

移動床付竜巻シミュレータによる移動竜巻の流れ場に関する研究

徳島大学大学院 学生会員 ○ Zhao Yuqiao
 高知大学 正会員 野田 稔
 徳島大学 川畑允人
 徳島大学大学院 フェロー 長尾文明

1. はじめに

竜巻は世界各地で人間の生活や財産に重大な損害を与えてきた。それらの損害は猛烈な風による過大な空気力や飛散物の衝突によって起こるため、それらを支配する竜巻の流れ場の構造について早急な研究が必要である。特に、実際に発生する竜巻は移動状態であることが多く、移動状態の竜巻状流れを再現し研究することは大変重要である。現在のところ、移動竜巻の評価は静止竜巻モデルを平行移動するという扱いに留まっている^{1,2)}。最近、野田らの研究で、移動状態の竜巻状流れは単純に静止状態の竜巻状流れを平行移動するものではなく、より複雑な構造であることが確認され、移動竜巻の水平面流れ場の接線風速分布は、同心円状ではなく、楕円状になっていることが観測された³⁾。そのため、従来の静止竜巻の流れ場に移動速度を重ね合わせる方法は現実に即していないことが明らかとなった。そのため、移動状態の竜巻状流れ場の風速分布の新しい表現方法について検討する必要がある。

本研究では、移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータを用いて、移動竜巻状流れを生成し、さらに3D-PIVによって3次元的な竜巻状流れ場を計測した。そして、移動状態の竜巻状流れ場の接線風速分布について、高さ・方向別に検討を行った。ここでは、その結果について報告する。

2. 移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータ⁴⁾

図-1に本装置の概略図を示す。本装置の平面形状は八角形で、その外周部分には40個のファンと40個のガイドベーンが設置されている。ファンは正逆両方向に任意の回転数を個々に設定でき、ガイドベーンは個々に±180度の任意の角度を指定できる。収束層の中央部天井部分には、上昇流孔が設けられており、アイリス機構によって200~800mmの範囲で自由に上昇流孔の直径を設定できる。また、収束層の天井も鉛直に移動させることができ、100~400mmの範囲で収束層高さを自由に設定できる。そして、本装置の床部分に設置されたムービングベルトを一定速度で駆動させることによって、装置本体を移動させずに水平方向に移動する流れ場を再現することが可能となる。ムービングベルトの速度は、約1.3m/sまで自由に設定が可能である。

竜巻状流れを生成する際には、外周のファンから収束層へ任意の速度分布で流入させ、収束層外周に設置したガイドベーンによって任意の流入角分布を生み、収束層の中央部で渦を形成する。その後、上昇流孔を通して装置外に流出する。

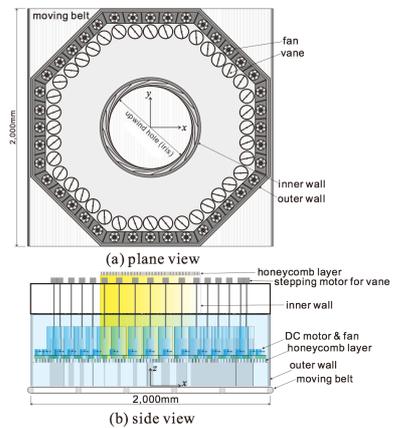


図-1 実験装置の構造

3. 3D-PIV 実験の概要

シーディング剤を流入させた状態で装置上部から鉛直かつムービングベルトの移動方向に平行にレーザーシートを照射し、レーザーシートを挟むように配置した2台の3D-PIVカメラによってステレオ撮影を行った。レーザー照射機および3D-PIVカメラによる計測面をムービングベルトの移動方向と直交方向に平行移動させて繰り返し撮影を行い、3次元的な速度場を計測した。ここでは、15Hzのサンプリングレートで撮影した150枚の画像を使って、3成分の風速ベクトルの10秒間の時間平均値を求めた。

4. 移動状態の竜巻状流れ場の検討

本節では、ファンの回転数とベーンの角度を決めるために用いる設定スワール比を0.15、0.3、0.6に変化させ、実験装置床部に設置されているムービングベルトを0.127(モーター駆動周波数10Hz)、0.208(同15Hz)、0.452(同30Hz)、0.941(同60Hz)(m/s)の4条件で駆動し、生成された移動状態の竜巻状流れについて検討する。以下の説明では、ムービングベルトの移動速度を簡単に表記するためにB0、B10、B15、B30、B60と呼ぶ。

図-2には、設定スワール比が0.3の場合、ベルト静止時(B0)の地表面での渦中心を原点として、各高さの渦中心のx座標をつないだものである。ここで、ムービングベルトの移動方向はx軸負方向である。この図から、ベルトを駆動させることによって、地表面付近の渦中心がムービングベルトの移動に引き摺られるように移動し、それに合わせて渦軸にx-z面内に傾きが発生していることが分かる。従来のIOWA大学型トルネードシミュレータで生成した竜巻状流れに比べて渦軸が大きく傾いていることを確認できた。

