

数値流体解析による竜巻状流れの性状に関する研究

徳島大学大学院 学生員 二宮 めぐみ 徳島大学 正員 野田 稔
 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る。また、いつ、どこで発生したとしてもおかしくはない大気現象でもある。日本では、年間約 25 件 (2007 ~ 2010 年) も竜巻の発生が報告されており¹⁾、近年、その被害が増加している。この被害を低減するために、竜巻に対する防災や対策をしなければならない。そこで、対策を講じるにあたり、竜巻の流れや乱れなどの特性を知る必要がある。しかし、今の技術では積乱雲が発生しやすい状況を予測することまでは可能であるが、時刻や場所を特定した予報は難しい。また、実際の竜巻を観測するのは極めて困難であり、仮にできたとしても危険である。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²⁾³⁾⁴⁾。本研究では、LES 乱流モデルを用いてペーン式の竜巻風洞内の流れ場の再現を行った。再現した竜巻状流れより速度場を求め、ペーンの角度で定義されるスワール比²⁾ (以下、ガイドペーンのスワール比) と、計算結果から得られる流速により求まるスワール比を比較した。

2. 数値解析法

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。

(1) 数値モデル

本研究では、図 1 に示すように 2 種類の竜巻状流れ発生装置の数値モデルを用いて解析を行った。図 1(a) に示すケース 1 では、収束層上部に流入口を設けており、鉛直下向きに流入している。収束層には、高さ 0.2m、幅 0.05m、厚さ 0.001m のガイドペーンを直径 1.5m の円周上に等間隔に 48 枚配置している。図 1(b) に示したケース 2 では、下部の円筒底面に流入口を設けており、鉛直上向きに流入している。収束層には、高さ 0.2m、幅 0.2m、厚さ 0.001m のガイドペーンを直径 1.5m の円周上に等間隔に 24 枚配置している。ケース 2 のパラメータの決定については後述する。

(2) 境界条件

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 10m/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、ガイドペ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。ケース 1、ケース 2 の解析に用いた条件を、表 1 に示す。

(3) スワール比の算出

今回、解析結果から得られる最大接線風速 $U_{t_{max}}$ および最大接線風速半径 $R_{t_{max}}$ により定義される場合と、ガイドペーンのスワール比を求め、これらを比較した。最大接線風速 $U_{t_{max}}$ および最大接線風速半径 $R_{t_{max}}$ により求めるスワール比の式は以下のようになる。

$$Sw = \pi R_{t_{max}}^2 U_{t_{max}} / Q \quad (1)$$

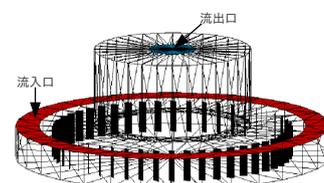
また、ガイドペーンによるスワール比の定義式は以下のようになる。

$$Sw = (R/2h) \tan \theta \quad (2)$$

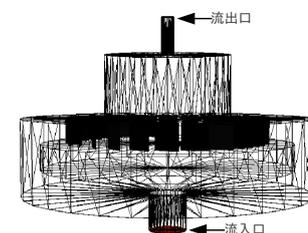
ここで、 Q 、 R 、 h 、 θ はそれぞれ流量、上昇流穴半径、収束層高さ、ガイドペーンの角度で決まる空気の流入角である。

表-1 解析におけるパラメータ

	ケース 1	ケース 2
上昇流穴半径 R (m)	0.4	0.15
収束層高さ h (m)	0.2	0.2
収束層の半径 (m)	1.0	1.15
対流域の半径 (m)	0.5	0.5
流出口の半径 (m)	0.15	0.05
流量 Q (m^3/s)	8.712792	0.706858
収束層の流入角 θ (deg)	50	60



