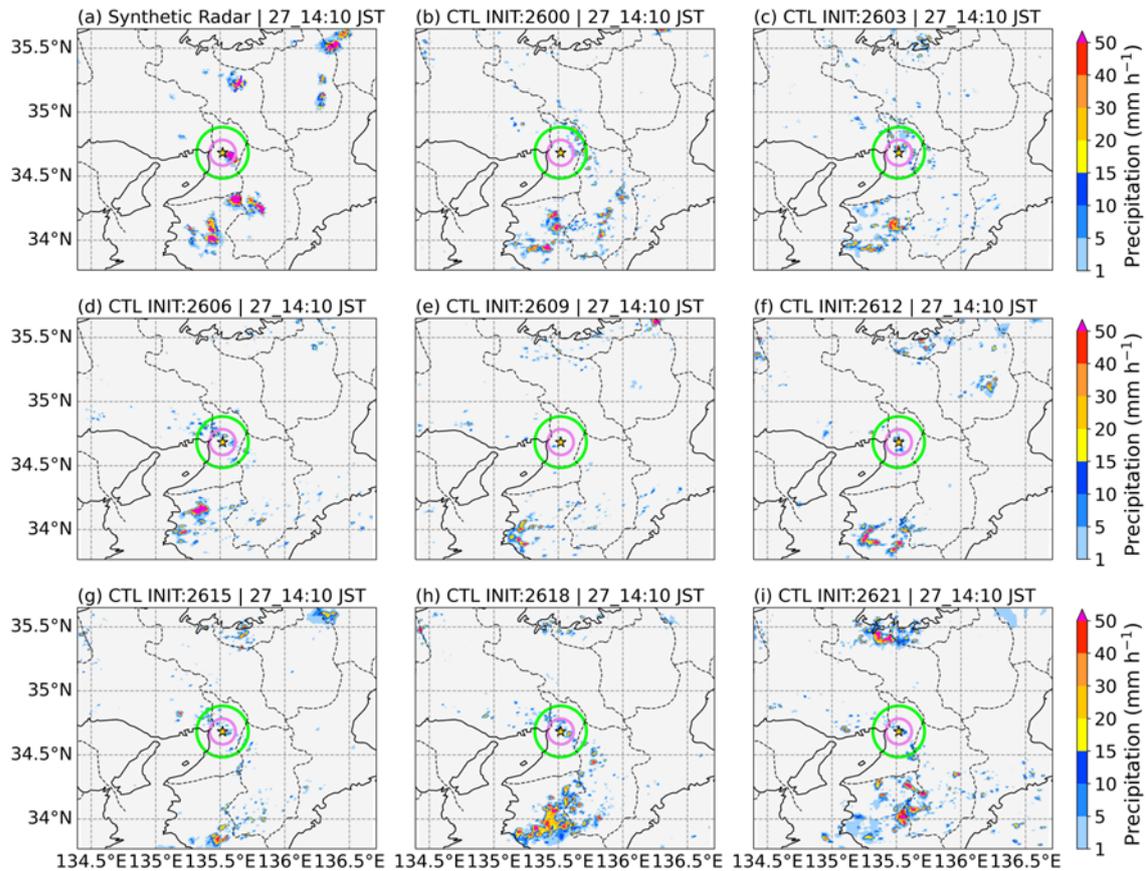


図 1 2023年8月27日14時10分における降水分布（単位：mm/時）。(a) 実測値、(b)から(i)異なる初期条件から開始した計算機シミュレーションの結果。ピンク色および黄緑色の円は、大阪観測地点を中心にした半径10 kmおよび20 kmの範囲を示す。

このように実際に発生した局地降水を計算機シミュレーションによって良好に再現できましたので、次に、地表面からの排熱量を徐々に減らした時に、降水の強さや量がどのように変化するかについてシミュレーションしました。地表面からの排熱量を減らす範囲を、近畿地方を囲む計算領域全体の全陸地からの排熱量を削減した場合（ALL 実験）、近畿地方を囲む計算領域全体の都市部のみの排熱量を削減した場合（URB 実験）、大阪市を中心とした20 km四方の都市部での排熱量を削減した場合（O20 実験）の3種類で設定しました。それぞれの実験で、排熱量の削減率を10%から10%刻みで50%まで減らすシミュレーションを実施しました。

