

竜巻渦など小規模渦中に発生する副次渦の実験

文 字 信 貴・光 田 寧

A LABORATORY EXPERIMENT ON THE MULTIPLE STRUCTURE IN TORNADO-LIKE VORTICES

By Nobutaka MONJI and Yasushi MITSUTA

Synopsis

The structure of the multiple vortices formed in tornado vortices is studied by a laboratory experiment. The number of the subsidiary vortices increases with the swirl ratio. The wind field of the multiple vortices with three subsidiary vortices is examined closely with an improved smoke-wire and a two component hot-wire anemometer. The core size, the maximum velocity and other properties of the subsidiary vortices are measured by the smoke-wire. The mean and the fluctuations of the velocity field is measured by the hot-wire anemometers. The spectral analysis of the velocity fluctuations indicates a predominant peak at the frequency associated with the subsidiary vortices in most of the field except for the layer near the ground. The ratio of the translation velocity of the subsidiary vortex to the mean field is about 0.9 in the upper layers, but decreases down to about 0.7 near the ground.

1. は じ め に

竜巻、塵旋風などの小規模な渦や、メソ低気圧などの中規模な渦は複数の副次的な渦を含む構造（複合渦, multiple vortices）となっている場合がある事が、現象の写真あるいは、被害の痕跡などから明らかとなっている。Fujita¹⁾²⁾ は、竜巻の被害がトロコイド状をしている事から複合渦構造を提案し、個々の副次渦を“吸上渦, suction vortex”と呼んだ。更に Fujita 他³⁾ は、この副次渦が実際に吸上渦となっている事を1971年の大宮市の竜巻を詳細に調べる事によって実証した。竜巻がこの複合渦の形態をしている場合には、副次渦の通過に伴って急激な風向風速や気圧の変化を伴って被害を大きくし、更に副次渦がトロコイド状に移動する事によって広い範囲に被害を与える。Fujita¹⁾ の調査によれば、1970年テキサス州のラボック市を襲った竜巻は28人の死者を出したが、そのうち27人までが副次渦の通過痕跡上に分布していた。更に Clare によれば (Snow, 1978 参照⁴⁾), 1974年4月の3日、4日に観測した23の竜巻のうち複合渦は17個であったが、そのうち複合渦でないものが Fujita スケール³⁾ で F2~F3 の強さであったのに対して、複合渦の形態を有したものは F3~F5 の強さを持ち、より大きな被害を発生させるものである事を確かめた。

より小さなスケールの渦である塵旋風もしばしば複合渦の形態を示し、大きく広がった渦核は数個の小渦に分裂する現象が認められる⁵⁾。一方、メソスケールの渦、例えばメソ低気圧の中でも、複合渦は複数の竜巻として現れ、一つの回転の中心を数個の竜巻が互いの周りを回転しながら通って行った事が痕跡から判断される例が報告されている⁶⁾。

更に大きなスケールである台風の渦にも非対称が生じる事が認められる。それらは台風眼の楕円形⁷⁾ や多角形⁸⁾ としてレーダーで観測されることによって認められる。但し、これらの異なるスケールの中に発生する現象がすべて同一の機構によるものかどうかは明らかではない。

複合渦現象の最初のシミュレーションは Ward⁹⁾ によって室内実験によってなされた。Ward は二つの槽、

すなわち収束槽とその上の対流槽から成る実験装置を開発し、上昇流は装置頂部の送風機で、流入流に与える回転は、回転スクリーンを用いる事によって、複合渦をはじめ種々の竜巻渦を形成させる事に成功した。その後 Church 等¹⁰⁾¹¹⁾は、同様の原理の装置を改良拡大し、複合渦の形成条件を求め、更に多様な複合渦の実験を行った。これらの実験はすべて可視化に重点が置かれたものであり、これまでのところ、複合渦の構造、特に副次渦の風速分布などについての測定結果は得られていない。

力学的不安定の理論的な研究も行われつつある。円筒状渦の線型理論については Snow¹²⁾ や Staley-Gall¹³⁾ の研究があり、接線風速分布における半径方向のシアの与え方に依っては、周期的な変動が発生する事が確かめられている。石川・光田¹³⁾は、この理論を竜巻から台風の中の非対称の説明にまで拡大適用を試みた。これらの研究は、複合渦現象の発生が2次元の線型理論を用いてある程度まで説明できる事を示した。また最近、Rotunno¹⁴⁾は3次元の数値シミュレーションにおいて、複合渦を作り出す事に成功している。但し、非常に低いレイノルズ数の実験の結果が、乱れを含んだ現実の現象にどの程度適用できるかは疑問である。

