

実験室で生成された竜巻状流れ場における飛散物の飛散性状

高知大学大学院 学生会員 ○中村里菜 高知大学 正会員 野田 稔

1. はじめに

日本では、毎年のように台風による強風や竜巻などによる突風災害が発生している。これらの強風被害を起こす原因として考えられる要素は、猛烈な風速と飛散物の衝突である。特に、竜巻による建物被害は、基本的に猛烈な風速により発生する過大な風圧で建物外装材が破壊されることや猛烈な風速で運ばれる飛散物の衝突により、外装材が破壊されることによる。また、飛散物の衝突で外装材が破損することで室内圧の急変により建物が破壊し、さらに飛散物が発生することで被害が拡大することも多い。従って、竜巻被害の元となる竜巻の流れ場は、過大な風圧力や飛散物の飛行特性を左右する重要な因子であり、竜巻被害低減の対策をする上で、竜巻状流れ場の特性を明らかにすることは非常に重要である。

しかし、従来の研究では、竜巻風洞を用いて実験を行い、実験から得られた流れ場の風速分布を用いて飛散物の飛行シミュレーションを行った研究は非常に少ない。そこで、本研究では竜巻風洞を用いた実験で得られた代表的な2種類の平均風速分布を用いて、この風速分布の影響により飛散物の飛行特性がどのように変化するのかを検討した。

2. 実験概要

本実験で用いた実験装置は、図1に示す移動床付きマルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータリである。この装置は、収束層外周部分に40個のファンと40基のベーンを個別に制御でき、流入風速や流入角を変化させて、生成する竜巻状流れ場を制御した。

実験では、流れの可視化を行うためにシーリング剤を竜巻風洞上部のマルチファンの流入口から流入させた。また、位置を平行にずらしながら鉛直に照射したレーザーシート面内の水平・鉛直方向および面直角成分の速度場を2台の高速度カメラによってステレオ撮影することで測定した。ここでは、7Hzのサンプリングレートで撮影した152組のステレオ画像を元に、PIV解析ソフトウェアを用いて、地表面の渦中心を原点とした円筒座標系に対する3成分の風速ベクトルの20秒間の時間平均値を求めた。

竜巻状流れ場の生成では、上昇流孔半径 R 、収束層高さ H 、設定スワール比 $Sw = \frac{R}{2H} \tan\theta$ によって流れ場を変化させた。ここで、設定スワール比とは実験において与える条件であり、実際に流れ場が持つスワール比とは異なる。

3. PIV解析より得られた平均風速分布

実験の結果、1セル型流れと2セル型流れの平均風速分布が得られた。図2に実験で求めた1セル型流れ場と2セル型流れ場の平均風速分布を示す。これより、1セル型流れ場では渦中心に上昇流が生じ、2セル型流れ場では、渦中心に下降流が生じた外側に上昇流が生じている様子が確認できる。また、いずれの場合でも収束流が認められ、高さ方向に広い範囲で分布している。

4. 竜巻状流れ場における飛散物の飛行特性に対する風速分布の影響

図3に実験で得られた2種類の流れ場の風速分布における飛散物の飛行シミュレーションを行った結果を示す。ここでは、流れ場の条件を最大接線風速 $V_m = 60\text{m/s}$ 、最大接線風速半径 $R_0 = 30\text{m}$ に統一した。飛散物の運動方程式は円筒座標系で解き、飛散物は質量 $m = 5, 10\text{kg}$ 、直径 $d = 1\text{mm}$ の球体を想定し、 $C_D = 0.6$ とした。渦中心から1m間隔で地表面に打ち上げ点を配置し、 $t = 0$ に鉛直上向きに初速度 $v_0 = 20\text{m/s}$ で打ち上げ、到達高度が初速度の運動エネルギーと等しい位置エネルギーとなる高さ $v_0^2/2g$ を上回ったものを飛散物として扱った。

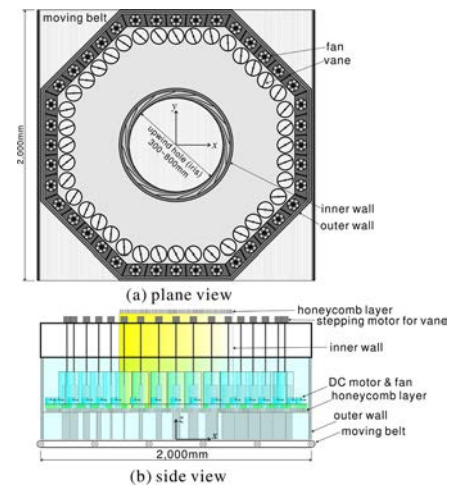


図1 移動床付きマルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータリ

まず、質量 $m = 5\text{kg}$ のとき、1セル型流れ場では、渦中心の上昇流によって高度を上げ、落下してこないものが多く見られた。また、渦中心から少し発射位置が離れると、飛散物が上昇流に乗って上昇し、遠心力で中央から遠ざかり、その後地表面に落下しているものが確認された。一方、2セル型流れ場では、打ち上げられた飛散物は渦中心の下降流を避けるようにして上昇し、渦中心から遠ざかり落下したものが見られた。さらに、中心から少し離れた範囲から出発した飛散物が収束流によって渦中心側に向かって飛行するものも認められた。

