

大気の組織構造：竜巻とダウンバースト

佐々浩司（高知大理）

Organized structures in atmosphere; tornadoes and downbursts

K. Sassa

Dept. of Applied Science, Kochi University

ABSTRACT

Atmospheric turbulence is composed of hierarchy of various organized structures from synoptic scale to micro scale. Tornadoes and downbursts are the most violent winds in all of them though their scales are relatively small. It is difficult for ordinary meteorological observation systems, e.g., Doppler radar and so on, to catch these hazard winds in detail. Then, we need experimental simulations of these hazard winds to clear their structure and generation mechanism of them. Some recent results of our experiments on tornadoes and downbursts are shown in the present paper.

Key Words: organized structure, tornado, tornado simulator, PIV

1. 序論

大気の流れは極めてレイノルズ数が高く乱流状態にあるが、同時に様々なスケールの組織的運動を含んでいる⁽¹⁾。その中でも特に興味深いのは直径 100~1000km におよぶ総観規模の低気圧や台風から積乱雲に伴う 10 数 km のメソ低気圧、100m 程度の竜巻、さらには竜巻の中の吸い込み渦といったように相似の構造が幾重にも階層構造をなして存在していること⁽²⁾である。したがって気象の多くはこういった組織的運動の一端を見ていることになる。

竜巻やダウンバーストは組織的運動の中でも比較的規模が小さいものの、最も強い風をもたらす現象であり、減災の観点から構造や生成メカニズムを明らかにすることが期待されるが、小規模故に気象観測網によって捉えることは現在もなかなか難しい。本研究室では、そのような突風をもたらす流れ現象の解明をめざして、様々

な実験的研究を行ってきた。ここではそれらを概観する。

2. 竜巻の生成メカニズム

山など渦度の発生源となる地形が存在しなくても竜巻は発生する。このメカニズムを理解するためにドライアイスミストで作る冷気とファンの上昇気流によってノンスーパーセル竜巻の発生を試みた⁽³⁾。図 1 の画面中央から手前に向かって流れるドライアイスミストの左右にはそれぞれ水平速度勾配の大きな領域があり、その上にファンを置いて上昇気流を作ると鉛直渦度が引き延ばされて竜巻を形成する。すなわち竜巻の渦度は渦伸張によってもたらされる。竜巻の回転方向は図のように水平速度勾配の向きに依存する。このような竜巻の生成過程はスーパーセル竜巻においても認められている⁽⁴⁾。一方、図示していないが、水平渦度のティルティングによる竜巻生成も確認できた。しかし逆回転の渦が一對となって発生



