

自走する竜巻の模擬実験

高知大学・理学部自然環境科学科 佐々 浩司 (Koji Sassa)
Dept. of Natural Environmental Science,
Kochi University

1. はじめに

竜巻は、何もない空間で組織化されるにも関わらず地球上で最も激しい風を引き起こす気象現象である。目撃例は古来より多々あるが、持続時間が短く定量的なデータはまだ不十分であり、その詳細な構造や生成のメカニズムも十分に理解されているとは言えない。著者も 2003 年に高知市桂浜近くで発生した竜巻の被害調査をおこなったが、高々数 10m の丘を通過する際に竜巻が減衰、再生した証拠を見出し、竜巻に対する地形効果に興味を持った。これが、本実験を始める直接の動機である。

竜巻の模擬実験は数多く行われてきているが、大半が円筒空間に渦を定在させるもので竜巻が走行する状況は再現できていなかった^{(1) (2)}。このため、地面粗度の変化や地形効果による竜巻の変化や、構造物に与える影響などを調べることはできなかった。近年ようやく移動式シミュレータ⁽³⁾が実現されたが、これは、上昇気流を作り出すファンからの還流によって周囲に弱い旋回を与えておく構造で、構造物への影響を調べるという風工学的な見地では大きく進歩したが、発生メカニズム等を再現できるものではない。そこで研究の主眼は、いかにして自然に近い環境化で竜巻を再現できるかということになった。

竜巻生成のメカニズムとしてはメソサイクロンを伴うスーパーセル下で生成されるものと、水平シアーを持つ収束線上で発達する積乱雲が水平シアーの鉛直渦度を引き上げることによって生成されるノンスーパーセルタイプ⁽⁴⁾がある⁽⁵⁾。これらはいずれも数値シミュレーションによって再現されている^{(6) (7)}が、解像度はまだ十分ではなく竜巻の生成過程を完全に明らかにしているわけではない。実験において降水過程を除く力学的な再現を考えると、ノンスーパーセルタイプの鉛直渦度は混合層中で K-H 不安定によって発達する秩序渦⁽⁸⁾に相当し、その渦軸方向から積乱雲の上昇気流に相当する流れを形成して秩序渦を引っ張ってやれば、竜巻のような渦を模擬出来そうである。ただし、拡散することなしに地表面付近に安定した水平シアーをもつ混合層を作ることは、速度差だけを与える装置では難しい。また、空気の

みで実験をおこなうと、水平シアーを作るための吹き出し流れから上昇気流へと滑らかにつながる流れが形成されるだけであり、意図したような渦伸張は起こらない。そこで、水平シアーが床面から浮き上がらないようにドライアイスによってガストを形成することにした。このうち移動速度が比較的遅く、大きな水平シアーを持つ側面のフロントを竜巻発生のためのシアーラインと見立てた。この上を上昇気流に見立てたファンを移動させることにより、側壁の無い自由空間中で容易に竜巻を発生させることができるだけでなく、自在に移動させることも可能となる。本報告では、このようにして模擬された竜巻に関する初期的な結果について述べる。

2. 実験

図1に実験の概略を示す。厚さ5mm、大きさ500mm×1000mmの亚克力平板上にドライアイス槽(出口幅100mm)をおき、そこから発生する炭酸ガス冷気によってガストフロントを模擬した。ドライアイスの冷気はドライアイス槽にもうけられた堰から比較的安定して供給され、平板の中央付近にガストフロントを形成する。ガストの厚さは床面から5mm程度、ガストの速度は $U_g=19\text{mm/s}$ である。正面のガストフロントはこれとほぼ同じ速度で進行するが、側面は比較的進行速度が遅く、かつガストと周囲との間に明確な水平シアーラインを形成する。水平シアーラインにおける鉛直渦度は 19s^{-1} 程度である。

