

豪雨制御シミュレーションにおける風速場操作の時空間的感度解析

Spatiotemporal Sensitivity Analysis of Wind Field Manipulation in Heavy Rainfall Control Simulation

西村太一⁽¹⁾・山口弘誠・中北英一

Taichi NISHIMURA⁽¹⁾, Kosei YAMAGUCHI, and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto Univ

Synopsis

Localized heavy rainfall (guerrilla heavy rainfall) is challenging to predict due to its small temporal and spatial scales, causing significant damage in recent years to urban areas in Japan. Additionally, with ongoing global warming, there are concerns about the intensification of heavy rainfall. Therefore, there is hope that controlling heavy rainfall artificially could mitigate its impact. This study focuses on artificial control methods for heavy rainfall, considering the phenomenon of wind speed reduction in the wake of wind turbines. From a perspective of engineering, it is crucial to determine when, where, and to what extent to weaken the wind. Hence, this research aims to analyze the sensitivity by varying the duration, timing, size of the controlled area, position, and amount of wind speed reduction in the manipulated wind speed field. The results indicate a particularly high sensitivity of heavy rainfall suppression to the placement of wind turbines and the timing of the control initiation.

キーワード: ゲリラ豪雨, 都賀川, 気象制御, 水蒸気

Keywords: guerrilla heavy rainfall, Toga River, meteorological control, water vapor

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年, 日本では局地的豪雨(ゲリラ豪雨)によって都市に甚大な被害が発生している。ゲリラ豪雨は時間・空間スケールが小さく, 予測が容易ではない。特に, 2008年に神戸市で発生した都賀川豪雨では5名もの人命が失われた。この豪雨をきっかけに, 中北ら(2009, 2010)は, 国土交通省Cバンドレーダーによる立体観測データからゲリラ豪雨をレーダーが最初に捉えることのできるゲリラ豪雨のタマゴの発見した。この発見から, ゲリラ豪雨研究は大きく発展し,

発達する積乱雲はそのタマゴの状態からドップラー風速から算出された鉛直渦度が大きいことが明らかになった(中北ら(2013))。

また, 中北ら(2018)は, 温暖化によってゲリラ豪雨の発生頻度が増加することを, 5km解像度領域気候モデル(RCM05)を用いた解析によって明らかにした。

そこで, 災害規模となりうる豪雨を人工的に抑制する気象制御が期待されている。

気象制御に関連して, 山口ら(2024)はLES数値シミュレーションを用いて, 2008年神戸都賀川豪雨を対象に風速場操作を行い, ゲリラ豪雨の重要な指標

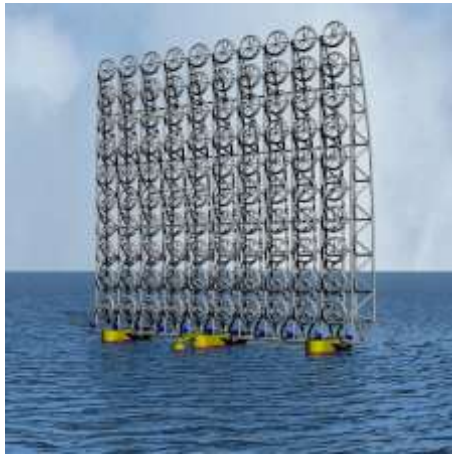


Fig. 1 Ultra--large floating cluster-lens wind turbine.
Source: Research and Education Center for Offshore
Wind Kyushu University

である渦管を抑制することによる気象制御手法を示した。具体的には、Fig. 1に示すような超大型浮体式クラスターレンズ風車と呼ばれる発電用の巨大風車（全幅278m、全高227m）を操作デバイスとして、風車後流で発生する風速減速現象を利用する。このような気象制御手法による豪雨抑制メカニズムとして、鉛直渦度の弱まりによる上昇流の抑制、温位場と気流場の不均衡、水蒸気の取り込み量減少を挙げた。

1.2 研究の目的

本研究では、上記の風速場操作気象制御実験において、風速場操作の向き・位置・領域の大きさ・開始のタイミング・継続時間・風速減速量を変化させる感度実験を行う。そして、風速場操作による気象制御を実世界で実装する際の信頼性を評価するための第1歩として、どの要素が相対的に感度が高いのかを解析することを目的とする。

それぞれの詳細な設定については2章以下の各節で説明するが、東西風の風速場操作を行った実験をA、南北風の風速場操作を行った実験をB、東西風と南北風の風速場操作を同時に行った実験をCとする。また、上記のパラメータを単一で変化させた実験を1、1で重要であるとわかった位置に加えて領域の大きさと期間、タイミングをそれぞれ1つずつ加えた実験を2、本数値シミュレーションにおける解像度の480mの格子を2つ選択し、風速場操作を行った実験を3とする。

2. 感度実験A-1: 東西風操作の時空間的感度

本章では、東西風の風速場操作において、山口

Table 1 Settings for Sensitivity Experiment A-1:
The red text indicates the settings used by Yamaguchi et al. (2024). The positions in the east-west and north-south directions are relative to those of Yamaguchi et al. (2024). Positive values indicate that the wind field operation was conducted further east or north, while negative values indicate that it was conducted further west or south compared to Yamaguchi et al. (2024).

継続時間 (分)	2	4	6	8	10	12	14
タイミング (計算開始からの分)	0	2	4	6	8	10	
東西方向の領域 (km)	0.48	2.88					
南北方向の領域 (km)	0.48	0.96					
領域の高さ (m)	32~356	(32m刻み)					
風速減速量 (m/s)	5⇒1	5⇒2	5⇒3	5⇒4			
東西方向の位置 (km)	山口ら(2024)	±0.48	±0.96	±1.44	±1.92	±2.4	±2.88
南北方向の位置 (km)	山口ら(2024)	±0.48	±0.96	±1.44	±1.92	±2.4	±2.88
操作領域底面の高度 (m)	112	144	176	208	240	272	

ら (2024) を元に風速場操作の期間、タイミング、位置、領域の大きさ、風速減速量をそれぞれ単一で変化させる感度実験を行った。

2.1 感度実験A-1の設定

風速場操作の期間に関しては山口ら (2024) では10分間の風速場操作を行っていたのに対し、本実験では2, 4, 6, 8, 12, 14分間行った。

風速場操作のタイミングに関して、山口ら (2024) では計算開始直後から風速場操作を行っていたのに対し、本実験では計算開始から2, 4, 6, 8, 10分後に行った。

風速場操作の領域の大きさに関して、まず東西方向は山口ら (2024) では2.88kmだったのに対して、本実験では0.48kmにして行い、南北方向は0.96kmだったものを0.48kmに、領域の高さは356mだったものを32, 64, 96, 128, 160, 192, 224, 256, 288, 320mで行った。

風速場操作の風速減速量に関して、山口ら (2024) では5m/sを1m/sに遅くしたのに対し、本実験では5m/sを2, 3, 4m/sにした。

風速場操作の位置に関して、山口ら (2024) を基準に、東西方向へはそれぞれ0.48, 0.96, 1.44, 1.92, 2.4, 2.88km移動させ、南北方向へはそれぞれ0.48, 0.96km移動させた。風速場操作底面の高度に関して、山口ら (2024) では272mだったのに対して、本実験では112, 144, 176, 208, 240mで行った。また、本実験において最低高度が112mとなっているのはそれ以下の高度だと風速場操作領域が地形の中に入ってしまうためである。

以上の諸設定をまとめたものをTable 1にまとめる。

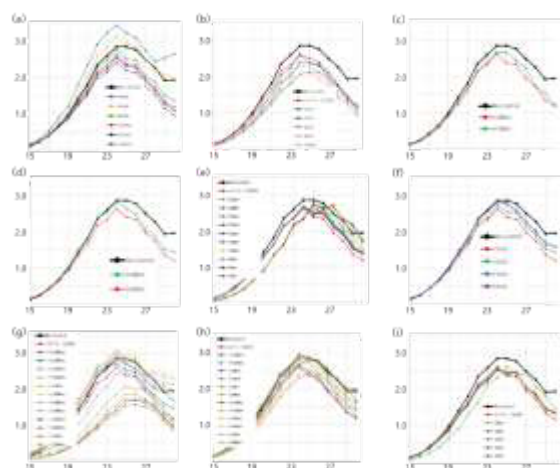


Fig. 2 Results of Sensitivity Experiment A-1: The horizontal axis represents the elapsed time [minutes] from the start of the calculation, and the vertical axis shows the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at each time. (a) represents the period, (b) the timing, (c) the size of the region in the east-west direction, (d) the size of the region in the north-south direction, (e) the height of the region, (f) the amount of wind speed reduction, (g) the east-west position of the region, (h) the north-south position of the region, and (i) the altitude of the region.

2.2 感度実験A-1の結果

感度実験A-1の結果として、計算開始から1分ごとの雨水混合比 (g/kg) の最大値の時系列変化をFig. 2 にまとめる。

風速場操作期間の結果 (Fig. 2 (a)) から、風速場操作が8分以上なら風速場操作を行わなかったNo Controlよりも雨を抑制できていることがわかる。しかし、6分以下の場合、No Controlよりも雨が強くなっていることがわかる。No Control, 10分間の風速場操作 (山口ら (2024)) , 4分間の風速場操作を比較したところ、雨が強くなった原因として以下が考えられる。Fig. 3のように東西鉛直断面で水平平均からの温位偏差 (陰影) に着目してみると、4分間の風速場操作では、より高い高度まで温かい空気が上っており、なおかつ10分間の風速場操作と比較して、操作時間が短いために水平方向にも移流が大きいことがわかる。より高い高度に温かい空気が上がる理由としては、風速場操作による収束が生み出す上昇流が関係していると考えられる。そしてこのようにより高く、水平にも広く移流した温かい空気がFig. 3の上昇流 (コンター) に取り込まれたことが、雨が強くなる原因の1つと考えられる。同様に水蒸気混合比についても確認したところ (Fig. 4) , 4分間の風速場操

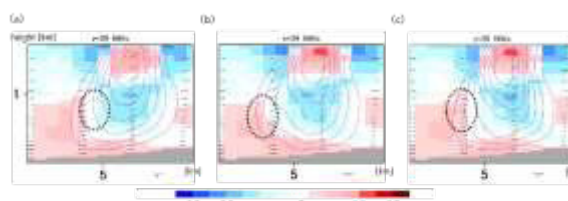


Fig. 3 East-West Vertical Cross-Section for Each Case: (a) No Control, (b) 10-minute wind field operation, and (c) 4-minute wind field operation. The shading indicates the potential temperature deviation [K] from the horizontal average, and the contours represent the updraft [m/s].

