

竜巻状流れの流入角による制御の可能性

徳島大学大学院 学生員 山下 翔平 徳島大学 正員 長尾 文明
 徳島大学 正員 野田 稔 徳島大学 正員 宗田 和之

1. はじめに

竜巻は極めて局所的な気象憂乱であり、年間数十例報告され日本各地で発生している気象現象¹⁾である。現在の観測・予測技術では積乱雲が発生しやすい状況を予測することまでは可能であるが、時刻や場所を特定した予報は難しい。竜巻に対する減災、防災のためには、竜巻の流入境界を明らかにして、発生する風荷重の算定や流れ場の把握が重要な課題であり、実験室レベルで竜巻状流れの再現²⁾³⁾⁴⁾が行われている。そして竜巻状流れの性状を制御することは工学的に重要なことである。本研究では、吸い込み中心・回転中心の与え方を変えることで竜巻状流れ場を流入角によって制御する可能性を検討した。

2. 竜巻風洞の構造

本研究では図-1に示すような還流式竜巻風洞実験装置を作成した。この装置はガイドベーンにより気流に回転を与え、中心上部のファンにより上昇気流をつくり、収束層中心に竜巻を発生させるものである。収束層の平面図を図-2に示す。収束層には、高さ200、幅50、厚さ1のプラスチック製のガイドベーンを直径1.5mの円周上に等間隔に48枚配置し、それぞれのガイドベーンは独立可動のサーボモーターによって、自由に角度が設定できる。

3. 実験概要

本研究では収束層外周からシーディングしたベビーパウダーをトレーサーとして可視化し、解析を試みた。可視化実験では、収束層底部から13の高さにレーザーシートを照射し、下から高速度カメラによって竜巻状流れ場中心付近の流れを撮影した。今回の実験では、フレームレートは1000fpsであり、各ケース2秒ずつの撮影を行い、2000枚の映像の中から目視により解析に有効と判断した連続300コマ、0.3秒間の映像を画像相関法⁵⁾によるPIVを通じて流速分布に変換した。また、竜巻状流れの中心を計測するためにマイクロビーズをトレーサーとした実験もあわせて行った。マイクロビーズの実験は目視による計測としている。

ここでは、竜巻状流れを平面的な2次元場と考え、吸い込みと回転渦と一様流の重ね合わせによって表記されると仮定する。座標(x, y)における流入角αは、流速のx成分Uとy成分Vの比より次式のように表される。

$$\tan \alpha = \frac{V}{U} = \frac{-\frac{y-y_s}{2\pi[(x-x_s)^2+(y-y_s)^2]} + \frac{2hS(y-y_v)}{2\pi[(x-x_v)^2+(y-y_v)^2]R} + \frac{V_u}{Q}}{-\frac{x-x_s}{2\pi[(x-x_s)^2+(y-y_s)^2]} - \frac{2hS(x-x_v)}{2\pi[(x-x_v)^2+(y-y_v)^2]R} + \frac{U_u}{Q}} \quad (1)$$

x_s, y_s は吸い込み中心の座標、 h は収束層高さ、 S は上昇流の運動量に対する角運動量の比を表すスワール比、 R は上昇流孔半径、 x_v, y_v は回転中心の座標、 U_u, V_u は一様流のx方向、y方向成分、 Q は吸い込み流量を表している。この式よりわかるように、流入角αはS, Q, $x_s, x_v, y_s, y_v, U_u, V_u$ のパラメータにより決定されることがわかる。これらのパラメータの竜巻状流れに対する影響を検討するために表-1に示す本研究で検討する実験条件のもとで実験を行った。

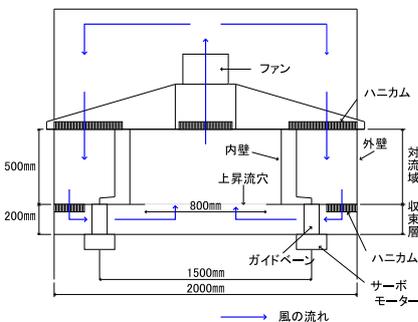


図-1 風洞断面図

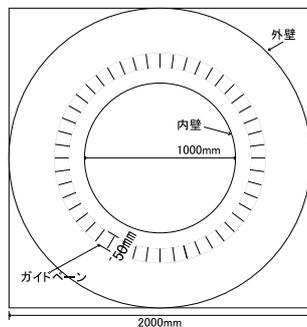


図-2 収束層平面図

表-1 実験条件

スワール比 S	吸い込み中心 Xs(m)	回転中心 Xv(m)	一様流れ Uu(m/s)
0.176	0	0	0
0.364			
0.577			
0.364	0.2	0	0
	0.4		
0.364	0	0.2	0
		0.4	
0.364	0.2	0.2	0
	0.4	0.4	
0.364	0	0	0.050
			0.075
			0.100
			0.125

4. 実験結果及び考察

ここでは、紙面の都合上、スワール比 S を 0.364 に固定し、吸い込み中心と回転中心を個々に変化させた場合について、さらに一様流れ U の与え方を変えた場合に生成される竜巻状流れにどのような変化が現れるかを検討する。