上昇気流を発生させるファンは2種類用いた。1つは同じ場所に安定して竜巻を形成させるために内径110mmのファンにハニカムを取り付けた100×200mmの矩形吸い込み口を床面から高さ150mmに設置したもので、ファンのモータを8Vから20Vまで電圧制御することにより発生させる竜巻の強度が変化するかを調べた。このときの吸い込み口の流速は $U_L=350\sim 1400\text{mm/s}$ であった。もう一つのファンは内径55mmのファンを縮流した内径20mmの円形吸い込み口を床面から高さ60mmに設置して、シアーラインに沿ってトラバース装置により $U_s=7.8\text{mm/s}$ と 16.8mm/s で移動させることにより竜巻の自走を再現した。従来の実験⁽²⁾と大きく異なり亚克力平板の周囲は開放されているので、あらかじめ周囲流に旋回を与えておくことはない。なお、これらの大きさに関しては現段階では現実の竜巻を意識したスケーリングをしているわけではない。竜巻実験においてはレイノルズ数ではなく、上昇気流と回転の周速度の比に相当するスワール比⁽²⁾

$$S=r_0\Gamma/2Qh$$

が重要とされる。本実験においては、流量 Qh は定義できるが装置内径を表す r_0 や周囲に与える旋回 Γ を定義できないため、後述のように再現されたパターンから S を推定した。今後、シアーラインの速度勾配や初期渦度などに基づく新たなスケー

リングを定義していきたい。

竜巻はガストを形成するドライアイス冷氣に伴う霧によって可視化される。光源には Ar レーザーシート光を用い、床面より高さ 5mm の水平断面と、竜巻の渦軸に平行な鉛直断面を照射して、それぞれ高速度カメラによって 1000 コマ/秒で記録した。ただし、霧の粒径は極めて小さいため、PIV 計測のトレーサーには別にベビーパウダーを用いた。

3. 実験結果

定在竜巻の実験においては、ガストが安定に供給されている間は竜巻も安定して形成されることが確認できた。図 2 に鉛直断面におけるパターン例を示す。(a) (b) はファン電圧が 8V、上昇気流の速度は $U_L=350\text{mm/s}$ 、(c) は 12V、 $U_L=1000\text{mm/s}$ である。同じ上昇気流速度でもガストのわずかな速度差により、なめらかな層流渦の状態(a)と地面より少し高いところで渦がブレークダウンして乱流化した状態(b)の 2 パターンが形成される。これらはそれぞれ swirl 比が $S=0.2, 0.3$ に相当する。このときの回転の接線速度と上昇速度との比はほぼ 1 である。

上昇気流を強めた(c)では竜巻が螺旋状になる。回転の接線速度と上昇速度との比は約 0.7 であったが、これは回転速度が速くなったために回転面上に投影される速度成分として接線速度が過小評価されたためであり、上昇に比べて回転が弱まっていることを示すものではないと考えている。速度の評価は今後より厳密にしていくな予定である。竜巻が螺旋状になる場合は鉛直渦度が引き伸ばされて強化されるだけでなく、ガストフロントにおける水平渦度が立ち上げられることによっても強化されることが、下層で斜めに持ち上げられている渦の様子からわかる。このパターンは $S=0.5$ に相当している。従来の実験⁽²⁾が循環を強めているのに対し、本実験では上昇気流を強めることによって大きな Swirl 比を得ることは、その定義と矛盾しているように見える。しかし、自由空間中ではファンによる上昇気流の及ぶ範囲が上昇気流の強さによって変化するため、結果的に鉛直渦度をより広い領域から集中させることによって竜巻が強化されたものと考えられる。

図示していないが、ファンの駆動電圧をさらに上げると螺旋渦が強まるが、多重渦の形成には至らなかった。最大の 20V では回転よりも上昇が勝り、全体的に吸い上げるだけの流れとなるため、竜巻は形成されない。

