

マルチファン・マルチベーン式トルネードシミュレータによる 竜巻状流れ渦中心の移動に関する研究

徳島大学大学院 学生員 二宮 めぐみ 徳島大学 正員 野田 稔
JFE エンジニアリング株式会社 非正員 山下 翔平 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

竜巻は、日本各地で発生しており、時には生命や財産を奪う恐ろしい自然災害である。そこで、竜巻に対する対策を講じるにあたり、竜巻の流れや乱れなどの特性を知る必要がある。しかし、実際の竜巻を観測するのは極めて困難であり、仮に可能だとしても危険である。そのため、現在でも実験または数値的な研究が行われている¹⁾²⁾³⁾。また、実際の竜巻は移動していることから、上昇流を作り出すファンを移動させて移動中の竜巻状流れを再現する取り組みがなされてきた⁴⁾⁵⁾。しかし、実際の竜巻の流れは流入境界が大きく影響する可能性が高く、これを考慮する必要があると考えられる。そこで、筆者らは、流入条件として流入角に加えて流量の制御が可能なトルネードシミュレータを開発した。今回は、その装置を用いて竜巻状流れ場を再現し、渦の中心の移動に関する結果を検討した。

2. トルネードシミュレータ

図-1に今回用いたトルネードシミュレータの概略を示す。装置は、対流域(図中①)と収束層(図中②)の2つの部分から成り立っている。装置内には上端部のハニカム(図中④)から空気が、収束層の流入部分に設置されたファン(図中③)によって外壁と内壁の間を通過して、流入する。そして、ファンの下部に設置しているハニカム(図中⑤)を通過して、収束層に流れ込む。収束層(高さ h)に入った流れはサーボモーター(図中⑧)により可動するガイドベーン(図中⑥)を介して内壁内に流入し、その上端の上昇流穴(図中⑦、半径 R)を通過して、対流域に移る。なお、ファンには個々に与えた流入条件が装置内に均一に伝わるように拡散胴(図中⑨)を取り付けている。

このトルネードシミュレータは収束層上部のハニカム上に48個の拡散胴をガイドベーンと対応するように設置し、それらの拡散胴内の上部にファンを設置している。さらに、このマルチファンとガイドベーンはそれぞれ個別に運転が可能である。また、ガイドベーンを動かすサーボモーターは360°回転可能なものであるため、ガイドベーンを任意の角度に設定し、様々な流入角を設定することができる。トルネードシミュレータの外観と主な構造を図-2、図-3に示す。図-2は、トルネードシミュレータの外観で、拡散胴にファン等の主要な部品を取り付けているのが確認できる。可視化実験をメインとして行うため、拡散胴は透明なポリエチレンテレフタレートを用いた。また、拡散胴とハニカムを固定し、かつわずかな隙間から拡散胴を通らずに流れる空気を遮断するためにハニカムと拡散胴の側面は粘土により密閉している。図-3は、収束層底部を下から見たものである。中心に設けられた撮影用の窓から外側に3分割された開閉可能な床板、スモークを全周から導入するためのダクト、ガイドベーンを制御するために円周上に取り付けられたサーボモーターが確認できる。

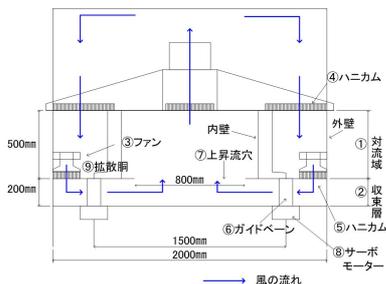


図-1 概略図

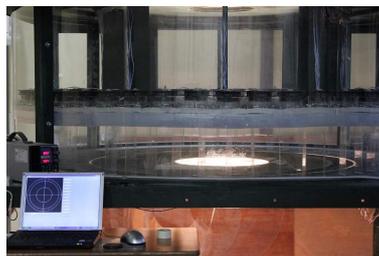


図-2 トルネードシミュレータの外観



図-3 収束層床板底部

3. 流入条件の設定と生成される渦の中心の移動

今回用いたトルネードシミュレータの、装置中心から同心円上に配置されたマルチファンの流量の設定方法について説明する。マルチファンで与える境界条件は収束層外周における流れの流入流出を決めるものであるから、外周における境界法線方向の流速にあわせてファンの回転数を決めればよいことになる。ここで装置中心を原点とする座標系において、竜巻状流れは座標 (x_s, y_s) を収束中心とする収束流、座標 (x_v, y_v) を回転中心とする回転流と流速ベクトル (U_u, V_u) の一様流の重ね合わせによって形成されるとする。よって、境界位置 (x, y) における流速ベクトルはスワール比 $Sw = R\Gamma/2hQ$ を考慮して次式のように求められる。

キーワード 流入条件の制御, 収束中心, 回転中心, スワール比, 竜巻風洞
〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2-1 徳島大学 TEL/FAX:088-656-7323

$$U = \frac{Q}{2\pi} \left(-\frac{x - x_s}{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2} - \frac{2hSw}{R} \frac{y - y_v}{(x - x_v)^2 + (y - y_v)^2} \right) + U_u \quad (1)$$

$$V = \frac{Q}{2\pi} \left(-\frac{y - y_s}{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2} + \frac{2hSw}{R} \frac{x - x_v}{(x - x_v)^2 + (y - y_v)^2} \right) + V_u \quad (2)$$

