

# 竜巻実験装置を用いた 1 セル及び 2 セル渦の研究

文字 信貴・光田 寧

## A LABORATORY EXPERIMENT ON THE ONE- AND TWO-CELL STRUCTURE IN TORNADO-LIKE VORTICES

By *Nobutaka MONJI* and *Yasushi MITSUTA*

### Synopsis

A laboratory vortex simulator was developed to investigate the characteristics of the small scale atmospheric vortices. The structure of the one- and two-cell vortices is studied based on the flow visualization and the three dimensional hot-wire velocity measurements. The vortex core diameter is found to increase as a unique function of the swirl ratio. The transition of a vortex from one-cell to two-cell structure occurs throughout the whole convergence layer within considerably small swirl ratio range near unity. The maximum horizontal velocity appears close to the ground surface. The height of the maximum velocity seems to be insensitive to the swirl ratio.

### 1. はじめに

竜巻は突発的に発生し、強暴であり、寿命が短かく、水平スケールが小さいなどの理由から自然界のものを実測する事が困難である。従って、竜巻の発生機構や竜巻渦の構造などの研究は室内実験や数値実験に頼らざるを得ない。実験室内に竜巻状の渦を作り出し、それを流れの可視化や風速測定によって研究する試みは種々の目的から様々な装置を開発する事によって行われて来た。その目的は大きく分けて2つ、すなわち、なるべく自然界のメソサイクロンに近い状態を作り出し、自然界で発生する様々な竜巻渦を作り出そうとするものと、もう1つは渦の流れと構造物や地表面との相互作用を研究する目的のものがある。いずれの場合においてもシミュレートされた渦が自然界の竜巻渦と比較して適当なものであるかどうかの考察を行わねばならないが、自然界の竜巻に関する直接的な測定はあまりにも限られているために、比較も一部の現象にとどまり、大部分は視覚的な比較に依らざるを得ない。しかしながら現在までに様々な実験装置内で得られて来た測定結果の多くは数少ない観測結果と比較的良好な相似を示し<sup>1)</sup>、視覚的にも現実のものと同様の渦の形態が流れの可視化により得られている。従って、実験室内で竜巻状渦を作り出してその測定を行う研究は、竜巻渦を理解する上で大きく役立つものと考えられる。

これまでに数多くの室内実験が行われて来たにもかかわらず、まだ多くの未解明な問題が残されている。それは、流入流の与え方などに関してメソサイクロンの知識が不十分であった事が主な理由である。現時点でもそれらは解決されたとは言いが、最近のドップラーレーダーの発達で積乱雲の構造が明らかになりつつあり、どの様な条件を室内実験で与えるべきかという点についての知識は急速に整いつつある。それらの知識を活用して最も自然の状態と相似した状態を作り出していると考えられるのが Ward<sup>2)</sup> の実験装置であり、それを改良したのが Purdue 大学の装置<sup>3)</sup> である。これらの装置を用いて活発な研究が行われているが、風速の3次元的な測定や、渦の境界層、乱れの研究などは行っていないのが現状である。

この研究で開発した装置も Ward 型に形状は類似しているが、回転を送風器によって与える事で大きな渦核を作り出し、流れと測定感部との相互作用を小さくした測定が可能となった。そのため渦核の細部まで測定を行う事ができる。特に、全域が上昇流である1セル型渦から、中心部に下降流域を持つ2セル型渦へ