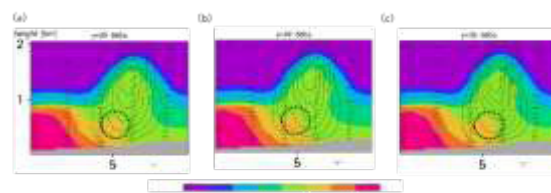


Fig. 4 East-West Vertical Cross-Section for Each Case: (a) No Control, (b) 10-minute wind field operation, and (c) 4-minute wind field operation. The shading indicates the water vapor mixing ratio [g/kg], and the contours represent the updraft [m/s].

作の方がより高く、水平に広く水蒸気が移流しており、それが上昇流に取り込まれていることがわかった。

風速場操作のタイミングの結果 (Fig. 2 (b)) から、風速場操作のタイミングが遅いほどに結果が良いことがわかる。しかし、計算開始から8分以降に操作を行った場合は豪雨抑制効果が小さくなっていることがわかる。豪雨抑制効果としても山口ら (2024) を超えていることから、風速場操作の重要なパラメータの1つであることがわかる。

風速場操作の東西・南北・高さ方向の領域の大きさの結果 (Fig. 2 (c) (d) (e)) から、都賀川豪雨の模擬計算にて主風向となっている東西方向に対し、流下方向の大きさは感度としてはやや小さく、それに対して主風向に垂直な方向である南北方向の領域の大きさに関しては、南北方向に領域が大きいほどに抑制効果があった。また、高さ方向に対しても、領域の高さが高いほどに抑制効果が強くなっていることがわかった。

風速場操作の風速減速量の結果 (Fig. 2 (f)) から、流入風を遅くするほどに抑制効果が大きくなっていることがわかった。

風速場操作の東西方向の位置の結果 (Fig. 2 (g)) から、山口ら (2024) より西側に風速場操作領域を設置した場合で抑制効果がより大きくなり、東に設置した場合は抑制効果はだんだんと小さくなっていき、

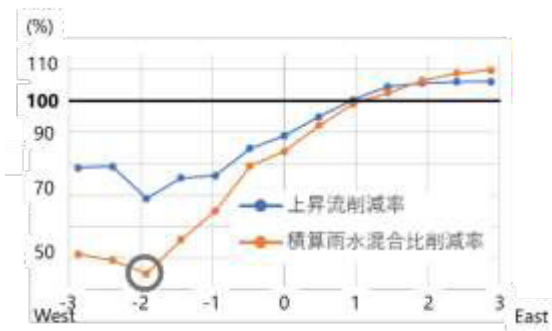


Fig. 5 Comparison of the 3D integrated values of updraft and rainwater mixing ratio within the regions where rain clouds were present in each sensitivity experiment with those in the No Control case. The vertical axis shows the ratio compared to the No Control case, while the horizontal axis indicates how far each sensitivity experiment is from the position used by Yamaguchi et al. (2024).

いくつかはNo Controlの降水強度を上回る結果となった。東西方向の位置に関する感度実験において、豪雨抑制効果が最大で約45%になり、その他のパラメータの中で最も大きい感度を持っていることがわかる。その原因を明らかにするために、まずはFig. 5で示すような、東西位置の各感度実験において、雨雲が発生した領域付近での上昇流の3次元積算値及び雨水混合比の3次元積算値がNo Controlと比較してどの程度になったかに着目した。図の横軸は山口ら (2024) からの各感度実験の相対位置を示しており、積算雨水混合比の削減度合いと積算上昇流の削減度合いが一致していることがわかる。つまり、一番雨が抑制できていた実験（山口ら (2024) から西に1.92km離れた実験）が一番上昇流も抑制できていることがわかる。この要因として、山口ら (2024) で明らかになった豪雨抑制メカニズムのうちの1つである気流場と熱力学場の不均衡が関係していることがFig. 6からわかった。具体的には、(a) で示すようにNo Controlでは温位のバブルによって熱力学場の収束がある場所に気流場の収束もあり、その結果上昇流も徐々に発達していったのが、(b) で示す山口ら (2024) ではその位置関係を崩していた（図中緑丸部）ことが豪雨抑制につながった。そして、(c) で示す西に1.92km離れた位置で風速場操作を行った実験では、その位置関係が更に崩れた（図中緑丸部）ことがわかった。また、Fig. 7で豪雨抑制メカニズムの1つである水蒸気の取り込みについても着目したところ、(b) で示す山口ら (2024) では(a) で示すNo Controlよりも水蒸気の移流を抑制できていることが図中の赤線部より下に着目することでわかるが、(c) で示す西に1.92km離れた位置で風速場操作を行った

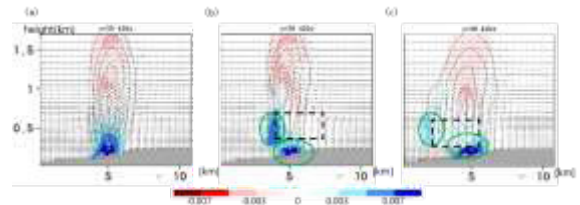


Fig. 6 (a) No Control, (b) Yamaguchi et al. (2024), and (c) an experiment where the wind field operation was conducted at a location 1.92 km west. The east-west vertical cross-section is shown with cold colors indicating convergence [s^{-1}], warm colors indicating divergence [s^{-1}], and contours representing the updraft [m/s]. The black rectangles in (b) and (c) indicate the wind field operation regions.

実験では赤線部より上の部分に豊富な水蒸気が多く持ち上がっていることがわかる。しかし、この(c)が一番雨を抑制できていたことを考えると、水蒸気が多く取り込まれたとしても、気流場と熱力学場の不均衡によって上昇流が弱くなることの方が豪雨抑制には重要である、つまり、コアの上昇流を抑制することが重要であることがわかった。一方、東に風速場操作領域を設置した場合に雨がNo Controlよりも多くなった実験に関して、Fig. 8 (c) で示すように、上昇流に対して風速場操作領域が東側にあることによって、上昇流に流入してきた風が風速場操作領域の西端で発生する収束によって上昇流に取り込まれやすくなり、上昇流が強化されていることが見て取れる。これを確認するために更に収束量に着目したところ (Fig. 9), (c) ではNo Controlよりも収束量が大きくなっていることが見て取れる。以上の風速場操作の東西位置に関する感度実験で得られた結果についての概念図をFig. 10に示す。(b) に山口ら (2024), (a) に山口ら (2024) より西に風速場操作を行ったもの、(c) に山口ら (2024) より東で風速場操作を行ったものを示しており、対流コアに対して、風速場操作によって気流収束がどこで発生しているのかを表している。

風速場操作の南北方向の位置の結果 (Fig. 2 (h)) から、山口ら (2024) より北側で風速場操作を行うとより抑制効果が大きくなり、南側だと効果がだんだん薄れていっていることがわかった。

風速場操作の底面の高度の結果 (Fig. 2 (i)) から、山口ら (2024) と大きな差はないものの、より低い高度で風速場操作を行う方が抑制効果が大きかった。

以上の結果から、位置に関しての感度がその他のパラメータと比較しても相対的に大きかったため、東西、南北の位置を同時に変えた実験も行った、図Fig. 11に示すように、山口ら (2024) より西へ

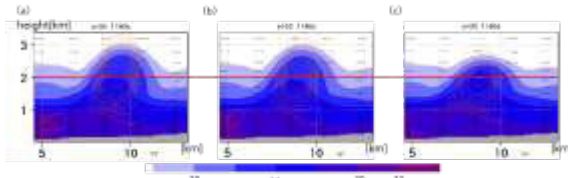


Fig. 7 (a) No Control, (b) Yamaguchi et al. (2024), and (c) an experiment where the wind field operation was conducted at a location 1.92 km west. The east-west vertical cross-section is shown with shading indicating the water vapor mixing ratio [g/kg] and contours representing the updraft [m/s].

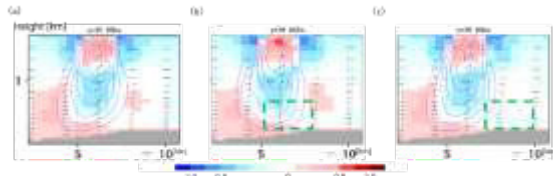


Fig. 8 (a) No Control, (b) Yamaguchi et al. (2024), and (c) an experiment where the wind field operation was conducted at a location 2.88 km east. The east-west vertical cross-section is shown with shading indicating the potential temperature deviation [K] from the horizontal average, contours representing the updraft [m/s], and the green rectangle indicating the wind field operation region.

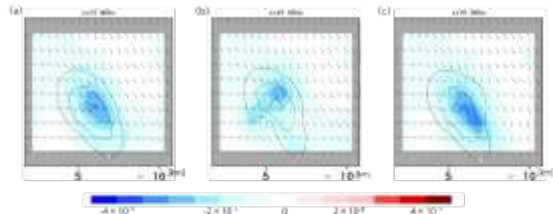


Fig. 9 (a) No Control, (b) Yamaguchi et al. (2024), and (c) an experiment where the wind field operation was conducted at a location 2.88 km east. The horizontal cross-section is shown with cold colors indicating convergence [s⁻¹], warm colors indicating divergence [s⁻¹], and contours representing the updraft [m/s].

