

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

松井 正宏^{*1} 田村 幸雄^{*2}

Characteristics of tornado-like flow as functions of swirl ratio and surface roughness

Masahiro Matsui^{*1} Yukio Tamura^{*2}

This research focuses on the influence of tornadoes, which are severe local weather disturbances, for wind resistant design of buildings. Because it was very difficult to evaluate tornado winds generated in real scale, a tornado simulator was developed in the laboratory and tornado-like flow was measured. The situation in which the form of the tornado-like flow changed depending on swirl ratio and surface roughness was reproduced, and the distribution of wind speeds according to this form became clear. These experiment results showed agreement with similar previous experiment results.

1. はじめに

建築物の耐風設計において、設計風速は、気象官署で観測されている風速記録や台風モデルを用いたモンテカルロシミュレーション結果を元に、年発生確率 99% または再現期間 100 年の値を確率・統計的に求めたものに基づいて設定されることが多い[1]。その際に、竜巻やダウンバーストなどの局所的に発生する突風については、陽には考慮されていない。しかし、日本における竜巻の発生数は、年平均 12 件（1971 年～2004 年、気象庁による）と、決して少なくない。また、その被害（例えば大島の竜巻被害[2]）は極めて高い風速により、角材、屋根葺瓦、屋根葺鋼板などの飛来物が発生し、被害が拡大する事例も数多い。

これらの強風災害に対応するため、竜巻に関する基礎的な性質を明らかにする必要がある。しかし、竜巻は極めて局所的な気象擾乱であり、その風速を直接観測した事例が殆どない。竜巻の発生件数が極めて高い米国で、気象レーダーにより風速が観測された事例[3]が数例ある程度である。

以上の経緯から、本研究では、実験室内に竜巻状の旋回流を作成し、その流れ場の基本的な性質を明らかにすることを目的とする。

2. 既往の研究

竜巻の風速を実測することは極めて困難であるため、実験室において竜巻状旋回流を作成し、その性質を調べる実験が行われてきた。Ward は、竜巻を形成するメソサイクロンの wall cloud 以下の地上付近の渦運動が主として運動学的な要因に支配されており、熱的要因の影響が少ないことを考慮して、この部分をシミュレートする装置を開発した[4]。

実験装置の概要を図 1 に示す。高さ h の収束層に外部から流入する空気が中央上部の半径 R の上昇流穴から吸い上げられる構造である。収束層内の気流が竜巻状の旋回流を形成するには、外部から循環を与える必要がある。循環の与え方には大きく分けて 2 種類がある。（１）収束層に流入する部分に接線方向の運動量を与えるもの[4-7]、（２）上昇流部分に回転成分を与えるもの[8]、である。（１）の接線方向の運動量の与え方には、ガイドバーンによるもの[4]、回転するスクリーンによるもの[5]、ファンにより接線方向の運動量を与えるもの[6]、小さい穴を開けたパイプからジェットを噴出するもの[7]、がある。

Church らは、Word 型実験装置を改良し、さらに多様な複合渦の実験を行った[9]。そこでは、スワー

^{*1} 東京工芸大学工学部建築学科助教授 ^{*2} 東京工芸大学工学部建築学科教授
2005 年 9 月 24 日 受理

ル比やレイノルズ数により渦の構造がどのように変化するかを明らかにした。文字は 1983 年に接線成分を作り出す機構として送風機を用い、大きな渦核を形成させることを可能とした[6]。さらに 1985 年文字はガイドベーンにより循環を与える装置により複数セルを発生させることに成功している[10]。

3. 竜巻のモデルとパラメータ

前述したように、地上付近での竜巻状流れ場では、収束層の高さ、上昇流穴半径、収束層への流入角度等が特徴的な有次元量である。これらのパラメータは自然界の竜巻では、表 1 に示される値を示すと見積られている[9]。これらの有次元量から導かれる無次元量としては、上昇流半径と収束層高さの比、レイノルズ数、スワール比が考えられる。

過去の竜巻状旋回流を扱った文献では、レイノルズ数を

$$Re = Q/\nu \quad (1)$$

と定義している。ここに、 Q は渦に向かって周囲から流入する流れの層単位長さあたりの流量、 ν は流体の動粘性係数（空気の場合 20℃で $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ）である。本実験では、自然界のレイノルズ数に比較しかなり小さい値となっているが、過去の研究によれば竜巻状流れ場に与えるレイノルズ数の影響は小さいことが調べられている[11]。