螺旋渦が形成される 12V の場合について水平断面の様子を図 3 に示す。図左端の左側に見える渦は右側の竜巻本体とは逆回転をしており、ガストフロントにおける水平渦度の立ち上げによって形成された逆回転の竜巻である。しかし、逆回転渦の寿命は極めて短く、時間の経過とともに右側の竜巻に解きほぐされるようにして、

消失していく様子が伺える(図3左から右へ)。なお、水平渦度の立ち上げによって同時に形成されたはずの竜巻本体と同方向回転の渦は図3左端の段階ですでに竜巻本体に融合しており、竜巻本体の回転を強めている。このように、竜巻生成に当たってはあくまでも水平シアアが持つ鉛直渦度は主体であって、ガストフロントにおける水平渦度の立ち上げは元の鉛直渦度を強化するように作用する。最近のスーパーセルシミュレーション⁽⁷⁾においても竜巻生成に支配的なのはガストフロントにおける水平シアアであると考えられていることから、ノンスーパーセル竜巻の再現をねらった本実験はスーパーセル竜巻生成のメカニズムも解明し得る可能性もつ。なお、ファンの下を水平シアアを持たないガストフロントが通過する場合は、ごく短時間であるが互いに逆回転する一対の渦が形成されることもあった。

ファンを固定して定在する竜巻をねらった実験においても、渦中心は図4(a)に示すように絶えず動き、不安定な楕円軌道を描いた。これは、ガストフロントのゆらぎに伴うものもあるが、竜巻自身の不安定性によるものであろう。

ファンを水平シアアラインに沿って移動させた場合、竜巻はそれに応じて移動するが、やはり渦軸は楕円軌道を描きながら平行移動するため、軌跡は図4(b)のように螺旋状のパターンを描いた。おおまかに見ると下に凸の緩やかなカーブを描いているのは、ガストフロントの輪郭に相当している。ファンの移動速度が小さく水平シアアの平均速度(9.5mm/s)以下の場合、竜巻は安定してファンとともに移動するが、移動速度をこれより速くすると上層が先行するように渦軸が傾いたのち、崩壊してしまう。このようなパターンは現実の竜巻における崩壊過程にもよく見られるものであり、竜巻崩壊のシナリオの一つを示すものと考えている。今回はファンの移動方向をシアアラインに沿ったものだけを試みたが、移動方向をシアアラインに直交させるなど他のケースも試みることにより、ガストフロントと親雲となる積乱雲との対応関係により実際の竜巻がどのように生成し、崩壊していくかを明らかにできるものと期待している。

図5にPIV計測によって得られた鉛直渦水平断面の速度ベクトル分布を示す。ファンの移動方向は図の左から右で、移動速度は(a)が $U_c=7.8\text{mm/s}$ 、(b)が 16.8mm/s である。(a)の場合、水平シアアラインの渦層が鉛直渦によって巻きとられている様子がよくわかる。等値線分布からわかるように、渦層内の強風域は周期的に強弱が繰り返されており、竜巻の元となる鉛直渦度の集中よりもさらに小さいスケールの不安定性が存在することが推測できる。(b)の方は移動方向と同じ方向の速度成分を持つ上半分の風速が特に強められている様子がよくわかり、実際の竜巻が走行する場合にもたらされる被害の状況が類推できる。この図において、竜巻は右方向に移動中の様子をとらえているにも関わらず、その渦軸が右方向に移動しているよ

うに見えない。これは、先述のように竜巻が螺旋状の軌道を描くため偶然渦軸がほぼ静止した状態をとらえているものと思われる。

図5と同じ瞬間の水平断面における渦度分布を図6に示す。(a)の場合、渦中心付近の渦度も逆符号の領域が見られるなど、渦としてやや不安定に見えるが、これはトレーサーの混入が十分でないため速度ベクトルがやや不明瞭なところが出てしまった結果と思われる。等値線分布が示す強度は(a)の方がはるかに強い。明確に渦運動が認められる領域は(a)(b)ともにほぼ直径20mmであったので、この領域について循環を求めた。結果は(a)が -1.09 1/s 、(b)が -0.57 1/s であり、竜巻の強度は(a)の方が大きいことがわかる。すなわち、ファンの移動速度が水平シアアの平均速度に近い $U_c=7.8\text{mm/s}$ の方が循環が大きく、竜巻は水平シアアの平均速度以下で移動させる方が強度も高く安定していることがこのことから確認された。

