

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

福王 翔

指導教官 石原 孟 教授

1. はじめに

近年日本における竜巻の発生個数は年々増加し、大きな被害が発生している。竜巻は強い上昇流を伴う複雑な三次元的な流れ場を持ち、それにより発生する被害は甚大である。竜巻の三次元流れ場を解明するための現地観測や室内実験では、竜巻の発生頻度が低いことや、三次元複雑乱流場の計測が難しいことなどからこれまでに流れ場を定量的に評価した研究例は少ない。また数値解析においては竜巻状渦の複雑な乱流場を定量的に再現するためには三次元の非定常解析を行う必要があり、これまでに LES を用いた解析例は少ない。

そこで本研究では、竜巻状渦を数值的に発生させ、竜巻状渦に伴う三次元流れ場を詳細に調べると共に、室内実験の結果と比較することで、その精度を検証する。また時間平均ナビエ・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により竜巻状渦に伴う三次元流れ場の形成メカニズムを明らかにする。

2. 数値解析結果

まず LES モデルを利用することで、竜巻状渦に伴う三次元複雑乱流場を再現できる数値竜巻発生装置を作成した。竜巻発生装置における導入ベーンの角度、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 2 には数値流体解析による流線図と室内実験による可視化写真を示し、渦の形状や直径が一致していることを確認した。

次に数値解析の結果から、それぞれのスワール比における最大旋衡風速とその半径を用いて風速の無次元化を行い、円周方向風速と

鉛直方向風速を図 2 と図 3 に示す。これらの図から円周と鉛直風速は松井 (2006) と文字 (1988) の実験結果と一致することがわかる。

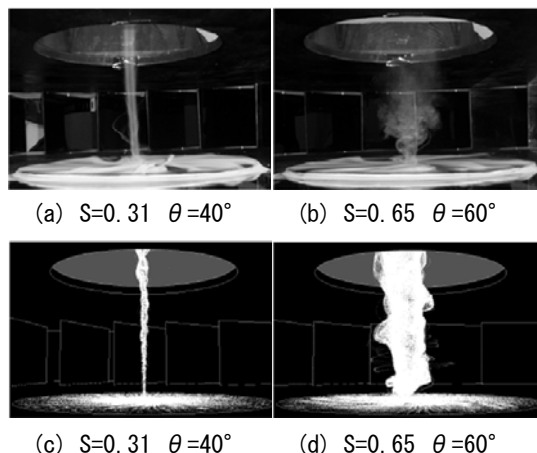


図 1 室内実験 (a, b) と数値解析 (c, d) の比較

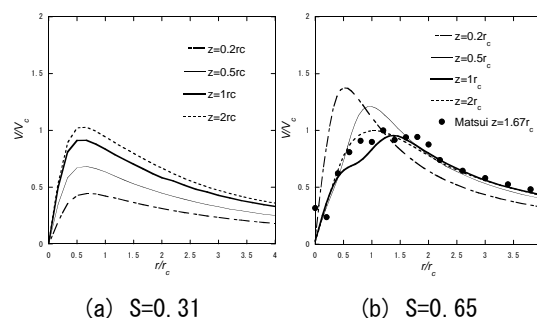


図 2 無次元化円周風速の半径方向分布

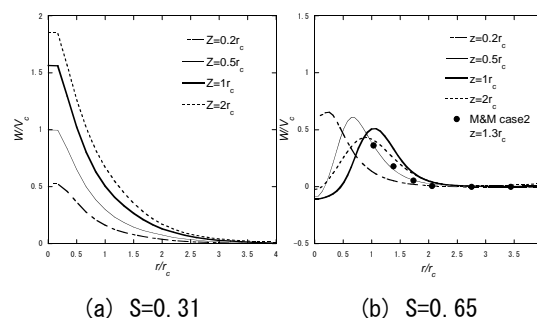


図 3 無次元化鉛直風速の半径方向分布

円周方向風速について、 $S=0.31$ では地表面ほど風速が小さいのに対して $S=0.65$ では逆に地表面付近の風速が上空の 1.4 倍近く増速

することがわかる(図 2)．構造物は地表面付近に位置するため，この風速の増大は耐風設計上重要である．鉛直風速について， $S=0.31$ では最大値は渦中心に見られ，その値は旋衡風速の 1.7 倍であるのに対して， $S=0.65$ では，最大値は最大旋衡半径に出現し，その値は旋衡風速の約半分である(図 3)．

