

風速場操作による風速減衰効果の増幅機構に着目した LES モデルによる初期的検討 Initial Investigation of Amplification Mechanism of Wind-Speed Attenuation by Wind-Field Manipulation Using the LES Model

○溝尻渉・山口弘誠

○Wataru MIZOJIRI, Kosei YAMAGUCHI

In recent years, heavy rainfall disasters have become more frequent, and weather modification has attracted attention as a potential mitigation strategy. Previous studies have shown that controlling inflow wind and moisture can weaken convective systems. However, nonlinear amplification related to atmospheric chaos has not been fully examined. In this study, we conduct idealized wind-speed control experiments using LES model to clarify the conditions under which a downstream deceleration region in wind speed is amplified. Sensitivity experiments indicate that atmospheric stability strongly modulates the response. In unstable environments, small disturbances triggered by the control can grow and form a stronger deficit downstream than at the control location. Resolution sensitivity shows that higher resolution produces finer and more complex deficit structures and enhances downstream propagation of disturbances. Future work will perform ensemble simulations to quantify the robustness of these amplification characteristics. (139 words)

1. はじめに

近年、平成 29 年 7 月九州北部豪雨をはじめ、甚大な被害をもたらす豪雨災害が頻発している。こうした激甚化する豪雨災害の被害を抑える方策として気象制御が期待されている。気象制御に関連する研究として、山口ら（2024）[1]は都市気象 LES（Large Eddy Simulation）モデル[2]を用いて、2008 年神戸都賀川豪雨を対象に風速場操作を行うことで、渦管を抑制するという気象制御手法を示した。また山口ら（2024）[3]では、九州北部豪雨による線状対流系に対し、水蒸気と風速の流入を制御することで降水量を抑制する手法を示した。

上記の先行研究では、主に線形的な影響に着目しており、初期状態の微小な違いが将来的に大きく異なる結果をもたらす「カオス性」による非線形的な影響について、評価はされているが、十分な確認は行っていない。この大気力学におけるカオス性を逆に利用し、わずかな介入でも効果を増幅できれば、より効率的な制御ができる可能性がある。実在豪雨を対象とした制御設計へ接続する上でも、まず理想化系において操作の効果が増幅しやすい条件について検討する必要がある。

そこで本研究では、LES モデルを用いて風速場操作の理想実験を行い、抑制位置の下流側に生じる減速域がどのような条件で増幅するのかを(1)環境場、(2)解像度の 2 つの要因から整理し、大気場に依存した減速域の増幅特性を明らかにする。

2. 環境場の違いによる感度実験

2.1 計算設定

地形や建物を考慮しないフラットな地表面を設定した。格子間隔は、水平・鉛直方向ともに 120 m とし、東西、南北、鉛直の順に $400 \times 44 \times 20$ 格子を配置した。これにより、計算領域は $48 \text{ km} \times 5.28 \text{ km} \times 2.4 \text{ km}$ となる。境界条件は東西南北を周期境界、地上と上空は free-slip とした。積分時間は 2 時間であり、コリオリ力および雲微物理過程は考慮していない。初期場として、平成 29 年 7 月九州北部豪雨における福岡県朝倉市周辺（2017 年 7 月 5 日 18 時）の気象庁メソ数値予報モデルデータを理想化し、気圧・水蒸気混合比・東西風について、鉛直・水平方向ともに一様場として与えた。温位については、 0.2 K/km （安定）、 0 K/km （中立）、 -0.2 K/km （不安定）の 3 パターンを与えた。また乱流を駆動するために、温位に対して $\pm 0.1 \text{ K}$ の範囲の一様乱数擾乱を与えた。

2.2 計算結果

風速場操作位置における東西風の差分（操作後-操作前）分布を図 1 に示す。計算開始から 3750 秒後に着目すると、環境の安定度により、減速域（ $\Delta u < 0$ ）の形状と広がりが大きく異なることが示された。安定環境では減速域が比較的滑らかに分布する一方、中立環境では安定よりも乱れが生じやすくなり、減速域がわずかに不規則になっている。不安定環境では減速域の細かな構造が顕著となり、特に 10 km 付近では、操作位

