

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

文字 信貴・王 允寛・光田 寧

A LABORATORY EXPERIMENT ON THE EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON THE SMALL SCALE ATMOSPHERIC VORTICES

By *Nobutaka* MONJI, *WANG Yunkuan* and *Yasushi* MITSUTA

Synopsis

The effects of surface roughness on the characteristics of small scale atmospheric vortices such as tornadoes are investigated based on a laboratory experiment. Diameter of the vortices, which increases with the swirl ratio, was found to be larger for larger roughnesses. For large swirl ratios, however, the differences are small. The height at which the maximum wind speed appears varies from the layer very close to the surface to the higher levels as the surface roughness increases. Radial distance at which the maximum velocity appears does not vary widely with roughness.

1. はじめに

大気中の小規模な渦である竜巻、塵旋風、火災旋風などは地表近くで発生するためにその性質は地表面の性質、すなわち、その形状、粗度に大きく支配されるものと考えられる。これらの渦が維持され発達するためには渦の中に入り込む流れが無ければならない。ところが地表面から離れた上層では旋衡風バランス、すなわち、遠心力と気圧傾度力がつりあった状態となっていて流入が起こりにくい。流入はそのバランスが摩擦のために崩れている最下層で発生する。この機構のため地表面摩擦は渦の維持にとって重要な意味を持つ。しかしながら、摩擦は一方では渦を減衰させる役目もはたすため、大きな粗度の場所では渦が発生しにくい事も予想される。例えば、1969年12月に豊橋市を襲った竜巻は長さ約4 kmに渡って被害を発生させたが、市街が最も発達し高い建物の集まっている中心地で約700 mの間は被害が途切れていた¹⁾。これは、市街地の大きな粗度のため竜巻の渦が弱められた事が原因となった可能性がある。

粗度が渦に対してどのような影響を及ぼすかについての研究は Dessens²⁾ が直径30 cm、高さが50 cmのシリンダー状の閉じた小型の容器の中でファンを用いて渦を発生させ行った実験例がある。シリンダー中程の位置における風速の測定によれば、粗度が大きい場合は直径が大きくて弱い渦が形成されるという結果が得られた。一方 Leslie³⁾ は回転スクリーン型の実験装置を用いて、スワール比(次節参照)と共に増大する副次渦⁴⁾の数が粗度が大きい場合は粗度が小さい場合より少ない、即ち、同じ数の副次渦ができるのにより大きなスワール比を必要とするという結果を得た。ただし、これらの実験では渦全体の風速分布の測定が行われていないため、粗度の増大が渦をどのように変えるのかについての十分な理解が得られていない。

そこで、この研究ではガイドベーンによる渦実験装置を用い、地表面の粗度を変化させた時その上で発生

する渦の形状や鉛直断面内の風向風速分布がどの様に变化するかを調べた。

2. 実験方法

実験は京都大学防災研究所にある竜巻渦の実験装置⁵⁾を用いて行った。この装置は直径が3 mの円筒形をしており、中央頂部のファンによって上昇流を作り出す。その結果周囲から空気が装置内へ流入するが、その流入流に様々な方法で回転を与えることができる様になっている。この実験では流入流がガイドベーン(案内羽根)によって接線成分を得る方法を用いた⁴⁾。

用いた粗度は3種類で、1つは比較的滑らかな合板(Roughness I と呼ぶ)、1つは縦横高さがそれぞれ0.6, 0.6, 0.4 cmの小さな木の立方体を2.5 cm 間隔の格子状に配列したもの(Roughness II)、もう1つはRoughness II と水平断面は同じであるが高さが0.9 cmのものをRoughness II と同じように配列したもの(Roughness III)である。これらの粗度の上の平行流を風洞内で測定し、対数法則の成立する領域から求めた粗度長はそれぞれ、0.015, 0.056, 0.15 cmであった。これらの粗度のうちRoughness I は装置の底部全域を覆っているが、他の2つは直径80 cmの円形の領域を占める様にした。この領域は、装置内で流入流が上昇流に転じる開口部の直径⁴⁾に合わせたものである。

