

竜巻の数値シミュレーションの試み

日本大学大学院理工学研究科 学生会員 ○宮田 秀太 東日本旅客鉄道 栗津 翔太
 日本大学理工学部 フェロー 野村 卓史 日本大学理工学部 正会員 長谷部 寛

1. はじめに

2006年には多くの竜巻が発生し、計12名もの死者がでるなど甚大な被害をもたらした。竜巻は台風に比べてはるかに小規模であり、その局所的・突発的な特徴から気象観測点を通過することがほとんどない。そのため、気流や内部の気圧を実測した例がほとんどなく、情報が不十分である。竜巻による被害メカニズムの解明や、被害の対策のためには、地上付近の気流や、圧力の特性を把握することが必要である。既往の研究では、竜巻旋回流の生成を行い、その性質を調べる実験が行われてきた¹⁾。本研究では、この風洞実験の機構を参考にし、数値シミュレーションのアプローチから、竜巻状旋回流の再現を試みることを目的とする。

2. 解析手法

支配方程式には、非圧縮性粘性流体の運動方程式と連続式を用いる。空間の離散化には有限要素法を用いた。要素は六面体8節点アイソパラメトリック要素を用い、瞬時速度 U_i は要素内 tri-linear 分布の補間関数を適用し、圧力 P は要素内一定分布の補間関数を適用した。また、安定化手法については SUPG 法、時間方向の離散化には、Predictor-Corrector 法を用いた。

3. 解析モデル

参考とした松井らの風洞実験¹⁾は、図1に示すような収束域と対流域と呼ばれる直径の異なる2段の円筒形からなる形状をしている。対流域の上部より気流を吸い

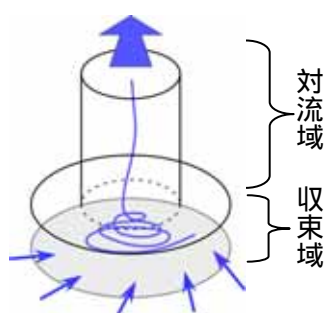


図1 対象実験の概要

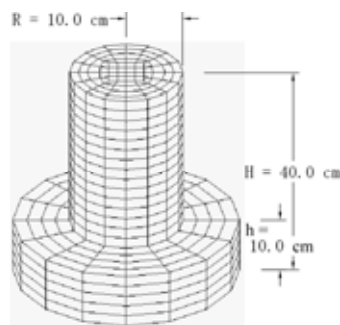


図2 解析メッシュ

上げることにより、収束域の側面より流入した気流が、領域内部において竜巻状の旋回流を生成する機構となっている。ここで、対流域の半径 R に対する収束域の高さ h の比 h/R をアスペクト比といい、松井らの実験では $h/R = 1.3$ である。解析モデルでは $h/R = 1.0$ とした。この実験を参考に領域を有限要素で分割した解析メッシュを図2に示す。総節点数2253、総要素数1920である。高さ方向には等分割に要素分割を行っている。

図3に示すように、境界条件として、対流域上部の流出境界 Γ_1 では吸い上げの上向き流速 $\bar{w}_0$ を一定分布として与える。対流域の側面、収束域の上面と下面の境界 Γ_2 では slip 条件を与える。対流域の側面の流入境界 Γ_3 ではトラクション・フリーの条件を与えている。

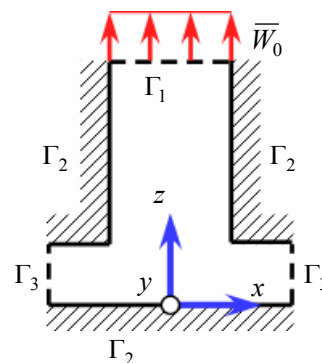


図3 境界条件

4. スリップ条件の与え方

対流域の円筒側面では、壁面の境界が全体座標系と一致した方向を有していないため、スリップ条件を適用する方法として接平面を定義した。図4のように、注目する節点に接している面の中心の法線方向ベクトルから、注目する節点の法線ベクトル $\bar{n}$ を式(1)のように対象とする節点の周辺の要素面の法線ベクトル $\bar{n}_i$ の平均として評価し、接平面を $\bar{n}$ に直交する面として定義した²⁾。

$$\bar{n} = \sum_{i=1}^{n_{sr}} \bar{n}_i / n_{sr} \quad (1)$$

ここで、 n_{sr} は着目する節点を含む要素面の総数である。スリップ条件は接平面の法線方向流速成分 $\bar{w}_n$

キーワード：竜巻，旋回流，有限要素法，圧力分布

連絡先：〒101-8308 東京都神田駿河台 1-8-14 日本大学理工学部土木工学科風工学研究室 TEL/FAX 03-3259-0411

をゼロとし, 接平面内流速成分 $\bar{u}_n, \bar{v}_n$ を未知数として与える.