(a) 時計回転の竜巻



(b) 反時計回転の竜巻

図 1 ガストを横切る上昇気流により形成された竜巻



(a) Weak tornado



(b) Strong tornado



(c) Divergence



(d) Updraft

図 2 竜巻のパターン

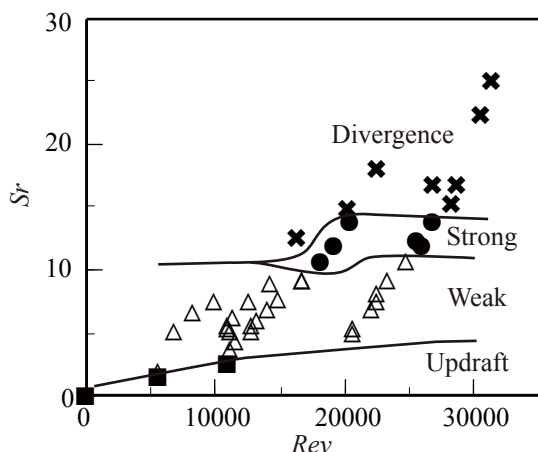


図3 渦レイノルズ数とスワール比による竜巻生成パターン

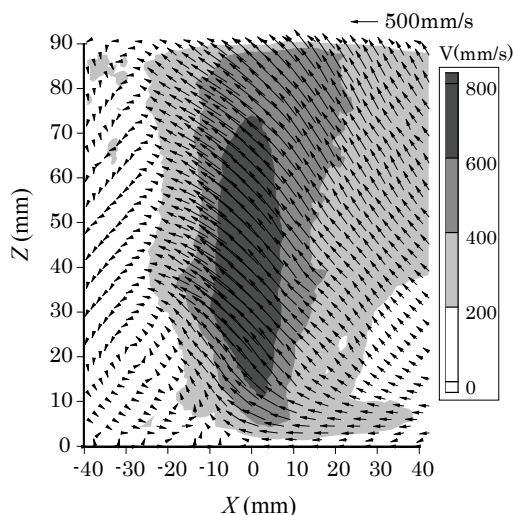


図5 鉛直断面内の速度分布

することや水平渦の元となるガストフロントの規模が小さいことから寿命が極めて短く、特殊な流れ環境を作らない限りティルティングは竜巻生成の主因とはならない。

3. 竜巻の構造

詳細な PIV 計測を行うため、上昇気流を模擬するファンと回転を生み出す回転多孔円盤を組み合わせた新たな模擬装置を開発し、実験を行った⁶⁾。上昇気流の速度と多孔円盤の回転速度を変えることにより、図2に示すような4つの流れパターンが形成された。**Weak** はドライアイスの作るガストの水平速度勾配を伸張してできた弱い竜巻、**Strong** は多孔円盤の回転により直接流れ場の回転が誘起されてできた強い竜巻を表す。これらを模擬装置の渦レイノルズ数 Rev とスワール比 Sr によってプロットすると図3のようになる。このことから、流れ場は主としてスワール比に依存することがわかる。ここでメソサイクロンの一般的上昇流と渦度を用い、動粘性係数の代わりに渦粘性係数を用いると、 $Rev \sim 5000$ 、 $Sr \sim 5$ 程度となる。このことから、メソサイクロンの下で発生するスーパーセル竜巻は、主として水平速度勾配の伸張による **Weak** 竜巻に相当することがわかる。

しかし、鉛直渦としての構造を調べる上では **Strong** が安定しているため、**Strong** の PIV 解析を行った。水平断面は図4に示すように、 $Z < 14\text{mm}$ で回転と収束流が認められ、それより上層で回転のみがみられる。すなわち、 $Z < 14\text{mm}$ がこの竜巻の境界層に相当する。ここに再現された竜巻は、 $Rev=300$ 、 $Sr=0.9$ であり、渦粘性係数を用いて実際の竜巻と比較すると、F4 クラス以上の強い竜巻⁶⁾に相当する。しかし、多重渦構造は認められなかった。周方向速度の最大値は境界層高さ付近に見られた。鉛直断面の様子は図5に示すようなもので、境界層における竜巻中心への収束流と鉛直渦側面における回転上昇流の様子が良く捉えられている。竜巻左側の $Z=20\text{mm}$ 付近に見られる水平渦状の回転流れは、境界層内にある水平渦が傾けられて鉛直渦へと吸収されていく過程を示したものである。回転がより強まって渦核が拡大すると、これらが多重渦を構成していくことになるものと思われる。