旋回流の状態については、スワール比 S との関係で、整理されることが多い。スワール比 S とは、発生する渦の強さに大きく関係する無次元数で、次式により定義される。

$$S = \frac{R}{2h} \tan \theta \quad (2)$$

ここに、 R は上昇流穴半径、 h は収束層の高さ、角度 θ はガイドベーンの角度で決まる空気の流入角である。文献[12]によれば、流れ場の形状はレイノルズ数には依存せず、スワール比が主要な無次元量である。本実験で再現されるスワール比は自然界で見られる値の範囲に含まれている。

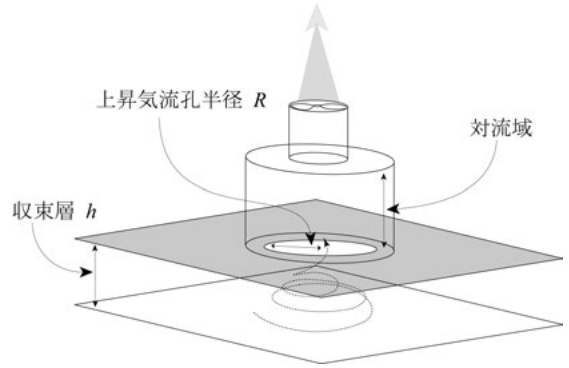


図 1 Tornado シミュレータの概要

表 1 竜巻の実現象と実験における諸量の比較

パラメータ		大気中の値[9]	本実験
物理量	上昇流穴半径 R	1～3 km	0.15 m
	収束層高さ h	0.5～2 km	0.2 m
	流量 Q	$10^8 \sim 10^9 \text{ m}^3/\text{s}$	$1.4 \text{ m}^3/\text{s}$
	循環 Γ	$2.5 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$	0.25 $\sim 3.8 \text{ m}^2/\text{s}$
無次元量	アスペクト比 h/R	0.2～ 1	1.3
	スワール比 S	0.05～ 2	0.07～ 1.0
	レイノルズ数 Re	$10^9 \sim 10^{11}$	9.4×10^4

4. 実験の概要

4.1 実験装置

製作した実験装置の概略を図 2 に示す。装置は基本的に収束層、対流域の 2 つの部分から成り立っている。対流域の上端部において可変速ファンを用いて上昇流を発生させると、装置内には収束層（高さ h ）の周辺から空気が流入し、その上端の上昇流穴（半径 R ）を通して排出される。流入した空気は収束層に設置されたガイドベーンによって流入角 θ を与えられ、層の中央部で渦度の集中を起こし、渦を形成する。様々な竜巻を形成させるためにガイドベーン角度 θ を可変とし、収束層の高さ $h = 200 \text{ mm}$ と上昇流穴 $R = 150 \text{ mm}$ は固定とした。また収束層底部は

可視化実験、風速測定実験それぞれに対応させるため取り外しが可能である。

4.2 計測方法

本研究では、流れ場の形態の変化を可視化実験により明らかにし、特徴的な形態について流速を計測する実験を行う。

可視化実験では、装置底部からミスト(水)を供給し装置内部に形成される旋回流の形状を可視化する。風速測定実験では、収束層周辺よりミストを供給し、レーザードップラー流速計(LDV)により流速を測定した。測定する流速の成分は、回転中心が装置の中心と一致すると仮定した場合の、水平面内の接線方向成分である。

測定範囲、測定位置を図3に示す。鉛直方向は、収束層底部より0 mm から+20 mm 間は5 mm ピッチ、+20 mm から+50 mm 間は10 mm ピッチとする。水平方向は、予備実験結果から竜巻の中心は±0 mm 付近にあることがわかっているため、測定範囲を-20 mm から+120 mm までとし、-20 mm から+50 mm 間は5 mm ピッチ、それ以外は10 mm ピッチとした。計測時間は原則として12秒間とし、平均化に用いる seeding particle 数は100とした。