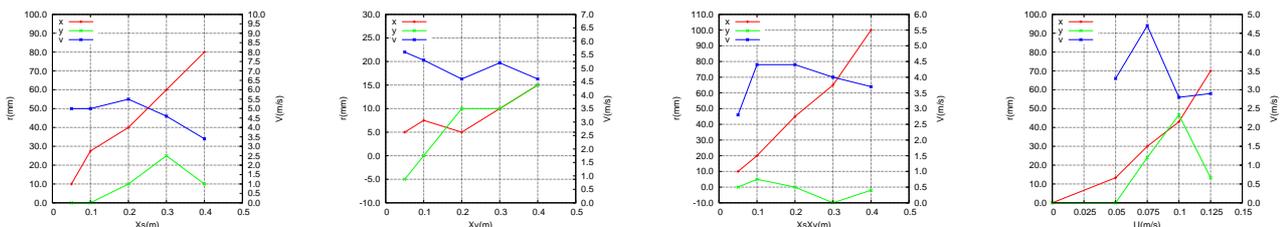
初めに $y_s = y_v = 0, x_s = 0$ として、 $x_s = 50, 100, 200, 300, 400$ と変化させたときの渦中心の x, y 座標と最大風速の変化を図-3(a) に示す。吸い込み中心 x_s を変化させた場合、 x_s に比べ、原点から実際に生じた渦の中心までの距離は、かなり小さくなった。しかし、 x_s と実際に生じた x 座標とは比例関係にあると考えられ、吸い込み中心の移動によって竜巻状流れの生じる位置が移動することが確認された。一方、 $y_s = 0$ としているにも拘わらず、 y 方向にも渦の中心が動いた。これは想定した吸い込み中心と想定した回転中心とが異なっているために生じたと考えられる。

次に $y_s = y_v = 0, x_s = 0$ として回転中心 $x_s = 50, 100, 200, 300, 400$ と変化させたときの渦中心の x, y 座標と最大風速の変化を図-3(b) に示す。流れ場への影響はわずかに見られたものの、吸い込み中心を変化させた場合に比べ非常に小さいものである。これより竜巻状流れの移動に関して、吸い込み中心 x_s の影響が回転中心 x_v と比較して極めて大きい。

また、 $y_s = y_v = 0$ として、吸い込み中心、回転中心を $x_s = x_v = 50, 100, 200, 300, 400$ と同じ点に移動させた場合の渦中心の x, y 座標と最大風速の変化を図-3(c) に示す。想定する中心の x 座標に対して、実際に生じた渦の中心の x 座標は、1/5 以下となった。しかし吸い込み中心、回転中心を個々に変化させた場合に比べ、生じた渦の中心の移動量の変化は大きくなった。 x_s と実際に生じた渦の中心の x 座標とは比例関係があるようであり、吸い込み中心と回転中心が移動したと想定して与えたガイドペーンの角度によって生じる竜巻状流れが移動することが確認された。一方で $y_s = 0$ としているにも拘わらず、 y 方向にも渦の中心が動いたが、吸い込み中心のみを変化させた場合に比べるとその量は小さい。また、スワール比一定にも拘わらず渦の発生位置が原点から離れるにつれて最大風速が減少する傾向が見られた。この結果より、吸い込み中心と回転中心は個別に変化させるよりも、常に同じ値を与えるほうがより竜巻状流れの中心位置を大きく変化させることができると考えられる。

最後に、一様流れ U のみを 0.05, 0.075, 0.1, 0.125m/s と変化させたときの渦中心の x, y 座標と最大風速の変化を図-3(d) に示す。今回の実験では竜巻状流れは一様流の流速に比例してコア中心も移動することが確認され、外的要因が実際の竜巻に及ぼす影響がわかった。しかし、最大で 0.125m/s ほどの流れしか見ることができず、今後更に高速の一様流れの中での竜巻状流れの風速分布を求める必要があるだろう。

本実験では最大風速を解析した実験において計測時間が 0.3 秒と極めて微小であり、必ずしも平均的な最大風速を与えているとは限らない。また可視化実験では、竜巻状流れの中心は 10~20 程度の範囲で常にふらついており、中心の位置や風速分布の定量的評価のためにはより長い評価時間による検討が必要であると思われる。



(a) x_s を変化させた場合 (b) x_v を変化させた場合 (c) x_s 及び x_v を変化させた場合 (d) U を変化させた場合
 図-3 吸い込み中心 x_s と回転中心 x_v の移動、一様流れ U の与え方による竜巻状流れの中心の変化

5. おわりに

本研究では想定する吸い込み中心・回転中心、一様流れによってガイドペーンの角度を変化させ、流入角によって竜巻状流れ場を制御する可能性について検討した。その結果、生成された竜巻状流れ場に対する吸い込み中心と回転中心の移動による影響は、個々に見た場合には吸い込み中心の変化が回転中心の変化に比べて強いと考えられる。しかし、吸い込み中心と回転中心を同時に動かすことにより竜巻状流れの中心の移動量は吸い込み中心のみを変化させたときよりも大きくなり、竜巻の性状を制御する際にも双方を同時に変化させる必要がある。一様流れの中での風速分布を詳しく計測することも必要と考えられる。

参考文献

- 1) 竜巻等の突風データベース, 気象庁 HP (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) .
- 2) 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 .
- 3) 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 .
- 4) 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, 第 20 回風工学シンポジウム, 319-324, 2008 .
- 5) 可視化情報学会: PIV ハンドブック, 森北出版株式会社, 64-66, 2002 .