の遷移の状態や、1セル、2セル渦の3次元的な風速分布の測定を行って渦の構造についての詳細な結果を得る事ができた。

## 2. 実験装置と測定法

この研究で開発した竜巻実験装置の外観を **Photo. 1** に、その構造の概略を **Fig. 1** に示す。装置は基本的には3つの部分、(1) 環流路、(2) 収束槽、(3) 対流槽から成り立っている。対流槽の上端部において送風器を用いて空気を排出して上昇流を発生させ、装置内には環流路の上端から空気が流入する様になっている。流入した空気が環流路内に設置された4個の小型送風器によって接線風速成分を得た後収束槽に入ってその中央部で渦度の集中を起し、渦核を形成することになる。装置全体の直径は3.0 m であり、そのうち収束槽の直径は2.0 m、環流路の幅は0.5 m である。収束槽の上端は直径1.2 m の開口部で対流槽と接している。対流槽の直径は2.0 m で高さは0.8 m、その上端は直径1.0 m の開口部となっており、整流用ハニカムを通して頂部の送風器とつながっている。Ward 型が接線成分を作り出す機構として回転スクリーン<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>を用いているのに対し、この装置では送風器を用いており、大きな回転、従って大きな渦核を形成させる事ができ、渦核の構造の詳細な測定が可能であるのに加えて、乱れの大きな渦を作る事ができるため、渦中の乱れの役割の研究が可能であるという特徴を有している。

頂部の送風器の流量は $0.016 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  の間で可変であるが、これは収束槽頂部の直径 ( $D$ 、この実験では1.2 m に固定) の開口部において $0.014 \sim 1.04 \text{ m/s}$  の範囲の流速 (断面内平均、 $W_0$  と記す) に相当する。 $D$  と  $W_0$  を用いて定義した Reynolds 数 ( $Re$ ) の範囲は $1.1 \times 10^3 \sim 8.3 \times 10^4$  である。環流用の送風器は環流路内の中央部で約 $0 \sim 0.85 \text{ m/s}$  の軌道を風速を発生させる。これらの送風器の組合わせによって、収束槽内の  $r$  (中心からの距離) = 68 cm の位置での swirl 比 ( $S$ ) は $0 \sim 50$  以上の範囲で変化させる事ができるが、充分な  $S$  の精度が得られるのは $0.1 \sim 10$  の範囲内である。なお、ここで swirl 比は  $S = \tan \theta / 2a$  と定義する。ここで  $\theta$  は半径方向から測った流れの流入角、 $a$  はアスペクト比で、収束槽の高さ ( $l$ 、この実験では50 cm に固定) を収束槽頂部開口半径 ( $R$ 、ここでは60 cm) で割ったものである。

収束槽の底部は取りはずしが可能であり、地面板の交換や構造物の模型の出し入れが可能である。ただし、ここで示す結果は空気力学的に滑らかな平板を用いたものである。

風速の測定は地面板の裏面に、上下及び半径方向に移動する様に取付けた移動装置を用いて熱線風速計 (日本科学工業 Model 1011) のプローブを移動させる事によって行った。用いたプローブは直径5  $\mu\text{m}$ 、長さ3 mm のタングステン線であるが、これを2種類の支持部に取付けた。1つの支持部は鉛直軸のまわりに回転するもので、熱線を流れる電流が最大となる角度を求めて水平面内の風向を測定し、もう1つは水平軸のまわりに回転するもので、風向に直角に熱線が向く様に調節して風の傾角及び風速の大きさを測

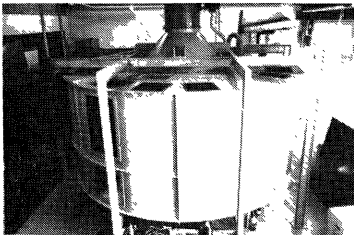


Photo. 1 Tornado vortex simulator at Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

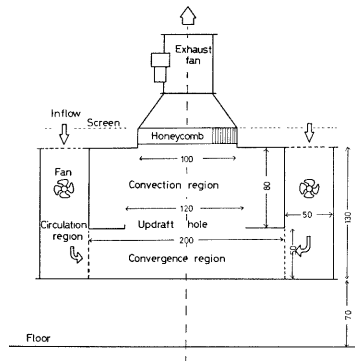


Fig. 1 Outline of the tornado vortex simulator (unit in cm).

