

水平シアに生じる竜巻状流れの漏斗雲による可視化

Tornado-like Flow Generated by Horizontal Shear and its Funnel Cloud

野田 稔, 徳島大学, 徳島市南常三島 2-1, E-mail:noda@ce.tokushima-u.ac.jp
 八谷 実, 徳島大学, 徳島市南常三島 2-1, E-mail:c501531027@tokushima-u.ac.jp
 長尾 文明, 徳島大学, 徳島市南常三島 2-1, E-mail:fumi@ce.tokushima-u.ac.jp
 前田 潤滋, 九州大学, 福岡市東区箱崎 6-10-1, E-mail:maeda@arch.kyushu-u.ac.jp
 Minoru Noda, Tokushima Univ., 2-1 Minamijosanjima, Tokushima
 Minoru Hachiya, Tokushima Univ., 2-1 Minamijosanjima, Tokushima
 Fumiaki Nagao, Tokushima Univ., 2-1 Minamijosanjima, Tokushima
 Junji Maeda, Kyushu Univ., 6-10-1 Hakosaki, Higashi, Fukuoka

In order to investigate a relation between shapes of funnel clouds and characteristics of tornado-like flow fields, tornado-like flows were generated by Large Eddy Simulation and visualized by those funnel clouds. As results of this study, it was clarified that characteristics of tornado can be estimated from shapes of funnel clouds if the funnel clouds don't reach the ground. However, characteristics of tornado can't be estimated from only shapes of funnel clouds if the funnel clouds reach the ground.

1. はじめに

近年, 日本では竜巻による大きな被害が目立っている. 効果的な対策を行うには, 被害をもたらした竜巻がどのような特性を持った流れであったのかを知る必要がある. しかし竜巻は局所的に短時間しか発生していない自然現象であり, 正確に発生予測をして実測することは困難である. そのような中, 日本ではフジタスケール¹⁾を用い, 残された被害から発生した風速値を推定している. しかし実際に被害を起こしている風速は周辺の地形の影響等, 様々な要素を含んでおり局所的に大きく変化するため, 竜巻そのものの純粋な強さを表しているわけではない. また被害が無ければ, そもそも風速を推定できないという問題点もある. したがって, 竜巻そのものの特性を評価でき, かつ被害の有無によらず適用できる新たな竜巻の評価方法を検討する必要がある. そこで, 近年スマートフォンのようにカメラの付いた携帯端末の普及により記録されることが多くなった竜巻の写真や動画から竜巻の特性を推定することができないかという検討^{2),3)}が進められている. 本研究ではまず数値流体解析により現実的な竜巻状流れを生成し, 得られた流れ場に対し漏斗雲による可視化を行う. そして竜巻状流れの特性の変化に対して, 漏斗雲の見え方がどのように変化するのかを検討することで, 写真や動画から竜巻の特性を推定する方法についての考察を行った.

2. 水平シアによる竜巻状流れの生成

(1) 解析概要

本研究では現実的な竜巻状流れを再現するために現実を意識し, よりシンプルな解析空間と流れを与えて竜巻状流れを生成した. 竜巻状流れを生成する際に与える流れ場の概略図を Figure 1 に, 作成した解析領域を Figure 2 に示す. 解析により竜巻を再現する従来の研究では竜巻発生装置を模した解析領域を利用することが多く, Figure 1(a) に示すように, 四方から均等に流入風速を与えることで, 流れ場に回転を与え, 流入する流れ全てが上昇流に転じる形で竜巻状流れ生成していた. しかし, 本研究では水平シアによって生じた回転に上昇気流が加わることで竜巻が発生する, という考えを基本として, Figure

1(b) のように水平シアを流れ場に再現することで竜巻状流れを生成した. また, 実際の竜巻が発生している空間をイメージして, Figure 2 に示すような単純な直方体解析領域を作成した. 自由流入出条件とした上昇流口を上面中央部に, 流入流出口を x 軸と直交する面のみ設定し, 流入流出口風速を与えることで水平シアを, 流入量と流出量に差を持たせることで上昇流を生成した. 解析領域の大きさ $W \times H$ を $12000\text{m} \times 3000\text{m}$, 上昇流口幅 d を $1200\text{m}(d/W=0.1)$, 流入風速 u_0 を 13.4m/s , 流出風速 u_1 を 11.1m/s とした. 天井と y 軸に直交する面に関しては摩擦なしの slip 条件とし, 底面に関しては no-slip(滑面) 条件で計算を行った.