1.44km, 北へ1.44km離れた位置で風速場操作を行った場合が抑制効果が最も大きく、約50%の抑制効果があった。

感度実験A-2では、感度実験A-1で最も抑制効果の高かった位置を基準に新たなパラメータを変更するため、Fig. 12に感度実験A-1において最も抑制効果が大きかった位置（灰色領域）と山口ら（2024）（薄い赤色の領域）の位置、及び温位のバブルの設置位置

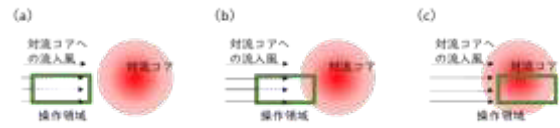


Fig. 10 Conceptual diagram of the sensitivity experiment results related to the east-west position of the wind field operation region. (a) When the wind field operation was conducted west of Yamaguchi et al. (2024), (b) Yamaguchi et al. (2024), and (c) when the wind field operation was conducted east of Yamaguchi et al. (2024).

（赤枠）の計算領域内のどこにあたるのかを示す。

3. 感度実験A-2：最適位置での時空間的感度

本章では、前章で最も豪雨抑制効果の大きかった位置（Fig. 12参照）を基準に、風速場操作期間、タイミング、領域の大きさのパラメータをそれぞれ1つずつ加えていき、その感度を調べることを目的とする。また、領域の大きさに関してはものの作りの観点を取り入れ、本計算の水平解像度上最も小さい領域である480m×480mに変更した計算のみを行っている。

3.1 感度実験A-2の設定

感度実験A-2では感度実験A-1で最も豪雨抑制効果が得られた山口ら（2024）から風速場操作領域を西に1.44km, 北に1.44km移動させた実験を基準に、風速場操作期間が10分間だったものを2, 4, 6, 8, 12, 14, 16, 18分間に変更した実験、計算開始直後から風速場操作を行っていたものを、計算開始から2, 4, 6, 8分後に操作を開始し始めた実験、風速場操作領域の大きさを感度実験A-1で最も抑制効果のよかったFig. 12の灰色領域周辺の1格子（水平解像度480×480m）のみにした実験を行った。

3.2 感度実験A-2の結果

上記の設定で計算を行った結果をFig. 13に示す。最も抑制効果のある位置で風速場操作の期間を変更した結果（Fig. 13 (a)）から、最適な位置ではある程度風速場操作期間があれば抑制効果はほとんど変化しないことがわかった。一方で、最適な位置での操作ができれば風速場操作時間が短くても大きな抑制効果が得ることができると共に、風速場操作の位置の重要性が示唆された。

最も抑制効果のある位置で風速場操作のタイミングを変更した結果（Fig. 13 (b)）から、最適な位置での操作を行う上で、風速場操作のタイミングが遅

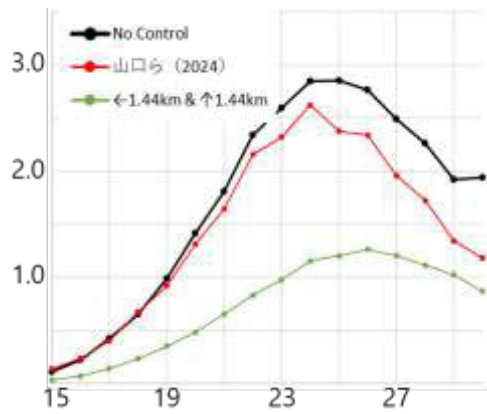


Fig. 11 Results of experiments where both the east-west and north-south positions of the wind field operation were simultaneously changed. The horizontal axis represents the elapsed time [minutes], and the vertical axis shows the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time. The green graph represents the results of the wind field operation conducted 1.44 km west and 1.44 km north of the position used by Yamaguchi et al. (2024).

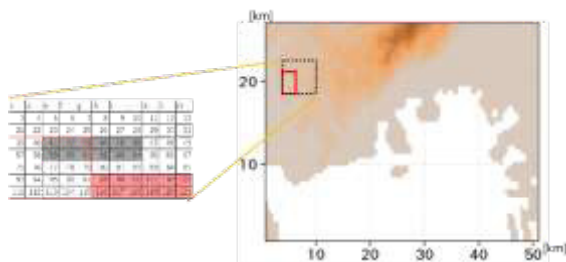


Fig. 12 The position with the greatest suppression effect obtained in Sensitivity Experiment A-1 (gray area), the position used by Yamaguchi et al. (2024) (light red area), and the location of the potential temperature bubble (red box). Details about the English labels and specific positions in the figure will be explained in Sensitivity Experiment A-2.

れるほど豪雨抑制効果が小さくなっていくことがわかった。

最も抑制効果のある位置で風速場操作領域の大きさを変更した結果のうち、抑制効果の大きかった4つの計算結果 (Fig. 13 (c)) から、領域の大きさは抑制効果を向上する上で重要であるが、それでも山口ら (2024) と同等の抑制効果が得ることができている実験もあり、より最適な位置を見いだすことの重要性が示唆された。Fig. 14に1格子のみの風速場操作領域で最も結果のよかった4つの位置を灰色で示す。Fig. 14の領域の中の一部において、No Controlと比較して雨水混合比のピークがどれだけの割合になったのかをFig. 15に示す。感度実験A-2で最も結果のよか

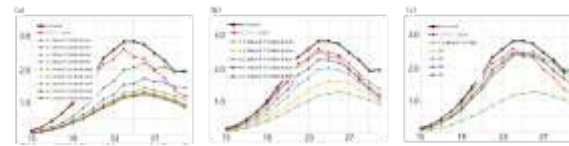


Fig. 13 Results of Sensitivity Experiment A-2. (a) An experiment where the parameters for the wind field operation duration were changed from those in Sensitivity Experiment A-1. (b) An experiment where the timing parameters for the start of the wind field operation were changed from those in Sensitivity Experiment A-1. (c) An experiment where the size of the wind field operation region was changed to a single horizontal grid cell, with the numbers in the figure corresponding to the grid selection shown in Fig. 11. The horizontal axis represents the elapsed time [minutes], and the vertical axis shows the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time.

った4つである格子番号41, 42, 59, 60に関してはそれぞれNo Controlと比較して雨水混合比のピークは87%, 86%, 83%, 85%となっていることがわかる。

4. 感度実験A-3：操作領域設置位置の感度

本節では、前節で1格子のみの操作領域で最も豪雨抑制効果の大きかった位置 (Fig. 14参照) を基準に、東西方向の風速場操作を行う格子をもう1つ追加して設置した際に、豪雨抑制効果は加算的に増加するのか、指数関数的に増加するのかを検証することを目的としている。

4.1 感度実験A-3の設定

感度実験 A-3 では、感度実験 A-2 の 1 格子のみでの風速場操作で最も豪雨抑制効果が大きかった位置に連続するようにもう 1 格子分の風速場操作を行う実験と、1 格子分の間隔を開けてもう 1 格子分の風速場操作を行う実験を実施した。

4.2 感度実験A-3の結果

前述の設定で計算を行った結果の一部をFig. 16に示す。図中の番号は風速場操作を行った格子の番号であり、Fig. 14の番号の通りである (図中の格子番号59は1格子の風速場操作実験で最も抑制効果があったものであり比較のために記載している)。

Fig. 16 (a) で示す風速場操作を2格子連続して設置した実験の結果を見ると、格子番号41, 59や格子番号42, 60のように主風向に垂直な方向である南北方向に連続して風速場操作領域を設置した方が抑制効果が大きいことがわかる。主風向に垂直な方向に断

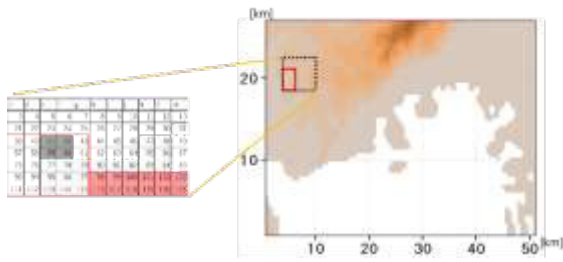


Fig. 14 The position with the greatest suppression effect obtained in Sensitivity Experiment A-2 (gray area), the position used by Yamaguchi et al. (2024) (light red area), and the location of the potential temperature bubble (red box).

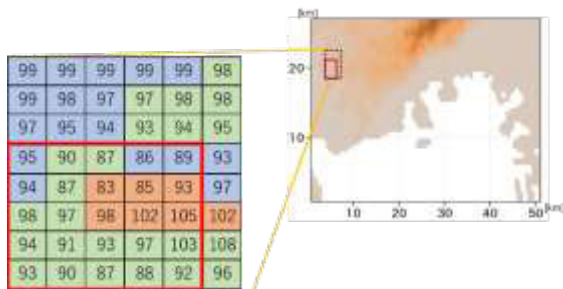


Fig. 15 The proportion of the peak rainwater mixing ratio compared to the No Control case for some of the grids shown in Fig. 13. The red box indicates the location of the potential temperature bubble. Additionally, the orange, yellow-green, and light blue color coding for each grid indicates that the peaks in the rainwater mixing ratio occurred 26, 25, and 24 minutes after the start of the calculation, respectively.