キーワード 竜巻, 建築物, 風災害, PIV

〒780-8520 高知市曙町 2-5-1 高知大学教育研究部自然科学系理学部門 TEL 088-844-8324

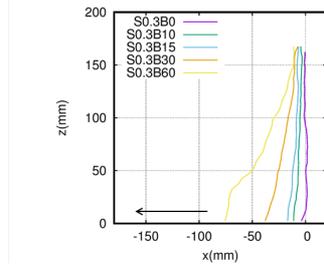


図-2 渦軸に対する移動効果の影響

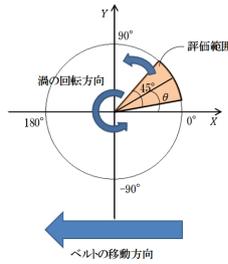


図-3 流れ場を評価する方法

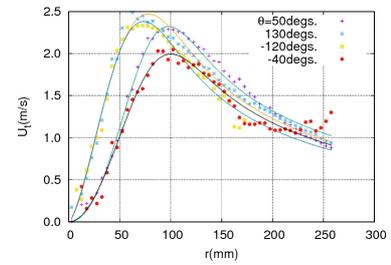
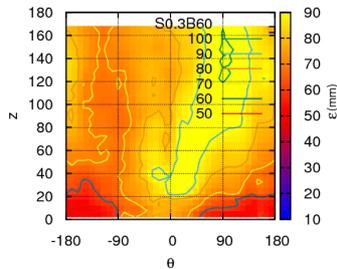
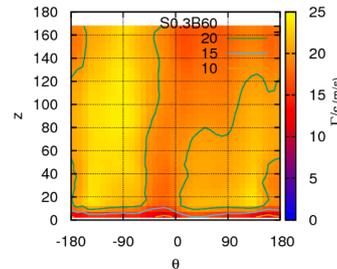


図-4 平均接線風速分布の近似

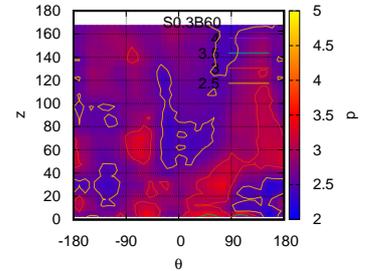
(S0.3,B60,z=22.5mm)



(a) コア半径



(b) 循環



(c) 形状パラメータ

図-5 スワール比 0.3B60 における各パラメータの分布図

図-3 には、移動状態の竜巻状流れ場の水平面内のデータを処理する方法を示す。楕円状になっている移動竜巻の水平面流れ分布を解明するために、図-3 のように x 軸から反時計回りに θ 回転した方向を中心に ± 22.5 度の範囲を対象にして移動状態の竜巻状流れ場の $r - U_t$ 関係を求め、野田らが提案した次式の接線風速分布式を近似させた⁵⁾。

$$U_t = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{r}{\epsilon} \right)^p \right\} \right] \quad (1)$$

ここで Γ は循環、 ϵ はコア半径、 p は形状パラメータ ($p > 2$) を表している。図-4 に、設定スワール比が 0.3、高さ 22.5mm の 4 つ方向のデータを近似した結果を示す。この図から、得られた接線風速分布と近似曲線が大変よく一致していることが分かり、さらにある角度の範囲内を対象としても式 (1) によって分布の特徴を適切に評価可能であることが分かる。そして、このような評価の上で、方向角 θ を 10° ずつ回転させながら接線風速分布の近似計算を行った。

図-5 には、スワール比が 0.3、B60 の場合で得られたコア半径 ϵ 、循環 Γ/ϵ 、形状パラメータ p の分布を示す。 Γ/ϵ は循環 Γ をコア半径 ϵ で除し、風速の次元としたものである。座標系や風速を移動渦側に合わせているため、もし静止渦と同じ状態が保たれているのであれば、いずれのパラメータも方向角の変化に対しては一定となるはずである。しかし、図-5(a) から、移動竜巻の水平面流れ分布は同心円状ではなくて、ベルトの移動方向の方が半径が長い楕円状になっていることが分かる。図-5(b) から、流れの循環はベルトの移動方向より、その直交方向の見た目の循環が強まっていることが分かる。図-5(c) から、形状パラメータ p は静止竜巻状流れ場と違い、方向角によって変化していることが分かる。

5. まとめ

本装置で生成された移動竜巻流れは従来の IOWA 大学型竜巻シミュレータで生成された移動竜巻状流れに比べ、渦軸の傾きが著しいことを確認できた。また、移動竜巻状流れの水平面内の接線風速分布を方向角を変えながら接線風速分布式で近似計算したところ、方向に応じたコア半径や循環、形状パラメータが得られ、流れ場の特徴を方向毎の 3 つのパラメータで表すことができた。そして、コア半径の分布による移動竜巻の水平面流れ分布は同心円状ではなくて、楕円状になっていることが分かった。今後は同様の評価方法を半径方向風速や鉛直方向風速にも適用し、移動状態の竜巻状流れの構造をより詳しく検討していく予定である。

6. 謝辞

本研究では、JSPS 科研費 (15H04034) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) T.Theodore Fujita: "Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity", Satekkute and Mesometeorology Research Project Paper, No.91, 1971.
- 2) 日本保全学会ホームページ (http://www.jsm.or.jp/jsm/at/mt_report.html).
- 3) 野田 稔, Zhao Yuqiao, 川畑允人, 長尾 文明, 「移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータによる移動竜巻の再現」, 平成 30 年度土木学会四国支部技術発表会概要集, 2018.
- 4) 野田ほか, 「移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータの開発」, 日本風工学会誌, Vol.37, No.2, p. 137-138, 2017.
- 5) 野田稔, 八谷実, 松浦佑樹, 長尾文明, 「竜巻状渦の平均接線風速分布について」, 日本風工学会論文集, Vol.38, No.2, pp.11-18, 2018.