

# LES モデルを用いた数値流体解析による竜巻状渦内の三次元乱流場の解明 Numerical study on turbulent flow fields of tornado-like vortices using the LES turbulence model

○石原 孟<sup>1)</sup>                      長坂 陽介<sup>2)</sup>                      劉震卿<sup>2)</sup>  
Takeshi ISHIHARA<sup>1)</sup>              Yousuke NAGASAKA<sup>2)</sup>              Zhenqing LIU<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

近年日本において竜巻による大きな被害が発生し、竜巻に対する耐風設計の重要性がクローズアップされている。竜巻は強い上昇流を伴う複雑な三次元乱流場になっているため、それにより発生する被害は甚大である。竜巻の三次元乱流場を解明するための室内実験や現地観測は行われてきた。室内実験では三次元複雑乱流場の計測の困難さから、竜巻状渦の中心部及び地表面付近の乱流場に関する統計データが十分に得られていないのが現状である。一方、現地観測ではドップラーレーダー等により竜巻内の風速場が観測できるようになったが、地表面付近の風速の計測の困難さと竜巻渦の非定常性により観測から流れ場の統計データを得ることが難しい。これらの問題を解決するために、近年 LES を用いた数値流体解析による竜巻状渦内の三次元流れ場の解明が行われ、平均風速場およびその形成メカニズムは明らかにされてきたが<sup>2)</sup>、竜巻渦内の乱流特性については不明な点が残されている。

そこで、本研究では、数値竜巻発生装置を作成し、竜巻状渦を数値的に発生させ、竜巻状渦内の三次元乱流場の詳細構造を明らかにすると共に、時間平均ナビエ・ストークス方程式における各項のバランスを調べることで、竜巻状渦に伴う乱れの平均風速場への寄与を明らかにする。

## 2. 数値解析モデル

本研究では、松井と田村<sup>1)</sup>が用いた Ward 型竜巻発生装置を数値的にモデル化した。図 1 には作成した数値竜巻発生装置及び計算格子の鳥瞰図を示す。作成した数値モデルは室内竜巻発生装置と同様にガイドベーン、収束層、対流層、ハニカム、吸い上げ部等を設けている。装置上部に一定の流出速度を一様に与えることにより上昇流を再現した。また装置下部のガイドベーンの外側に自由流入を境界条件とし、ガイドベーンの変角を調整することにより地面付近の角運動量を与えた。本研究ではガイドベーン角度  $\theta$  を  $40^\circ$  と  $60^\circ$  に設定することにより、スワール比が 0.31 と 0.65 の竜巻状渦を再現した。数値解析モデルおよび解析条件の詳細については文献 2 を参照さ

りたい。竜巻発生装置における導入ベーンの変角、すなわち、スワール比  $S$  を変化させることにより、代表的な二つのタイプの竜巻状渦 ( $S=0.31$ ,  $S=0.65$ ) を発生させた。

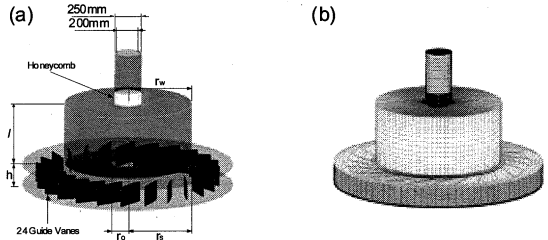


図 1 数値解析モデルの鳥瞰図(a)と格子分布(b)

## 3. 数値解析結果

図 2 には数値流体解析による室内実験による可視化写真<sup>1)</sup>と瞬間流線図を示し、渦の形状や直径が一致していることが分かる。またスワール比の小さいケース ( $S=0.31$ ) では竜巻状渦が層流渦になっているのに対して、スワール比の大きいケース ( $S=0.65$ ) では竜巻状渦が大きな乱れに伴う乱流渦になっていることが分かる。

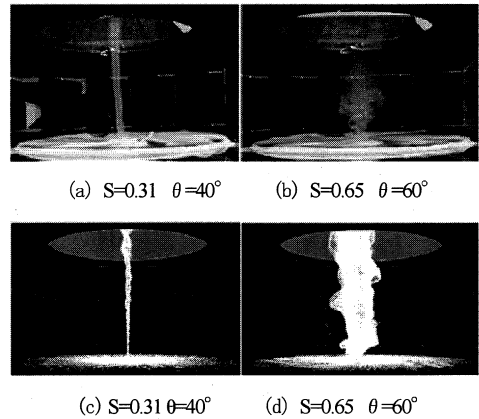


図 2 室内実験(a, b)と数値解析(c, d)の比較

図 3 と図 4 には、半径方向、円周方向、鉛直方向の変動風速の標準偏差およびレイノルズ応力の鉛直分布を示す。それぞれのスワール比における上空の最大旋衡風速  $v_c$  とそれに対応する半径  $r_c$  を用いて無次元化した。

図 3 から分かるように、スワール比の小さいケース ( $S=0.31$ ) では、変動風速の標準偏差の鉛直方向の変化

1) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授  
Professor, Department of Civil Engineering, Univ. of Tokyo

2) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 大学院生  
Master, Department of Civil Engineering, Univ. of Tokyo