今回行った研究の目的は、複合渦の構造を室内実験の測定によって明らかにしようとするものである。用いた実験装置はガイドベーン型であり、流入流に接線成分を与えるのにガイドベーン(案内羽根)を用いている。過去におけるこの型の装置による実験では、複合渦は形成されず、大きな渦核が形成されるだけであるという結果になっている¹⁵⁾が、今回の実験ではガイドベーン型でも渦の分裂が起って複合渦が生じる事を確認し、更にその発生条件を求めた。また複合渦のある特定の条件を選び、その構造、即ち風速分布、発生位置、大きさ等を調べ、更に、主渦との相互作用、即ち、主渦中の副次渦の移動などについて検討を行った。

2. 実験装置と測定法

用いた装置の概略図を Fig. 1 に示す。この装置は以前に京都大学防災研究所において開発された渦実験装置¹⁷⁾であるが、流入流に接線成分を与える機構を、以前の送風機によるものからガイドベーンによるものに改造した。装置頂部にある送風機によって周辺部から空気が流入するが、その流入流に厚さが1mmで大きさが23cm×47cmのアルミ板を中心から80cmの所48ヶ所に設ける事によって接線成分を与えている。ガイドベーンの半径方向からの偏角(θ)は 0° から 85° の間で変化させられる。これを用いて定義されるスワール比 $S = \tan\theta/2(H/R)$ の値は0から4.6の間の値をとる。ここで H は収束槽の高さ(47cm)、 R は上昇口の半径(38cm)である。頂部の送風機の回転を変化させる事によって上昇口での上昇流の大きさ(W_0)は約0.2cm/sから16cm/sの間で変化し、その場合のレイノルズ数 $Re = W_0 D/\nu$ (ここで $D=2R$ 、 ν は空気の動粘性係数)の範囲は $1.0 \times 10^3 \sim 8.3 \times 10^4$ である。底面は取替可能であるが、この実験では滑かな木の表面を用いた。

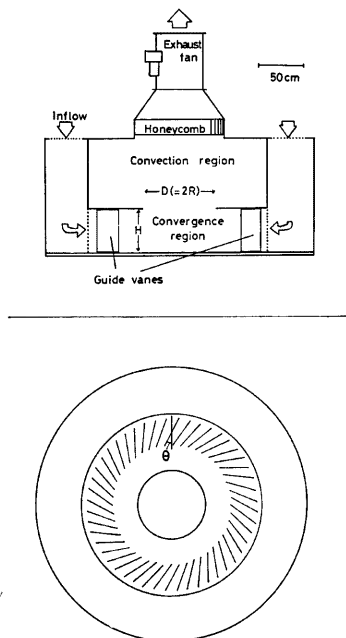


Fig. 1 Outline of the vortex simulator. Upper figure is the side view and the lower figure the top view.

風速はスモークワイヤーと2成分熱線風速計を用いて測定した。スモークワイヤーは副次渦の風速が測定できる様に改良したもので、直径0.1 mmの銅線の上に5 mmの長さの煙が発生する部分と10 mmの煙が発生しない部分を交互に作り、風向と風速の両方が測定できるようにした。スモークワイヤーは収束槽内を水平に張り、7 Hzのストロボで照射し、上方から35 mmカメラによって撮影を行った。発煙状況を示す例をFig. 2に示す。1成分の熱線風速計をスモークワイヤーの直下数mmの位置に設置し、スモークワイヤーの発煙した時の流れの状況を記録した。最初にリモートスイッチによってカメラのシャッターが開くと、シャッターからの信号がスモークワイヤーを作動させ、同時に熱線風速計の記録上に記録される。

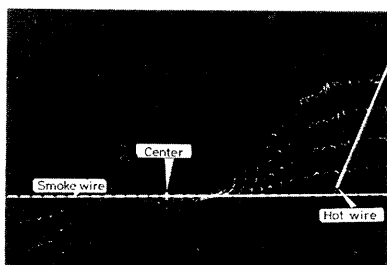


Fig. 2 Example of the emitted smoke from the smoke-wire

スモークワイヤーから発せられる煙はワイヤー加熱時の対流で上昇成分を持つ。静止空気中での上昇速度は約5 cm/sであった。従って、7 Hzで照射している場合、ストロボと発煙とのタイミングに応じて測定精度に0.4~1.1 cmの誤差を生じる事になる。