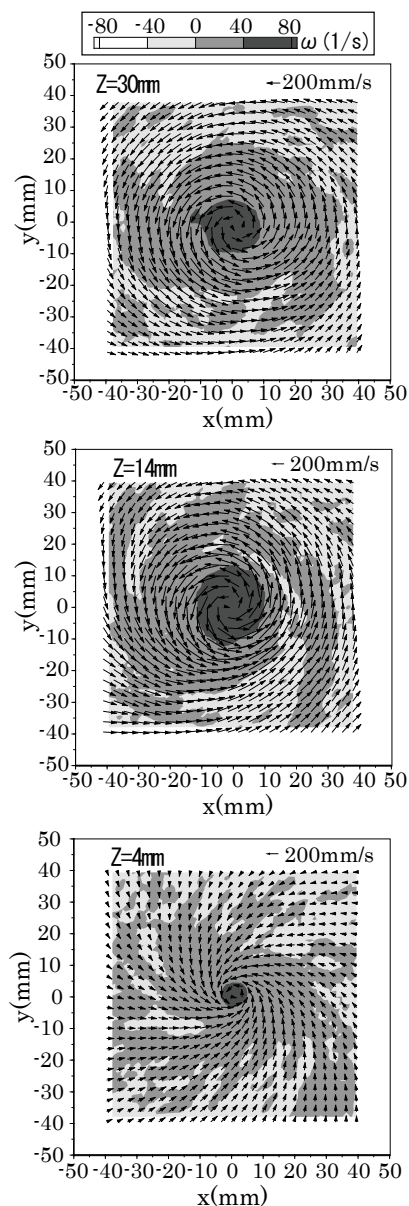


図4 水平断面の鉛直渦度分布

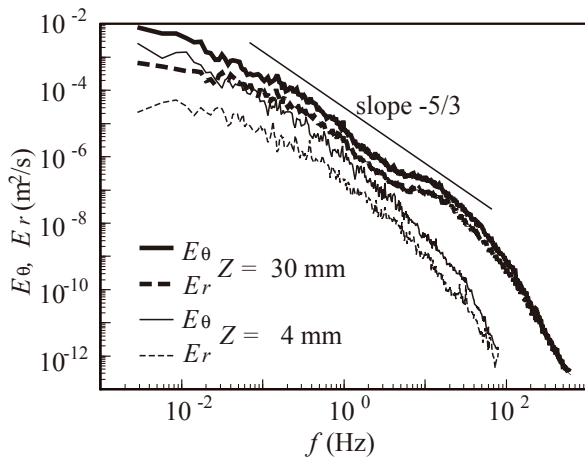


図6 速度変動のエネルギースペクトル

周方向速度が最大となる位置に熱線流速計のプローブにおいて速度変動スペクトルを求めると図6のようになる。境界層内の $Z=4\text{mm}$ では広い流域に収束流があるため、スペクトルは単調な分布であるが、鉛直渦が顕著な $Z=30\text{mm}$ では 5Hz 付近にエネルギーギャップが見られ、変動が間欠的であることがわかる。すなわち、これより低周波は渦軸の揺動に伴う変動で、竜巻渦がプローブに当たる場合とそうでない場合で極端に変動強度が異なる。それより高周波は竜巻渦自身の乱流変動であり、 $Re\tau=300$ でもこの竜巻が乱流渦であることがわかる。

4. メソサイクロンとの関係

先述の模擬装置ではメソサイクロンの回転はあまり竜

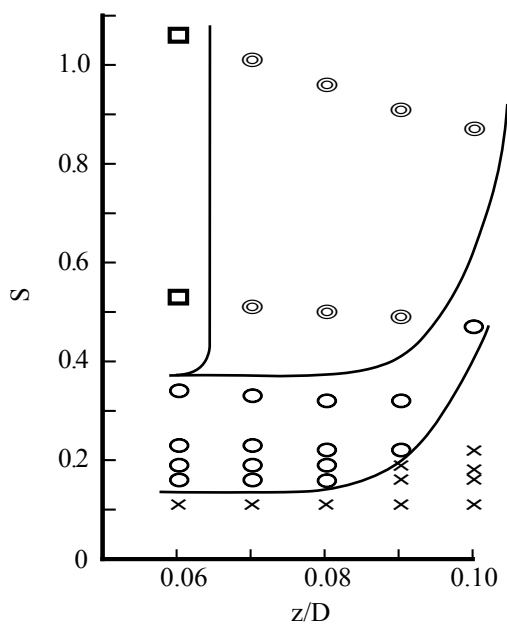


図7 メソサイクロンの高さとしワール比をパラメータとした竜巻パターン

◎: 多重渦、□: 装置中央に形成される単一渦、○: ガストの水平シアに伴う竜巻、×: 竜巻なし

巻生成に寄与しないと考えられたが、この場合の角運動量は発散流に与えたものであり、室内回流の結果竜巻の角運動量へと供給されるところが実際のメソサイクロンとは異なっている。そこで、ファンと案内羽根で構成するメソサイクロン模擬装置を新たに製作し、その高度と回転強さを変えつつ、下層にあるガストとの干渉によってどのように竜巻が形成されるかを調べた⁽⁷⁾。この場合、案内羽根に囲まれたエリアがメソサイクロンの回転上昇流に相当し、発散する流れは生じない。

