

### 数値流体解析を用いたトルネードシミュレータの再現

徳島大学大学院 学生会員 森 一樹 徳島大学 正会員 野田 稔  
徳島大学 フェロー 長尾 文明

#### 1. はじめに

近年では茨城県つくば市，常総市で発生した竜巻(2012年5月6日)<sup>1)</sup>や埼玉県越谷市，千葉県野田市で発生した竜巻(2013年9月2日)<sup>2)</sup>による被害がニュースなどで報じられ，人々の竜巻への社会的関心が高まっており，被害発生メカニズムの検討に必要な研究が求められている．しかし竜巻はいつ，どこで発生するか予測が困難であり，突発的に発生し，すぐ消滅してしまうため実測は極めて困難とされている．そのため，トルネードシミュレータを使った実験や数値流体解析による竜巻状流れ場の再現などを通じて竜巻発生メカニズムの解明が行われている．そこで，本研究ではトルネードシミュレータを使った実験を行い，生成した竜巻状流れに対して，3次元でのPIV測定を行った．さらに，その様子を数値流体解析によって再現することで，装置内の流れの様子を観察した．

#### 2. トルネードシミュレータ

本研究では，アイオワ州立大学のトルネードシミュレータ<sup>3)</sup>(図-1(a))<sup>4)</sup>を参考にした徳島大学のトルネードシミュレータ(図-1(b))を使用し，風洞実験を行った．アイオワ州立大学と徳島大学の装置の大きな違いとしてサイズの違いが挙げられる．前者が直径5.5m程であるのに対し，後者は直径1.5mとなっている．徳島大学のトルネードシミュレータによる竜巻状流れの生成は，図-2に赤矢印で示す通りであり，まず本体中央にある送風機から送り込まれた気流が，本体上部に均等に取り付けられたガイドベーン(18枚)によって旋回を与えられ，本体外周部から吹き降ろすとともに，収束層中央部で旋回する竜巻状の実験気流が形成されるようになっている．上昇流と旋回流との運動量の比で表されるパラメータ(スワール比)を変化させるのは，ベーン角度の他に送風機の回転数，ステージの床面と吸込口との間の収束層高さである．更に本体は任意の速度で水平方向に移動可能であり，竜巻が建築物上を通過する状況を模擬することができる点も大きな特徴である．装置は回転数，ガイドベーンの角度がそれぞれ0~3500rpm，0~60°の範囲で自由に設定が可能で，収束層高さも自由に変えることができる．これらのパラメータを使って，静止竜巻の実験を行っていく．また，ここでは述べないが，装置は全長6m程度のステージを移動速度0~500mm/sで走行可能なため，移動竜巻の実験では静止竜巻で用いる条件に加えて移動速度の変化の影響も検討できる．

#### 3. 3D-PIVを使った可視化実験

##### (1) 実験概要

トルネードシミュレータによって生成された竜巻状流れ場に対しての3D-PIVによる可視化実験は，装置中央部で生成された竜巻状流れの速度3成分の様子を，ステレオ撮影によって計測した．また，撮影はサンプリング周波数3Hz，取得画像60枚(20秒分)，解像度2048×2048ピクセルの条件で行い，解析ソフトはKoncertoを用いた．本研究では可視化を行うため，本体上部のガイドベーン部分からシーディング剤を充填させ実験を行った．実験ではステージ上がガラス張りとなっているため，装置の真下部分に設置したレーザー照射機からレーザーを放出し，斜め下からその様子を高速カメラ2台を用いて，静止時の竜巻状流れの様子を撮影した．

##### (2) 実験結果

実験に用いた風洞のパラメータは，表-1に示す通りであり，収束層高さ，回転数，ガイドベーンの角度を変化させた．今回は，収束層高さ，装置の回転数がそれぞれ200mm，1000rpm，ガイドベーンの角度を15°，30°，55°と変化させたものを図-3に示す．図の縦軸は床からの高さ，横軸は装置中心からの距離となっており，竜巻状気流を側面から見た図となっている．図の赤と青で示したものは，奥行き方向の風速を最大接線風速( $U_{max}$ )で除して無次元化したものを表しており，色が濃いほど奥行き方向に強い風が吹いていることを示して



