

LES による移動式トルネードシミュレータの再現

徳島大学大学院 学生会員 森 一樹 徳島大学 正会員 野田 稔
 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

実際の竜巻の風速を実測するのは非常に困難である．そのため、これまで風洞実験、数値解析において竜巻状の流れ場を再現し、その特性が数多く調べられてきた．本研究では、写真-1 に示す IOWA 型の移動式竜巻シミュレータ¹⁾を数値流体解析により再現し、竜巻状流れ場の生成を試みる．そして、再現した風洞の境界条件、流出条件を変化させることで流れ場に与える影響を考察する．また、境界条件を変化させることで移動竜巻を再現し、移動状態を評価することも目的としている．



写真-1 IOWA 型シミュレータ

2. 解析概要及び竜巻状流れの評価方法

本研究では、竜巻発生装置を再現するにあたり IOWA 型の風洞を数値的にモデル化した．装置は基本的に、上下に流入、流出口を設けた内側円筒部、上下に蓋をして壁面を設けた外側円筒部と旋回流を与えるガイドベーンから成り立っている．ガイドベーンの角度は 30° 、 55° とした．内側円筒部の上部に流出口を設け、そこから空気を流出させる．流出した空気は、ガイドベーンを介して外壁と内壁の間を通った後、下部の収束層に流れ込む．収束層に入った流れは、ガイドベーンによって角度が与えられているため収束層の中央部で渦を形成する．解析に使用した装置の概要を図-1 に示す．本研究では、風洞の吹き出し口、収束層などの解析領域の違いによる風速分布の比較を行なっている．

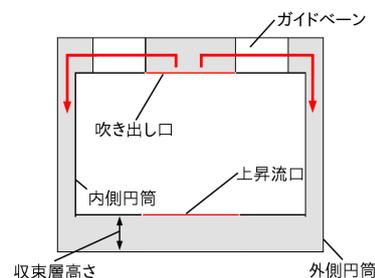


図-1 再現する風洞の概要

竜巻状流れの評価方法としては、はじめに風洞ごとに計測高さ（本研究では収束層底部からの高さ）を 5 箇所（場合によっては 6 箇所）に定め、計測高さごとの水平面内の風速分布を取得する．これを竜巻状流れ場の中心から等距離でアンサンブル平均を行い、法線方向風速 U_r 、接線方向風速 U_t 、鉛直方向風速 U_z を求める．また、本論文では、 U_r は渦中心から外向き、 U_t は半時計回り、 U_z は上向きを正として述べていく．

その後、求めた接線方向風速と渦の理論式（式 1）を最小二乗法により近似させる．

$$v_c = \frac{\Delta\Gamma_i}{2\pi R} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{\varepsilon^2}\right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 v_c は接線方向の風速、 Γ は循環、 ε はコア半径、 R は半径を表している．本研究ではこの式の近似により Γ と ε の値を求め、スワール比 S_w 、最大接線風速 U_{max} 、最大接線風速半径 R_{tmax} それぞれを条件ごとに求め、比較していく．

3. 解析条件の違いによる竜巻状流れの変化

(1) ガイドベーンが竜巻状流れ場に与える影響

はじめに、ガイドベーンの角度を 30° 、 55° と変化させて、ガイドベーンの角度が流れ場に与える影響を検討した．ガイドベーンの角度の違いによるコア半径の鉛直分布の比較を図-4(a) に示し、最大接線風速の鉛直分布の比較を図-5(a) に示す．図-4(a) より、 30° は高さの増加に対してほぼ一定のコア半径を保ち、 55° は高さの増加に対してコア半径も増大した．また、図-5(a) より、ガイドベーンの角度が大きいほど最大接線風速が高い値を示すため、強い渦を発生させていると判断できる．これは、ガイドベーンの角度を大きくすることで、流れに与える循環が強まったことが原因として考えられる．

次に、ガイドベーンの枚数の違いによる影響を調べるため、ベーンの数を 18 枚、36 枚と変化させ、流れ場の変化を検討した．枚数の違いによるコア半径の鉛直分布の比較を図-4(b) に示し、最大接線風速の鉛直分布の比較を図-5(b) に示す．図-4(b) より、18 枚は高さの増加に対してほぼ一定のコア半径を保ち、36 枚は高さの増加に対してコア半径が減少した．また、図-5(b) から分かるように、ガイドベーンの枚数が多いほど最大接線風速