レーザードップラー流速計は、流体中に含まれる微粒子からの散乱光によるドップラー効果を利用して光学的に流体速度を測定する装置である。レーザースourceから出射されたレーザービームをビームスプリッターで等しい強度をもつ平行な2本のビームに分離し、収束レンズで交差させ、測定点とする。測定点を通過した粒子によりドップラシフトを受けた各々の散乱光の光ビート(ヘテロダイン)から、変化量(シフト量)を取り出す。このシフト量は、光電変換器によって電気信号に変換しその周波数を求め、次式により流速 V (トレーサ粒子速度) に変換する事ができる。

$$V = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} f_d \quad (3)$$

ここで、ドップラー周波数を f_d 、レーザ波長を λ 、収束レンズの交差角度を θ とする。

本実験で用いた LDV では予めレーザービームの片方の周波数をシフトさせることにより、逆流の計測を可能なものとしている。

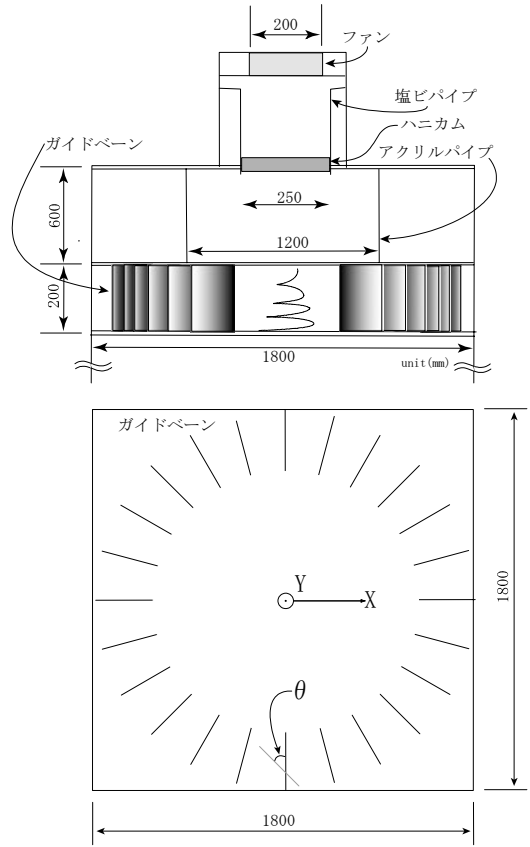


図2 竜巻状流れ場を再現する実験装置

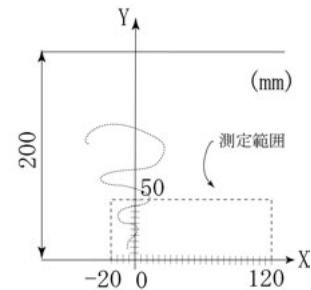


図3 流速の計測範囲

(鉛直断面、X=0 は装置中心を表わす。)

4.3 実験ケース

表2に実験ケースを示す。ガイドベーンにより周辺流入角を与えることにより、スワール比で0.07～1.0の範囲の竜巻状旋回流の形態を明らかにする。

また、スワール比0.14、0.65のケースについて流速計測を実施し、床面粗度による流速分布の違いを

調べる。その際、粗度は一辺が 5 mm の立方体を収束層底部に配置することで与える。収束層底部に何も置かない状態すなわち粗度の平面密度 0%, 平面密度 4%, 平面密度 25%の 3 ケースについて実験を行う。平面密度 4%, 25%の状態を図 4 に示す。

5. 実験結果と考察

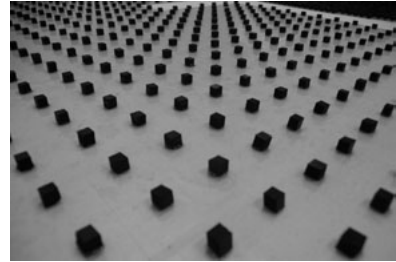
5.1 可視化実験

図 5(a)-(g)に可視化画像を示す。ガイドベーン角度 10 度は床面付近では明確なコアが形成されていない。上昇流穴付近で渦の形成がみられる。20 度から 40 度では、渦は床面から形成されており層流渦である。ガイドベーン 50 度では、渦上部から breakdown が始まる。60 度では breakdown が渦全体に及び乱流化する。ガイドベーン 70 度では乱流化した渦のコアが拡大する。