面積が大きいということは、その分収束の位置ずれを発生させる面積が大きくなることを意味するため、感度実験A-1の結果である気流場と熱力学場の収束位置のズレが豪雨抑制に効くということと一貫性がある。

Fig. 16 (b) で示す風速場操作を1格子間隔を空けて合計2つ設置した場合には、連続して風速場操作領域を2つ設置した場合よりも豪雨抑制効果が小さくなっていることがわかる。この原因として、Fig. 17に (a) 南北方向に連続して2つの風速場操作領域を置いた実験（格子番号41, 59）における東西鉛直断面図、(b) 南北方向に1格子間隔をあけて風速場操作領域を2つ設置した実験（格子番号41, 79）の東西鉛直断面図を示す。この東西鉛直断面図では、格子番号59を通る断面に着目している。すなわち (a) では風速場操作が行われているため風速が遅くなっており、(b) では風速場操作は行われていないので風速は遅くできていない。この2つの図を比較すると、(a) ではコンターで示す上昇流への流入風（ベクトル）が

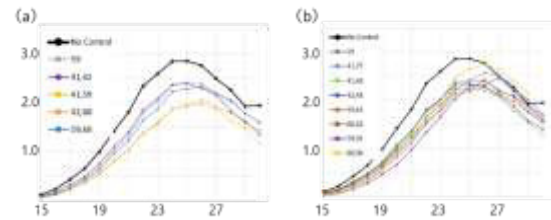


Fig. 16 Results of Sensitivity Experiment A-3. (a) An experiment where two wind field operation regions were placed consecutively. (b) An experiment where two wind field operation regions were placed with a one-grid-cell gap between them. The numbers in the figure correspond to the grid numbers shown in Fig. 13. The horizontal axis represents the elapsed time [minutes], and the vertical axis shows the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time.

風速場操作によって抑えられている（図中緑丸部）一方で、(b) では上昇流に (a) よりも強い流入風があることがわかる。また、風速場操作領域に間隔があいていることで、時間経過とともに温位のバブルによる熱学的収束が強まる青丸部に上昇流域が伸びており、気流場と熱力学場の収束位置の不均衡が風速場操作位置に間隔があることで部分的に成立していないことが風速場操作領域に間隔が空くと連続して設置した場合より豪雨抑制効果が弱くなる原因であることがわかる。

5. 感度実験Aの考察

5.1 降雨強度のピークが出る時刻のずれについて

感度実験A全体を通して、豪雨抑制メカニズムのうち気流場と熱力学場の収束の位置ずれが重要であり、そこには風速場操作の位置、主風向に垂直な方向への領域の大きさが大きく影響することが分かった。感度実験A-2で、1格子のみで風速場操作を行った場合に、Fig. 15に示すように雨水混合比のピークが出る時刻が計算開始から24～26分とばらつきがあった。その主な傾向として、Fig. 15で示す温位のバブルの中心に近いほどピークが出る時刻が遅くなっていることが見て取れる。しかし、温位のバブルの中心である格子番号77で最も雨が弱められているわけではなく、その1格子北にある格子番号59で最も雨が弱められていた。また、Fig. 15の赤枠で示す温位のバブルの設置範囲内でバブルの中心を通る格子番号75～79よりもその1格子分北の格子番号57～61の方がより豪雨抑制効果が高いことがわかった。以下ではその原因について解析した結果について述べる。

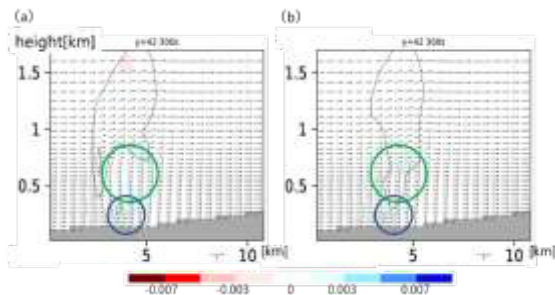


Fig. 17 East-West Vertical Cross-Section Through Grid Number 59 in Experiments: (a) where two wind field operation regions were placed consecutively (grid numbers 41 and 59), and (b) where two wind field operation regions were placed with a one-grid-cell gap (grid numbers 41 and 77). Cold colors indicate convergence [s^{-1}], warm colors indicate divergence [s^{-1}], contours represent the updraft [m/s], and vectors represent the wind speed [m/s]. The blue circles in the figure indicate the positions where the thermodynamic convergence due to the potential temperature bubble strengthens over time.

最初に、以下で使用する変数の定義について述べる。

- ・水蒸気の取り込み量: 1.5m/s以上の上昇流が発生している高度1kmの領域について水蒸気混合比を3次元積算したものをNo Controlでの3次元積算値で割ったもの。単位は%。
- ・水平風取り込み量: 1.5m/s以上の上昇流が発生している高度1kmの領域について東西風を3次元積算したものをNo Controlでの3次元積算値で割ったもの。単位は%。

また、上昇流の閾値である1.5m/sという値については、Fig. 16で (a) 格子番号59, (b) 格子番号77の水蒸気混合比[g/kg]の水平断面示すように、コンターで示す上昇流のより強い領域(1.5m/s以上の領域)において水蒸気混合比に差が発生し始めており、より豪雨を抑制できた実験(格子番号59)ではそうでない実験(格子番号77)よりもその領域において水蒸気混合比が小さくなっていることが分かったため、1.5m/sという値を設定した。高度1kmの領域について3次元積算をした根拠として、風速場操作領域の上端の高度630mよりも高く、かつ山口ら(2024)の都賀川豪雨模擬計算で設定した豊富な水蒸気が西側境界から流れ出てくる高度が地表から高度約1kmまでであり、そこでの違いについて着目するためである。

Table 2に各格子番号で風速場操作を行った結果、豪雨抑制効果、水蒸気取り込み量、水平風取り込み量がそれぞれどうなったかを示す。Table. 2から、水

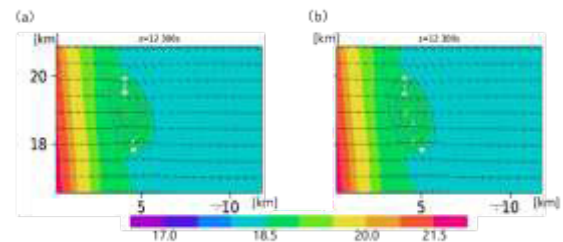


Fig. 18 Horizontal Cross-Sections for (a) Grid Number 59 and (b) Grid Number 77. Shading indicates the water vapor mixing ratio [g/kg], contours represent the updraft [m/s], and vectors show the wind speed [m/s].

蒸気取り込み量に関して、北側の格子である39~43, 57~61と温位のバブルの中心に近づくほど、また、南側の格子である111~115, 93~97と温位のバブルの中心に近づくほど水蒸気取り込み量が増大していることがわかる。また、バブルの中心より東側で風速場操作を行うほど水蒸気取り込み量が増大していることがわかる。このことを、温位のバブルによって発生する上昇流のコアが主風向である西風に移流することと照らし合わせて考えると、風速場操作を温位のバブルの中心で行うと、風速場操作によって副作用的に発生する上昇流によって水蒸気が持ち上がり、それが上昇流のコアにより近い位置で取り込まれやすくなるために水蒸気を取り込み量が増えたと考えられる。また、温位のバブルの中心部より東側で風速場操作を行うと、そこに発達しながら移流する上昇流の経路と重なる。よって結果的に上昇流のコアに近い場所で風速場操作を行ったこととなり、水蒸気を取り込み量が増大したと考えられる。また、Table 2から、水平風を取り込み量に関して、北側の格子である39~43, 57~61と温位のバブルの中心に近づくほど、また、南側の格子である111~115, 93~97と温位のバブルの中心に近づくほど水平風の取り込み量が減少していることがわかる。また、風速場操作を温位のバブルの中心より東側で行うほど水平風の取り込み量が減少していることがわかる。このことに関しても、上昇流のコア部分と照らし合わせると以下のように考えられる。風速場操作領域から外に出ると、その風は環境場の風に徐々になじんでいく。つまり、風速場操作領域の出口から遠くなるほどに抑制された風速は環境場の風速になじんで速くなっていく。風速場操作を温位のバブルの中心より東で行うほど上昇流のコア部分と風速場操作の出口との距離が短くなる。したがって抑制された風速が環境場となじむ前に上昇流に取り込まれる形になり、水平風の取り込み量が減少すると考えられる。

Table 2 Results of wind field operation for each grid number. The table includes the grid number, the suppression effect on heavy rainfall (compared to No Control), the amount of water vapor intake, and the amount of horizontal wind intake.

格子番号	豪雨抑制効果 (%)	水蒸気取り込み量 (%)	水平風取り込み量 (%)
39	95	99.82	98.95
40	90	99	97.86
41	87	99.99	97.39
42	86	100.3	95.29
43	89	100.28	94.38

格子番号	豪雨抑制効果 (%)	水蒸気取り込み量 (%)	水平風取り込み量 (%)
57	94	100.99	98.64
58	87	99.86	96.78
59	83	98.08	93.52
60	85	97.56	88.88
61	93	101.65	85.45

格子番号	豪雨抑制効果 (%)	水蒸気取り込み量 (%)	水平風取り込み量 (%)
75	98	102.76	97.86
76	97	103	95.29
77	98	101.38	92.77
78	102	101.96	87.75
79	105	103.66	81.1

格子番号	豪雨抑制効果 (%)	水蒸気取り込み量 (%)	水平風取り込み量 (%)
93	94	99.28	97.78
94	91	99.19	97.16
95	93	98.72	92.64
96	97	97.5	85.09
97	103	96.53	77.09

格子番号	豪雨抑制効果 (%)	水蒸気取り込み量 (%)	水平風取り込み量 (%)
111	93	97.84	97.27
112	90	96.68	96.06
113	87	94.53	94.24
114	88	95.19	93.9
115	92	96.64	94.1

また、Table 2の結果を基に重回帰分析を行うと、水蒸気取り込み量の係数は1.09、水平風の取り込み量の係数は-0.56であった。つまり、水蒸気取り込み量と水平風取り込み量の豪雨抑制効果への寄与はおよそ2:1ほどであることがわかった。