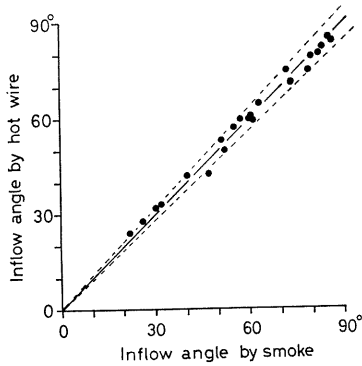


Fig. 2 Comparison between the inflow angles measured by the hot wire anemometer and the smoke trajectories. Dashed lines indicate the limit of  $\pm 5\%$  error.

定するものである。いずれも地面板の裏面から操作し、最大値が得られる角度を求めた。熱線風速計を用いて求めた流入角と煙によって求めた流入角の比較を行ったものをFig. 2に示す。両者のばらつきは $\pm 5^\circ$ 以内であり、熱線風速計による風向測定法は $5^\circ$ 程度の精度を有していると考えられる。なお、風速分布の測定に際しては、熱線風速計の角度は $5^\circ$ ずつ変化させて出力を記録し、その最大値の方向を風向とした。

圧力分布の測定は底面において行ったが、直径5cm、厚さ1mmの円板の中央に直径4mmの穴を開け、ビニールチューブでマンメータに導いて測定した。圧力分布を求めるにはその円板を半径方向に移動させた。

流れの可視化は潤滑油を加熱して煙を発生させる装置(TEM社製システムE)を用いて行った。煙はチューブを通して装置裏面中央部へ導き、収束槽底部に置いた直径38cmの円板の周辺から収束槽へ放出し、写真撮影を行った。

### 3. 渦の形態

この研究で用いた実験装置は直径の大きな渦の構造の解明を目的としているため、小さな直径の渦については渦の位置が不規則に変化して不安定であるが、swirl比が0.7以上の大きな渦に関しては安定した渦が形成される。種々の直径の渦を可視化したものをPhoto. 2に示す。Photo. 2の(a), (b)はそれぞれ $S=0.71$ 及び1.1の場合であり、全層乱れているが、全域が上昇流から成る1セル型の渦で

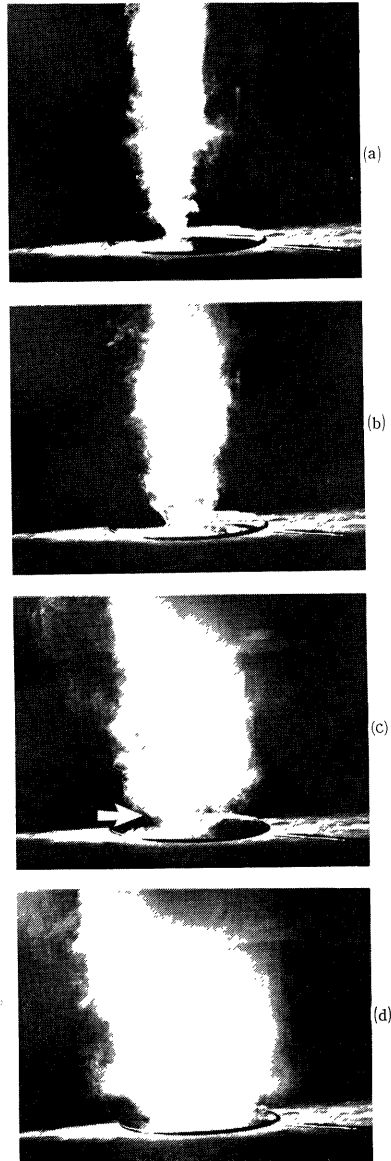


Photo. 2 Visualized vortices for  
(a) Case I, (b) Case II,  
(c) Case III and  
(d) Case IV.