(a) アイオワ州立大学 (b) 徳島大学  
図-1 トルネードシミュレータ

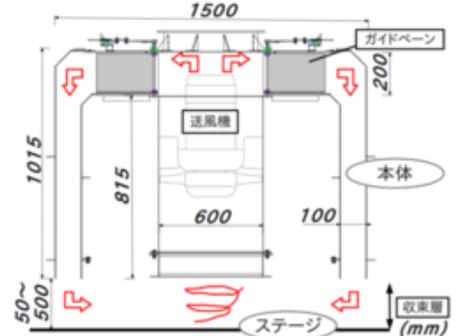


図-2 装置の断面図  
表-1 変化させたパラメータ

収束層高さ (mm)	200, 500		
回転数 (rpm)	500	1000	2000
ベーン角度 (°)	30	15	30
	30	30	55

キーワード トルネードシミュレータ, PIV, 数値流体解析  
〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2-1 徳島大学 TEL/FAX:088-656-7323

いる．また，図の等値線は鉛直方向の風速を最大接線風速で除して無次元化したもので，値の高いものほど鉛直方向に強い風が吹いていることを示しており，渦の外側が上昇流，中心側が下降流になっていることが分かる．これは，2セルの渦が発生していると思われる，この現象はペーンを角度を変化させても変わらなかった．また，ペーンを角度が大きくなるにつれて渦が大きくなり，渦中心に近づくほど奥行き方向に強い風が吹いていることも観測することができた．

4. 数値流体解析によるトルネードシミュレータの再現

(1) 解析条件

本研究では非格子構造に基づく有限体積法を用いた OpenFOAM<sup>5)</sup>による解析を行った．LES は標準 Smagorinsky モデルを採用した．図-4 に図-2 をモデル化した計算領域の断面図を示す．装置の寸法は実物に沿っており，周りに大きな部屋を設けることでより実際の実験室に近づけている．風洞の境界条件としては，図-4 に示す流入面に風速(今回は 5m/s)を，流出面には自由流入条件を与えている．また，緑で示す風洞壁部分と青で示す部分には表-2 に示す境界条件を与えた．

(2) 解析結果

表-2 に示した 3 条件での計算結果を紹介していく．図-5 は PIV 実験の時と同様に赤と青で奥行き方向の無次元風速分布を，等値線で鉛直方向の無次元風速分布をそれぞれ示している．条件 1 では，壁も床も no-slip 条件としており角度を変化させても 1 セルのままであった．条件 2 では，床は no-slip のままであるが，収束層部分に到達する前に流れが弱まってしまっているのではないかと考え壁面部分に slip 条件を与えた．その結果，30 °の時は 1 セルの流れが確認できた一方，角度を 55 °に変化させると床付近は粗度の影響で上昇流であったが，収束層上部では下降気流が見られた．条件 3 では，壁も床も slip 条件とした．その結果角度を変えても外側は上昇流，内側は下降流といった流れが見られた．この傾向は PIV 実験の際にも見られた現象である．

5. おわりに

本研究ではトルネードシミュレータを使った実験で竜巻状気流を発生させ，その様子を数値流体解析によってコンピュータ上で再現した．その結果，境界条件を変化させることで実験で見られた 2 セル型の竜巻状気流の再現を行うことができた．しかし，現段階で実験で得られる渦は 2 セルのみであり，また数値流体解析で得られた結果も粗度が極端に低い海上竜巻の再現のようになってしまっているため，検討の余地があると考えられる．今後はそれらの問題点を踏まえ再現性の高い解析，また，移動状態の研究を行なっていきたい．