実験装置の上昇流の大きさや流入流の流入角度を変化させる事は可能である。ただし、この実験では、上昇流に基づいたレイノルズ数は $Re = D \cdot W / \nu = 4.1 \times 10^4$ に固定した。ここに、 D は前述の上昇流開口部の直径、 W はその開口部における平均上昇速度、 ν は空気動粘性係数である。また、流入角については、渦の直径を煙を用いて測定する実験ではガイドベーンの角度(θ :半径方向からの偏角)を変化させたが、速度分布の測定時には角度を30度に固定した。その際のスワール比 $S = \tan \theta / 2a$ の値は0.23である。ここに、 $a = h / r_\theta$ 、 h は流入層の厚さ、 $r_\theta = D/2$ である。これらの値を選んだ理由は、これまでこの装置で行った基礎的な実験から、この条件の時に測定に容易な直径と風速を持つ安定した2セル渦(中心が下降流となっている渦)が形成されるという結果が得られているためである⁴⁾。

風速の測定は直径5 μ m、長さ3 mmのタングステン線を用いた熱線風速計を微動装置を用いて測定点を移動させながら行った。また、水平面内の風向は小型の風向計を配置して写真撮影により測定した。測定点の位置は、中心からの距離 $r=2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30$ cm、高さ $z=1, 2, 5, 10, 15, 20$ cmである。ただし、高さが0.9 cmの粗度の場合には1 cmの高さの測定は困難であるため除外した。形成された渦の直径の測定はオイルを加熱して発生する煙を装置内に導いて流れを可視化し、装置内に細い糸を張って作ったスケールを用いて行った。

3. 渦の形状

形成される渦の直径が粗度の変化によってどの様に变化するかを調べる測定を行った。渦の直径はスワール比、 S と共に増加するが、レイノルズ数にはほとんど依存しない結果が以前の実験で得られている⁵⁾。従ってこの実験では、レイノルズ数は固定して、スワール比のみを変化させた。結果をFig. 1に示す。結果は地表面から5 cmと20 cmの2高度について示してある。どの粗度の場合でも渦の直径はスワール比の増加と共に増加するが、粗度の小さい方がその変化が顕著に現れている。また、粗度が小さいほど渦の直径は小さい事が分かるが、 S の小さいときほどその差が顕著である。大きな S の場合にはどの粗度の場合にも乱れが非常に大きくなり粗度に対する依存性が小さく、ほぼ同じ直径となった。最も大きな粗度の場合で5 cmの高さで S が0.11から0.23に変化したとき直径がほとんど変化しないのは、 S が0.3程度以下では、この高さより少し上まで高さ方向にほぼ一定の直径をもつ1セル渦の部分が伸びているからである(後のPhoto. 1参照)。

前節で述べた特定の条件($Re = 4.1 \times 10^4$, $S = 0.23$)のときの各粗度の上の渦を可視化した写真をPhoto. 1に示す。スムーズな表面(Roughness I)の場合には2セルの部分が表面まで達した形となっている。粗度を増加させると2セルになり始める部分(vortex breakdownの点)が表面から離れて上層に移