4. まとめ

ドライアイスによって形成されたガストフロントをファンで吸い上げることにより、自由空間中で竜巻を再現することに成功した。その形態は層流渦、乱流渦、蛇行渦の3パターンであった。これらの竜巻は主としてシアアラインの鉛直渦度を起源としているが、蛇行渦においては、ガストフロントにおける水平渦度の立ち上げも寄与することがわかった。また、ファンの移動速度が水平シアアの平均速度以下の時、竜巻は安定に移動し、その循環も強いことがわかった。

今後、PIV計測によって詳細な速度場を求めることで、竜巻の構造や発生から消滅に至るまでの過程も明らかにしていけるもの期待している。

謝辞

本研究会にお招きいただいた水島二郎教授、木田重雄教授に感謝いたします。また、本稿をまとめるにあたり、新野宏教授より極めて重要なご意見を賜りました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 文字, "龍巻渦の実験的研究," 日本風工学会誌, 12 (1982), pp. 3-19.
- (2) Church, C.R. et al., "Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: a laboratory investigation," J. Atmos. Sci., 36 (1979), pp. 1755-1776.
- (3) Gallus, W.A., et al., "A translating tornado simulator for engineering tests: comparison of radar, numerical model, and simulator winds," AMS 22nd Conference on Severe Local Storms, 81394.pdf.

- (4) Wakimoto, R.M. and Wilson, J. W., "Non-supercell tornadoes," *Mon. Wea. Rev.*, 117 (1989) pp.1113-1140.
- (5) 新野, "竜巻とその親雲の流体力学," *ながれ* 19 (2000), pp.105-118.
- (6) Lee, B.D. and Wilhelmson, R.B., "The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis, Part. II: Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow," *J. Atmos. Sci.*, 54 (1997), pp.2387-2415.
- (7) Noda, A.T. and Niino, H., "Genesis and Structure of a Major Tornado in a Numerically-Simulated Supercell Storm: Importance of Vertical Vorticity in a Gust Front." *SOLA*, 1 (2005) pp.5-8.
- (8) Brown, G.L. and Roshko, A., "On density effects and large structures in turbulent mixing layers," *J. Fluid Mech.* 64 (1974) pp775-816.