本研究では数値流体解析ソフトウェアである OpenFOAM⁴⁾ の PISO 法ソルバを用い, 標準 Smagorinsky を採用した LES の解析を行った.

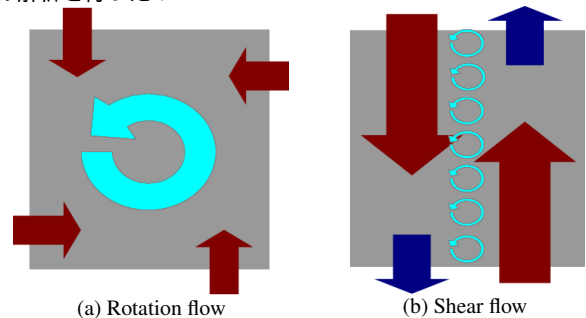


Figure 1 Boundary condition to generate a tornado-like flow

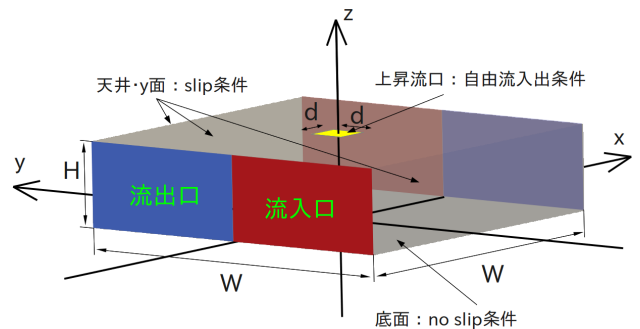


Figure 2 Analysis domain

(2) 生成された竜巻状流れの流れ場

生成された竜巻状流れの風速分布等を検討するため、ある任意の高さの水平面で最も圧力が低い点として定義した渦中心からの半径 r ごとに圧力 p 、接線・法線・鉛直方向風速 $U_t \cdot U_r \cdot U_z$ それぞれについてアンサンブル平均を行なった。圧力の基準を大気圧とするため、流入の平均圧力を基準圧とし、 U_t は水平シアの回転方向と同一方向を、 U_r は渦中心から外向きを、 U_z は上向きを正としている。また U_t と r の関係に

$$u_t(r) = \frac{\Gamma}{2\pi \cdot r} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{\varepsilon^2}\right) \right\} \quad (1)$$

で定義される Burger's vortex⁵⁾の接線風速分布を近似させることにより竜巻の大きさを表すコア半径 ε 、回転の強さを表す循環 Γ を求め、得られた近似曲線の最大値を最大接線風速 U_{tmax} とし、それぞれ 20 箇所の異なる計測高さ z について $\varepsilon_{(z)}$ 、 $\Gamma_{(z)}$ 、 $U_{tmax(z)}$ を求めた。