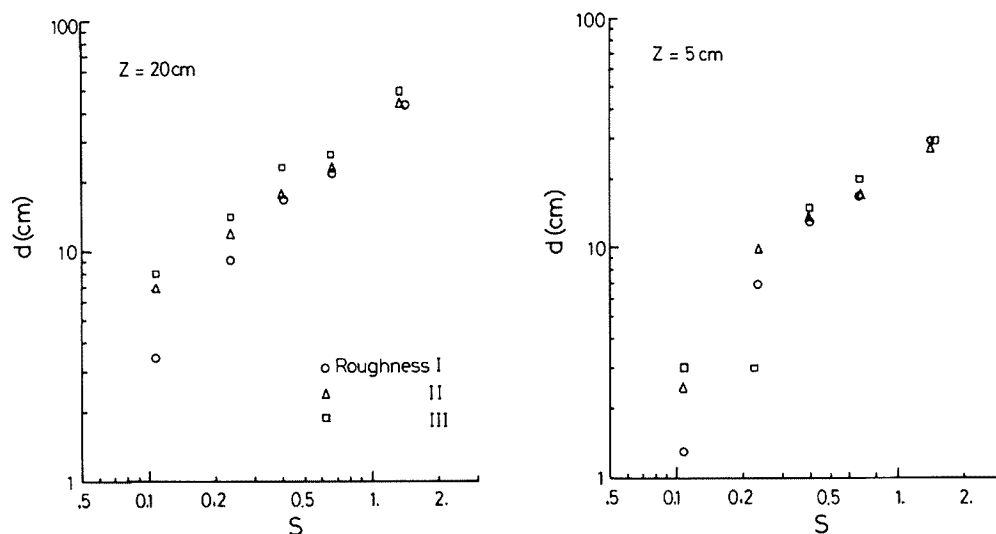


Fig. 1. Variation of the smoke filled vortex core diameter with the swirl ratio for three types of surface roughness.

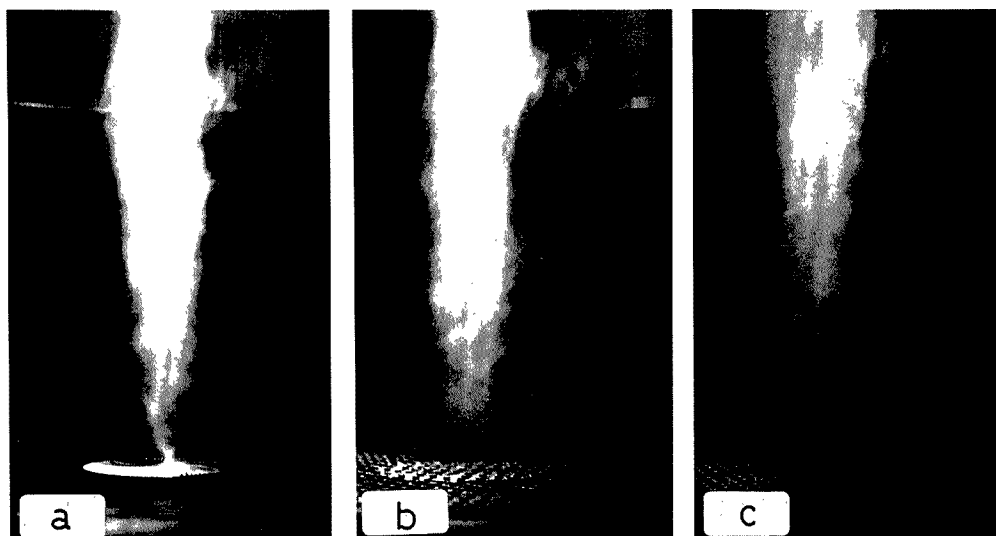


Photo. 1 Photographs of the visualized vortices for three kinds of roughness, (a) the smoothest, (c) the roughest and (b) in between.

動する。しかも、2セルの始まる部分、すなわち、渦の直径が太くなる部分は直径の変化が大きく、角ばっている様に見える。このような状態の渦がどのような風速分布を持ち、それが粗度の変化によってどの様になるかを次に述べる。

4. 風 速 分 布

風速の分布は、第2節で述べた条件の下に発生させた渦について、風速の水平成分と風向の分布を $r-z$ 断面内で測定する事によって求めた。水平風速の半径方向の分布を対数座標で示した図を各々の粗度について Fig. 2 に示す。いずれの粗度の場合も風速の最大値の外側では r^{-1} に比例した変化を示し、ランキン渦の外側に近い風速分布を有することが分かる。ただし、風速の最大値の内側（渦核内）では r に比例する形からずれている。これは、渦の中心付近で流れが大きく乱れているため熱線風速計では測定値が過大に現れ