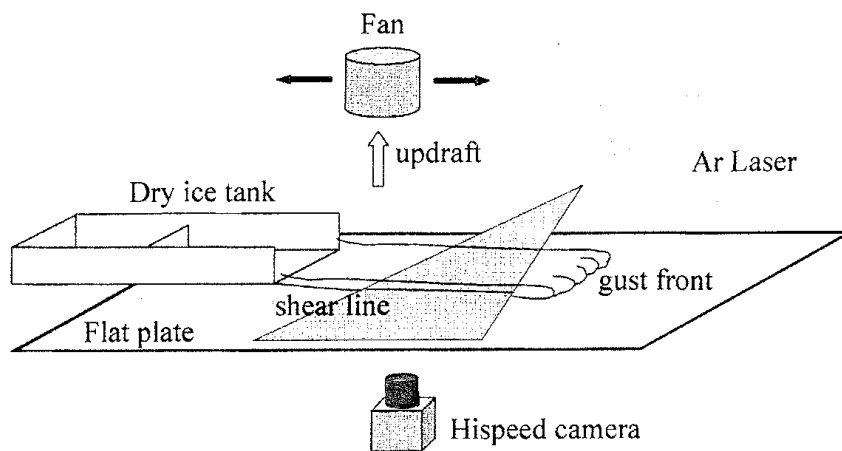
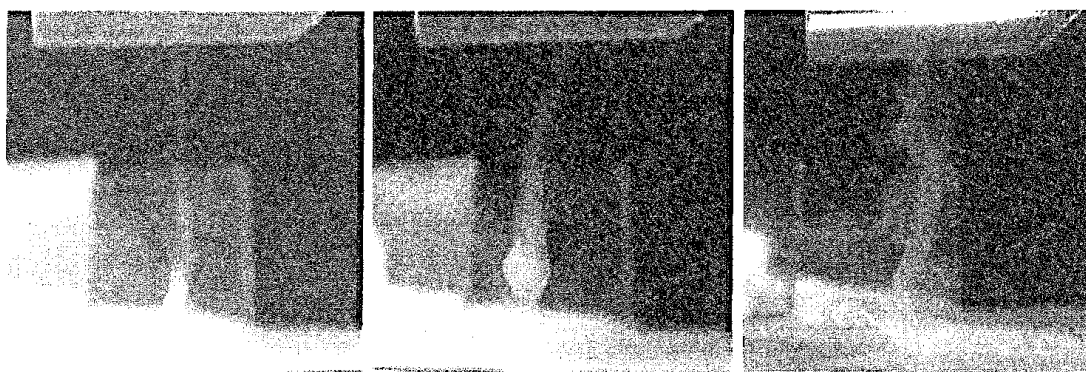


図1 実験装置概略図

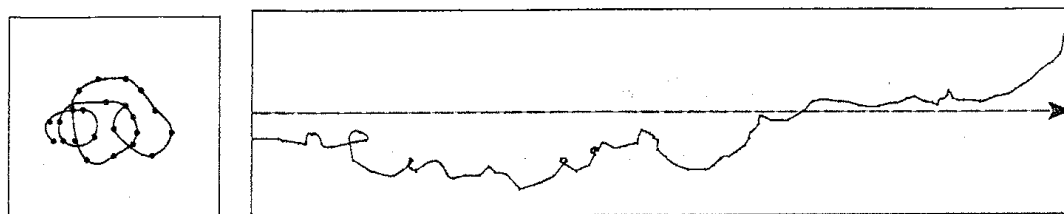


(a)層流 8V ($U_u=0.3\text{m/s}$) (b)乱流 8V ($U_u=0.3\text{m/s}$) (c)蛇行 12V ($U_u=0.5\text{m/s}$)