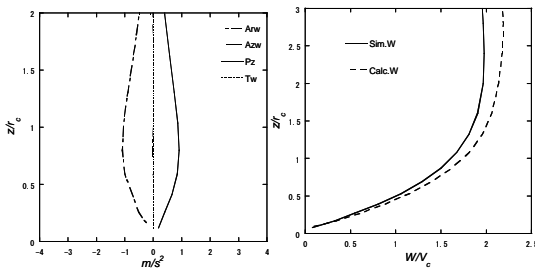
4. 三次元流れ場の形成メカニズム

$S=0.31$ のケースにおける強い上昇流と $S=0.65$ のケースにおける地表面付近での増速のメカニズムを調べるために，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，各項のバランスを調べた．

$$U \frac{\partial W}{\partial r} + W \frac{\partial W}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \left(\frac{\partial uw}{\partial r} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{uw}{r} \right) + D_w \quad (1)$$

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

まず鉛直方向の方程式を用いて， $S=0.31$ の中心軸上における各項を計算した．その結果，鉛直方向の移流項と圧力勾配がほぼバランスしていることがわかった(図 4,a)．また鉛直方向の移流項と圧力勾配とのバランス式から求めた鉛直風速は数値解析の結果ともよく一致し，中心軸上の強い上昇流は圧力勾配によって作られていることがわかった(図 4, b)．

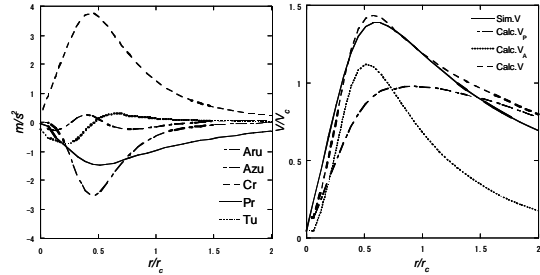


(a) 鉛直方向のバランス (b) 鉛直風速

図 4 ナビエ・ストークス方程式 ($S=0.31$)

次に半径方向の方程式を用いて， $S=0.65$ の地表面付近の各項を計算した．その結果，遠心力は圧力勾配と鉛直方向移流項とほぼバランスしていることがわかった(図 5, a)．また，

遠心力，圧力勾配，鉛直方向移流項とのバランス式から求められた円周風速は数値解析結果とよく一致し(図 5,b)， $S=0.65$ の地表面付近での増速は鉛直方向の移流項に起因していることがわかった．



(a) 半径方向バランス (b) 円周風速

図 4 ナビエ・ストークス方程式 ($S=0.65$)

5. 結論

本研究では，室内実験と同様に竜巻状渦を再現できる数値竜巻発生装置を作ること的成功し，それにより竜巻状渦に伴う三次元流れ場を定量的に評価した．またナビエ・ストークス方程式の各項を調べることにより， $S=0.31$ のケースにおける強い上昇流と $S=0.65$ のケースにおける地表面付近における増速の発生メカニズムを明らかにした．

参考文献

- [1] 松井正宏他：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
- [2] Mitsuta, Y. et al: 1984. Development of a laboratory simulator for small scale atmospheric vortices, *Natural Disaster Science*, Vol. 6, 43-54
- [3] Wan, C. A. et al 1972. Measurement of the velocity field in a simulated tornado-like vortex using a three-dimensional velocity probe, *Journal of Atmospheric Science*, Vol. 29, 116-127
- [4] Oka, S. et al 2009. Numerical study of aerodynamic characteristics of a square prism in a uniform flow, *J. Wind Eng. Indust. Aerodyn.*, Vol. 97, pp. 548-559.