

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：82641

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13877

研究課題名（和文）竜巻状渦が構造物にもたらす風圧荷重を評価する数値モデルの開発

研究課題名（英文）Model development for evaluating wind load of tornado-like vortex

研究代表者

中尾 圭佑（Nakao, Keisuke）

一般財団法人電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・主任研究員

研究者番号：40714473

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：数値気象モデルやCFD（Computational Fluid Dynamics）モデルなどの数値計算技術に基づいて竜巻に起因する強風形成に寄与する多様なスケールの現象を再現し、それぞれのスケールでの因子を理解・評価した。並行して、一般的な境界層流れにおける強風特性を乱れ現象も含めて把握するための数値検討を行った。これらの流体特性に関するデータに基づき、対比的に分析を行うことで竜巻渦に関する竜巻渦の現象理解を進め、工学的評価につながる知見を創出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では数値気象モデルの高解像化に基づく風の乱れの知見取得に成功するとともに、CFDによる都市キャノピー上の竜巻渦の現象把握に成功した。また、これらの数値計算技術/評価技術の整備により、より多様な都市形態を取り込んだ竜巻風況評価が可能となった。この2点において学術的意義の高い成果が創出されたと考えられる。

また、モデル基盤の開発や得られた成果により、今後の風荷重評価に資する情報が新たに創出可能となった点において、高い社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：In this study, we attempt to model the influence of strong winds generated by a tornado over buildings in an urban area. The indicator of strong wind, (e.g., turbulent statistics) was analyzed based on numerical simulations, such as computational fluid dynamics (CFD) and numerical weather prediction model (NWP). Initially, the classical wind characteristics were reproduced via NWP and CFD to acquire the turbulent statistics. Next, the tornadic wind over an urban area was recreated by CFD, and its turbulent characteristics were analyzed based on the wind that holds the classical features (e.g., stationarity and straight orientation). The results showed a remarkable feature of the wind modulated by the urban canopy effect.

研究分野：風工学

キーワード：Large-eddy simulation 竜巻状渦 突風 ガストファクター 都市キャノピー

1. 研究開始当初の背景

竜巻は構造物に破壊的な荷重をもたらす強風現象で、近年その工学的評価が進みつつある。一般的な強風現象では、10分間平均風速に加えてその平均からの偏差として定義される風の乱れに関する突風指標（ガストファクター、ピークファクター、乱流強度など）も重要となる[1]。しかし、竜巻渦は3次元的な流れ場を特徴とし、(直線的に吹走し、定常性が仮定できる)一般的な強風現象とは異なる。また、竜巻発生と密接に関連する気象スケールの現象から、人間環境に関係する都市空間規模のマイクロスケールの現象まで大きなギャップが存在する。従って、建物に作用する風圧荷重に関する現象解明には、多層なスケールの各段階に適合的な技術を用いる必要がある。数値気象モデルやCFDモデルといった数値計算手法は、多様なスケールのそれぞれにおいて適用可能であり、それらのモデルに基づく現象解明は急務となっている。特に、建物配置などの微細な因子による風の変化については十分な知見がなく、精査が必要となっていた。

2. 研究の目的

数値気象モデルやCFDモデルといった数値計算手法に基づき、竜巻渦の形成や強風発生機構を明らかにし、工学的評価に資するモデル評価・開発を行う。

3. 研究の方法

竜巻現象を包含する多様な各スケールのそれぞれにおいて有効な数値計算技術を駆使し、竜巻渦の流体特性に関する知見を取得する。並行して、一般的な境界層流れにおける乱れの特徴を把握するための数値検討を行う。これらのデータに基づく対比的な分析により現象理解を進め、工学的評価につながる知見を創出する。

4. 研究成果

(1) 竜巻渦の有する流れの特異性を対比的に評価するべく、まず、一般的な境界層流れによって生じる突発的な強風現象を数値計算した。近年活発に研究が進められている乱流の組織的な運動に伴う強風特性を把握することに独自の着眼点を定めた。先行研究によれば、大気下層では主流方向に境界層高さよりも数倍長い相関が確認されることが指摘されている。強風現象についても、この現象が作用することが考えられ、ガストファクターやピークファクターなどの突風指標のモデル妥当性を評価することが重要である。しかし、強風に条件づけられた十分なサンプルを観測により取得するには、時間やコストがかかる。以上を鑑み、Large-eddy simulation (LES) と呼ばれる数値計算手法により、風速時系列を取得した。