5.2 東西方向の風速場操作における主風向に平行な方向の領域の大きさが持つ意味について

感度実験A-3をもとに、東西方向の風速場操作において主風向に平行な方向である東西方向の領域の大きさが豪雨抑制にどのような効果があるのかを考察する。

考察のために、風速場操作領域を東西方向に2つ連続しておいた実験（以下、59・60とする。）と1つだけ置いた実験（以下、59とする。）の比較を行う。Fig. 16でわかるように、豪雨抑制効果は59・60のほうが大きかった。以下では、59からNo Controlの差分と、59・60から59の差分をとりながら解析を行った。Fig. 19 (a) に59からNo Controlの収束量の差分を、(b) に59・60から59の収束量の差分を示す（共に風速場操作を行った格子を通る東西鉛直断面である）。図

中のベクトルは左向きであれば豪雨がより抑制できていた実験の方が東風を抑えられていることを示す。寒色系の陰影では、豪雨が寄り抑制できていた実験の方が収束量が大きいことを示す。コンターでは、No Controlにおける上昇流を示す。よって、Fig. 19 (a) からは風速場操作を1格子で行ったことで（図中黄緑の四角が風速場操作領域。）、メインの上昇流に取り込まれる流入風を抑制できたことがわかる。また、Fig. 19 (b) からは更に風速場操作領域を東西方向に連続して1格子設置することで（図中濃い緑色が風速場操作領域。）1格子のみで風速場操作を行うときよりも上昇流に取り込まれる流入風を削減できていることがわかる。豪雨抑制効果としては59では約17%の削減があり、59・60では20%の削減があった。また、格子番号60単体の風速場操作による削減率は15%であった。すなわち、主風向に平行な方向への風速場操作領域の拡大は加算的には増加しないことがわかる。

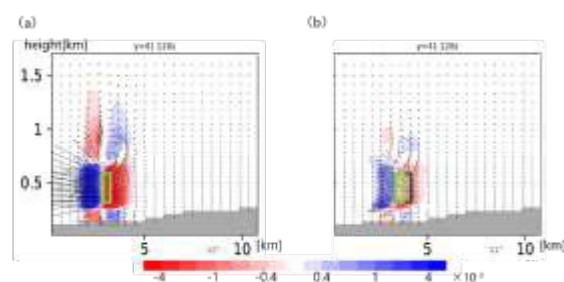


Fig. 19 (a) The difference from No Control for the experiment where wind field operation was conducted only in one grid (Grid Number 59). (b) The difference from Grid Number 59 for the experiment where wind field operation was conducted consecutively in the east-west direction (Grid Numbers 59 and 60). Cold colors indicate that the experiment with the greater suppression effect had higher convergence [s^{-1}], contours represent the updraft [m/s] for No Control, and vectors show the difference in wind speed [m/s]. If the vectors point left, it indicates that the experiment with the greater suppression effect had a greater reduction in wind speed. The light green rectangle in the figure represents the wind field operation region for Grid Number 59, and the dark green rectangle represents the wind field operation region for Grid Numbers 59 and 60.

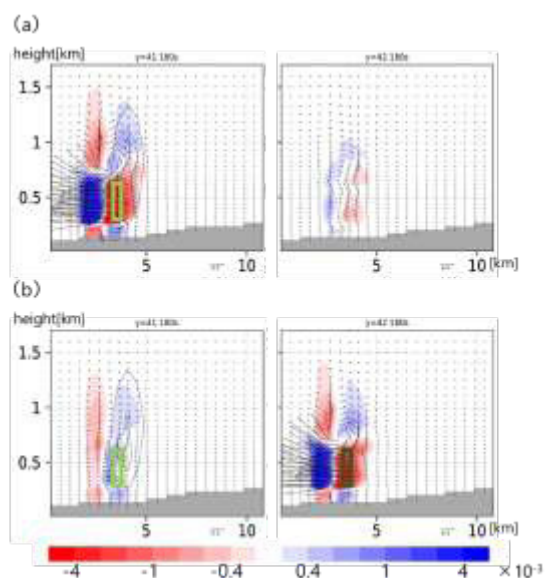


Fig. 20 (a) The difference from No Control for the experiment where wind field operation was conducted only in one grid (Grid Number 59). (b) The difference from Grid Number 59 for the experiment where wind field operation was conducted consecutively in the north-south direction (Grid Numbers 41 and 59). Both figures show the east-west vertical cross-section passing through Grid Numbers 41 and 59. Cold colors indicate that the experiment with the greater suppression effect had higher convergence [s^{-1}], contours represent the updraft [m/s] for No Control, and vectors show the difference in wind speed [m/s]. If the vectors point left, it indicates that the experiment with the greater suppression effect had a greater reduction in wind speed. The light green rectangle in the figure represents the wind field operation region for Grid Number 59, and the dark green rectangle represents the wind field operation region for Grid Numbers 41 and 59. In the left figure of (b), only the light green rectangle is shown, but the wind field operation region for Grid Numbers 41 and 59 (dark green rectangle) is also present there.

5.3 東西方向の風速場操作における主風向に垂直な方向の領域の大きさが持つ意味について

感度実験A-3をもとに、東西方向の風速場操作において主風向に垂直な方向である南北方向の領域の大きさが豪雨抑制にどのような効果があるのかを考察する。

考察のために、風速場操作領域を南北方向に2つ連続しておいた実験（以下、41・59とする。）と1つだけ置いた実験（以下、59とする。）の比較を行う。Fig.

16でわかるように、豪雨抑制効果は41・59のほうが大きかった。以下では、59からNo Controlの差分と、41・59から59の差分をとりながら解析を行った。Fig. 20 (a) に59からNo Controlの収束量の差分を、(b) に41・59から59の収束量の差分を示す（共に風速場操作を行った格子である41と59を通る東西鉛直断面を示している。）。図中のベクトルは左向きであれば豪雨がより抑制できていた実験の方が東風を抑えられていることを示す。寒色系の陰影では、豪雨が寄り抑制できていた実験の方が収束量が大きいことを示す。コンターでは、No Controlにおける上昇流を示す。(a) から、風速場操作を1格子で行うことによって上昇流への流入風が削減できていることがわかる。また、(b) から、(a) の左図で示したところに加え、更に風速場操作領域を北に1格子設置したことで（(b) 右図）、2つの断面で流入風を削減できていることがわかる。豪雨抑制効果としては59では約17%の削減があり、41・59では31%の削減があった。また、格子番号41単体の風速場操作による削減率は13%であった。すなわち、主風向に垂直な方向に風速場操作領域を拡大することは加算以上の効果をもたらすことがわかった。

また、より大きな面積で流入風を削減したという結果において、感度実験A-1で明らかになった気流場と温位場の収束位置のズレを離すことが豪雨抑制に重要であるという結果とも整合性があることがわかる。

5.4 東西方向の風速場操作における高さ方向の領域の大きさが持つ意味について

感度実験A-2から、水平に1格子のみとった場合に最も豪雨抑制できていた場所がわかった（格子番号59）。本項では、この格子番号59において、風速場操作領域の高さを変更することで、豪雨抑制効果にどう寄与するかを明らかにする。また、高さを変更するにあたって、現実的なもの作りの観点を取り入れる目的で、風速場操作領域の底面は地表面に最も近い部分からはじめ、そこから超大型レンズ風車の高さを目安として224mまでを32m刻みで高さを変更して実験を行った。その結果をFig. 21に示す。この結果から、風速場操作領域においては高さが高いほどに抑制効果が大きいことがわかる。また、Fig. 22に風速場操作領域の高さと豪雨抑制効果の関係を示す。この図から、高さと抑制効果は強い線形性を持つことがわかった。以下では、高さが224mの実験（以下、224m）とその約半分の高さである高さ128mの実験（以下、128m）との比較を行う。また、前項までと同様に128mからNo Controlの差分をとったものと224mから128mの差分をとったもので解析を行っている。Fig. 22 (a) に128mからNo Controlの収束量の

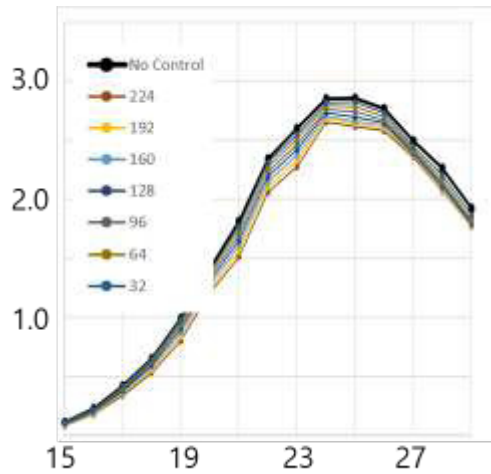


Fig. 21 Results of the experiment where the height was varied from 32 to 224 m (in 32-m increments) at Grid Number 59. The horizontal axis represents the elapsed time [minutes], and the vertical axis shows the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time.

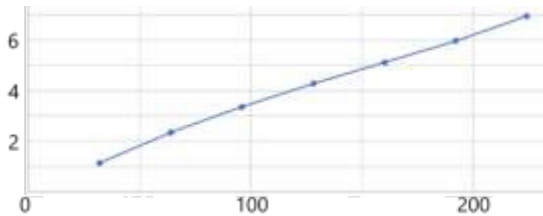


Fig. 22 The relationship between the height of the wind field operation region and the heavy rainfall suppression effect at Grid Number 59. The horizontal axis represents the height of the wind field operation region [m], and the vertical axis shows the heavy rainfall suppression ratio [%] at that height.