図2に、これらのシミュレーション実験で得られた降水の強さ（単位：mm/時）の頻度分布を示します。排熱量を改変しない実験（CTL 実験；図中の黒線）に比べて、ALL 実験、URB 実験、O20 実験のすべてにおいて、排熱量を削減するにつれて、強い降水ほど（図中の横軸の数値が大きくなるほど）頻度が下がる（図中の縦軸の数値が低くなる）ことが分かります。

次に、降水の強さや量が、排熱量の削減率に応じて、どの程度の割合で減少するかについて示します。図3は、ALL 実験・URB 実験・O20 実験それぞれの場合において、排熱削減率別に降水強度の極端値（上位0.1%の降水強度）がどのくらいの割合で減少率するかについて、CTL 実験に対する100分率で示します。また、図4は、図3と同様な示し方で、時間積算した降水量の減少率を示します。いずれの図からも、降水の強さや量が、排熱を削減するほど徐々に減少することが分かります。大阪市中心の20 km四方の都市部の排熱を削減した場合（O20 実験）を見ても、例えば、10%の排熱削減によって、極端降水強度が9%、積算降水量が18%も削減されることが分かります。このようにして、都市部からの排熱を削減することで、局地的な降水の強さ

や量を制御できる可能性を示すことができました。

本研究では、さらに、降水が減少するメカニズムを調べました。都市部の排熱を削減することで大気下層が安定化し、積乱雲の急発達を抑止されることで降水の強さや量が減少するという物理プロセスを示しました。

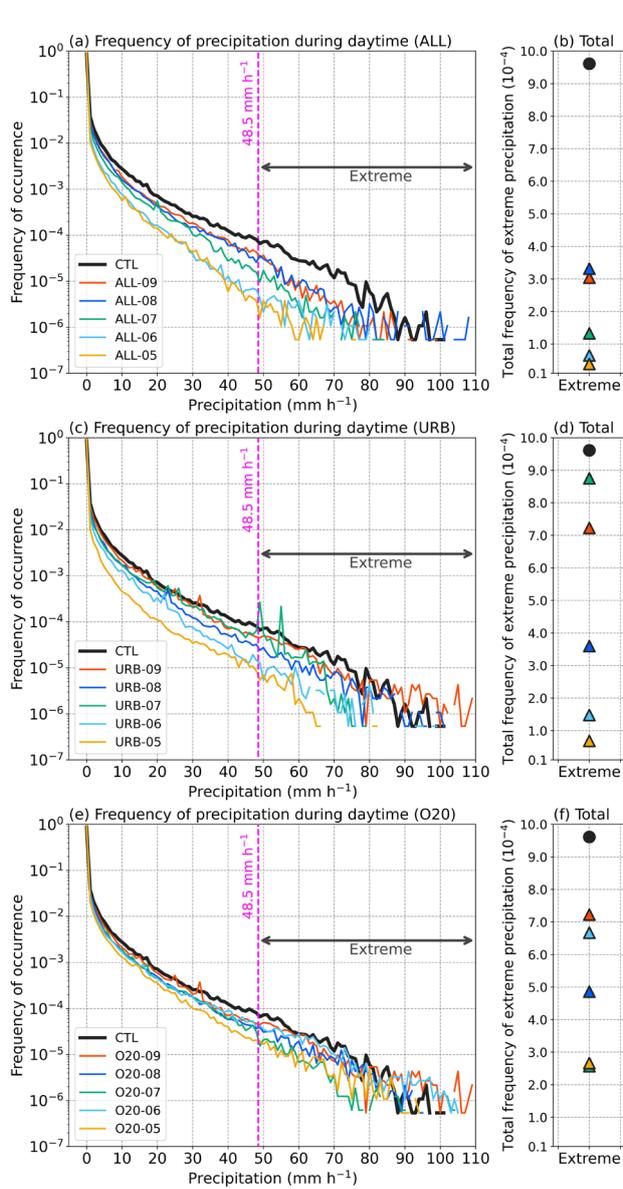


図2 数値実験毎の降水強度（単位：mm/時）の頻度分布。縦軸は対数軸としている。黒線は排熱を削減していないCTL実験、色は排熱を削減した実験の結果を示す。（上）ALL実験、（中）URB実験、（下）O20実験。頻度は全体の発生頻度に対する割合で示す。

