

LES による竜巻状流れの再現に関する研究

徳島大学大学院 学生員 二宮 めぐみ 徳島大学 正員 野田 稔
 JFE エンジニアリング株式会社 非会員 山下 翔平 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

竜巻は、時に人命を脅かす可能性があるほどの恐ろしい自然災害であり、また、いつ、どこで発生したとしてもおかしくはない自然現象でもある。そこで、竜巻に対する対策を行うにあたり、竜巻の流れや乱れなどの特性を知る必要がある。しかし、実際の竜巻を観測するのは極めて困難である。そのため、現在でも実験または数値的な研究が行われている¹⁾²⁾。本研究では、竜巻状流れ発生装置を数値モデル化し、LES 乱流モデルを用いて竜巻状流れ場を再現する。再現した竜巻状流れより速度場を求め、竜巻における流れ場の特性を検討した。また、粘性渦モデルを当てはめて循環とコア半径の評価を行った。

2. 数値解析モデル

本解析は LES 乱流モデルを用いて、非構造格子に基づく有限体積法により離散化した。また、標準的な Smagorinsky モデルを適用し、竜巻状流れの再現を行った。本研究では、竜巻状流れ発生装置を再現するにあたり徳島大学の竜巻発生装置を数値的にモデル化した。装置の断面図を図-1 に、収束層平面図を図-2 に示す。また、図-3 に作成した数値竜巻状流れ発生装置を示す。図-3 に示すように、作成した数値モデルにはガイドベーン、収束層、対流域を再現している。ここで、圧力 p は、流入面及び壁面に垂直な勾配を 0 とし、流出面には 0 を与えている。速度 U は、流入面に 1m/s を与えており、流出面には垂直な勾配を 0、壁面には 0 を与えている。また、ガイドベーンは壁面とみなしているため、壁面における境界条件と同一のものとなる。表 1 には、解析に用いた条件を示す。

表-1 実験条件

上昇流穴半径 (m)	0.4
収束層高さ (m)	0.2
収束層の半径 (m)	1.0
対流域の半径 (m)	0.5
流量 (m^3/s)	0.8712792
収束層の流入角 (deg) (スワール比 Sw)	10, 20, 30, 50 (0.18 ~ 1.19)
計測高さ z (mm)	5, 10, 13, 25, 50, 100, 200
格子数	1201104
時間刻み (s)	0.001

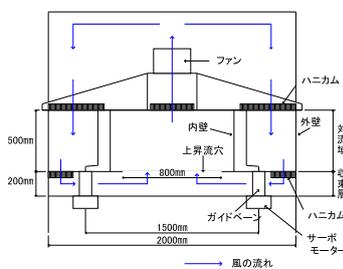


図-1 風洞断面図

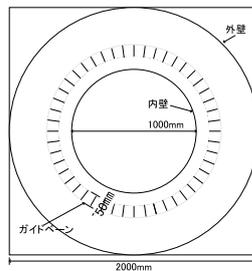


図-2 収束層平面図

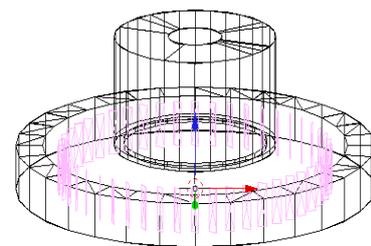
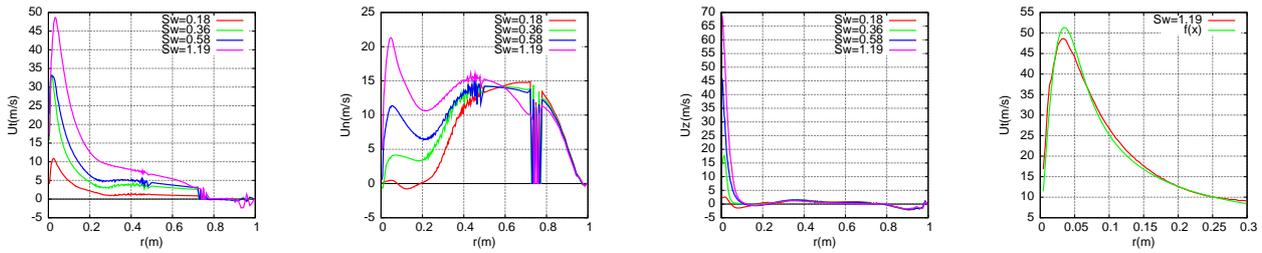