置よりも強い減速域が新たに形成されている。これらは、操作によって生じた擾乱が、背景の不安定な成層の中で自発的に増幅しながら下流へ発達する可能性が示唆される。

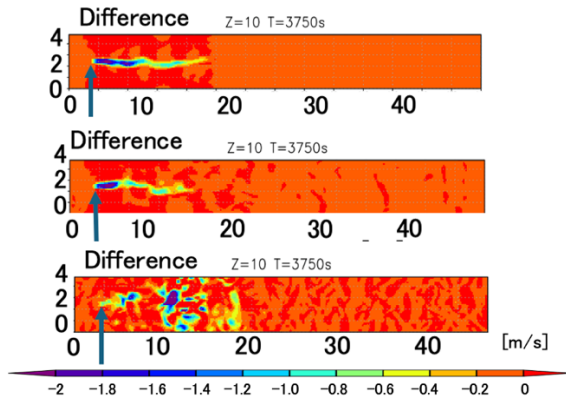


図 1 高度約 1.2 km における東西風の差分 Δu (風速場操作後-操作前) の水平分布 ($t = 3750$ s). 上から順に安定・中立・不安定環境の結果を示す。矢印は風速場操作領域の位置を示す。

3. 解像度の違いによる感度実験

3.1 計算設定

地形や建物を考慮しないフラットな地表面を設定した。格子間隔は、水平・鉛直方向ともに同一とし、480 m, 240 m, 120 m, 60 m, 30 m の 5 通りを設定した。計算領域は $48.96 \text{ km} \times 5.76 \text{ km} \times 2.4 \text{ km}$ とした。境界条件は東西南北を周期境界、地上と上空は free-slip とした。積分時間は 2 時間であり、コリオリ力および雲微物理過程は考慮していない。初期場は 2.1 と同様に理想化し、気圧・水蒸気混合比・東西風・温位について、鉛直・水平方向ともに一様場として与えた。また乱流を駆動するために、温位に対して $\pm 0.1 \text{ K}$ の範囲の一様乱数擾乱を与えた。

3.2 計算結果

風速場操作位置における東西風の差分 (操作後-操作前) 分布を図 2 に示す。計算開始から 7200 秒後に着目すると、解像度の向上に伴い、減速域の構造がより微細かつ複雑となる。粗い解像度では、操作の影響が比較的連続的に表現されているのに対し、60 m, 30 m と解像度を細かくするにつれて、小スケールの不規則構造が増加し、減速域が下流方向に伝搬しながら広がっている傾向が確認できる。これは、高解像度ほど小スケールの乱流渦が表現され、風速場操作に起因する擾乱が空間的に発達しやすくなるためと考えられる。

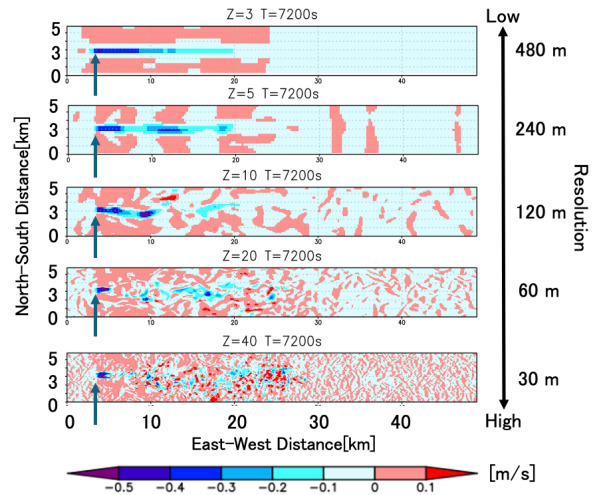


図 2 高度約 1.2 km における東西風の差分 Δu (風速場操作後-操作前) の水平分布 ($t = 7200$ s). 上から順に格子間隔 480, 240, 120, 60, 30 m の結果を示す。矢印は風速場操作領域の位置を示す。

4. 結論

本研究では、LES モデルを用いた風速場操作の理想実験により、抑制位置下流に形成される減速域の増幅特性について、環境場および解像度の 2 要因から整理した。

環境場の感度実験では、安定環境では減速域が比較的滑らかに広がる一方、不安定環境では乱れが生成されやすく、操作により生じた擾乱が下流で増幅し、操作位置より強い減速域が形成される場合があることを示した。解像度の感度実験では、解像度の向上に伴い減速域がより細かく複雑な構造を持ち、下流方向への伝搬と乱れの強化が顕著となることを確認した。これより、高解像度ほど小スケール渦が表現され、風速場操作による擾乱が非線形的に発達し得ることが示唆された。

今後は、各感度実験条件においてアンサンブル実験を実施し、減速域の増幅が初期擾乱 (乱数) に対してどの程度頑健に再現されるかを定量的に確認する予定である。

参考文献

- 1) 山口弘誠, 西村太一, 中北英一, 2024, 土木学会論文集 (水工学), **80**, 16.
- 2) 山口弘誠, 高見和弥, 井上実, 中北英一, 2016, 土木学会論文集, B1 (水工学), **72**, 205-210.
- 3) Yamaguchi, K., Nishimura, S., and Nakakita, E., 2024, *DPRI Annuals*, **67 B**, 156-167.