平均風速や風速の時間変化は2成分の熱線風速計(X-wire)を用いて測定を行った。ワイヤーは直径が5 μ mで長さが3 mmのタングステン製であり、それぞれのワイヤーが水平に、しかも接線方向と45度の位置になるように設置した。接線方向からの流れの偏角は、熱線風速計の2成分の出力の比として、予め検定しておいた関数を用いて測定した。この方法で測定可能な偏角は $\pm 30^\circ$ 以内である。それ以上の角度になると熱線の支持部が測定を妨げ、精度が悪くなる。熱線風速計の検定は小型の検定風洞で、超音波風速計を基準風速計として行った。検定の精度は数 cm/sの風速まで充分保ち得るが、熱線風速計の方が10 cm/s以下ではその出力が定常的ではなく、長期間検定値を保持できないため、検定は各測定直前に行うようにした。

熱線風速計による測定は中心から10, 15, 20, 25, 30, 35 cmで、高さ2, 5, 10, 15, 20 cmの各点で行った。10 cmよりも中心に近い所は乱れが平均流に対して大きく、測定は困難であるので省いた。熱線風速計の増幅回路(KANOMAX Model 1010)からの出力は、PCM記録器(TEAC PU-400)を用いて磁気テープに記録した。その信号はAD変換後、小型計算機(NOVA 01)を用いて解析を行った。なお熱線風速計の検定曲線を計算機に予め記憶させておいて補正を行った。測定は3回異なった日に行ったが、次節以下に示した熱線風速計の解析結果はその3回の測定の平均値で示されている。

渦のタイプの判定のための流れの可視化は潤滑油を加熱して発生させる装置(TEM社、システムE)を用いて行った。煙はチャンセルを通して装置の底面裏側から中央部へ導き収束槽底面中央の小門板の周囲から収束槽へ放出した。

3. 複合渦の形成条件

装置頂部の送風機とガイドベーンの角度の組合わせによって種々の形の渦が形成される。この風量と偏角の2つの変化量と装置の形状特性の組合わせで前節で述べた様にレイノルズ数とスワール比の2つの無次元パラメーターが得られる。特に、スワール比は渦の相似性を考える場合に重要であると考えられている¹⁸⁾。例えば室内実験によって得られる竜巻状渦の渦核の直径はスワール比に依存し、レイノルズ数にはほとんど依らない事が明らかとなっている¹⁷⁾¹⁹⁾。また、形成される渦の形、すなわち、1セル型、2セル型、複合渦などの形態は主にスワール比(S)の関数である。Fig. 3に実験装置の中で形成される種々の形態の渦を示す。 S が小さい時は、細い1セル型の層流渦が形成されるが(Fig. 3(a)), S を増加させると上層部に渦崩壊(vortex breakdown)が起り(Fig. 3(b)), 次に全層が2セル型の乱流渦(Fig. 3(c))となる。さらに

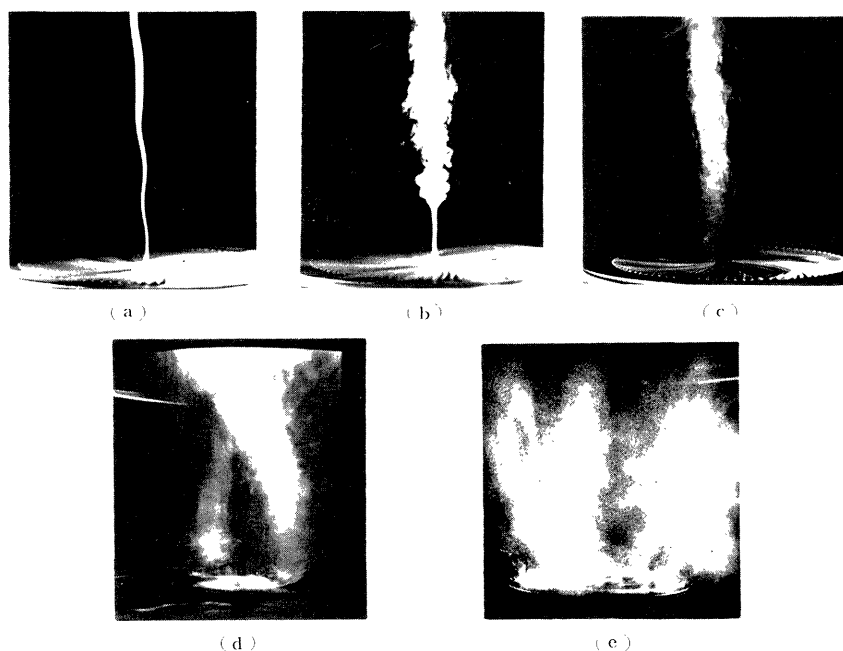


Fig. 3 Flow visualization of the various type of vortex.