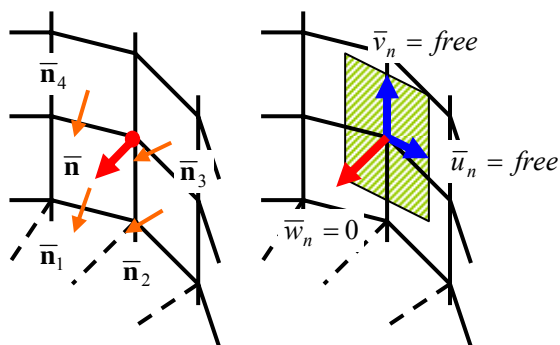


図4 単位法線ベクトル

図5 接平面内の自由度

表1 解析条件

$$Re = \frac{\bar{W}_0 \cdot 2R}{\nu} = 2.8 \times 10^2$$

流出流速 $\bar{W}_0$ 2.0 cm/s

$\Delta t = 1.0$ s

総 step 数 3000 (3000 s)

流速の立ち上げ step 数 500 (500 s)

5. 数値シミュレーション結果

計算の条件を表1に示す. 初期条件(流速, 圧力)ゼロから500 stepで $\bar{W}_0$ を0.0~2.0 cm/sまで立ち上げた.

定常状態になったときの領域全体の流れの流線を図6に示す. 流入した流れが収束域内において渦を形成し, 対流域へと旋回しながら上昇し, 螺旋状の流れを形成している. 流速は対流域の中心部で最大値をとり, その値は流出流速 $\bar{W}_0$ の約1.5倍の値である.

図7より, 底面において流れが旋回し, 渦を形成していること, その中心部で圧力が低下していることが確認できる. この圧力低下は, 吸い上げと渦の形成に起因するものと考えられる. 渦の中心は収束域のほぼ中央にあり, 流れ場は軸対称になっている. 図8は底面の圧力分布をx軸とy軸についてプロットしたものである.

図9は底面におけるx, y軸のそれぞれの軸方向の流速をプロットしたものである. ここに示されるように, 軸に沿って渦の中心に向かっていく流速が, 流入口で最大となり, 中心へ向かうほど減少していくという結果が得られた.

6. まとめ

対流域と収束域を有した2段の円筒形領域において, 竜巻状の旋回流の生成が可能であることが確認できた. また, 底面においては, 回転流と吸い上げ流による圧力の低下や, 渦の中心に向かって吸い込む流れを確認することができた.

今後は, 乱流モデルを組み込み, 本解析を乱流域まで拡張することや, 地表面の粗度の影響を考慮したモデルへと発展させていきたい.

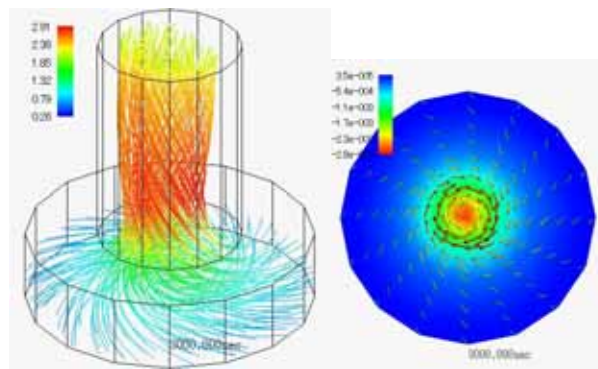


図6 流線

図7 底面の圧力コンターと

流速ベクトル

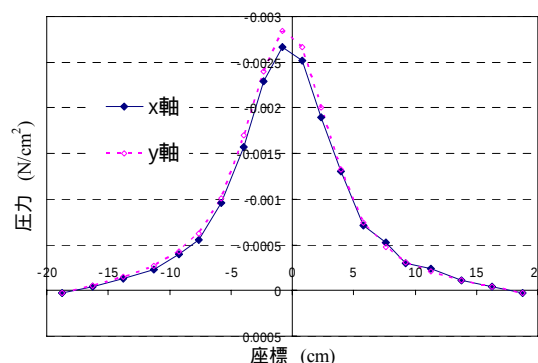


図8 底面におけるx,y軸上の圧力分布

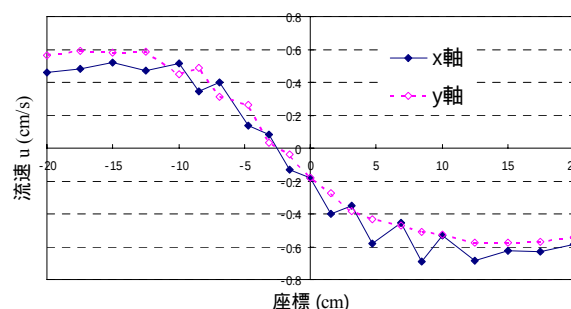


図9 底面におけるx,y軸上の軸方向流速

参考文献

- 1) 松井正宏・田村幸雄: 竜巻状流れ場の可視化実験および流速計測によるスワール比, 粗度の影響, 東京工芸大学工学部紀要 Vol.28 No.1, pp113-119, 2005.
- 2) 長谷部寛, 野村卓史: 有限要素解析における物体の角への壁関数適用方法の検討, 応用力学論文集 Vol.9, pp.811-820, 2006.