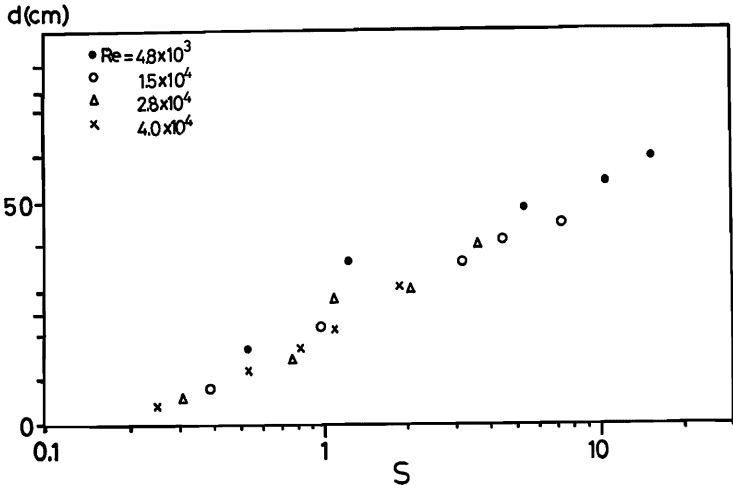


Fig. 3 Variation of the smoke filled core diameter with the swirl ratio.

ある。流入流が層流である様な実験では、1セル型は層流渦であり、 $S$ を大きくして渦崩壊 (vortex breakdown) が起ってから後の流れが乱流渦を形成する事が知られているが<sup>3)</sup>、この実験の様に流入流の乱れが大きい場合には1セル型でも乱流渦である。Photo. 2 の(c), (d) はそれぞれ  $S=2.1$  及び  $4.0$  の場合であり、写真では単に直径が大きくなった様に見えるだけであるが、煙の動きを観察すると渦の中央付近が下降流の2セル型の渦となっている事がわかる。これらの例では  $Re$  は全て  $2.8 \times 10^4$  に固定している。この様に、 $S$  が大きいほど渦の直径は大きくなる事がわかるが、その変化を種々の  $Re$  について求めたものが Fig. 3 である。直径は高さによっても変化するが、この測定では  $z=20$  cm の高さにおける直径が示してある。これからも明らかな様に、渦の直径は、ほぼ  $S$  の一意的な関数であり、 $Re$  にはほとんど無関係である。そこで、以下では主に  $S$  を変化させて渦の性質がどの様に変化するかを調べる測定を行った。

#### 4. 竜巻状渦の風速分布

この章で述べる例は主に  $Re$  を固定させて、 $S$  を  $0.71, 1.1, 2.1, 4.0$  と変化させた4つの場合について測定したものであるが、地表面近くの測定については  $S$  を固定させて  $Re$  を4種類に変化させる場合も加えた。Table 1 に測定条件を示す。表中のローマ数字は以下の本文中で使用する場合の名称である。

##### 4.1 水平風速

風速の接線成分 ( $w$ ) の半径方向の分布は、Fig. 4 に例を示す様に Rankine 渦 (最大風速半径  $r_m$  より外側では  $w \propto r^{-1}$ 、内側では  $w \propto r$ ) に近い形状をしている。ここに示したのは Case III の場合で、比較的渦核の直径が大きい例であり、渦核内部の風速分布の測定が容易であるが、 $S$  が小さい場合には渦核が小さく、渦の中心と装置の中心が  $1, 2$  cm ずれる事があるので渦核内部で平滑化された様な分布となる時がある。接

Table 1 Condition for the experiment

Case	I	II	III	IV	V	VI	VII
$Re$	$2.8 \times 10^4$	$2.8 \times 10^4$	$2.8 \times 10^4$	$2.8 \times 10^4$	$4.8 \times 10^3$	$1.5 \times 10^4$	$4.0 \times 10^4$
$S$	0.71	1.1	2.1	4.0	2.1	2.1	2.1