(a) Laminar vortex, $S=0.07$, $Re=1.0 \times 10^4$, (b) Vortex breakdown, $S=0.2$, $Re=1.0 \times 10^4$, (c) Turbulent vortex, $S=0.46$, $Re=1.0 \times 10^4$, (d) Multiple vortices with 2 subsidiary vortices, $S=1.1$, $Re=3.8 \times 10^3$, (e) Multiple vortices with 3 subsidiary vortices $S=2.3$, $Re=3.8 \times 10^3$

S を増加させると渦の分裂が起り、複合渦が形成される。複合渦中の副次渦の数は S の増加と共に 2 個 (Fig. 3 (d))、3 個 (Fig. 3 (e)) と増加して行く。変化の様子を S と Re の関数として表わしたのが Fig. 4 である。 Re の小さな値の領域では Re への依存性も認められるが、 Re の大きな値の領域では S への依存の方が高い。 Re を非常に大きくすると乱れが大きくなって複合渦が破壊される領域 (Fig. 4 の右上の領域) が現れる。我々の実験装置で作られる副次渦の個数は 4 個が限界であった。

この結果と Purdue 大学の回転スクリーン型の実験装置によって得られたもの¹¹⁾と比べてみると、 Re の範囲が異なるので厳密な比較はできないものの、渦の形態とスワール比の関係について両者は類似している事がわかった。これは、周囲の回転を与える手段としての回転スクリーンとガイドバーンは渦運動に対して同種の境界条件として働いている事を示すものと考えられる。

渦の形態に影響を及ぼすものとしては、他に地面の粗度が考えられる。Leslie²⁰⁾ の実験によれば、粗度が大きいと、複合渦の形成のためにより大きな S の値が必要である。これは乱れが複合渦の形成を妨げるためであると考えられる。従って異なった乱流特性を有する実験装置による複合渦の形成条件は全て異なったものとなる可能性があり、乱れの強さも重要なパラメータの 1 つとして加える必要があるが、乱流の渦流に対する働きについては未解明な部分が多い。

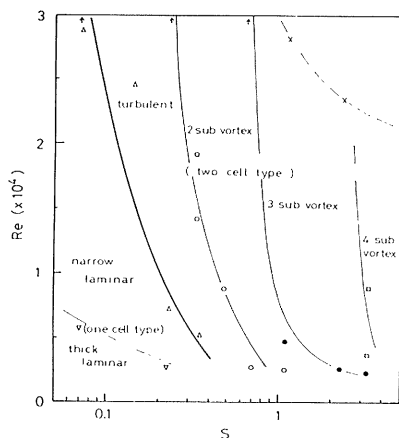


Fig. 4 The variation of the type of the generated vortex as a function of the Reynolds number and the swirl ratio. The boundary of the one cell and two cell structure is indicated by a thick solid curve. The area bounded by dashed curve in the upper right corner is where the turbulence is too large to recognize any organized motion.