差分を、(b) に224mから128mの収束量の差分を示す（共に風速場操作を行った格子を通る東西鉛直断面である）。図中のベクトルは左向きであれば豪雨がより抑制できていた実験の方が東風を抑えられていることを示す。寒色系の陰影では、豪雨が寄り抑制できていた実験の方が収束量が大きいことを示す。コンターでは、No Controlにおける上昇流を示す。Fig. 23 (a) からは風速場操作を高さ128mで行ったことで（図中黄緑の四角が風速場操作領域。）、メインの上昇流に取り込まれる流入風を抑制できたことがわかる。また、Fig. 23 (b) からは更に風速場操作領域を高さ方向に大きくすることで（図中濃い緑色が風速場操作領域。）、高さ128mで風速場操作を行うときよりも上昇流に取り込まれる流入風を削減できていることがわかる。豪雨抑制効果としては128mでは約4%の削減があり、224mでは7%の削減があった。Fig. 23から、風速場操作領域の高さと豪雨抑制割合

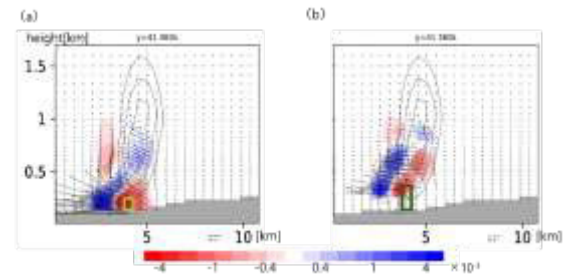


Fig. 23 (a) The difference from No Control for the experiment where wind field operation was conducted at a height of 128 m. (b) The difference between the experiment where wind field operation was conducted at 224 m and the experiment where it was conducted at 128 m. Cold colors indicate that the experiment with the greater suppression effect had higher convergence [s^{-1}], contours represent the updraft [m/s] for No Control, and vectors show the difference in wind speed [m/s]. If the vectors point left, it indicates that the experiment with the greater suppression effect had a greater reduction in wind speed. The light green rectangle in the figure represents the wind field operation region at 128 m, and the dark green rectangle represents the wind field operation region at 224 m.

には強い線形性がみられたことから考えると、本実験では32mごとに1%の抑制効果の増大が見込めることがわかった。

6. 感度実験B-1：南北風操作の時空間的感度

本章では、南北風の風速場操作を行うことで東西風の風速場操作を行った際と豪雨抑制メカニズムが比較することが目的である。

6.1 感度実験B-1の設定

風速場操作の重要なパラメータは感度実験Aから風速場操作領域の位置が挙げられる。よって感度実験B-1では、風速場操作領域を南北2.88km、東西0.96km、高さ350mとし、風速場操作のタイミング及び期間は計算開始直後から10分間に固定し、その中で最も抑制効果が大きい位置を模索する。なお、風速減速量については、山口ら（2024）では北側境界から北風の風速が徐々に強くなっていく境界値の時間変化スキームを用いていたため、北風の速度が1m/sを超えた場合に、それが常に1m/sになるように山口ら（2024）の風速場操作スキームを用いた。

6.2 感度実験B-1の結果

前述の設定で計算を行った結果、南北風の風速場

操作において最も豪雨抑制効果があった領域をFig. 24に示す。また、その領域における雨水混合比の最大値[g/kg]の時系列変化をFig. 25の灰色の折れ線グラフに示す。このことから、豪雨抑制効果は約34%だったことがわかる。

このような豪雨抑制効果が得られた要因として、山口ら (2024) による都賀川豪雨のLES模擬計算では北側境界から時間変化的に徐々に都賀川豪雨発達に寄与していたとされる冷氣外出流が流入するように設定されていた。この設定が今回得られた豪雨抑制効果に大きく関与していると考えられるため、この冷氣外出流と風速場操作の関係を主に解析した。Fig. 26に (a) 山口ら (2024) , (b) 感度実験B-1で最も豪雨抑制効果があった実験の南北鉛直断面を示す。陰影で、水平平均からの温位偏差[K], コンターで上昇流を示す。これは山口ら (2024) で示された、冷氣外出流に伴って発生する上昇流を温位のバブルによって発生した上昇流が取り込み、上昇流が強くなった時間の図であるが、南北風の風速場操作を行った (b) において、冷氣外出流の進行を風速場操作領域 (図中緑破線) が抑え、それによって温位のバブルによる上昇流 (黄色丸) が、冷氣外出流の進行とともに発生する上昇流を取り込めていないことがわかる。つまり、南北風の風速場操作では上昇流がさらに発達する要因となった冷氣外出流の進行を抑えたことが豪雨抑制メカニズムとして働いたことがわかる。

7. 感度実験B-2：最適位置での空間的感度

本節では、感度実験B-2で明らかになった最も豪雨抑制効果の出る領域を中心に、風速場操作領域を水平1格子のみとし、豪雨抑制効果が強い位置を模索した。

7.1 感度実験B-2の設定

感度実験B-2では感度実験B-1で最も豪雨抑制効果が得られた実験を基準に、風速場操作領域の大きさを感度実験B-1で最も抑制効果のよかったFig. 24の灰色領域周辺の1格子 (水平解像度480×480m) のみにした実験を行った。

7.2 感度実験B-2の結果

前述の設定で計算を行った結果、Fig. 27の灰色領域で示す位置が最も抑制効果が大きく、格子番号67では13%, 格子番号68では11%, 格子番号85では13%, 格子番号86では13%の抑制効果が得られた。また、この最も抑制効果の高かった4つの実験の雨水混合比の最大値[g/kg]の時系列変化をFig. 28に示す。

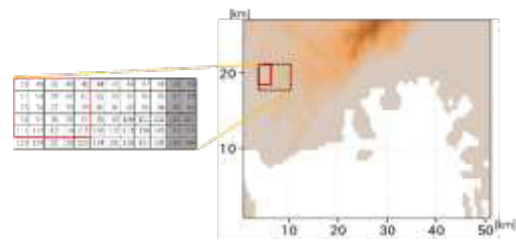


Fig. 24 The position with the greatest suppression effect obtained in Sensitivity Experiment B-1 (gray area), and the location of the potential temperature bubble (red box).

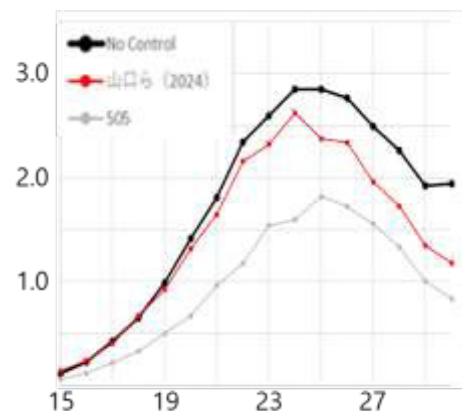


Fig. 25 Time series of the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] in the experiment with the greatest heavy rainfall suppression effect during the wind field operation for the north-south wind (gray line graph). The horizontal axis represents the elapsed time [minutes], and the vertical axis shows the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time.

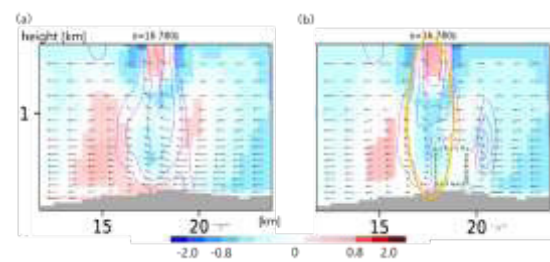


Fig. 26 (a) Yamaguchi et al. (2024) and (b) the north-south vertical cross-section from the experiment with the greatest heavy rainfall suppression effect in Sensitivity Experiment B-1. Shading indicates the potential temperature deviation [K] from the horizontal average, contours represent the updraft [m/s], and the green dashed area indicates the wind field operation region.

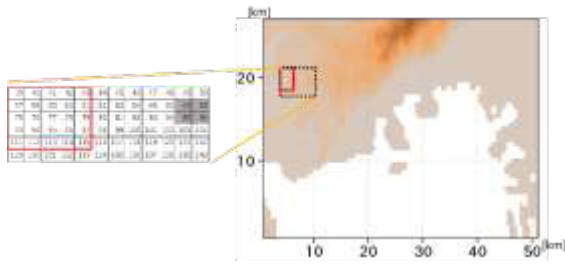


Fig. 27 The location with the greatest heavy rainfall suppression effect in Sensitivity Experiment B-2 (gray area). The red box indicates the location of the potential temperature bubble.

8. 感度実験B-3：操作領域設置位置の感度

本章では、前章で1格子のみの操作領域で最も豪雨抑制効果の大きかった位置 (Fig. 27参照) を基準に、南北方向の風速場操作を行う格子をもう1つ追加して設置した際に、豪雨抑制効果は加算的に増加するのか、指数関数的に増加するのかを検証することを目的としている。

8.1 感度実験B-3の設定

感度実験B-3では感度実験B-2の1格子のみでの風速場操作で最も豪雨抑制効果が大きい位置に連続するようにもう1格子分の風速場操作を行う実験を実施した。今回は、格子番号67を基準に、東に1格子追加したもの（以下、67・68）と南に1格子追加したもの（67・85）の2つのみを行った。

8.2 感度実験B-3の結果

前述の設定で計算を行った結果をFig. 29に示す。この図から、感度実験A-3とは違い、南北方向の風速場操作において、南北方向に風速場操作領域が大きくても、東西方向に大きくても豪雨抑制効果は大きく異なることがわかった。

9. 感度実験Bの考察

9.1 南北方向の風速場操作における南北方向の領域の大きさが持つ意味について

感度実験B-3をもとに、南北方向の風速場操作において南北方向の領域の大きさが豪雨抑制にどのような効果があるのかを考察する。

考察のために、67・85と67の比較を行う。Fig. 28、Fig. 29でわかるように、豪雨抑制効果は67・85のほうが大きかった。以下では、67からNo Controlの差分と、67・85から67の差分をとりながら解析を行った。Fig. 29 (a) に67からNo Controlの水平平均からの温位偏差の差分を、(b) に67・85から67の水平平均から

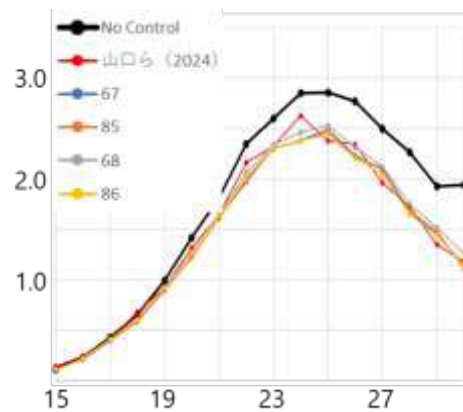


Fig. 28 Time series of the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] in the experiment with the greatest heavy rainfall suppression effect in Sensitivity Experiment B-2. The horizontal axis represents the elapsed time [minutes], and the vertical axis shows the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time.