3. 波及効果、今後の予定

今回の研究で、都市からの排熱量を削減することで、夏季午後の積乱雲の発達や局地的な降水を制御することができることを、計算機シミュレーションによって示すことができました。本研究では、都市での排熱を一

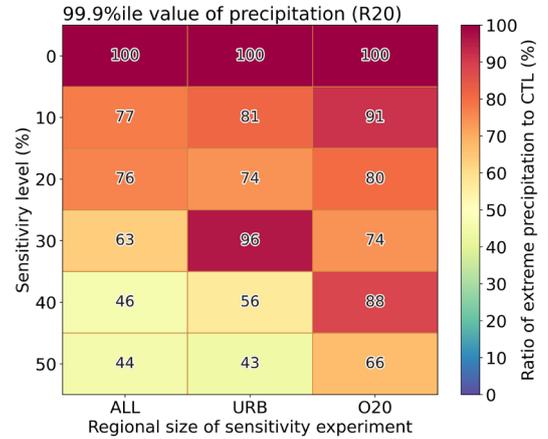


図3 ALL実験・URB実験・O20実験それぞれの場合における、排熱削減率別の極端降水強度の減少率をCTL実験に対する100分率（%）で示す。数字が100分率で示した値、色分けはそれを視覚的に示したものの。

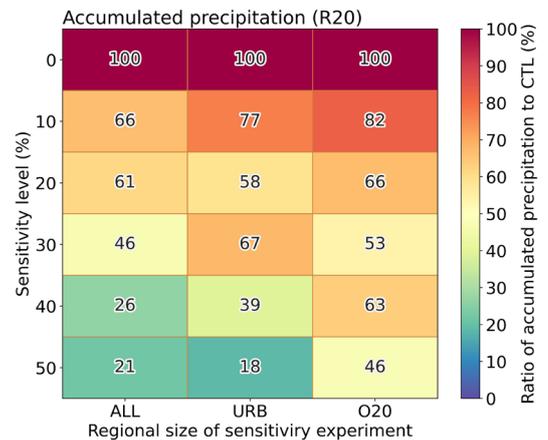


図4 図3と同様に、時間積算降水量についての減少率を示す。

律に広域で削減することを想定し、局地降水の制御の可能性を示しました。

今後は、局地的に強い降水が予測される場合に、いつ・どの範囲で・どの程度の量で排熱を削減すれば効果的に降水の強さや量を制御できるのか、といったことを研究していきます。また、そういった都市の排熱を削減するための具体的な手段（風車や増風機など）についても探っていきます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構ムーンショット型研究開発事業目標8「2050年までに、激甚化しつつある台風や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」の研究開発プロジェクト「ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御」における「熱に対する操作手法の開発」(JPMJMS2283-01)の支援を受けて行われました。

<用語解説>

- Weather Research and Forecasting (WRF)モデル：米国・国立大気研究センターが中心となって開発した領域規模から局地規模の気象現象の予測や解析のための計算機シミュレーション用の数値気象モデル
- 降水強度：降水の強さとして、1時間に降る雨量（mm）に換算して表します。1時間に実際に降った雨量ではなく、瞬間的に生じた雨の強さを時間雨量に換算したものです。
- 降水量：ある時間間隔で実際に降った雨量のことです。

<研究者のコメント>

「都市化や地球温暖化の影響により、都市での大気環境が変化を続けています。これまでの想定を超える豪雨が起る可能性も否定できません。豪雨災害を抑止・軽減するためには、予測精度向上や防災情報伝達といったアプローチに加え、将来の気候変動も見据えた中長期的な技術開発も大切です。本研究では、変動する都市環境に適応する手段として、新たに気象制御の考え方を提案しました。」

<論文タイトルと著者>

タイトル：Effects of Modifying Surface Sensible Heat Flux on Summertime Local Precipitation in Urban Areas of Osaka, Japan（大阪都市圏における夏季局地降水に及ぼす地表面顕熱輸送量の影響）

著者：Kenta Irie, Tetsuya Takemi

掲載誌： *Theoretical and Applied Climatology* DOI：10.1007/s00704-025-05509-9