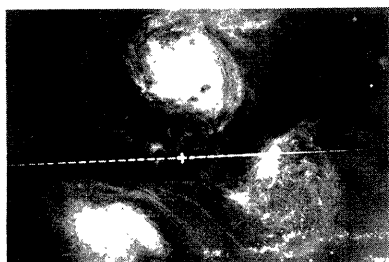


Fig. 5 Three subsidiary vortices at the height of 20 cm

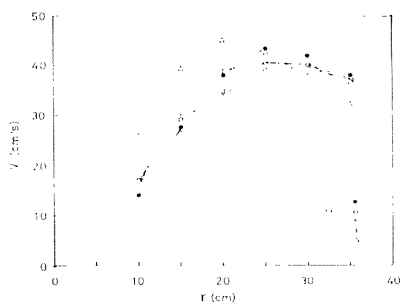


Fig. 6 The distribution of the mean tangential velocity on r - z plane

4. 複合渦の構造

前節で述べた渦の形態の中で、複合渦の形成される範囲内の特定の条件 $Re = 3.2 \times 10^3$, $S = 2.3$ について渦の構造を詳しく調べた。この条件下では Fig. 3 (e) に示した様に、3つの副次渦を含む複合渦が形成される。この渦を上から見た場合は Fig. 5 に示す様に、ほぼ等間隔に副次渦が全体の中心のまわりをまわっている。写真中には高さ 20 cm の位置に水平に張られたスモークワイヤーが渦の大きさの目安を示すために写してある。破線として写っている白い部分の長さが 1 cm で、 $\dagger$ は装置の中心である。この写真は高さ 20 cm を中心にして 5 cm の幅にストロボ光を当てて撮影したものである。

4.1 平均風速分布

熱線風速計で求めた平均接線風速分布を Fig. 6 に示す。渦核(最大風速半径より内側の部分)の内部では平均的には剛体回転に近い運動をしている事がわかる。渦の最大風速の位置は中上層部 ($z = 10 \sim 20$ cm) ではほぼ同じ半径の所に現れるが、下層 ($2 \sim 5$ cm) では中心により近い所に現れる。

4.2 複合渦内の風速変動

副次渦の通過に伴って風速は規則正しい変動をする。熱線風速計によって得られた風速変動例を Fig. 7 に示す。周波数 $f = 0.8$ Hz 付近の変動が全領域に認められ、ここに示した範囲でも最下層部以外はその周波数の変動が最も卓越している。この周波数の変動は可視化した乱れの観察によって3つの副次渦が次々に通過することに伴うものである事が確かめられ、中心のまわりを渦核とはほぼ同じ角速度で回転する波数3の現象に伴う変動である事がわかる。しかし地面近くでは周波数がほぼ 0.2 Hz の変動が卓越している領域があり、3つの副次渦には平等にエネルギーが分配されていない事を示している。

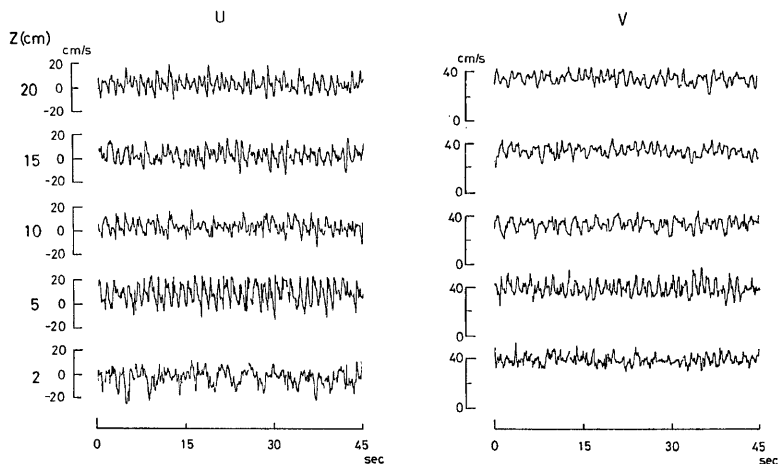


Fig. 7 The examples of the velocity variations measured by the two component hot-wire anemometer. The left figure is the radial component and the right figure the tangential component.

この変動の様子はスペクトル解析を行うとより明確である。**Fig. 8** に、**Fig. 7** の変動例の FFT によるスペクトル解析例を示す。半径成分 (U) と接線成分 (V) のスペクトルの形には著しい相異が認められるが、共通している点は 0.8 Hz が全ての変動の中に存在している事である。ただし、相対的には、 U 成分については、下層で 0.2 Hz の周波数を持つ変動成分が卓越している。しかしながら、 V 成分のスペクトルにはその低周波数成分は顕著には現れていない。この高い周波数の変動 (約 0.8 Hz) と低い周波数の変動 (約 0.2 Hz) はそれぞれ波数 3 と 1 の変動に起因するものである可能性が強いが、解析では厳密には 3:1 となっておらず不明確である。

4.3 副次渦の構造

これらの変動はどのような構造を持った副次渦によって作り出されているかをスモークワイヤーを使用して調べた。**Fig. 9** の左図は高さ 20 cm におけるベクトル場を示したものである。3つの副次渦のケースについて重ね合わせているので、全平面空間の $1/3$ の扇形として示してある。副次渦の中心が通った時にスモークワイヤーが発煙したものを図形の中央に取り、発煙が副次渦の通過以前のものを左に、通過以後のものを右に