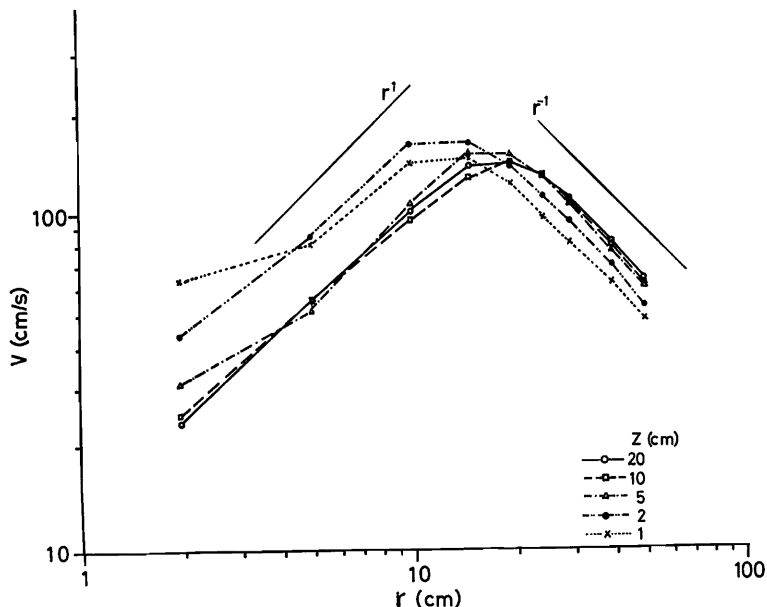


Fig. 4 Radial distribution of the tangential wind velocity for Case III.

線風速成分の鉛直分布の例 (Case III) を Fig. 5 に示す。  $r=40$  cm 程度以上の外周部では直線流の境界層に見られる対数分布に近い分布を示しているが、中心に近づくに従ってその形が変形し、下層にピークが現れるようになる。渦全体の風速の最大値は高さが数 cm のところに現れている。Case I, II, III, IV について鉛直面内の接線風速分布を示したのが Fig. 6 である。この図からわかる様に最大風速半径は  $S$  とともに増加して行く事は、渦核の可視化による測定 (Fig. 3) によって求められたとおりであるが、最大風速の現れる高さは  $S$  によってほとんど変化しない事がわかる。

地表面付近における水平風速の鉛直分布を詳しく調べた結果を Fig. 7 に示す。地面近くでは最大風速半径は高さとともに急速に増大し、(Fig. 7 (a), (c))、また  $S$  とともに増加するが、 $Re$  を変化させてもほとんど渦の形が変化しないことはこの図(c)からも明らかである。一方、最大風速は Fig. 7 (b), (d) に示す様に  $S$  と  $Re$  の両方の関数であるが、接線風速成分についても述べた様に、最大風速の現れる高さは  $S$  によってほとんど変化しない。可視化された渦の形状と、測定結果を比較してみると、この最大風速の現れる位置は、Photo. 2 (c) の中に矢印で示した様に、収束して来た流れが最も絞られる箇所付近、すなわち、流れが一度平衡点を越えて中心部へ近づいた後にすぐ上層で拡がる直前である事がわかる。なお、自然界の竜巻においても、例えば Dallas 竜巻 (1957年) の測定例<sup>4)</sup> にも認められる様に、竜巻渦全体の高さ (少くとも 500 m 以上) と比較して低い所 ( $Z \approx 70$  m) に風速の最大値が現れているが、この高さがどの様な条件で決定されるのかは明らかではない。

#### 4.2 鉛直風速

風速の鉛直成分 ( $w$ ) の分布は  $S$  と共に著しく変化する。 $S$  が小さい場合は上昇流は中心付近に集中しているが、 $S$  の増加と共に外側へ移動する (Fig. 8)。  $w$  の最大値の現れる位置は最大風速半径付近である。 $S$  が大きい場合は中心付近に下降流領域を持つ 2 セル型の渦が形成される。上昇流の最大値は最大水平風

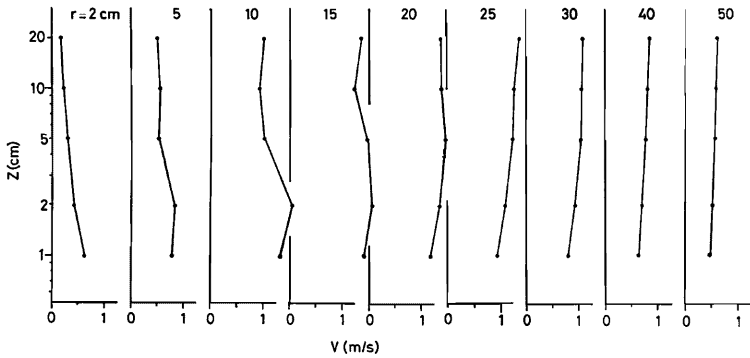


Fig. 5 Vertical distribution of the tangential wind velocity for Case III.

