

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

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、時に人命を脅かす可能性があるほどの恐ろしい自然災害であり、いつ、どこで発生したとしてもおかしくはない自然現象でもある。そこで、竜巻に対する対策を行うにあたり、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、現実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⁾。だが、実際の竜巻の流れは流入境界が大きく影響しており、これを考慮する必要があると考えられる。そこで、筆者らは流入条件を制御できる装置の製作を行ってきた。今回、流入条件として流入角に加えて流量の制御を行うことが可能なトルネードシミュレーターを開発したので、その装置について報告する。

2. トルネードシミュレーター

図-1 に今回開発したトルネードシミュレーターの概略を示す。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。装置内には上端部からの空気が流入し、外壁と内壁の間を通る。そして、収束層の流入部分に設置されたファン（図中③）の上・下部に設置しているハニカム（図中④⑤）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 ）を通して、対流域に移る。なお、ファンには個々に拡散胴（図中⑨）を取り付けている。

このトルネードシミュレーター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、こ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を連動させている。また、サーボモーターは360°回転可能なものであるため、ガイドベーンの角度を設定し、より大きなスワール比の流れ場を作ることが出来る。

トルネードシミュレーター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ーの外観で、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とし、拡散胴とファンを固定する器具はベニヤにレーザー光の反射を抑えるために塗料によりつや消しをした上で製作している。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。

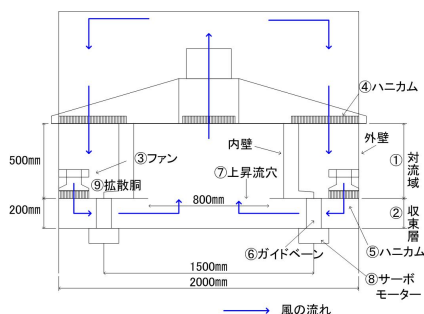


図-1 概略図

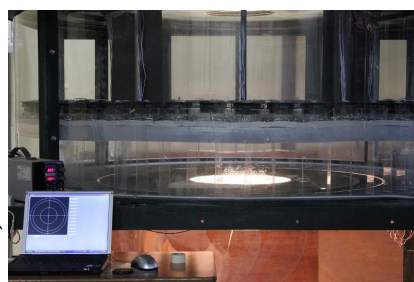


図-2 トルネードシミュレーターの外観



図-3 収束層床板底部

3. 流入条件の設定と生成される渦中心の移動

トルネードシミュレーターを開発するにあたり装置中心から離れた位置に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、竜巻状流れは中心座標 (x_s, y_s) での収束流、中心座標 (x_v, y_v) での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次式のように求められる。

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

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

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 $(\cos \theta, \sin \theta)$ 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

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

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た。

実験を行うにあたり用いた条件を表1に示す。 $y_v=y_s=0$ に固定した状態で、 x_v を変化させた場合に生じた渦中心の移動量 (dX_c, dY_c) を図-4に示す。図中の線の種類は x_s/x_v の違いを表しており、記号の種類は x_v の値の違いを表している。

図-4より、上昇流穴半径が小さくなると竜巻状流れの中心の移動範囲が狭くなっていることがわかる。また、 $x_s/x_v=0.0$ の結果を見ると、装置において回転中心のみを変化させたものが、実際に生じた渦中心は負の y 方向にも移動しており、想定したものと異なっている。特に $R=0.15$ の場合を見ると、負の x 方向に移動していることがわかる。次に、 $x_s/x_v=1.0$ とし収束中心と回転中心を一致させたと想定した場合を見ると、生じた渦の中心はどの条件においても正の x 方向に移動しておらず、 $R=0.4$ に比べ、 $R=0.15$ の場合は y 方向の移動量は小さくなっている。一方、 x_s/x_v が負の場合を見ると (d) 以外は、生じた渦の中心は正の x 方向に移動していることがわかる。

これらのような渦の動きは、ガイドベーンの角度による抵抗が流入の変化やベーンにおける剥離の発生等が原因と考えられる。

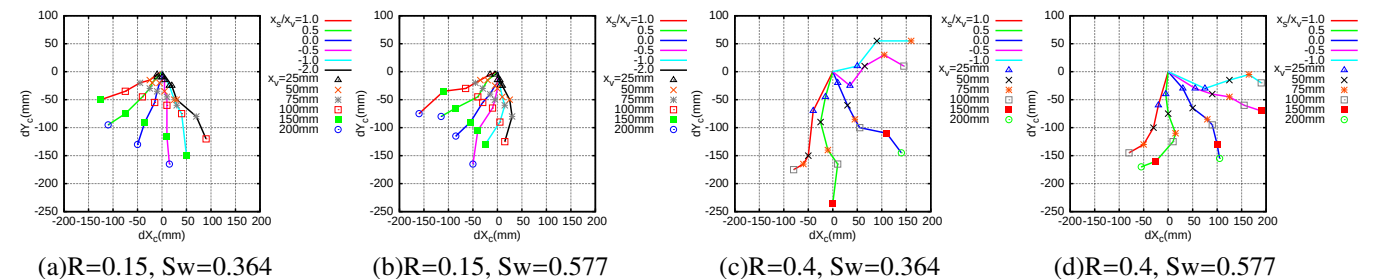


図-4 竜巻状流れ中心の移動量

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ーを開発し、形成される竜巻状流れの中心位置の移動について報告した。今後は、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検討し、渦の中心のみならず、流速分布などから竜巻状流れの形成や移動に対す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, 143148, 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