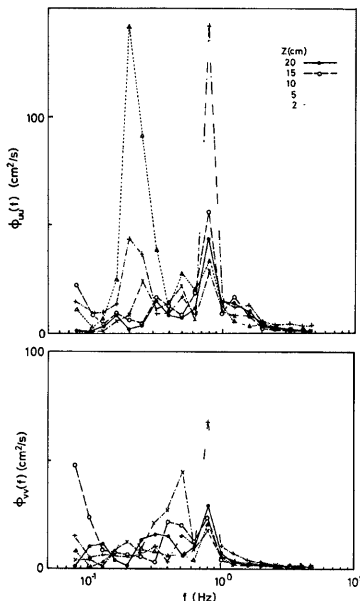


Fig. 8 Power spectral density of the velocity fluctuations in Fig. 7. The upper figure is the radial component and the lower figure the tangential component.

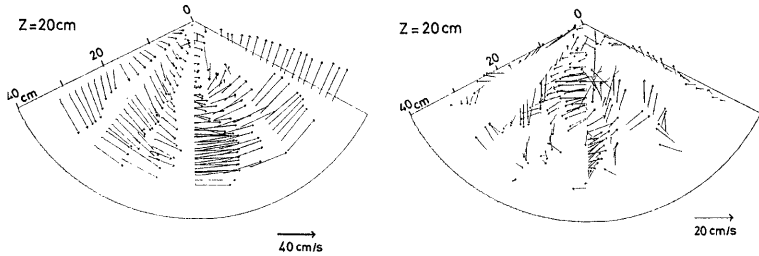


Fig. 9 Velocity vector field of the flow associated with the subsidiary vortex measured with the smoke-wire (left), and the vector field with the radially averaged angular velocity subtracted (right)

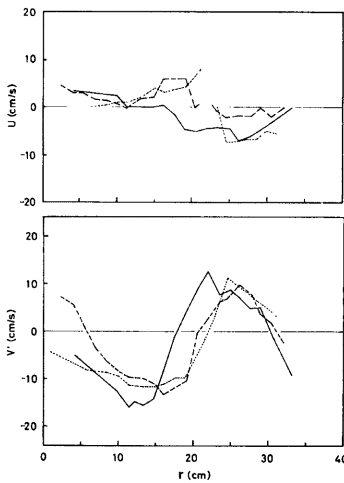


Fig. 10 The radial distribution of the velocity components of the subsidiary vortex measured at $z=20$ cm by the smoke-wire. The upper figure is the radial component and the lower figure the tangential component.

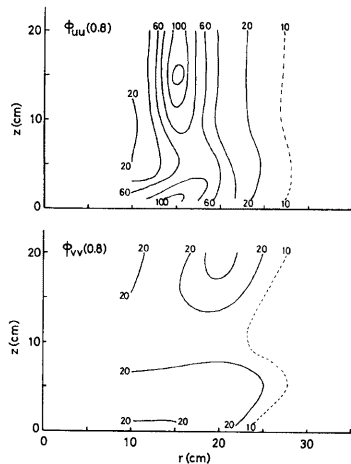


Fig. 11 Distribution of the power spectral density of the radial (upper figure) and the tangential (lower figure) velocity fluctuations at the frequency of 0.8 Hz

記入してある。扇形の両端では風速は外側に向ってほぼ直線的に増加しており、副次渦の影響はほとんど認められないのに対し、扇形の中央付近ではベクトル分布は著しく変形され、副次渦の影響を強く表わしている。これをさらに明確に示すため半径方向に平均した角速度を差引いたものを Fig. 9 の右図に示した。この引算は剛体回転を差引いた事になり、主渦と副次渦の分離としては必ずしも最も適当な方法とは言えないかも知れないが、図には副次渦に相当する風速分布が浮び上って来る。すなわち、Fig. 5 の写真に見られる副次渦の渦核と、Fig. 9 (右) に示されている渦核の位置、大きさはほぼ一致している。