の温位偏差の差分を示す（共に風速場操作を行った格子を通る南北鉛直断面である）。図中のベクトルは右向きであれば豪雨がより抑制できていた実験の方が北風を抑えられていることを示す。寒色系の陰影では、豪雨がより抑制できていた実験の方が水平平均からの温位偏差が高い（冷氣外出流の進行の観点では、冷氣外出流の進行を抑制できている）ことを示す。コンターでは、No Controlにおける上昇流を示す。よって、Fig. 30 (a) からは風速場操作を1格子で行ったことで（図中黄緑の四角が風速場操作領域。）、メインの上昇流に取り込まれる流入風を抑制できたことがわかる。更に図中の黄丸部に着目すると、1格子の風速場操作によって冷氣外出流の進行を抑制できていることがわかる。また、Fig. 30 (b) からは更に風速場操作領域を南北方向に連続して1格子設置することで（図中濃い緑色が風速場操作領域。）1格子のみで風速場操作を行うときよりも上昇流に取り込まれる流入風を削減できていること、さらに黄色丸部から冷氣外出流の進行を抑制できているがわかる。豪雨抑制効果としては67では約13%の削減があり、67・85では18%の削減があった。また、格子番号85単体の風速場操作による削減率は約13%であった。すなわち、南北方向の風速場操作において、南北方向に風速場操作領域を大きくすることによって豪雨抑制効果は加算的には増加しないことがわかった。

9.2 南北方向の風速場操作における東西方向の領域の大きさが持つ意味について

感度実験B-3をもとに、南北方向の風速場操作において東西方向の領域の大きさが豪雨抑制にどのような

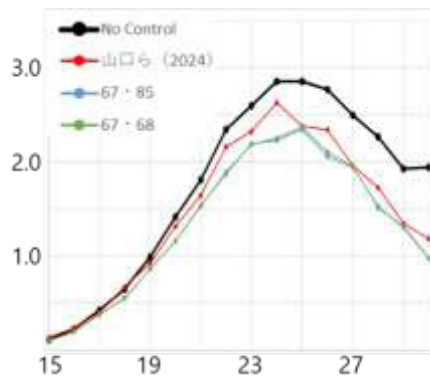


Fig. 29 Time series of the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at 67・68 and 67・85 in Sensitivity Experiment B-3. The horizontal axis represents the elapsed time [minutes], and the vertical axis shows the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time.

な効果があるのかを考察する。

考察のために、67・68と67の比較を行う。Fig. 28, Fig. 29でわかるように、豪雨抑制効果は67・68のほうが大きかった。以下では、67からNo Controlの差分と、67・68から67の差分をとりながら解析を行った。Fig. 30 (a) に67からNo Controlの水平平均からの温位偏差の差分を、(b) に67・68から67の水平平均からの温位偏差の差分を示す（共に格子67、68を通る南北鉛直断面である）。図中のベクトルは右向きであれば豪雨がより抑制できていた実験の方が北風を抑えられていることを示す。寒色系の陰影では、豪雨がより抑制できていた実験の方が水平平均からの温位偏差が高い（冷氣外出流の進行の観点では、冷氣外出流の進行を抑制できている）ことを示す。コンターでは、No Controlにおける上昇流を示す。よって、Fig. 31 (a) 左図からは風速場操作を1格子で行ったことで（図中黄緑の四角が風速場操作領域。）、メインの上昇流に取り込まれる流入風を抑制できたことがわかる。更に図中の黄丸部に着目すると、1格子の風速場操作によって冷氣外出流の進行を抑制できていることがわかる。更に、(a) 右図から今回風速場操作を行わなかった場所でも風速が抑制されており、また黄色丸部に着目すると水平平均からの温位偏差が高いことがわかった。更に (b) 左図から、風速場操作領域を東西に2つ連続しておくことで、1つだけ風速場操作領域を奥実験よりも風が抑制できていることがわかる。また、黄色丸に着目すると、水平平均からの温位偏差が高くなっていることがわかる。豪雨抑制効果としては67では約13%の削減があり、67・68では17%の削減があった。また、格子番号68単体の風速場操作による削減率は約11%であった。すなわち、南北方向の風速場操作において、東西方向

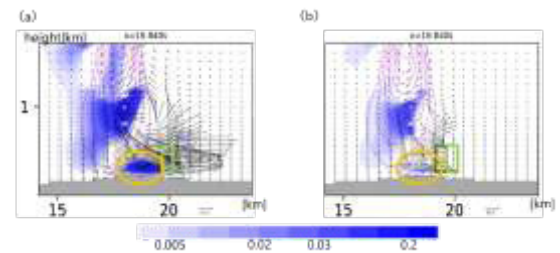


Fig. 30 (a) The difference from No Control for the experiment where wind field operation was conducted at a single grid (Grid Number 67). (b) The difference from Grid 67 in the experiment where two wind field operations were consecutively placed in the north-south direction (Grid Numbers 67 and 85). Both show the north-south vertical cross-section passing through the wind field operation regions. Cold colors indicate that the experiment with the greater suppression effect had a higher potential temperature deviation [K] from the horizontal average, contours represent the updraft [m/s] for No Control, and vectors show the difference in wind speed [m/s]. If the vectors point right, it indicates that the experiment with the greater suppression effect had a greater reduction in wind speed. The light green rectangle in the figure represents the wind field operation region at Grid 67, and the dark green rectangle represents the wind field operation region at Grids 67 and 85.

に風速場操作領域を大きくすることによって豪雨抑制効果は加算的には増加しないことがわかった。

9.3 南北方向の風速場操作における高さ方向の領域の大きさが持つ意味について

感度実験B-2から、水平に1格子のみとった場合に最も豪雨抑制できていた場所がわかった（格子番号85）。本項では、この格子番号85において、風速場操作領域の高さを変更することで、豪雨抑制効果にどう寄与するかを明らかにする。また、高さを変更するにあたって、現実的なもの作りの観点を取り入れる目的で、風速場操作領域の底面は地表面に最も近い部分からはじめ、そこから超大型レンズ風車の高さを目安として224mまでを32m刻みで高さを変更して実験を行った。その結果をFig. 32に示す。この結果から、風速場操作領域においては高さが高いほどに抑制効果が大きいことがわかる。また、Fig. 33に風速場操作領域の高さと豪雨抑制効果の関係を示す。この図から、高さが高くなるほど抑制効果は2次関数的に増加することがわかった。以下では、高さが224mの実験（以下、224m）とその約半分の高さである高

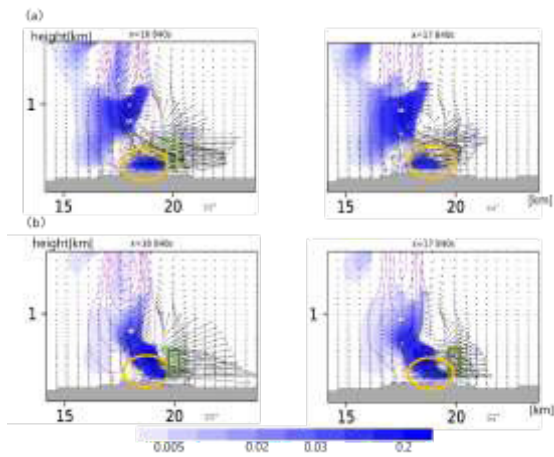


Fig. 31 (a) The difference from No Control for the experiment where wind field operation was conducted at a single grid (Grid Number 67). (b) The difference from Grid 67 in the experiment where two wind field operations were consecutively placed in the east-west direction (Grid Numbers 67 and 68). Both show the north-south vertical cross-section passing through Grids 67 and 68. Cold colors indicate that the experiment with the greater suppression effect had a higher potential temperature deviation [K] from the horizontal average, contours represent the updraft [m/s] for No Control, and vectors show the difference in wind speed [m/s]. If the vectors point right, it indicates that the experiment with the greater suppression effect had a greater reduction in wind speed. The light green rectangle in the figure represents the wind field operation region at Grid 67, and the dark green rectangle represents the wind field operation region at Grids 67 and 68.

さ128mの実験（以下、128m）との比較を行う。また、前項までと同様に128mからNo Controlの差分をとったものと224mから128mの差分をとったもので解析を行っている。Fig. 33 (a) に128mからNo Controlの水平平均からの温位偏差の差分を、(b) に224mから128mの水平平均からの温位偏差の差分を示す（共に風速場操作を行った格子を通る南北鉛直断面である）。図中のベクトルは右向きであれば豪雨がより抑制できていた実験の方が北風を抑えられていることを示す。寒色系の陰影では、豪雨がより抑制できていた実験の方が水平平均からの温位偏差が高いことを示す。コンターでは、No Controlにおける上昇流を示す。Fig. 34 (a) からは風速場操作を高さ128mで行ったことで（図中黄緑の四角が風速場操作領域。）、メインの上昇流に取り込まれる流入風を抑制できたことがわかる。そして黄色丸部において水平平均からの温位偏差が高いことがわかる。また、Fig.

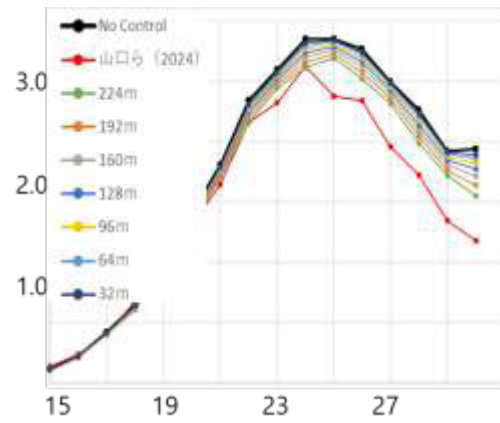


Fig. 32 Results of experiments at Grid Number 85, where the height was varied from 32 to 224 m in 32 m increments. The horizontal axis represents the elapsed time [minutes], and the vertical axis shows the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time.