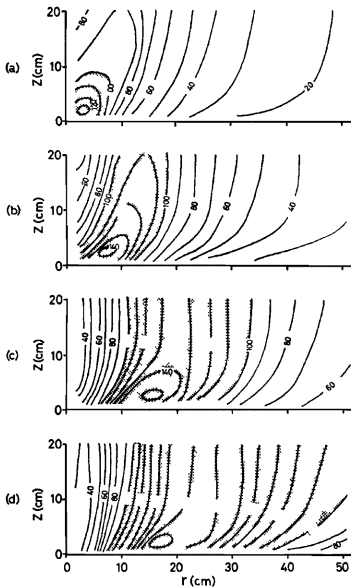


Fig. 6 Distribution of the tangential wind velocity (cm/s) in the r-z plane. (a) Case I, (b) Case II, (c) Case III, (d) Case IV.

速の1/2~1/3程度の大きな値を持つが、下降流の最大値は、そのさらに1/5程度以下である。S がさらに大きな条件下ではさらに大きな値を取る可能性はあるが、自然界の竜巻渦の鉛直風速の特性はこの実験で得られた範囲内のものに近い事が推定される。Fig. 9 に鉛直断面内の風速成分の分布をベクトル表示で示した。この図から、S が大きい場合には中心付近は下降流が外側に向きを変えて渦核外周部で上昇流に転じているが、下層においては地表面摩擦によってかなり中心近くまで半径成分の大きい流入流となっている様子がわかる。また半径成分も下層で最大であり、渦核への流入は比較的薄い層によって行われている事が明らかである。

### 5. 2セル型渦への遷移

層流渦の回転を増加させて行くと S のある値で渦崩壊が起り、それより下流側では乱流渦となる事が種々の渦実験によって確かめられている。その場合層流渦は1セル型であり、乱流渦は2セル型となっている場合が多い。しかしながら、渦に向かって流入する流れに乱れを与えると1セル型の渦でも乱流渦を作ることができる。Photo. 2 の(a), (b)は1セル渦であるが、乱れている点では(c), (d)の2セル渦と同じ様に見えており、外見上どの条件で2セル型に遷移するのか、層流渦から乱流渦への遷移の様な明確な区別がない。そこ

で、渦の中心部の鉛直風速の鉛直分布の S に対する変化の測定を行った。その結果を Fig. 10 に示す。S の増加とともに中心部の上昇流は減少をはじめ、S が1より少し大きくなったところで全層同時に下降流に転じる事がわかる。これについては、異った Re の値でもほぼ同じ結果が得られた。中心部の下降流速は S