Fig. 9 (右) に見られる様に、副次渦の中心がスモークワイヤーの位置を通過した時に発煙したものが3例

ある。それから副次渦の風速分布を求めたものを **Fig. 10** に示した。副次渦の接線風速成分が符号を変える所は $r=20$ cm 付近であり、この付近が副次渦の中心である。また、半径風速成分もこの付近で符号が変わる。すなわち、副次渦付近では流れは収束しており、Fujita によって提案された吸上渦として働いている可能性を示している。中心付近の副次渦の回転はほぼ剛体回転を示し、その副次渦の中心のまわりの回転角速度は主渦の約1.25倍である。また副次渦の渦核の大きさは主渦の約1/5となっている。風速については、副次渦の最大接線風速は主渦の1/4である。この事は、複合渦の形態を取っているこの場合は最大風速が単独渦の時の主渦より25%大きい値となる事を意味する。言いかえれば、副次渦の存在のため、最大風速半径での風速の最大風速から最小風速までの変化量は主渦の最大風速の1/2に達する事になる。

他の高度、特に地面に近い所では乱れが大きくて精度の高いスモークワイヤー測定が困難であったので、熱線風速計による測定結果から副次渦の性質を推定した。副次渦の通過によって起される変動が、対象としている条件下では約0.8 Hzの周波数を有する変動である事を考えて、その周波数のパワースペクトル密度の空間分布を求めてみた。**Fig. 11** の上図に u 成分、下図に v 成分の $r-z$ 面内での分布を示す。 u 成分と v 成分の分布には多少異なりがあるが、中心からの距離が15~20 cmの間に最大値の領域があり、下層に向かってわずかに中心に近くなる傾向が認められる。これは **Fig. 3 (e)** に示した副次渦の可視化写真の特徴と一致しており、**Fig. 11** は副次渦の通過に伴う風速の変動の分布を表わしているものと考えられる事が可能であろう。

4.4 副次渦の移動速度

流れの可視化による観察によれば、副次渦は一体としてほぼ形を保ちながら主渦の中心のまわりを回転する。従って、その移動速度は高さによって変化しない。一方、**Fig. 6** に示す様に主渦（平均場）の接線風速は、上層部ではあまり高さによって変化しないが、地表面近くでは上層部と異なった水平分布となっている。副次渦の移動角速度は、熱線風速計で測定した3個の副次渦の通過による変動周波数が、与えられた条件下では約0.8 Hzであるので、 $2\pi \times 0.8/3 = 1.7$ rad/s である。従って、副次渦の中心付近の移動速度は $1.7 \times 20 = 34$ cm/s となる。これは、上層部での接線風速より約10%小さな値となっているが、地表面近くの接線成分より約30%小さな値となる。この結果を単純な2次元ランキン渦の線型不安定理論と比較してみる事ができる。それによれば、 $\cos(m\theta - \sigma t)$ という擾乱を与えた場合、擾乱の位相角速度 σ/m は $\omega \cdot (m-1)/m$ と書ける²⁾。ここに m は波数、 σ は周波数、 ω はランキン渦核の角速度である。現在の実験では波数 $m=3$ であるので擾乱の位相速度は ω の2/3となって、地表面近くではこの単純な理論計算の結果と一致している。ただし、さらに上層部での値はこの理論とは合わない。しかしながら副次渦の移動速度は平均場よりも遅いという傾向は一致している。この様に副次渦が一体として動くのに比べ、平均場には鉛直シアアがあるため、上層と下層とで副次渦と主渦の相対的な速度が異なる事は両者の相互作用にも高さによって差が生じる可能性を示す。

5. 結 語

大気中の中小規模渦内に発生する複合渦現象についての室内実験を行った。ガイドベーン型の実験装置においても回転スクリーン型と同様副次渦が形成される事が確かめられた。形成される渦のタイプ、すなわち1セル型、2セル型さらには複合渦中の副次渦の数はスワール比とレイノルズ数の関数となるが、スワール比がより重要なパラメータである。スワール比が0.1付近で層流渦から2セル型の乱流渦に移り、0.3付近で2つの副次渦に、1付近で3つに分離していく。

3つの副次渦が形成される一条件を選んで複合渦の構造について調べた。改良したスモークワイヤーと2成分の熱線風速計を用いて測定した結果、次の事が明らかとなった。地表面付近で発生する乱れの影響が少く、複合渦が十分に整った形を示す $z=20$ cm の高さの付近では、副次渦の渦核の半径は主渦の約1/5の大