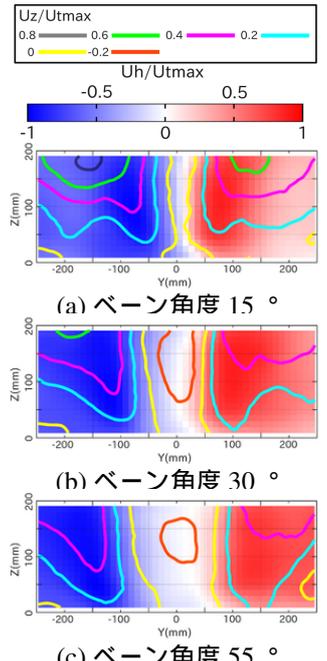


図-3 竜巻状流れ場の鉛直，奥行き方向の無次元風速分布

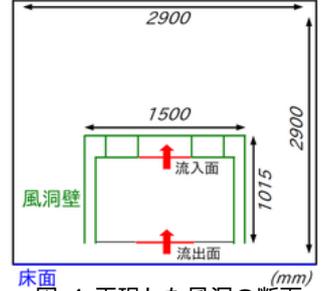


図-4 再現した風洞の断面

表-2 境界条件

	条件 1	条件 2	条件 3
壁	no-slip	slip	slip
床	no-slip	no-slip	slip

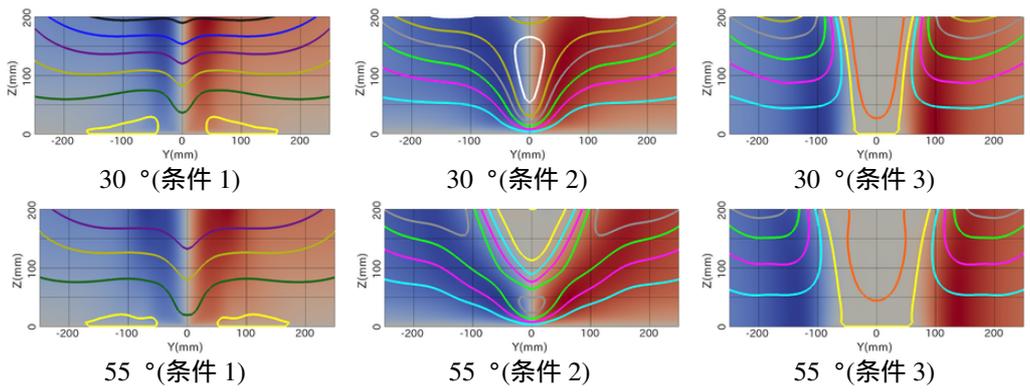
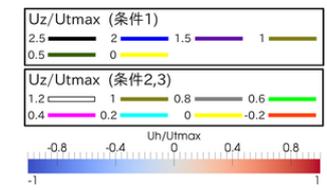


図-5 竜巻状流れ場の鉛直方向および，奥行き方向の無次元風速分布

6. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (24560583) の助成を受けた．ここに記し，感謝の意を表す．

参考文献

- 1) 前田潤滋他：「平成 24 年 5 月 6 日に北関東で発生した竜巻の発生メカニズムと被害実態の総合調査」研究成果報告書, 2013.
- 2) 竜巻等の突風データベース，気象庁 HP (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)
- 3) "Iowa State researchers find, test winds extending far away from Alabama tornado's path", IOWA STATE UNIVERSITY News Service (<http://archive.news.iastate.edu/news/2012/apr/AlabamaTornado>), 2015
- 4) Sarkar P.P., Haan, F.L., Gallus, Jr., W.A., Le, K., Kardell, R. and Wurman, J., "Laboratory tornado simulator: comparison of laboratory, numerical and full-scale measurements", proc. of 10th Americas Conference on Wind Engineering, Baton Rouge, LA, (2005)
- 5) OpenFOAM, The open source CFD toolbox ([www.openfoam.com/](http://www.openfoam.com/)), 2015