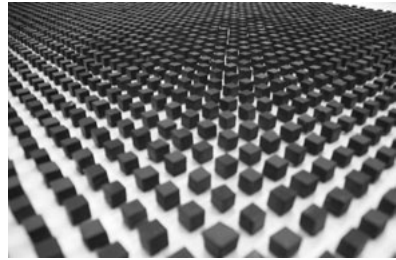
スワール比と渦の形態の関係を Church の実験結果[9], 文字の実験結果[10]と比較し, 図 6 に示した。Church はレイノルズ数の変化の影響も示しているが, ここでは, 本実験と同程度の $Re=10^5$ の結果を比較した。文字の実験結果はレイノルズ数が小さいが, あえて比較のため併記した。スワール比 0.3 を超えると層流から乱流渦に変化する。この遷移するスワール比は, 本実験結果と Church の結果は対応している。一方, 文字の結果ではやや小さいスワール比 0.2 程度から乱流化している。複数セルの渦に変化するスワール比は Church の結果では, 0.6 程度から, 文字の結果では 0.5 程度となっているが, 本実験では, この範囲のスワール比において渦のコアが拡大した様子が認められたのみで, 明確な複数セルの構成を確認することはできなかった。

表 2 実験ケース

流入角 θ (deg.)	スワール比 S	可視化	風速測定
10	0.07	○	
20	0.14	○	○
30	0.22	○	
40	0.31	○	
50	0.45	○	
60	0.65	○	○
70	1.0	○	



(a) 平面密度 4%



(b) 平面密度 25%

図 4 床面粗度の状態



(a) 可視化画像 $\theta=10^\circ$ $S=0.07$



(b) 可視化画像 $\theta=20^\circ$ $S=0.14$

図 5 竜巻状流れ場の可視化画像

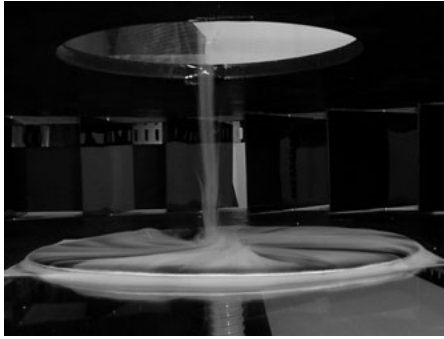
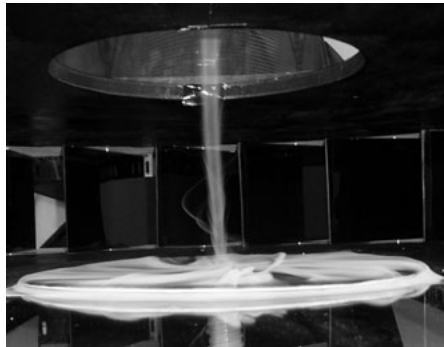
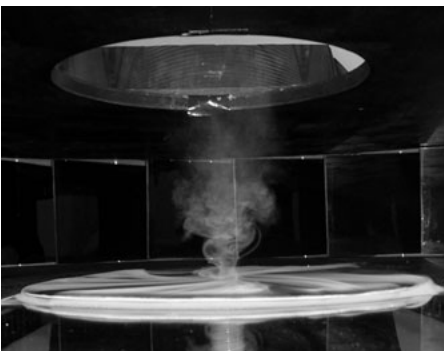
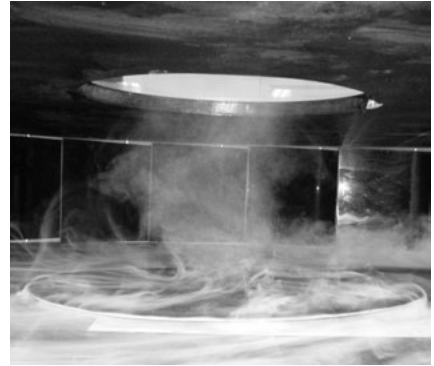
(c) 可視化画像 $\theta=30^\circ$ $S=0.22$ (d) 可視化画像 $\theta=40^\circ$ $S=0.31$ (e) 可視化画像 $\theta=50^\circ$ $S=0.45$ (f) 可視化画像 $\theta=60^\circ$ $S=0.65$ (g) 可視化画像 $\theta=70^\circ$ $S=1.0$

図5 竜巻状流れ場の可視化画像 (続き)

Swirl ratio	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Vortex type						
Church1979 $Re=10^5$	laminar		turbulent		2 cell	
Monji1985 $Re=3 \times 10^4$	laminar		turbulent		2 subsidiary vortices	
present study $Re=9 \times 10^4$	● ● ● ●		○ ○		expanded core	
					3 sub.	