速は主渦の約 1/4 である事、すなわち、副次渦の通過に伴う風速の変動幅は主渦の最大風速の 1/2 に達する事がわかった。

地表面近くでは副次渦に伴う変動成分以外の成分が卓越するためスモークワイヤーによる測定が困難である。熱線風速計の変動記録のスペクトル解析から副次渦の構造を推定した結果、副次渦の中心が通過して行く半径は主渦の最大風速半径の約 80% の位置にあり、下層へ向って小さくなっていく傾向が認められた。

副次渦は一体となって移動するがその移動速度は、同じ位置での主渦の接線風速成分と比較すると、地表面から離れた所ではほとんど両者は一致するか又は 10% ほど副次渦の移動の方が遅いのに対し、地表面近くでは、主渦の接線成分の方が上層より大きいために副次渦の移動速度は 30% ほど小さいという結果となる。

この研究によって複合渦の構造をある程度明らかにする事ができたが、地面近くでの構造や、さらには副次渦と主渦との相互作用などについては不明な点が残された。また、大気中の渦の他のスケールにおける非対称構造、例えば、台風渦中に現れる楕円や多角形構造が同種の現象としてどこまで扱えるかという事も未解決の問題である。

参 考 文 献

- 1) Fujita, T.T.: The Lubbock Tornadoes: A study of suction spots, *Weatherwise*, Vol. 23, 1970, pp. 169-173.
- 2) Fujita, T.T., D.L. Brodbury and C.F. Thullenar: Palm Sunday Tornadoes of April, 1965, *Mon. Weath. Rev.*, Vol. 98, 1970, pp. 29-69.
- 3) Fujita, T.T., K. Watanabe, K. Tsuchiya and M. Shimada: Typhoon-associated tornadoes in Japan and new evidence of suction vortices in a tornado near Tokyo, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 50, 1972, pp. 431-453.
- 4) Snow, J.T.: On inertial instability as related to the multiple-vortex phenomenon, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 35, 1978, pp. 1660-1677.
- 5) Hallett, J. and T. Hoffer: Dust devil systems, *Weather*, Vol., 1971, pp. 246-250.
- 6) Agee, E.M., J.T. Snow and P.R. Clare: Multiple vortex features in the tornado cyclone and the occurrence of tornado families, *Mon. Weath. Rev.*, Vol. 104, 1976, pp. 552-563.
- 7) Mitsuta, Y. and S. Yoshizumi: Periodic variation of pressure, wind and rainfall observed at Miyakojima during the Second Miyakojima Typhoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 51, 1973, pp. 475-485.
- 8) Lewis, B.M. and H.F. Hawkins: Polygonal eye walls and rainbands in hurricanes, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 63, 1982, pp. 1294-1300.
- 9) Ward, N.B.: The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 29, 1972, pp. 1194-1204.
- 10) Church, C.R., J.T. Snow and E.M. Agee: Tornado vortex simulation at Purdue University, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 58, 1977, pp. 900-908.
- 11) 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.
- 12) Staley, D.O. and R.L. Gall: Barotropic instability in a tornado vortex, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 36, 1979, pp. 973-981.
- 13) 石川裕彦・光田 寧：負渦度領域を持つ軸対称渦の安定性，京都大学防災研究所年報，第24号 B-1，1981，pp. 345-356.

- 14) Rotunno, R.: An investigation of a three-dimensional asymmetric vortex, J. Atmos. Sci., Vol. 41, 1984, pp. 283-298.
- 15) Fitzjarrald, D.E.: A laboratory simulation of convective vortices, J. Atom. Sci., Vol. 30, 1973, pp. 894-902.
- 16) Monji, N. and Y. Mitsuta: An experiment on the rotation source of the small scale atmospheric vortices, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 61, 1983, pp. 91-99.
- 17) Mitsuta, Y. and N. Monji: Development of a laboratory simulator for small scale atmospheric vortices, Natural Disaster Sci., Vol. 6, 1984, pp. 43-54.
- 18) Davies-Jones, R.P.: The dependence of core radius on swirl ratio in a tornado simulator, J. Atmos. Sci., Vol. 30, 1973, pp. 1427-1430.
- 19) Baker, G.L. and C.R. Church: Measurements of core radii and peak velocities in modelled atmospheric vortices, J. Atmos. Sci., Vol. 36, 1979, pp. 2413-2424.
- 20) Leslie, F.W.: Surface roughness effects on suction vortex formation: A laboratory simulation, J. Atmos. Sci., Vol. 34, 1977, pp. 1022-1027.
- 21) Lamb, H.: Hydrodynamics, Dover, 1945, pp. 230-231.