図2 竜巻のパターン

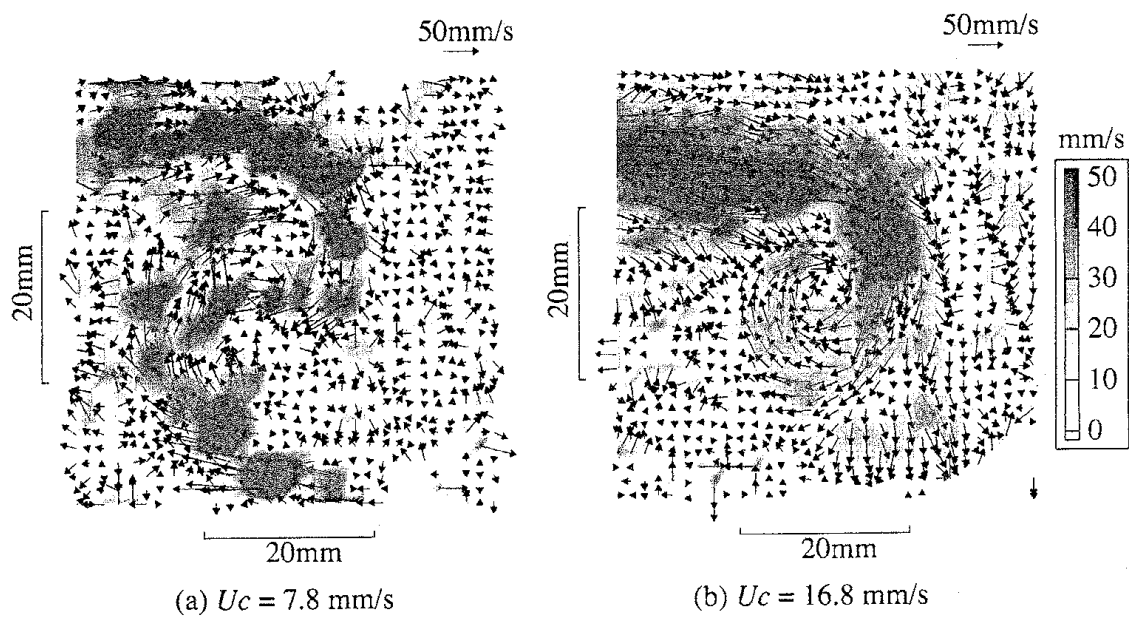


図3 逆回転竜巻の消滅過程 (時刻の経過は左から右)



(a) ファン静止 (b) ファン移動 $U_c=16.8\text{mm/s}$ 破線はファンの移動軌跡

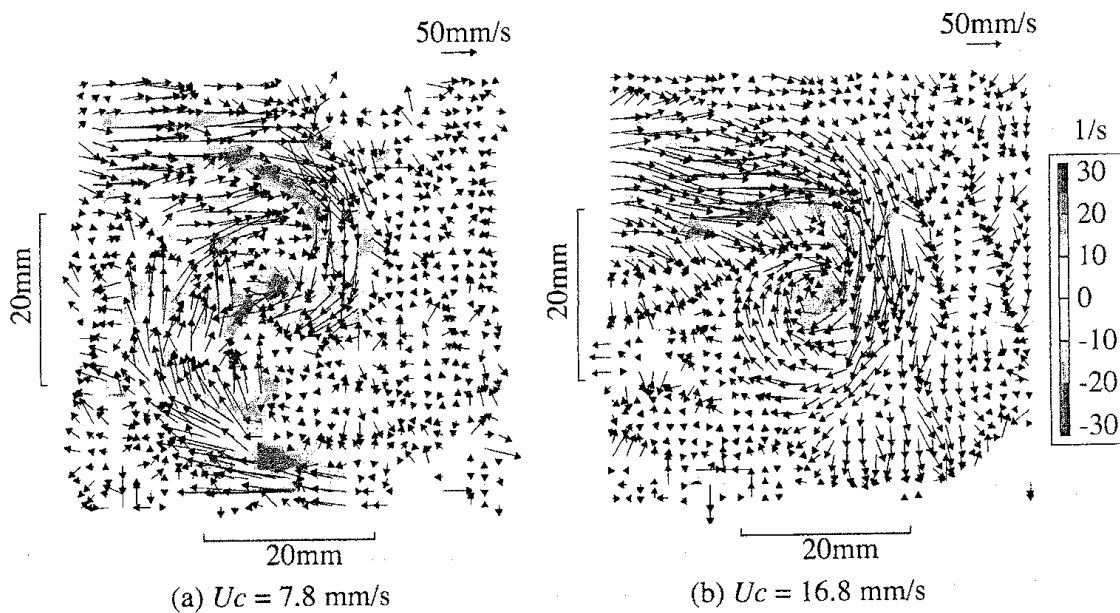
図4 竜巻中心の移動軌跡



(a) $U_c = 7.8\text{ mm/s}$

(b) $U_c = 16.8\text{ mm/s}$

図5 水平断面の速度ベクトル分布



(a) $U_c = 7.8\text{ mm/s}$

(b) $U_c = 16.8\text{ mm/s}$

図6 水平断面の渦度分布と速度ベクトル分布