33 (b) からは更に風速場操作領域を高さ方向に大きくすることで（図中濃い緑色が風速場操作領域。）高さ128mで風速場操作を行うときよりも上昇流に取り込まれる流入風を削減できていることがわかる。さらに黄色丸部において（a）よりも高い高度において、水平平均からの温位偏差が高くなっていることがわかる。豪雨抑制効果としては128mでは約2.3%の削減があり、224mでは5.7%の削減があった。このことから、南北方向の風速場操作において高さが高くなると、抑制効果は加算以上の効果をもたらすことがわかる。

10. 感度実験C：東西風・南北風操作の組み合わせ

本章では、感度実験A、Bで明らかになった一番小さい領域（480m×480m×224m）での風速場操作で最も豪雨抑制効果があった風速場操作領域の位置をA、Bそれぞれから1つずつ選択し、組み合わせる、つまり一番小さい領域での東西方向の風速場操作と南北方向の風速場操作を組み合わせることで、豪雨抑制効果が加算的に増大するのかを検証することを目的とする。

10.1 感度実験Cの設定

感度実験Aで一番豪雨抑制効果のあった格子番号41、42、59、60と感度実験Bで一番豪雨抑制効果のあった57、85からそれぞれ1格子ずつ選択し、組み合わせた。

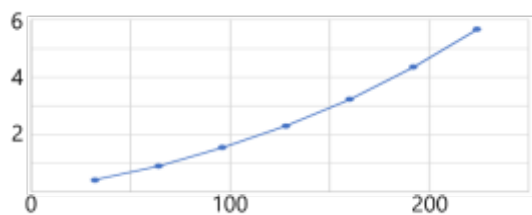


Fig. 33 The relationship between the height of the wind field operation region and the heavy rain suppression effect at Grid Number 85. The horizontal axis represents the height of the wind field operation region [m], and the vertical axis shows the heavy rain suppression rate [%] at that height.

10.2 感度実験Cの結果

Fig. 35に感度実験Cの結果を示す。この図から、東西方向・南北方向の風速場操作の組み合わせとして最も豪雨抑制効果の高い実験は格子番号60・85の組み合わせであることがわかる。以下ではこの60・85の解析結果について述べる。まず、Fig. 36に60, 85, 60・85それぞれの雨水混合比の最大値の時系列変化を示す。この図から、60, 85, 60・85の豪雨抑制効果はそれぞれ約7.0%, 約3.0%, 約16.1%であることがわかり、異なる抑制メカニズムの組み合わせによる抑制効果は加算以上の効果になることがわかった。次に、Fig. 37に60, 85, 60・85それぞれの上昇流の3次元積算値の時系列変化を示す。この図から、計算開始8分後頃までは60と60・85の上昇流の時系列は変化量まで同じで、その時間以降で、変化量は異なるが85と60・85の変化傾向がほとんど一致していることがわかる。このことから、計算開始から8分後に南北風の風速場操作による抑制メカニズムが東西風の風速場操作による抑制メカニズムを組み合わせさせたことがわかる。

11. まとめ

本研究では、山口ら (2024) の都賀川豪雨の風速場操作による気象制御を元に、風速場操作の向き、期間、タイミング、位置 (東西・南北・高度)、領域の大きさ、風速減速量を変化させることで、操作デバイスとして想定する大型レンズ風車のどのパラメータが豪雨抑制に重要なのかを明らかにするために、風速場操作の時空間的感度実験を行った。

特に感度が大きかったパラメータとして、風速場操作位置が挙げられる。その要因として、風の収束位置の変化によって対流コアに流入風が届きにくくなることと、より適切な位置での操作による水蒸気

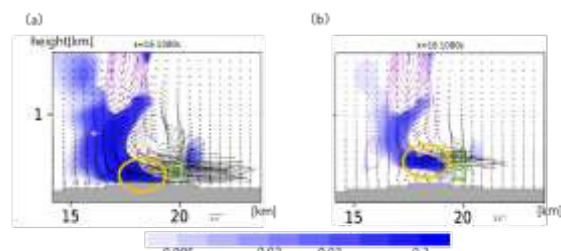


Fig. 34 (a) The difference between the experiment with wind field operation at a height of 128 m and the No Control case. (b) The difference between the experiment with wind field operation at a height of 224 m and the one at 128 m. Both figures show the north-south vertical cross-section through the wind field operation region. Cold-colored shading indicates that the experiment with the stronger suppression effect had a higher potential temperature deviation [K] from the horizontal mean. Contours show the updraft [m/s] in the No Control case, and vectors represent the difference in wind speed [m/s]. If the vectors point to the right, it indicates that the experiment with the stronger suppression effect had a weaker wind. The light green square indicates the wind field operation region at a height of 128 m, while the dark green square shows the wind field operation region at a height of 224 m.

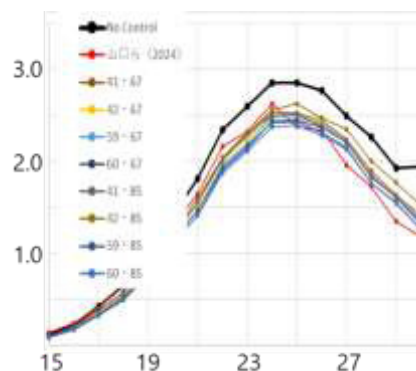


Fig. 35 Time series of the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] in Sensitivity Experiment C. The horizontal axis represents the elapsed time of the calculation [minutes], and the vertical axis represents the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time.

の取り込み量の削減が影響していた。

さらに、風速場操作領域を小さくし (480m×480m×224m, 大型風車2台分を想定)、対流コア付近で操作位置を変化させると、対流コアの中心に近づくほど降水強度のピークが表れる時刻が1~3分遅くなることがわかった。また、対流コアの中心が通る位置

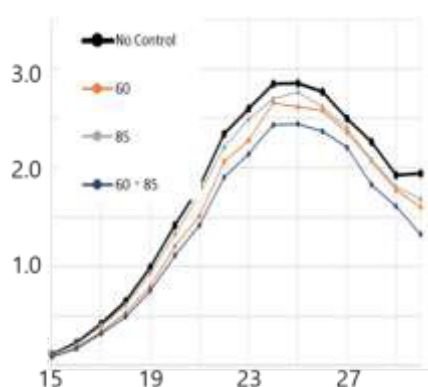


Fig. 36 Time series of the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] for grid points 60, 85, and 60 · 85. The horizontal axis represents the elapsed time of the calculation [minutes], and the vertical axis represents the maximum rainwater mixing ratio [g/kg] at that time.

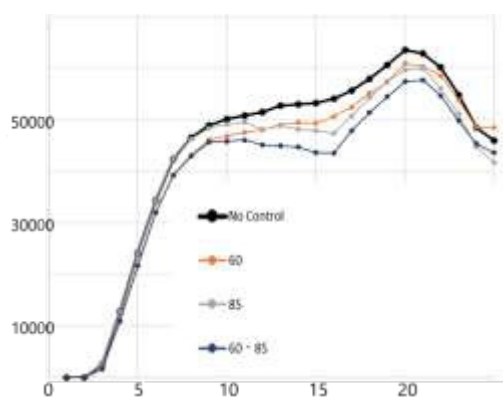


Fig. 37 Time series changes in the 3D integrated value [m/s] of updrafts at 60 and 85, 60 · 85. The horizontal axis represents the elapsed calculation time [minutes], and the vertical axis shows the 3D integrated value [m/s] of updrafts at that time.

で操作をすると、風速場操作によって副作用的に発生する上昇流が下層の豊富な水蒸気を上空へ上げ、さらにその近くで対流コアによる強い上昇流域があるため、豪雨の元となった上昇流に取り込まれる水蒸気が多くなり、風速場操作を行わない場合よりも雨抑制に対して上昇流の水蒸気取り込み量と水平風の取り込み量がどの割合で寄与するのかを調べるため重回帰分析を行った結果、2:1の割合で水蒸気を取り込み量の寄与が水平風の取り込みよりも寄与が大きいことがわかった。

主風向に垂直な方向（南北方向）で風速場操作を行った実験では、都賀川豪雨の発達要因の一つとして考えられている冷氣外出流（草開ら（2011））の進行を抑制したことが豪雨抑制につながった。

さらに、東西方向の風速場操作と南北方向の風速場操作を組み合わせる実験を行い、上昇流の時系列変化に着目すると、風速場操作開始からしばらくは、東西方向の風速場操作のみ行った実験と変化傾向が一致していたが、ある時間を境に南北方向の風速場操作のみ行った実験の変化傾向に移り変わった。このことから、ゲリラ豪雨の各ライフステージにおいてそれぞれ最適な操作手法が存在すると考えられる。

謝 辞

本研究はJST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2283), 科研費24H00291の支援を受けました

参考文献

- 草開浩・小山芳太・金森恒雄・瀬古弘（2011）：2008年7月28日近畿地方を南西進した線状降水帯と都賀川での大雨について，日本気象学会，天気58（5），3-20.
- 中北英一・山口弘誠・山邊洋之（2009）：レーダー情報を用いたゲリラ豪雨の卵の解析，京都大学防災研究所年報，第52号B，pp_547-563.
- 中北英一・山邊洋之・山口弘誠（2010）：ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究，水工学論文集，第54巻，pp.342-348.
- 中北英一・西脇隆太・山口弘誠（2013）：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予測に関する研究，京都大学防災研究所年報，55巻B，pp319-329.
- 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，京都大学防災研究所年報，80巻16号，論文ID: 23-16001.
- <https://recow.kyushu-u.ac.jp/>（最終閲覧日：2024/08/20）

（論文受理日：2024年8月30日）