ここでは、ガイドベーンの角度を

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V}{U} \quad (3)$$

として与えている．一方、その境界面の法線ベクトルは、ガイドベーンによって与える流入角を θ とすると $(\cos \theta, \sin \theta)$ で表されることからこの流入境界面における法線方向成分は

$$V_n = U \cos \theta + V \sin \theta \quad (4)$$

表-1 実験条件

上昇流穴半径 R (m)	0.4
収束層高さ h (m)	0.2
収束層の半径 (m)	1.0
対流域の半径 (m)	0.5
スワール比 Sw	0.18 ~ 1.0
収束中心 x_s /回転中心 x_v	1.0, 0.5, 0.0, -0.5, -1.0, -2.0
回転中心 x_v (mm)	5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100, 150, 200

と表される．ここでは各ファンの設置方向についてそれぞれ上記の法線成分流速を求め、すべてのファンの中で最大流速となるファンが最大回転数となるように回転数を決定している．実験に用いた条件を表-1 に示す．図-4 は、スワール比 Sw=0.37 として $y_0=y_s=0$ に固定した状態で、 x_s/x_v を 1.0, 0.5, 0.0, -0.5, -1.0, -2.0 とし x_v を変化させた場合に生じた渦の中心の移動量 (dX_c, dY_c) である．横軸が x 軸方向への移動量、縦軸が y 軸方向への移動量を表している．ここで、図中の線の種類は x_s/x_v の違いを表しており、記号の違いは x_v の値の違いを表している．これより、 x_s/x_v の与え方によって、移動方向が回転していることがわかる．そこで、図-4 の場合における移動角と x_v の関係を表したのが図-5 である．ここでは、縦軸の 0(degree) に近いときが想定した移動方向であることを表している．このときも同様に、図中の線の種類は x_s/x_v の違いを表しており、記号の違いは x_v の値の違いを表している．これをみると、 $x_s/x_v=1.0$ として想定した収束中心と回転中心を一致させた場合が、想定した移動方向から離れていることがわかる．一方、 $x_s/x_v=-1.0$ として想定した収束中心と回転中心を原点に対して対称に配置させる条件に近づけていくとき、想定した移動方向に近づいていることがわかる．また、図-5 より、どの x_s/x_v においても $x_v=5$ (mm) から移動方向の角度が概ね安定していることがわかる．上述は、他のスワール比でも同様な傾向が見られた．図-6 は、今回与えた x_v によって得られた移動角の平均と x_s/x_v の関係である．これより、どのスワール比においても x_s/x_v が負の場合に想定した方向に渦中心が動くことがわかる．これより、渦の中心はスワール比と x_s/x_v を用いることで想定した方向へ移動可能だと考えられる．

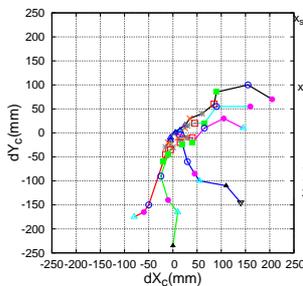


図-4 渦の中心の移動量 (Sw=0.37)

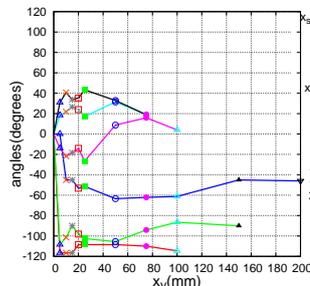


図-5 移動角 (Sw=0.37)

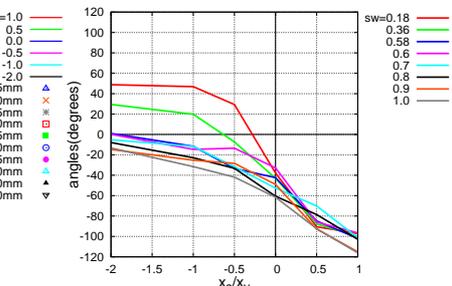


図-6 移動角の平均

4. おわりに

今回、流入条件の流量と流入角を同時に制御可能なトルネードシミュレータを用いて、形成される竜巻状流れの渦の中心の移動の結果について検討した．今後は、渦の中心のみならず、流入境界による竜巻状流れの形成に対して流入量と流入角の影響を流速分布などから分析し、竜巻状流れの形成や移動に対するさらなる要因について検討していく．

5. 謝辞

本研究は、科研費基礎研究 (c)(21560503) の助成を受けたものである．ここに記し感謝の意を表す．

参考文献

- 1) C.R.Church, J.T.Snow, G.L.Baker and E.M.Agee : Characteristics of Tornado-Like Vortices as a Function of Swirl Ratio:A Laboratory Investigation, Journal of the Atmospheric Science, Vol.36, 1755-1776, 1979 .
- 2) 文字信貴, 光田寧: 竜巻実験装置を用いた 1 セル及び 2 セル渦の研究, 京都大学防災研究所, 第 26 号, B-1, 393-401, 1983 .
- 3) 石原孟, 福王翔, 徳山佳央: 数値流体解析による竜巻状渦内の三次元流れ場及びその形成メカニズムの解明, 東京大学大学院, 第 21 回 風工学シンポジウム論文集, 143-148, 2010
- 4) 佐々浩司, 竹村早紀, 道下翔吾: 移動竜巻の下層構造の実験的解明, 高知大, 第 20 回 風工学シンポジウム論文集, 157-162, 2008
- 5) 松井正宏, 田村幸雄, 吉田昭仁: 竜巻状旋回流中におかれた立方体に作用する風圧力と移動効果による旋回流形成への影響に関する実験的研究, 東京工芸大学, 第 20 回 風工学シンポジウム論文集, 319-324, 2008
- 6) 二宮めぐみ, 野田稔, 山下翔平, 長尾文明: マルチファン・マルチベーンによるトルネードシミュレーターの開発, 徳島大学大学院, 平成 23 年度全国大会 第 66 回年次学術講演会概要集, 2011