検討対象として以下の2点を定めた。すなわち、実際に観測される風が有する強風特性と、理想的な条件での強風特性の把握である。

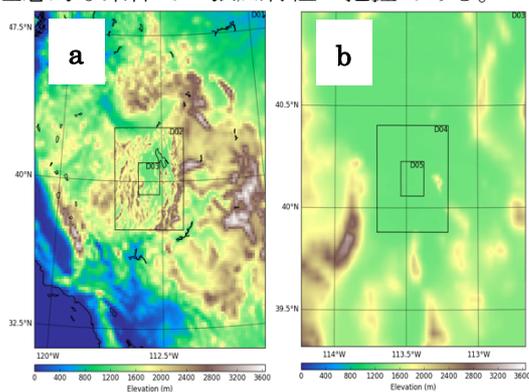


図1 数値気象モデルWRFを用いた高解像気象計算 米国Salt flatsは平坦な地形が広がり、大きなRe数の境界層が自然環境で観測される。a: 計算領域第1、第2、第3ドメイン、b: 計算領域第3、第4、第5ドメインと領域(各枠線)を狭め、解像度を上げた。コンターは標高を示し。第5ドメインは理想的な平坦地系が成立している。

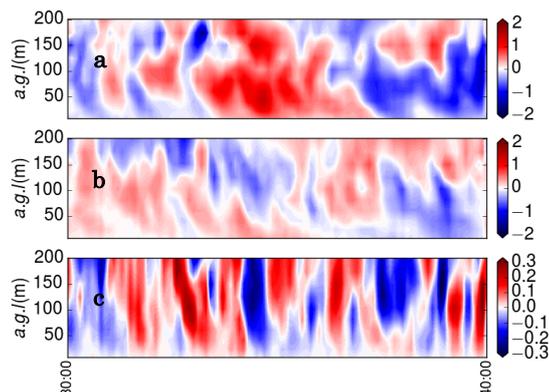


図2 ある10分間の時間間隔における風速の時刻鉛直分布。a: 主流方向風速、b: スパン方向風速、c: 鉛直方向風速(コンター単位は[m/s])。

前者については数値気象モデルWeather Research and Forecasting model (WRF, [2])を用いて検討を行った。過去の観測で、限定的に組織的な乱流運動が観測された時間・場所を指定した数値気象計算を高解像化(最小格子幅約30m)の上、LESモードにより実現させた(図1)。対象としたのは、米国ユタ州において、大きなレイノルズ数(Re)数の境界層流が自然環境で観測さ

れた Salt flats と呼ばれる地域である ([3])。計算には、LES による計算実施を助けるための乱流促進法[4]をモデルに実装することで、適切なレベルの乱流強度が確認できる程度にまで乱流場が発達することが確認された[5]。

計算の結果、一般的に知られている粗度対数則分布に近い風速分布を確認するとともに、強風を伴う流体運動や弱風を伴う流体運動が一定の相関を持って吹走することが確認できた (図 2)。

以上から、乱流の組織的な運動が強風の形成にも寄与することが確認できた。

既存の突風評価モデルとしてガストファクター G やピークファクター g_x のモデルが提案されており、それらとの整合性を検証する必要がある。そこで、理想的な条件に限定した LES を実施し、風速時系列を取得した。得られたデータに基づき、 G や g_x を再現するモデルの機能性を評価した。検討の結果、これらのモデルの妥当性が確認された (図 3, 中尾ら[6])。