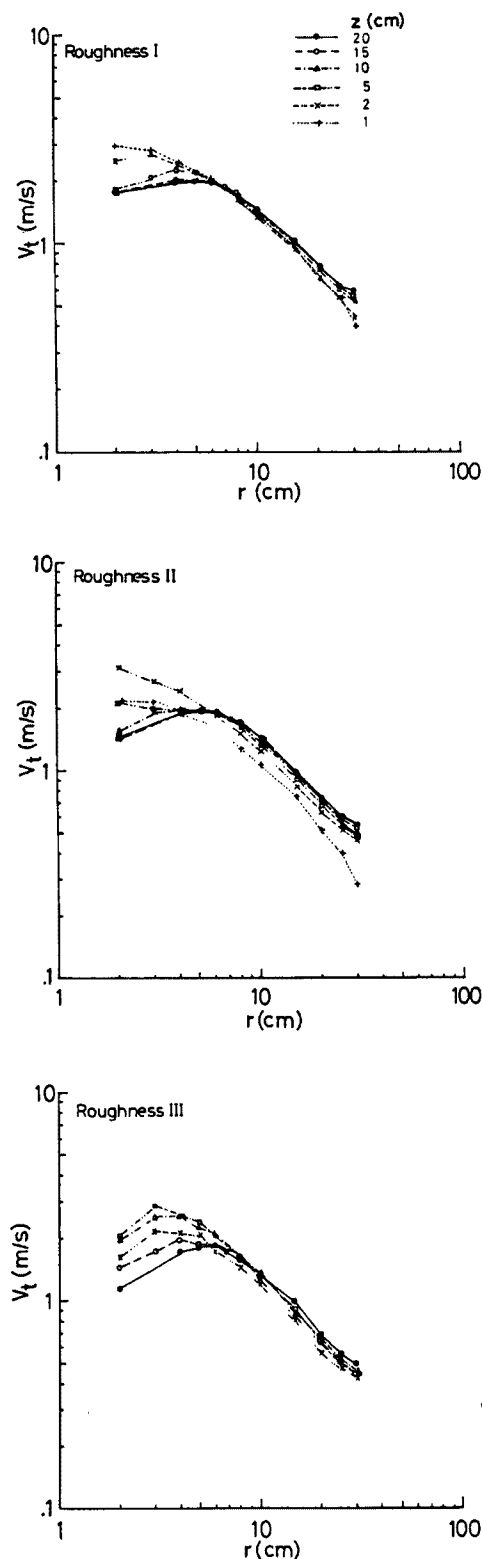


Fig. 2. Radial distribution of the horizontal velocity over three roughnesses for $Re=4.1 \times 10^4$ and $S=0.23$.

るためであると考えられる。粗度による違いは、地表面が滑らかなほど上下の変化が小さく2次元的な渦が形成されており、粗度が大きくなるほど上下の差が顕著になっているという点である。ただし、Roughness IIIにおいては、他の2つの場合に示されている最下層 ($z=1$ cm) は測定できていない。

風速分布を $r-z$ 面内で示したものを Fig. 3 に示す。地表面から離れた所では、いずれの粗度の場合にも風速の最大値は中心から 4 cm 程度の所に出ており、下層ほど最大風速の現れる場所は中心に近づく傾向を示す。全体の最大が現れる半径は粗度が大きいほど僅かに大きくなる傾向が見られるが大きな差異は無い。これに対して最大風速の現れる高さは粗度によって大きく変化する。すなわち、表面が滑らかなほど下層に最大風速域が現れ、粗度が増大するに連れて上方へ移動する。Fig. 3 と Photo. 1 とを比較すると、風速の最大値は、下層において渦に入って来る流れが中心付近にしばらく少し上で外へ広がる直前の所に位置する事が分かる。最大風速の値そのものは粗度と共にほとんど変化しないが、地表付近の風速は粗度の増加と共に著しく減少する。