可視化実験の結果、図7に示すように床面からメソサイクロンの高さ Z/D とスワール比 S によって竜巻が形成される場合とそうでない場合があり、さらに竜巻が形成される場合でも流れパターンは様々であることがわかった。ここで D は装置の直径でメソサイクロンの直径に相当する。図中の□で表されるパターンは下層ガストの存在に関係なくメソサイクロンの回転がそのまま地上まで到達して形成された竜巻で、その形成過程はいわゆるパイプ効果⁽⁸⁾と呼ばれるものに相当すると思われる。○はガストの作る水平速度勾配を伸張してできた竜巻で、比較的小さいスワール比に形成される。◎は竜巻形成の初期に図8に示すような多重渦が形成された場合で、比較的大きなスワール比に生じる。これらの結果から考えるとメソサイクロンの回転と地上からの高さが竜巻の形成に強く関わっていることがわかる。

図8における多重渦は画面右手にみられる3本の吸い込み渦により構成されている。吸い込み渦は、下層ガストが竜巻の主渦に取りこまれるように反時計回転する際に主渦の周りを惑星のように回転しつつ収束していくように見えるが、その後強い主渦一つに融合して極めて強い回転が生じる。このような様子は実際の竜巻⁽⁹⁾においても観測されている。その一方で、下層ガストの反対側にある水平速度勾配は時計回転の渦度を持つため、上層のメソサイクロンの反時計回転に関わりなく時計回転の竜巻が画面右手に発生している。これもまた実際の竜巻で観測⁽²⁾されている。

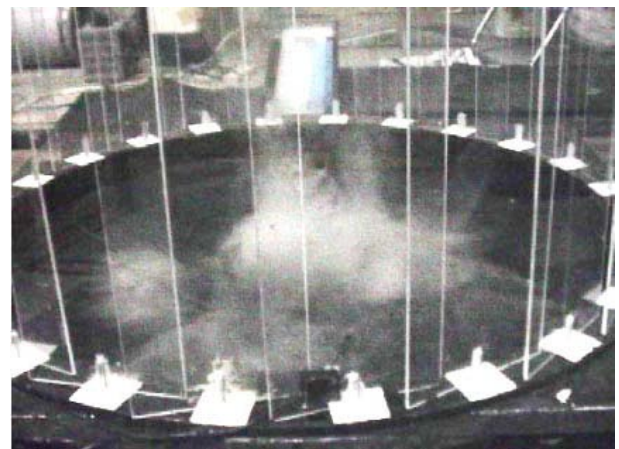


図8 再現された多重渦

ガストは写真奥より手前へ流出している。右手が多重渦で3本の吸い込み渦が見られる。左手は多重渦と反対に時計回転する竜巻を示す。

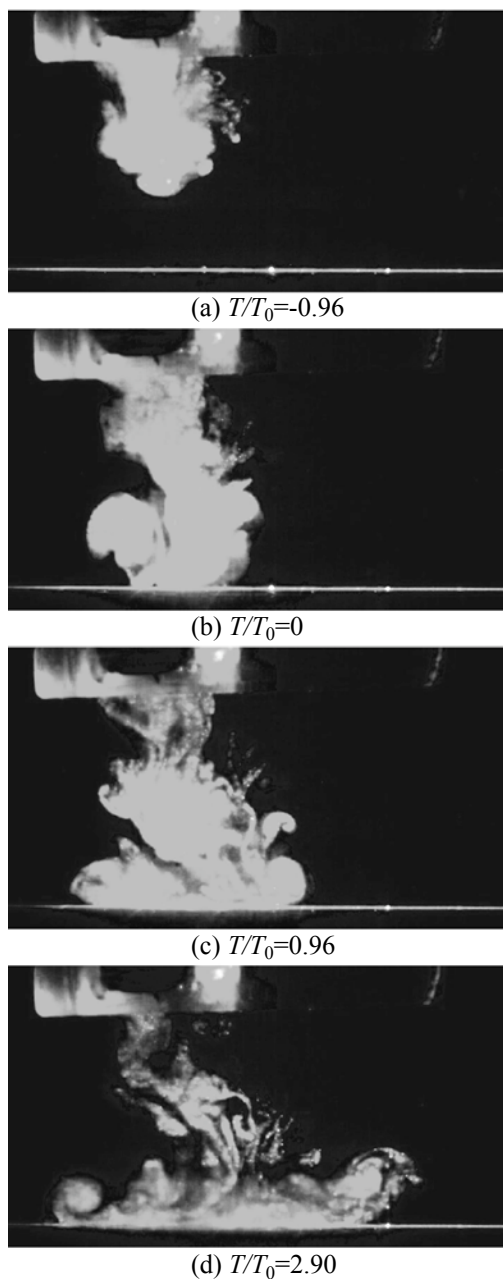
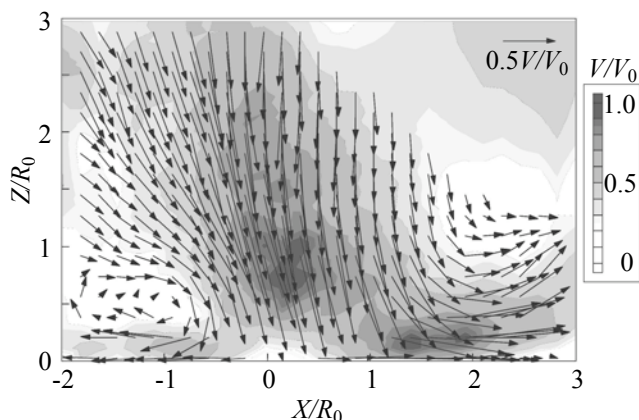