が高いことが分かる．これは，ベーンの枚数が多いほど，吹き出す方向を拘束するため，流れがベーンから剥離しないまま下まで伝わり，強い渦を形成すると考えられる．

(2) 吹き出し口の形状が竜巻状流れ場に与える影響

吹き出し口の形を円筒型と円盤型の2種類を用意し，流れ場への影響を検討した．円筒型は，図-2のように，放射状に風を吹き出すもの．円盤型は，図-3のように，鉛直上向きに風を吹き出すものを示している．吹き出し形状の違いによるコア半径の鉛直分布の比較を図-4(c)に示し，最大接線風速の鉛直分布の比較を図-5(c)に示す．図-4(c)より，どちらとも高さの増加に対して一定のコア半径を保った．図-5(c)から，円盤状吹き出し口のほうが最大接線風速が高いため，強い渦を形成すると思われる．これは，円筒状吹き出しの場合は強制的に放射状に風を吹き出し，直後にガイドベーンを経由して流れの向きを強制的に変化させている．そのため，流れをスムーズに変化させているとは言いがたい．一方，円盤状吹き出し口は吹き出した風が流れに任せてベーン前後で風洞の形状に沿って流下するため，流れの変化がスムーズにできることから，このような結果の違いを生んだと思われる．

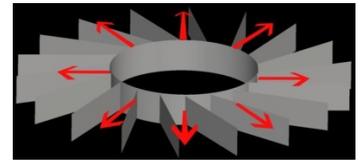


図-2 円筒型吹き出し口

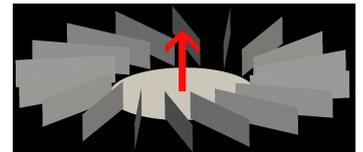
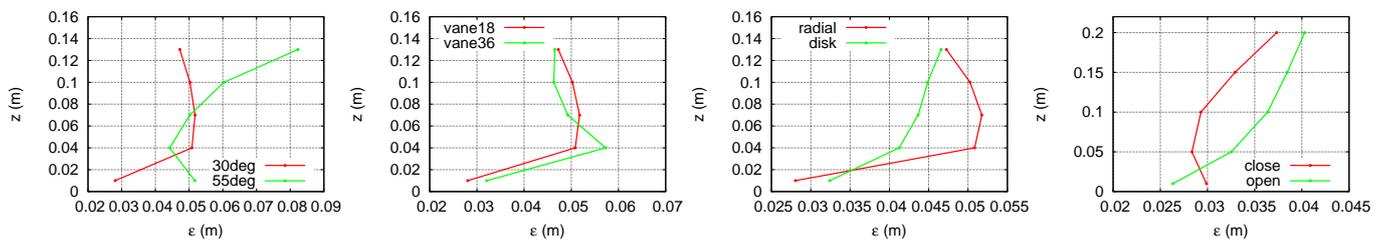


図-3 円盤型吹き出し口

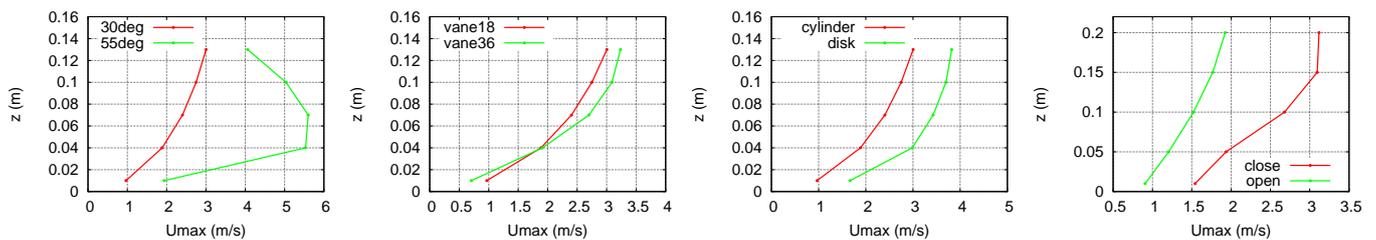
(3) 風洞の形状が竜巻状流れ場に与える影響

風洞の形状を密閉型と開放型の2種類を用意し，流れ場への影響を検討した．風洞の形状の違いによるコア半径と鉛直分布の関係を図-4(d)に，最大接線風速と鉛直分布の関係を図-5(d)に示す．図-4(d)より，どちらとも高さの増加に対して，コア半径も増大した．また，図-5(d)より，密閉型のほうが開放型よりも高い風速であることが分かった．これは，装置の外にも渦が発生しそれが中の流れに引きずられブレーキとなるため，形状によって差が出ていると考えられる．



(a) ベーン角度の影響 (b) ベーン枚数の影響 (c) 吹き出し口の影響 (d) 風洞の形状の影響

図-4 コア半径の鉛直分布



(a) ベーン角度の影響 (b) ベーン枚数の影響 (c) 吹き出し口の影響 (d) 風洞の形状の影響

図-5 最大接線風速の鉛直分布

4. おわりに

静止状態の評価だけではなく，移動状態の竜巻状流れの解析も行なっているので，それも合わせて今後は，実際のIOWA型トルネードシミュレータを用いて様々な条件下で竜巻状気流を発生させる．また，その流れについてPIVを用いて流速分布を計測し，コア半径などの各パラメータを求める．そして，その結果と今回行った数値流体解析の結果と照らし合わせてより詳細な検討を行なっていく．

参考文献

- 1) F.L.Haan, et al: Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications, Engineering Structures, Vol.30, Issue 4, pp.1146-1159, 2008.