次に、風向の鉛直面内分布を Fig. 4 に示す。この測定例ではガイドペーンの角度は30度に固定されており、ガイドペーンの設置してある $r=80$ cm 付近ではこれに近い角度で流入していると考えられるが、 $r=30$ cm の付近では約70度になっている。粗度が小さいときは小さな角度を持って流入して行き、渦核近くになって旋衡風バランスに近い状態になってほぼ接線方向の成分のみとなる。粗度が大きくなると r が大きい所では下層で接線成分が大きくなって渦核付近では逆に半径成分が増加するという現象が見られる。粗度が大きい場合でも風速の最大値が現れる付近では接線成分が増加している事が分かる。なお、角度の測定値と水平風速の測定値を組み合わせれば水平風速の接線及び半径成分が得られるが、風速の測定精度に比べて風向の測定精度が劣り、しかも風向測定点の位置が限られているためここでは図示していない。

5. 結 論

竜巻や塵旋風など大気中の小規模な渦が地表面粗度によってどの様に変形を受け、また、風速分布がどの様に变化するかを見るため室内実験を行った。3種類の異なった粗度を持つ地表面上に形成される渦の測定を行った結果、次の様な結論が得られた。

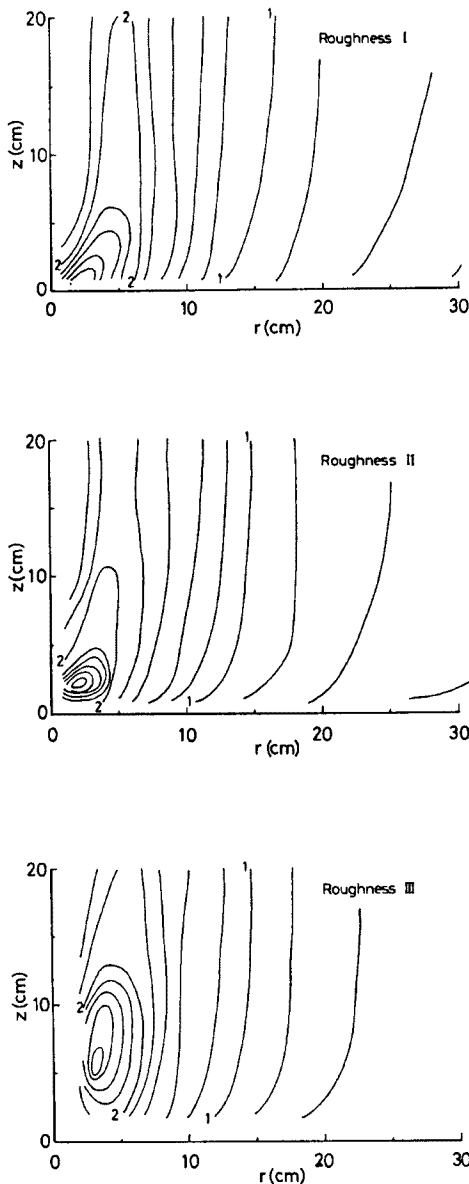


Fig. 3. Horizontal velocity distribution in the vertical plane for the same conditions as in Fig. 2. The contours are drawn every 0.2 m/s.