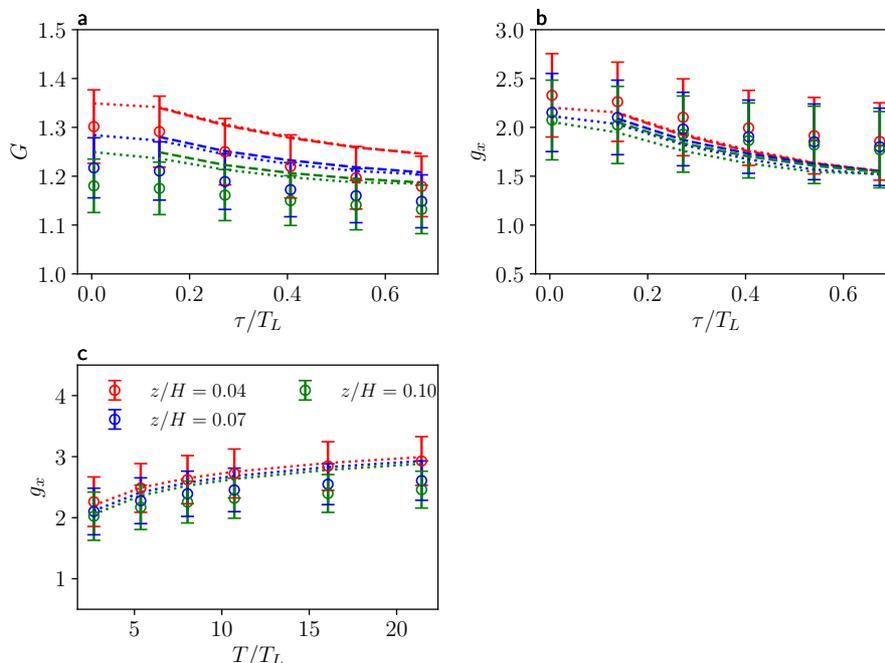


図 3 ガストファクター G やピークファクター g_x の評価モデルによる結果と、LES による時刻歴から直接算出された値の比較。a は G の平滑化時間 τ への依存性、b は g_x の τ への依存性、c は g_x の平均化時間 T への依存性を示す。○が複数の高さにおける LES の計算結果 (エラーバーは 1 標準偏差)。破線がスペクトル形状を仮定してモデルから算出した値。点線が LES から算出されたスペクトル形状をモデルに代入して算出した値。 T_L は規格化に用いる代表時間スケール。

(2) 竜巻の形成を模擬する CFD により、竜巻渦の再現を試みた。竜巻の形態はスワール比に依存して、複数の形態が観察されている[7]が、本研究では平坦な地面において two-cell タイプの渦の再現を確認できた (図 4a)。加えて、竜巻渦が、都市を模擬したブロック形状の上層に形成される条件を作成し、竜巻渦の形態変化を確認した (図 5a)。都市を模擬して配置したブロック形状のアスペクト比や建ぺい率による変化を把握することで、市街地形状の多様な条件における流れ特性を把握した。

まず、平坦な地形の竜巻渦では、渦の強い収束により強風が局所的に確認される一方 (図 4a) で、十分広い領域に都市を模擬したブロックが広がる場合、旋回と収束のバランスが崩れ、強い渦は維持されなくなる傾向が明らかとなった (図 5a)。

また、得られたデータベースに基づき、乱流エネルギーの空間分布等を明らかにした。都市を模擬したブロックがない場合、乱流エネルギーは収束の強い領域に限定して大きな値を取る傾向があった (図 4b)。一方で、ブロックがある条件ではそのような強い収束が緩和され、ブロック上層の幅広い領域に極大領域が生じることが確認された (図 5b)。上昇流が法線方向に有する強いせん断 (図 5b の上昇流速の短い線幅に示される) により生成された乱れが乱流エネルギーの空間分布の主要因となっていることが推察される。

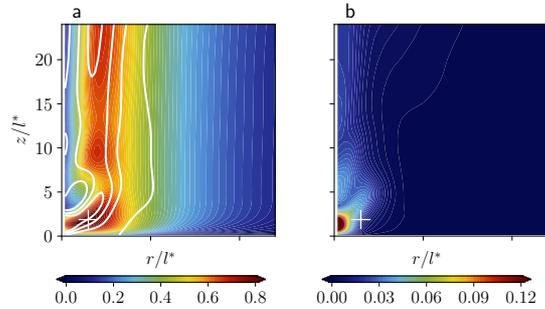


図4 平坦な地形における竜巻状渦統計量の軸対称場分布 a: スカラー平均風速、b: 乱流エネルギー分布。a の白線は上昇流速度の等値線。白抜きの+は旋回風速最大値を観測する地点。 l^* は規格化に用いる代表長さ。