次に、質量 $m = 10\text{kg}$ のとき、1セル型流れ場では質量 $m = 5\text{kg}$ と飛散軌跡は類似しているが、渦中心の上昇流によって高度を上げるが遠心力で中心から遠ざかる飛散物が増えていることが分かる。これより、質量の増加に伴い、上昇流に乗って高度を上げるものの、遠心力で中心から遠ざかるため、落下に転じると考えられる。一方、2セル型では質量 $m = 5\text{kg}$ のときと類似する飛散傾向が見られた。

5. 2つの流れ場の飛散物の飛行特性

図4に1セル型流れ場、2セル型流れ場の飛散物の飛行特性（最大到達半径 r_{max}/R_0 ，最高到達高度 z_{max}/R_0 ，最大飛行速度 $V_{a,max}/V_m$ ）を示す。まず、質量 $m = 5\text{kg}$ のとき、最大到達半径は1セル型流れ場の方が飛散距離は長かった。また、落下した飛散物のうち、最高到達高度と最大飛行速度は2つの流れ場でほとんど変化は見られなかった。次に、質量 $m = 10\text{kg}$ のとき、最高到達高度は1セル型流れ場の方が、2セル型流れ場と比べて高度が高くなり、大きな差が見られ、最大到達半径も1セル型流れ場の方が値は高くなっていた。一方で、最大飛行速度については、2つの流れ場で大きな差は見られなかった。これより、地表面に落下してくる飛散物の最高到達高度の変化については質量の影響を受ける慣性力と外力である空気力との関係を詳しく検討する必要があると思われる。

6. まとめ

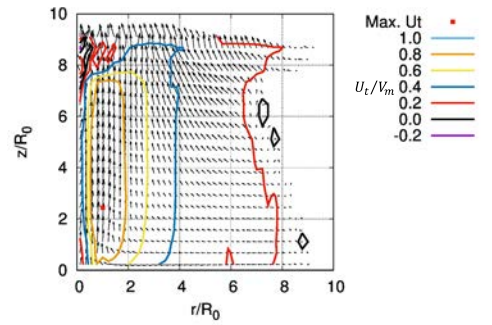
本研究では、竜巻風洞を用いた実験から、様々な竜巻状流れ場を生成し、実験より得られた1セル型流れ場と2セル型流れ場の平均風速分布を用いて、今回は質量の変化による飛散物の飛行特性について検討した。その結果、1セル型流れ場と2セル型流れ場では飛散する範囲や傾向が大きく異なることが分かった。また、最高到達高度に対する質量の影響については今後詳しく検討する必要がある。

謝辞

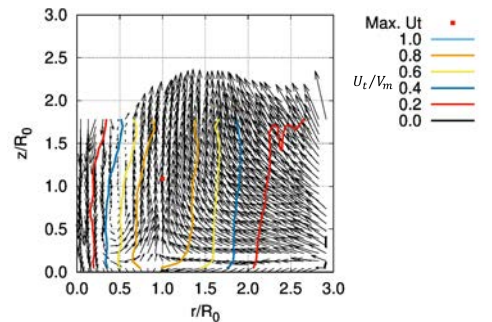
本研究は、科研費(19H02410)の助成を受けて実施された。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) M. Noda and F. Nagao, Development of a Tornado Simulator with Multi-fan, Multi-vane and Moving belt, Proc. of 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 4 pages, 2017.

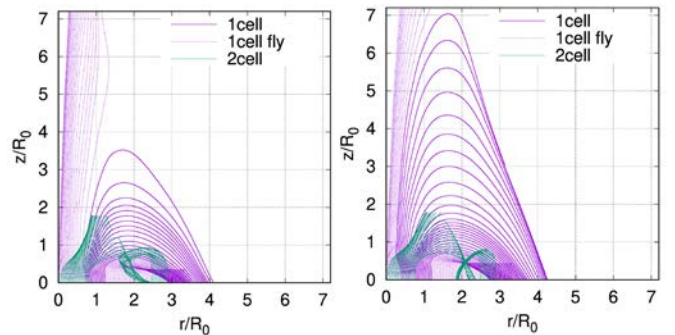


(a) 1セル型流れ場



(b) 2セル型流れ場

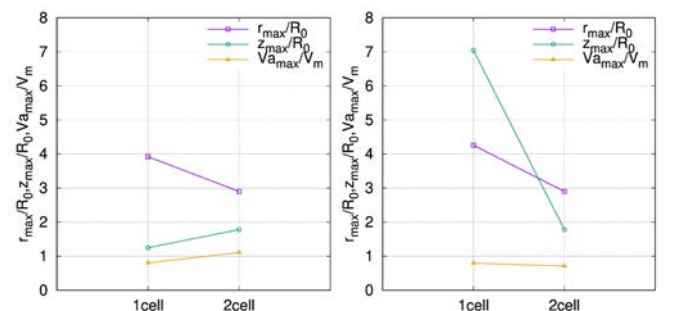
図2 実験で得られた平均風速場の平均風速分布



(a) $m = 5\text{kg}$

(b) $m = 10\text{kg}$

図3 それぞれの平均風速分布での飛散軌跡



(a) $m = 5\text{kg}$

(b) $m = 10\text{kg}$

図4 それぞれの平均風速分布での飛散特性