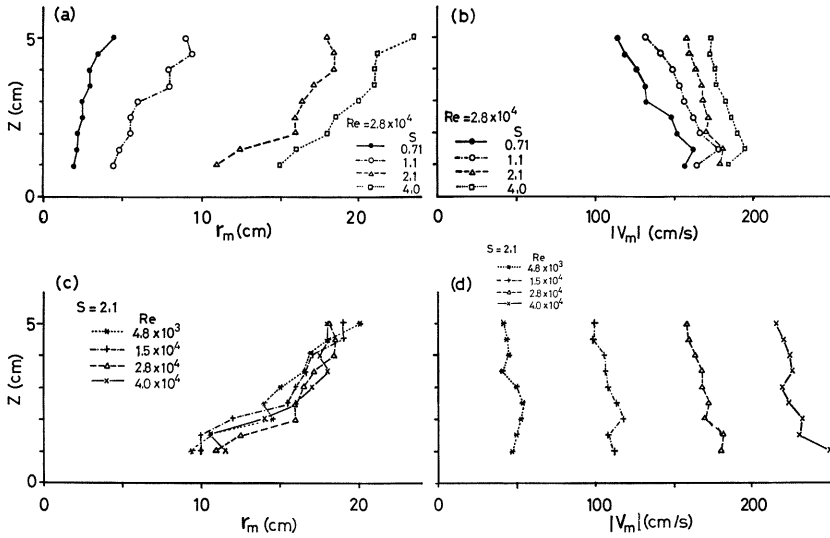


Fig. 7 Maximum wind velocity near the ground surface and its location. (a) and (b) for various  $S$ , (c) and (d) for various  $Re$ , (a) and (c) the radius of the maximum velocity, and (b) and (d) the maximum horizontal wind velocity.

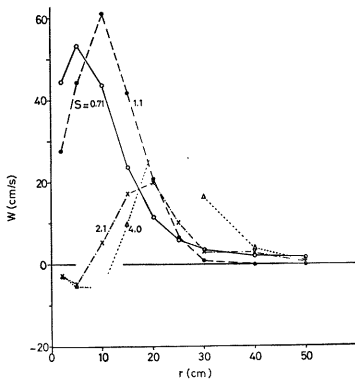


Fig. 8 Radial distribution of the vertical wind velocity at  $z=20$  cm for various swirl ratio.

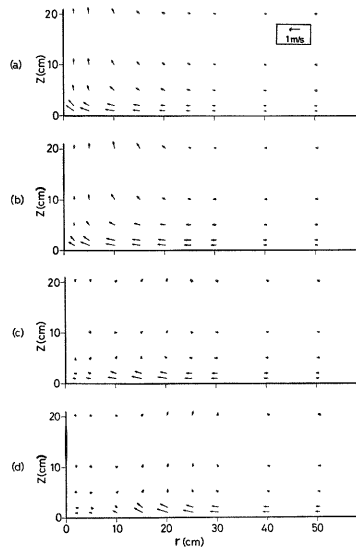


Fig. 9 Velocity vector projected on the  $r$ - $z$  plane for (a) Case I, (b) Case II, (c) Case III and (d) Case IV.

とともに増加するが  $S$  のある値 (1.5付近) からまた減少をはじめる。なお、 $S$  の大きい場合は上昇流も含めて鉛直成分全体が小さくなる傾向がある (Fig. 8 参照)。

### 6. 圧力分布

底面の圧力分布も  $S$  によって変化する。測定結果は Fig. 11 に示すとおり、 $S$  の小さい時は中心付近が最も圧力降下大きい分布となっているが、 $S$  の増加と共に中心付近の圧力勾配が減少し、 $S=4.0$  の場合は最低気圧が中心より数 cm 離れた位置に現れている。すなわち、中心部の下降流が地表面にまで達した結果、中心部が相対的にそのすぐ外部よりも気圧が大きくなる現象であると推定できる。

気圧勾配を用いて旋衡風を求めたものと接線風速成分の比較を行った例 (Case III) を Fig. 12 に示す。接線風速成分の分布は境界層上層部 ( $z=5$  cm 以上) では旋衡風速分布とほぼ一致するが、下層では両者に相異がある。すなわち、下層では測定風速が旋衡風速よりも小さな半径の所で旋衡風速より大きな最大値を持つ。それは地表面付近では、摩擦の影響で半径方向の運動量の移流が生じる事によるものと考えられる。

### 7. 考察と結論

この実験で得られた結果は、従来の室内実験の結果と比較して類似している点もあるが、幾つかの相異点がある。ここで比較の対象として適しているのは、最も数多くの成果を得ている Purdue 大学の研究グループの結果であるが、その装置は回転スクリーンによって流入して来る空気に接線風速成分を与える