図-3 数値竜巻状流れ発生装置

3. 竜巻状流れの風速場

ここでは、再現した竜巻状流れより速度場を求め検討を行う。なお、紙面の都合上、図 4 に示すスワール比 $Sw=0.18, 0.36, 0.58, 1.19$ 、計測高さ $z=25mm$ のときの風速分布を示す。グラフの横軸は、竜巻状流れ場の中心からの距離 r であり、縦軸は各距離における各諸量のアンサンブル平均したものを表している。はじめにスワール比 $Sw=0.18, 0.36, 0.58, 1.19$ 、計測高さ $z=25mm$ のときの竜巻状流れの接線方向の風速分布を (a) に示す。風速分布をみると、スワール比が増加すると最大風速が速くなる傾向がある。また、竜巻状流れ場の中心から最大風速までの形状が直線的なのに対し、最大風速後は形状が曲線的であることからランキン渦の傾向があるのではないかと考えられる。(b) は半径方向の風速分布である。正の値は竜巻状流れ場の中心に向かう吸い込みを表している。風速分布をみると、半径方向に関しても、接線方向と同様の傾向がみられ、スワール比が増加すると最大風速が速くなる傾向がみえる。(c) の鉛直方向の風速分布をみると、竜巻状流れ場の中心付近で大きい風速が現れている。また、最大風速よりも中心側の風速分布の形状をみると、中心付近が減速しており、下向き抵抗が働いていると推測される。



(a) 接線方向の風速分布 (b) 半径方向の風速分布 (c) 鉛直方向の風速分布 (d) $Sw=1.19$ の場合
 図-4 計測高さ $z=25\text{mm}$ における水平面内の風速分布

4. 循環とコア半径の評価

ここでは渦の理論解を解析結果に適用し、循環とコア半径について検討する。2次元流れにおける渦度が連続関数で与えられている粘性渦の理論解は次式で表される³⁾。

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

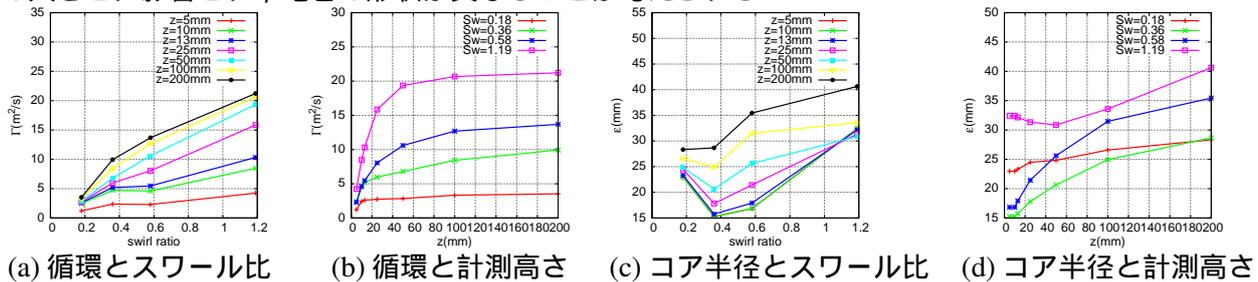
ここで、 v_c は接線方向の風速、 Γ は循環、 ε はコア半径である。これを図 4(a) の結果に当てはめ、以下の検討を行った。図 4(d) は $Sw=1.19$ の接線方向の風速分布に式 (1) を近似させた。これより計算値とよく一致していることがわかる。

(1) 循環に関する検討

図 5 は、循環またはコア半径と各パラメータの関係を表したグラフである。図 5(a) より、どの計測高さにおいてもスワール比が大きくなるにつれ、循環も大きくなっていることがわかる。これより、流入角が大きいほど回転も強くなると考えられる。図 5(b) より、計測高さが高くなるにつれ、循環も大きくなっていることがわかる。これより、竜巻状流れでは上層部ほど回転も強くなると考えられる。

(2) コア半径に関する検討

図 5(c) より、スワール比が 0.36 から 1.19 の間ではスワール比が大きくなるとコア半径も大きくなっている。しかし、スワール比が 0.18 から 0.36 の間では計測高さが 100mm 以下の場合、スワール比が大きい 0.36 においてコア半径の減少がみられる。これより、仮にスワール比を 0 から増加させていくと、あるスワール比に達したときにコア半径の増加が始まると考えられる。図 5(d) より、計測高さが 50mm 以上ではスワール比の増加とともにコア半径の増加がみられる。しかし、計測高さが 50mm 未満において、スワール比が 1.19 の場合はコア半径の減少が現れている。これより、竜巻状流れにおいて高層部ではコア半径は増加してゆき、低層部では流入角の大きさに影響され、竜巻の形状が異なることが考えられる。



(a) 循環とスワール比 (b) 循環と計測高さ (c) コア半径とスワール比 (d) コア半径と計測高さ
 図-5 循環またはコア半径と各パラメータによる関係

5. おわりに

本研究では、LES で竜巻状流れの再現を行い、それによる風速分布を求め、また、粘性渦モデルによる循環とコア半径の評価を行った。今後は、流入条件や上昇流穴半径を変化させた場合のシミュレーションを行い、それらが竜巻状流れ場に対して及ぼす影響について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 石原孟, 福王翔, 徳山佳央 : 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, 東京大学大学院, 第 21 回 風工学シンポジウム論文集, 143148, 2010
- 3) 乱流解析: 吉澤徹, 村上周三 他, 東京大学出版会