図6 スワール比と渦形状の関係

(Church および Monji の実験と本実験結果の比較)

5.2 風速測定実験

図7にスワール比0.14, 図8にスワール比0.65の場合の風速の分布を示す。測定位置Xは、装置の中心からの距離を表わしている。風速は水平面内で中心からの半径に直交する接線成分である。スワール比0.14では、周辺から流入する気流に与えられた回転成分が小さいことが影響して、スワール比0.65に比べ全体的に風速が小さくなっている。また、装置は軸対象であるので、 $X=0$ を中心とした線対象な風速分布が期待されるが10mm程度の中心位置のずれ、若干の非対称性が見られる。

図7(a)-(c)では、スワール比0.14で、床面粗度を平面密度で0%, 4%, 25%と変化させた結果を示している。可視化画像からも分かるようにスワール比

0.14, 面積密度 0%では, 渦のコアが小さいため, 風速の大きな領域が中心に近い位置で発生している。粗度の面積密度が 4%になると, 風速の大きな範囲は中心から離れた位置に移っている。これは, 粗度が生成する乱流成分により渦のコア半径が拡大したものと考えられる。平面密度を 25%にすると渦半径は平面密度 4%場合に比べ若干大きくなり, 風速の大きな範囲が床面から離れた高い位置に移っている。

図 8(a)-(c)では, スワール比 0.65 で, 床面粗度を面積密度で 0%, 4%, 25%と変化させた結果を示している。いずれのケースも最大風速発生範囲が中心から同程度の距離であり, スワール比が大きく渦が **breakdown** した状態では, 粗度の変化によりコア半径が大きく変化しないようである。また, 粗度の影響は, 最大風速発生位置が床面から離れた高い位置に移動することに現れている。

文字らが行った実験[12]では, 渦の直径がスワール比の増加と共に大きくなり, 粗度の小さい場合の方がその傾向が顕著であること, 大きなスワール比では粗度の影響が小さくなる事が示されているが, 本実験結果も同様の傾向を示していることが確認された。

6. まとめ

本研究では, 建築物に大きな被害をもたらす気象擾乱について, 大気中に発生する竜巻を対象に, その流れ場を実験室内に再現することを試みた。

再現された竜巻状流れ場に対する可視化実験では, 流れ場の特徴に大きな影響を与えるスワール比を変化させて, 竜巻状流れ場とスワール比の関係を調べ, スワール比が増加すると共に, 層流渦から渦崩壊が始まり, 乱流渦に移行すること, 更に大きなスワール比では渦のコア半径が大きくなる様子が明らかとなった。

風速測定実験ではレーザードップラー流速計を用いて, 平面密度 0%, 4%, 25%の床面粗度の状態に対して, 水平面で中心からの半径に直交する接線成分の計測を行いその値の分布を調べた。その結果, 渦の直径がスワール比の増加と共に大きくなり, 粗度の小さい場合の方がその傾向が顕著であること, 大きなスワール比では粗度の影響が小さくなる

事が明らかとなった。

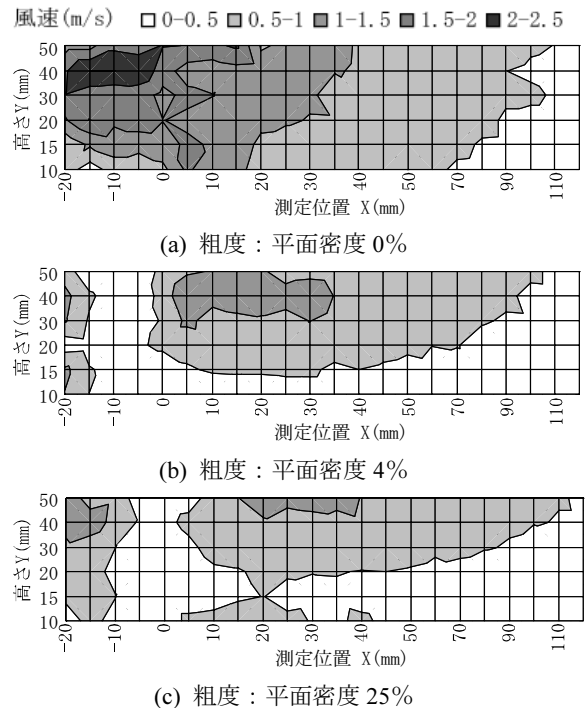


図 7 接線方向風速分布 ($\theta=20^\circ$, $S=0.14$)