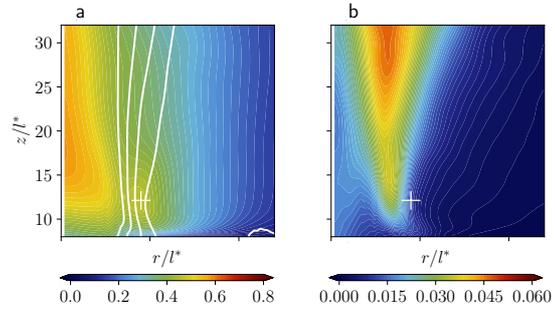


図5 都市キャノピ上端部に形成する竜巻状渦統計量の軸対称場分布 凡例は図4と同じ。

以上の通り、市街地-竜巻の相互作用を検証可能なモデルの構築を達成した。今後の展望として、流れ場の三次元性や都市形態等をふまえた竜巻渦の風荷重指標の算出可能性について、さらなる検討が必要であることがわかった。

(3) 本研究では、竜巻渦のもたらす突風現象を、既往の知見が前提とする直進性・定常性を有する強風の保つ特性と対比的に評価するべく、数値モデルを用いた現象説明を行った。その結果、一般的な強風現象の再現に成功し、突風の持つ諸特性を把握した。竜巻固有の特性である三次元的な気流場は市街地を模擬したブロック形状の有無の影響を受けて変化し、突風を生じうる領域についても変化が生じることを定性的に把握した。

これらの知見を踏まえ、突風評価に用いられる古典的なモデルの竜巻等への適用可能性を吟味することが次の課題であることが示された。

参考文献

- [1] American Society of Civil Engineers (ASCE) (2022). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-22, ASCE.
- [2] Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D., Duda, M.G., Powers, J.G. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D68S4MVH.
- [3] Hutchins, N., Chauhan, K., Marusic, I., Monty, J., Klewicki, J. (2012). Towards reconciling the large-scale structure of turbulent boundary layers in the atmosphere and laboratory. *Boundary-Layer Meteorol.* 145, 273–306. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9735-4>.
- [4] Muñoz-Esparza D., Kosović B., van Beeck J., Mirocha J. (2015). A stochastic perturbation method to generate inflow turbulence in large-eddy simulation models: Application to neutrally stratified atmospheric boundary layers. *Phys. Fluids*, 27, 3, 035102. <https://doi.org/10.1063/1.4913572>.
- [5] 中尾 圭佑, 服部 康男, 須藤 仁 (2018). マルチスケール数値気象モデルに基づく中立に近い大気接地層の再現性, 日本流体力学会 2018.
- [6] 中尾 圭佑, 江口 謙, 服部 康男 (2020). 閉空間にて形成される様々な Re 数下の竜巻状渦の特性. 第 34 回数値流体力学シンポジウム.
- [7] Church, C.R., Snow, J.T., Baker, G.L., Agee, E.M. (1979). Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: A laboratory investigation, *J. Atmos. Sci.*, 36(9), 1755-1776. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1979\)036<1755:COTLVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<1755:COTLVA>2.0.CO;2).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中尾圭佑、江口謙、服部康男
2. 発表標題 閉空間にて形成される様々なRe数下の竜巻状渦の特性
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Nakao
2. 発表標題 Predictability of sea-salt transport on Japan-Sea coastal region in winter severe weather using WRF-Chem
3. 学会等名 15th International Conference on Wind Engineering 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中尾圭佑
2. 発表標題 中立大気境界層のガストファクターの特性
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中尾圭佑、服部康男、須藤仁
2. 発表標題 マルチスケール数値気象モデルに基づく中立に近い大気接地層の再現性
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisuke Nakao, Tsubasa Okaze, Hideki Kikumoto, Yoshihide Tominaga
2. 発表標題 Prediction performance of large-eddy simulations for the mean pressure coefficient on an isolated building surface.
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Computational Wind Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関