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-1 数値竜巻状流れ発生装置

3. 竜巻状流れの風速場とスワール比

ここでは、再現した竜巻状流れより速度場を求め、スワール比の検討を行う。図2に、収束層の1/2の高さにおける接線方向風速と流量の比のグラフを示す。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、縦軸はアンサンブル平均した接線方向の風速値と流量の比を表している。図2より、ケース1の最大接線風速と流量の比、最大接線風速半径はそれぞれ $U_{t_{max}}/Q=6.8365(1/m^2)$ 、 $R_{t_{max}}=0.0375(m)$ である。よって式(1)より、最大接線風速および最大接線風速半径により定義されるスワール比は $Sw=0.0302$ となった。また、式(2)より、ガイドベーンのスワール比は $Sw=1.19$ である。これらより、2つのスワール比には大きな差があることがわかる。この高さでの風速 ($\sqrt{U_t^2 + U_n^2 + W^2}$) 分布図を図3に示す。ここで、 U_n 、 W は、半径方向風速、鉛直方向風速である。これよりケース1の場合、流れ場中心に向かって風速の遅い領域が確認でき、ガイドベーンから流れが剥離していることがわかる。このことから、ガイドベーンに沿った流れが生じていないことがスワール比の不一致の原因だと考えられる。これを考慮し、改善を行った数値モデルがケース2である。

ケース2では、ガイドベーンの幅を0.05mから0.2mにしている。これより、剥離の発生を軽減させている。またケース1では、収束層上部から鉛直下向きに風が流入し、ガイドベーンに達するまでの距離が短いため、流入部分の流れの拘束が強いと考えられる。そのため、ケース2では、流入口を下部の円筒底面に設け、鉛直上向きに流入させている。これにより、よりスムーズな流れを再現させている。

図2より、ケース2の最大接線風速と流量の比、最大接線風速半径はそれぞれ $U_{t_{max}}/Q=22.5929(1/m^2)$ 、 $R_{t_{max}}=0.0495(m)$ である。よって式(1)より、最大接線風速および最大接線風速半径により定義されるスワール比は $Sw=0.1739$ である。また、式(2)より、ガイドベーンのスワール比は $Sw=0.65$ である。これらよりケース1の場合と比べると、式(1)のスワール比と式(2)のスワール比の差が小さくなっていることがわかる。これは、図3のケース2に示すように、ガイドベーンで発生していた剥離が弱まり、ガイドベーンに沿った流れが再現できているためだと考えられる。以上から、数値流体解析を用いて竜巻状流れを再現するにあたり、ガイドベーンの大きさがスワール比に影響を及ぼすことがわかる。

4. おわりに

本研究では、LES乱流モデルを用いて竜巻状流れ場の再現を行った。再現した竜巻状流れより速度場を求め、計算結果から得られるスワール比と、ガイドベーンによるスワール比を比較した。今後は、様々な数値モデルを用いるなど更なる研究が必要であり、竜巻状流れ場の基本性状をより詳しく検討する必要がある。

5. 謝辞

本研究は、科研費基礎研究(c)(21560503)の助成を受けたものである。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 竜巻等の突風データベース, 気象庁 HP (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) .
- 2) 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
- 3) 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
- 4) Takeshi Maruyama: Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex, Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering, 2010
- 5) 二宮めぐみ, 野田稔, 山下翔平, 長尾文明: LESによる竜巻状流れの再現に関する研究, 徳島大学, 土木学会四国支部 第17回技術発表会講演概要集, 2011

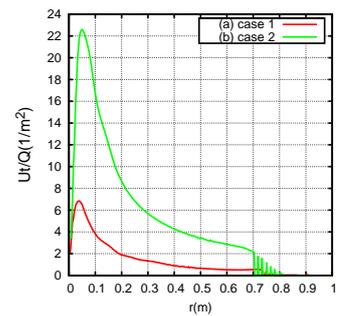
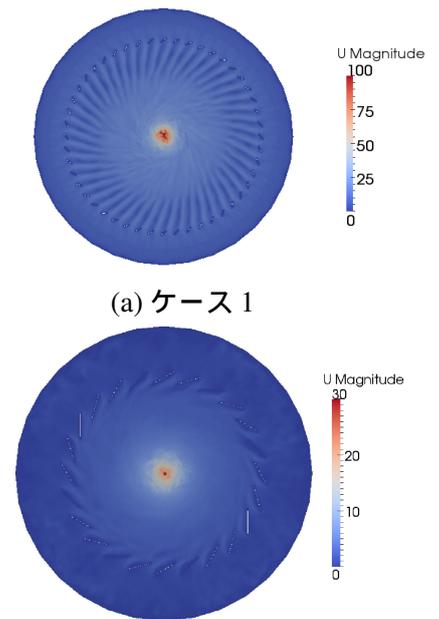


図-2 接線方向の風速分布



(b) ケース 2

図-3 風速分布図