水平シアに生じる竜巻状流れの制御因子に関する検討

徳島大学大学院 学生会員 八谷 実 徳島大学 正会員 野田 稔徳島大学大学院 学生会員 西村 公成 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

竜巻は局所的に短時間しか発生しない自然現象であるため実測は困難とされている.したがって,効果的な対策や発生予測を行うために,風洞実験や数値流体解析を用いて竜巻状流れの特性が数多く調べられてきた.本研究では数値流体解析により,水平シアに生じる竜巻状流れの生成を試みた.また解析条件を変化させることで流れ場にどのような影響を与えるかを考察し,竜巻状流れの制御因子に関する検討を行った.

2. 解析概要

図-1 に竜巻状流れを生成する流れ場の概略図を示す.従来の研究 では,図-1(a)のように四方から均等に流れを流入させることで流れ 場に回転を与え,流入する流れが全て上昇流に転じる形で竜巻状流 れを再現していた.しかし,本研究では水平シアに発生している小 さな渦が強い上昇気流に引き伸ばされることで竜巻が発生する,と いう考えを基本として,図-1(b)のように水平シアを流れ場に再現す ることで竜巻状流れを生成した.また,実際の竜巻が発生している 空間をイメージして図-2に示すような単純な直方体解析領域を作成 した.上昇流口を上面中央部に,流入流出口を x 軸に直交する2側 面のみに設定し,流入流出風速を与えることで水平シアを,流入量 と流出量に差を持たせることで上昇流を再現した.天井と側面に関 しては摩擦なしの境界条件とした.底面に関しても本研究では海上 竜巻をイメージし,地表面粗度を考慮しないため摩擦なしの条件と した.本研究では流入流出口高さh,上昇流口幅d,解析領域の大き



(a) 回転を与える方法 (b) シアを与える方法図-1 竜巻状流れを生成する流れ場の概略図



さW×H, 与えるシアの強さ, 上昇流量を変化させて竜巻状流れに与える影響の比較を行った.

3. 解析結果および考察

本研究で生成された竜巻状流れの特徴としては,渦中心がふらふらと移動し続ける,生成・消滅を繰り返すな ど,空間的にも時間的にも不安定なことが挙げられる.しかし,実際の竜巻が局所的に短時間しか発生してい ないことを考慮すると,現実的な竜巻状流れが生成できたといえる.

したがって,原点ではなく最も低圧な位置とした渦中心からの半径rごとに圧力p,接線·法線·鉛直方向風速 U_t , U_r , U_z それぞれに対しアンサンブル平均を行なった.pは渦中心の圧力を基準圧とし, U_t は反時計回り, U_r は渦中心から外向き, U_z は上向きを正としている.また U_t とrの関係を次に示す粘性渦の理論式(1)に近似させることによりコア半径 ε ,循環 Γ ,最大接線風速 U_{tmax} を20箇所の異なる計測高さzについて求めた.

$$u_t(r) = \frac{\Gamma}{2\pi \cdot r} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{\varepsilon^2}\right) \right\}$$
(1)

ここでは h を 3000m, d を 1200m, H を 6000m とし, W を 6000m, 12000m, 24000m と変化させることで, 竜巻状流れに対する解 析領域の大きさの影響について検討する.3 つの条件を W/H=1,2,4 と表すこととする.ま た比較のため, 流入量と上昇流量がそれぞれ 同一になるように流入流出風速により調節し ている.はじめに図-3 に示した z=20m での



図-3 コア半径・循環・最大接線風速の時刻歴変化(計測高さ 20m)

 ε , Γ , U_{tmax} の時刻歴変化から竜巻状流れが発生している時間を判断し,その間の時間平均を行った. 竜巻状流れが発生していない場合は,渦中心が存在しないため,図-3(a)の後半のようにはげしい変動を示す.したがっ

て,3要素全てが安定している部分を竜巻状流れが発生している状態と判断し,図中には緑の線で範囲を示している.図-3からは解析領域が大きいほど,安定した竜巻状流れを生成できることが分かる.

次に z=20m での r に対する p, Ut, Ur, Uz の半径 方向分布を図-4 に示す.図の横軸には ε を用いて無 次元化した中心からの距離 r/ε を,縦軸には U_{tmax} を 用いて無次元化した各パラメータを示し,赤線,緑 線,青線はそれぞれW/H=1,2,4を表している.図-4(a)(b)より p, Ut 共に, W/H=1 以外は同じような性 質を持った竜巻状流れが生成されていることが分かっ た.図-4(c)(d)からは, U_r , U_z 共に,W/H=1が他2 条件に比べ大きく乱れた値をとっていることが分か るが,無次元数値からどちらもUtに比べ無視してよ いほど微小な値であることが分かった.図-5には解 析領域の大きさごとの ε , Γ , U_{tmax} の鉛直分布を示し た.また時間平均した際に求めた標準偏差を $\pm \sigma$ とし て各データに付加した.ここでも W/H=1 のみに大き な変動,乱れが見られた.以上のことから,解析領域 を過小に設定すると竜巻状流れが大きく乱れ,正確 に評価することが出来ないと考えられる.流れが乱 れる原因としては,解析領域が十分な大きさでなく, 壁や天井の影響が竜巻状流れにまで及んでいるため であると考えられる.したがって図-5の残りの2条 件に注目すると、いずれのパラメータにもこの変化に 伴う値の変化が見られないことから、地表面粗度を 考慮していないこともあり,強い2次元性を持った竜 巻状流れが生成されていることが明らかとなった.ま た解析領域を大きくすれば流れが弱くなる傾向も見 られた.それは流入量を同一にするために調節した 流入風速による影響であると考えられる.

εやΓに関わらず,どのような接線方向風速でも表 現出来るような式を得るために,粘性渦の理論式(1) に対しε,Γを用いて無次元化を行なった.それによ り得られた式(2)で表されるマスターカーブを図-6(a) に示す.

$$U^* = \frac{1}{2\pi \cdot r^*} \left\{ 1 - \exp\left(-r^{*2}\right) \right\} \quad U^* = \frac{u_t}{\Gamma/\varepsilon} \quad r^* = \frac{r}{\varepsilon} \quad (2)$$



また前述のシアの強さ等の各種条件を変えて比較した全ての U_t の z=20m での分布を図-6(b) に,それに対し ε , Γ を用いて無次元化を行なった分布を図-6(c) に示す.その結果,無次元化を行なうことで U_t 分布がマスター カーブに見事な一致をすることが明らかとなった.

4. おわりに

今後は,地表面粗度を考慮した解析や,特徴の違った竜巻状流れを生成・制御するため,圧縮や熱輸送,浮力 対流などを考慮した解析を行うことを考えている.

5. 謝辞

本研究の遂行においては, JSPS 科研費 (24560583) および東京工芸大学風工学共同研究拠点共同研究の助成を 受けた.ここに記し,感謝の意を表す.