図9 トラベリングマイクロバーストの様子

図10 トラベリングマイクロバーストの平均速度場 ($T/T_0 = 0.96$)

5. トラベリングマイクロバースト

ダウンバーストは竜巻と反対に積乱雲から下降してくる発散性の突風である。発散性という特徴から被害域は突風の吹いた領域にまんべんなく広がるように思われるが、実際には被害極めて狭い領域に局在する⁽¹⁰⁾。この原因を解明するため、模擬水槽実験⁽¹¹⁾を行っている。トラベリングマイクロバーストは親雲や環境場の風によって風下に流されつつ下降するもので、図9は主に環境場の風により上流側と下流側のガストフロントが非対称になる様子を示している。PIV解析によって速度場を求めると図10のようになり、フロントにおける水平渦の存在がよくわかる。このうち、強風域は濃いグレーとなっている部分で、下流側ガストフロントの背後(上流側)の地面付近が最も強い水平風をもたらす。これらの速度パターンは観測結果⁽¹²⁾をよく再現している。しかしながら、この強風域の中のむらについてはいまのところ下降噴流の乱流化に伴う可能性が考えられているのみであり、今後の解析が望まれる。

6. まとめ

大気中で最もシビアな組織構造である竜巻とダウンバーストの再現実験の結果について概観した。流れ場の構造や発生メカニズムなどについて明らかになりつつあるが、今後突風の局在化をもたらすさらに小規模な組織構造の解明をめざしたい。

謝辞

一連の実験を進めるにあたり、(株) Photron より高速度カメラの貸与を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 新野, 航空宇宙技術研究所特別資料, SP-47, (2000), 9-12.
- 2) Fujita, T.T. J. Atmos. Sci., 38 (1981), 1511-1534.
- 3) 佐々, 日本流体力学会年会, 2005 講演論文集, (2005), 177.
- 4) Noda, A.T., and Niino, H., SOLA, 1 (2005), 5-8.
- 5) 佐々, 山下, 竹村, 日本気象学会関西支部例会講演要旨集第110号, (2006), 44-47.
- 6) Wurman, J. and Alexander, C., Mon. Wea. Rev., 133, (2005), 97-119.
- 7) 佐々, 清水, 日本気象学会 2008 年度春季大会講演予稿集 93, (2008) 135.
- 8) Trapp, R.J. and Davis-Jones, R., J. Atmos. Sci., 54, (1997) 113-133.
- 9) Wurman, J., Weather and Forecasting, 17, (2002) 473-505.
- 10) 佐々, 藤澤, 瀬川, 第16回風工学シンポジウム論文集 (2000) 107-112.
- 11) Sassa, K., Turbulence, Heat and Mass Transfer 5 eds. Hanjalic et al. (2006) 239-242.
- 12) Hjelmfelt, M.R., J. Appl. Meteor., 27 (1988) 900-927.