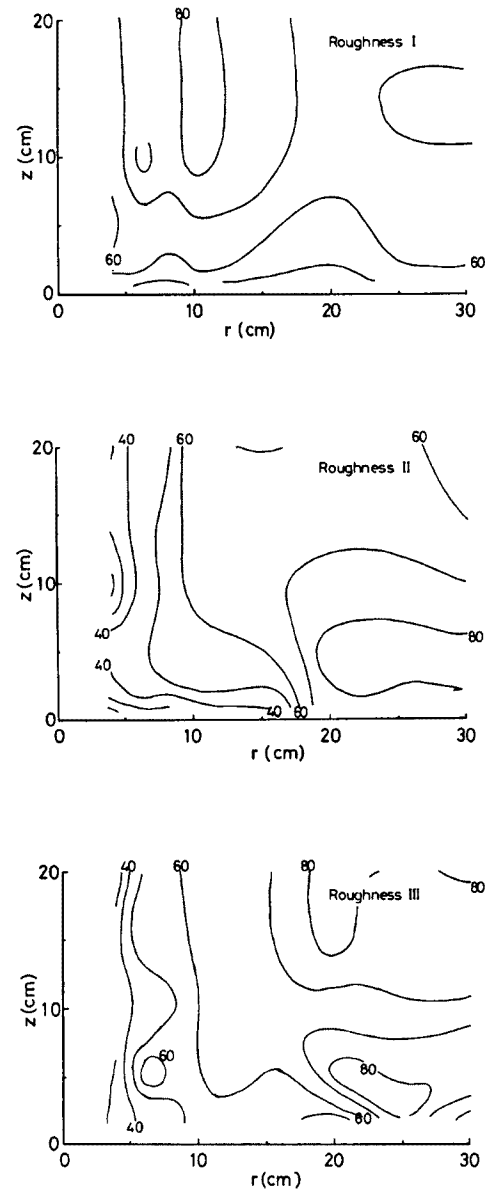


Fig. 4. Distribution of the wind direction in the vertical plane for the same condition as before. The angle is measured from the radial direction. Contours are drawn every 10 degrees.

- 1) 煙で可視化した渦の直径はスワール比と共に増加するが、スワール比が小さいところでは粗度が小さいほど渦の直径は小さく、スワール比が大きくなれば粗度の違いによる直径の差は小さくなる。
- 2) 粗度が小さいときは渦の直径の高度変化は滑らかであるが、粗度が大きいときは最大風速の現れる高さ付近で急に増大する。
- 3) 最大風速の現れる高さは粗度が小さいほど低い位置にあり、粗度が増大すると上層に移動する。

- 4) 最大風速が現れる半径は粗度の増加とともに僅かに増加するが、高さの変化に比べて顕著ではない。
- 5) 最大風速の値は粗度によって大きくは異ならないが、被害と関係の深い地表付近の風速は粗度の増加と共に減少する。

このように、渦の性質に対する粗度の影響には顕著なものがある事が分かったが、ある特定の位置に風速の最大域を形成させる機構や、粗度と共にその位置が上層に移動する機構などの解明には摩擦の発生機構すなわち、上下及び半径方向の運動量輸送機構の研究が必要である。

この研究は京都大学防災研究所と中国科学院大気物理研究所との間で行われている大気の渦に関する共同研究の一環として行ったものである。共同研究にあたって鹿島学術振興財団の援助を得た。

参 考 文 献

- 1) 石崎潑雄・光田 寧・川村純夫・室田達郎・木本英爾・田平 誠：1969年12月7日，豊橋市を襲った「たつまき」に関する研究．京都大学防災研究所年報14号 A, 1971, pp. 481-500.
- 2) Dessens, J.: Influence of ground roughness on tornadoes: A laboratory simulation. J. Appl. Meteor., Vol. 11, 1972, pp. 72-75.
- 3) Leslie, F. W.: Surface roughness effects on suction vortex formation: A laboratory simulation. J. Atmos. Sci., Vol. 34, 1977, pp. 1022-1027.
- 4) Monji, N.: A laboratory investigation of the structure of multiple vortices. J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 63, 1985, pp. 703-713.
- 5) Mitsuta, Y. and N. Monji: Development of a laboratory simulator for small scale atmospheric vortices. Natural Disaster Sci., Vol. 6, 1984, pp. 43-54.