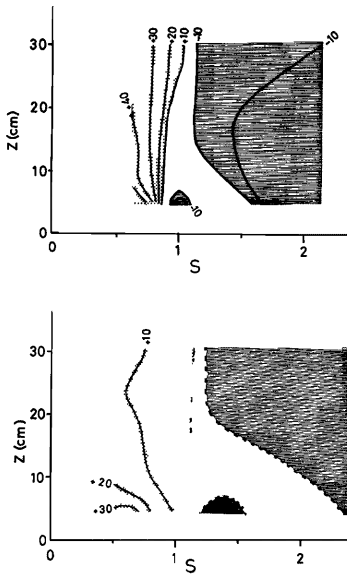


Fig. 10 Transition from one cell to two cell vortex. The shaded areas by dots indicate the updraft at the vortex axis and those by the horizontal bars the downdraft. The numbers in the figure indicate the axial velocity (cm/s).  
(a)  $Re=2.8 \times 10^4$ , (b)  $Re=1.0 \times 10^4$ .

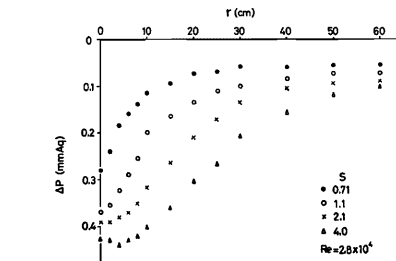


Fig. 11 Radial distribution of the surface pressure.

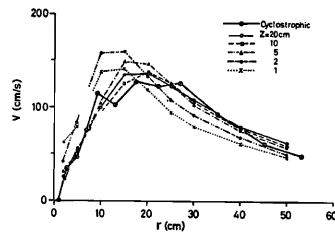


Fig. 12 Comparison of the cyclostrophic wind with the measured tangential winds for Case III.



型である<sup>3)</sup>。

同じ傾向を示す点としては、渦の直径が  $S$  の一意的な関数であり、ほとんど  $Re$  には依存しない事、 $S$  の増加と共に1セル型から2セル型へ遷移する事、風速の最大値が地面近くで得られる事、最大の圧力降下は  $S$  が大きい時は中心より外側で起る事などである。同じ傾向を示さない点としては、Purdue 大学の装置では  $S$  がある値になると複合渦 (multiple vortices) が形成されるが、この実験では形成されず、そのかわり、大きな渦核が形成される事、1セル型は前者では層流渦であり、明確な渦崩壊があった後に乱流渦が形成されるのに対し、この実験では1セル渦も乱流渦であって、明確な渦崩壊が認められない事、などである。この後者の原因は流入流の乱れにある事が考えられるが、複合渦に関しては、これまで開発された数多くの装置の中でも形成されるものとされないものがあり、その原因は明確ではない。定性的に同じ傾向を示すものとして上に述べたものでも詳しく比較すると相異が認められる。例えば、1セル渦から2セル渦への遷移は、この実験では  $S$  が1より大きい所で起っているが、Purdue 大学の実験では  $S$  が0.5以下で起っている事、また、中心の圧力降下量は、 $S$  と共に増加するが、Purdue 大学の実験では  $S$  の増加と共に減少する領域がある事などが異っている。

この様な両者の装置で作られる渦の相異については、その原因の究明を今後この装置を用いた室内実験の過程で行う予定である。

本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究 No. 00502017の補助による。

#### 参 考 文 献

- 1) 文字信貴：竜巻渦の室内実験，京都大学防災研究所年報，第25号 A，1982，pp. 27-45.
- 2) Ward, N. B.: The exploration of certain feature of tornado dynamics using a laboratory model, J. Atmos. Sci., Vol. 29, 1972, pp. 1194-1204.
- 3) Church, C. R., J. T. Snow, G. L. Baker and E. M. Agee: Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: A laboratory investigation, J. Atmos. Sci., Vol. 36, 1979, pp. 1755-1776.
- 4) Hoecker, W. H. Jr.: Wind speed and air flow patterns in the Dallas tornado of April 2, 1957, Mon. Weath. Rev., Vol. 88, 1960, pp. 167-180.