が小さく、その最大値は地表面付近で最大旋衡風速 $v_c$ の数パーセントである。一方、スワール比の大きいケース( $S=0.65$ )では、変動風速の標準偏差は地表面付近で大きなピークが現れており、その最大値は地表面付近で最大旋衡風速 $v_c$ の80パーセント(図3(a))を超えている。このことから、乱流渦の場合には竜巻中心付近のガスト風速は平均風速より、変動風速の寄与が大きいことが推測される。また $S=0.65$ のケースでは変動風速成分の標準偏差の鉛直分布は平均風速の分布によく対応している<sup>2)</sup>。レイノルズ応力 $uw$ に関しては層流渦の場合にはその値が小さく、乱流渦の場合には大きな値を示し、その鉛直分布は変動風速の標準偏差のそれによく対応している。

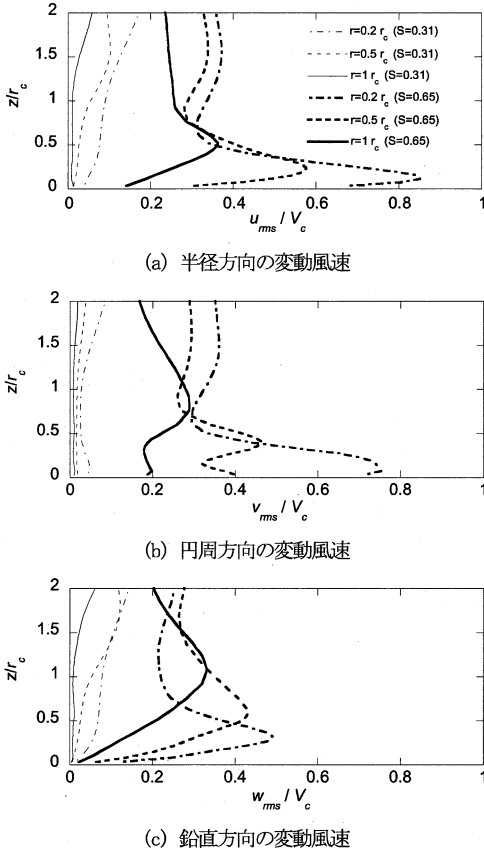


図3 無次元化した変動風速の標準偏差の鉛直分布

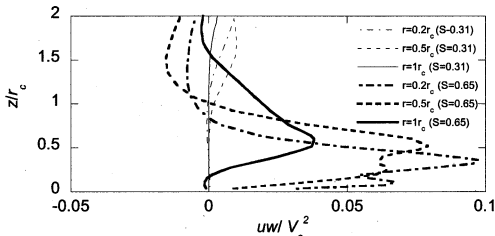


図4 無次元化したレイノルズ応力の鉛直分布

$S=0.65$ のケースでは渦の中心付近に大きな変動風速を示すが、Ishiharaら<sup>2)</sup>の研究から、 $S=0.65$ のケースにおける地表面付近での円周方向風速の増大は、平均風速の鉛直方向の移流項により生じていることが明らかになっている。変動風速が円周方向の平均風速への寄与を調べるために、円筒座標系における軸対称時間平均ナビエ-ストークス方程式を導出し、運動方程式の各項を調べた。

$$U \frac{\partial U}{\partial r} + W \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{V^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} - \left( \frac{\partial u^2}{\partial r} + \frac{\partial uw}{\partial z} - \frac{v^2}{r} + \frac{u^2}{r} \right) + D_u \quad (1)$$

式(1)の左辺は、半径方向( $A_{ru}$ )と鉛直方向( $A_{zu}$ )の移流項及び遠心力( $C_r$ )から、右辺は半径方向圧力勾配( $P_r$ )、レイノルズ応力項( $T_u$ )、拡散項( $D_u$ )からなる。またレイノルズ応力項( $T_u$ )は、 $T_{ru2}$ 、 $T_{ruw}$ 、 $T_{v2}$ 、 $T_{u2}$ から求められる。図5(a)から、レイノルズ応力項( $T_u$ )の寄与が小さい。その理由は、図5(b)に示すように、円周方向と半径方向の変動風速の寄与が打ち消しあうことによるものであることが分かる。

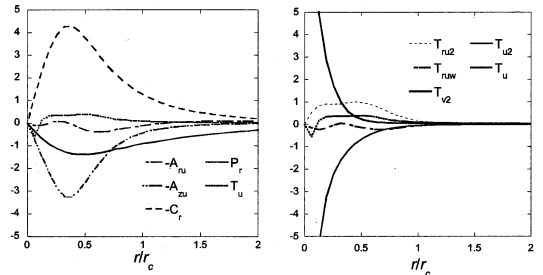


図5 運動量の半径方向バランス(S=0.65)

#### 4. まとめ

本研究では、数値竜巻発生装置を作成し、それにより二つのタイプの竜巻状渦に伴う三次元乱流場をLESモデルにより定量的に評価した。その結果、スワール比の小さいケースでは層流渦となり、地表面付近での変動風速の標準偏差は最大旋衡風速の数パーセントであるのに対して、スワール比の大きいケースでは竜巻状渦が乱流渦となり、地表面付近での変動風速の標準偏差は最大旋衡風速の80パーセントを超えることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 松井正宏, 田村幸雄: 竜巻状流れ場に対するスワール比粗度の影響に関する室内実験, 第19回風工学シンポジウム, pp.7-12, 2006.
- 2) Ishihara T., Oh S., and Tokuyama Y.: Numerical study on flow fields of tornado-like vortices using the LES turbulence model, J. Wind Eng. Indust. Aerodyn., 2011. (In press)