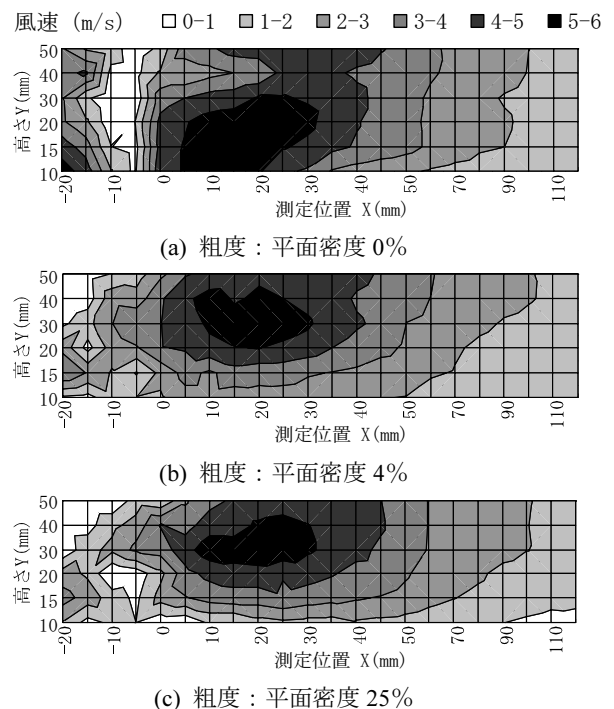


図 8 接線方向風速分布 ($\theta=60^\circ$, $S=0.65$)

謝辞

本研究を進めるにあたり、アイオワ州立大学 Partha Sarkar 教授から貴重な意見を頂いた。ここに、記して謝意を示す。本研究の一部は、平成 15 年度卒業研究として坂上佳寛君、鈴木英明君、平成 16 年度卒業研究として石原誠太郎君、大島純一君、喜瀬雅也君が実施した結果を元に纏めたものである。また、資料収集に際して、胥森君の協力を得た。記して謝意を表わす。本研究は、文部科学省 21 世紀 COE プログラムの助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) 建築物荷重指針・同解説 2004, 日本建築学会, 2004
- 2) 田村幸雄, 松井正井, 吉田昭仁, 小原久典, 2002 年 10 月の台風 0221 号および 10 月 7 日に発生した突風による風災害調査, 東京工芸大学工学部紀要, Vol.26, No.1, 148-159, 2003
- 3) Bluestein, H. B. and J. H. Golden, A review of tornado observations, The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones (Eds), Washington, D.C., Amer. Geoph. Union, Geophysical Mono. 79: 319-352, 1993
- 4) Ward, N. B., The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 29, 1194-1204, 1972
- 5) Church, C. R., T. Snow and E. M. Agee, Tornado vortex simulation at Purdue University, Bulletin American Meteorological Society, Vol. 58, No. 9, 900-908, 1977
- 6) 文字信貴, 光田寧, 竜巻実験装置を用いた 1 セル及び 2 セル渦の研究, 京都大学防災研究所年報, 第 26 号, B-1, 393-401, 1983
- 7) Fouts, J. L., D. L. James and C. W. Letchford, Pressure distribution on cubical model in tornado-like flow, Proceedings for the 12th International Conference on Wind Engineering, Lubbock, Texas, 2002
- 8) Wan, C. A. and C. C. Chang, 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, 1972
- 9) Church, C. R., T. Snow and E. M. Agee, Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: Laboratory investigation, Journal of the Atmospheric Science, Vol. 36, 1755-1776, 1979
- 10) 文字信貴, 光田寧, 竜巻渦など小規模渦中に発生する副次渦の実験, 京都大学防災研究所年報, 第 28 号, B-1, 427-436, 1985
- 11) Mitsuta, Y. and N. Monji, Development of a laboratory simulator for small scale atmospheric vortices, Natural Disaster Science, Vol. 6, 43-54, 1984
- 12) 文字信貴, 王允寛, 光田寧, 大気中の小規模な渦に及ぼす地表面粗度の影響に関する実験, 京都大学防災研究所年報, 第 31 号, B-1, 177-182, 1988