はじめに生成された竜巻状流れ場の構造を確認するため、Figure 3 に示す $z=20m$ でのコア半径 ε 、循環 Γ 、最大接線風速 U_{tmax} の時刻歴変化から、3 要素全ての変動が小さくなっている 47500 秒付近で比較的安定した竜巻状流れが発生していると判断し、 $t=47000 \sim 48000$ 秒の 1000 秒間(図中の緑の線で挟まれた範囲)に対して時間平均を行った。また Figure 3 からは生成された竜巻状流れが時間的に不安定であることが分かる。実際の竜巻が短時間しか発生していない不安定な現象であることを考慮すると、現実的な竜巻状流れを生成できたといえる。Figure 4 には時間平均中の $z=20m$ での渦中心座標の軌跡を示し、矢印で渦中心の進行方向を表している。この図からは渦中心がふらふらと移動し続けている様子が読み取れる。しかし軌跡の範囲から、矢印で示した水平シアにより竜巻状流れが移動させられているわけではなく、竜巻状流れが持つ不安定性による移動であることが分かる。次に平均操作により得られたコア半径 $\varepsilon_{(z)}$ 、循環 $\Gamma_{(z)}$ 、最大接線風速 $U_{tmax(z)}$ の鉛直分布を Figure 5 に示す。図中のヒゲ線はアンサンブル平均で得られた標準偏差 σ による平均値 $\pm 1\sigma$ の範囲を表しており、乱れの程度を示している。Figure 5 から 3 パラメータ共に地表面付近で大きく変化しており、三次元構造を持った竜巻であることが分かる。また Figure 5(a) からは地表面付近でコア半径 $\varepsilon_{(z)}$ が数十 m になっていることが分かり、記録に残っている日本で発生した竜巻の半径も数十～数百 m のオーダーであることから現実的な大きさの竜巻状流れが生成できたといえる。Figure 5(b)(c) を見ると、地表面付近で循環 $\Gamma_{(z)}$ の値が小さくなる一方で、最大接線風速 $U_{tmax(z)}$ が大きくなっていることが分かる。これは一見矛盾する関係に見えるが、式 (1) からわかるように最大接線風速 U_{tmax} が生じる半径はコア半径 ε によって決定され、最大接線風速 U_{tmax} は Γ/ε で与えられるのでコア半径 ε の減少が循環 Γ の減少を上まわれば、最大接線風速 U_{tmax} が大きくなることになる。

次に圧力 p 、接線・法線・鉛直方向風速 $U_t \cdot U_r \cdot U_z$ の $r-z$ 面分布を Figure 6 に示す。ここで横軸は高さ z で求めたコア半径 $\varepsilon_{(z)}$ 、カラーマップで示した圧力および各風速成分は高さ z で求めた $U_{tmax(z)}$ を用いて無次元化している。Figure 6(a) から圧力

は高さ方向に変化があまり見られないため、水平スケールをコア半径 $\varepsilon_{(z)}$ で無次元化することで、二次元的な分布になることが分かった。Figure 6(b) から同様に接線方向風速 U_t が渦中心に近い領域では、二次元的な分布であることが分かった。しかし Figure 6(c) を見ると、法線方向風速 U_r は地表面付近の領域で強いマイナス成分が見られることから、地面に沿って渦中心に吹き込む強い収束流が発生している一方で $z = 1000m$ 付近の渦中心に近い領域では弱い吹き出し流れが発生している。よって法線成分に関しては地表面付近に強い三次元性が認められる。一方で Figure 6(d) からは、渦の中央付近でのみ強い上昇流が発生していることがわかった。

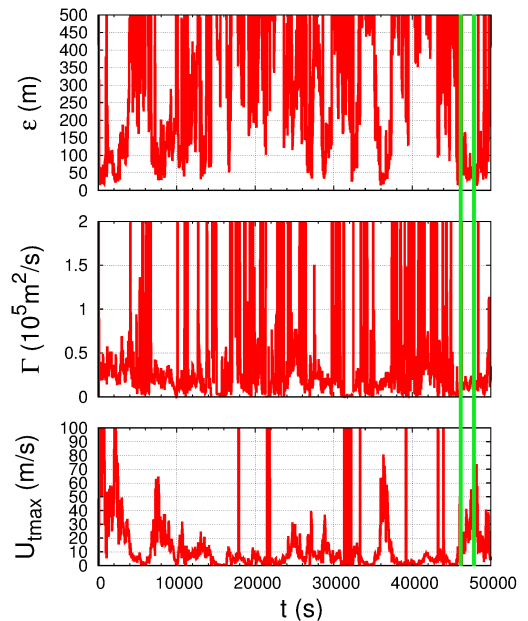


Figure 3 Time history of ε , Γ , U_{tmax} ($z=20m$)

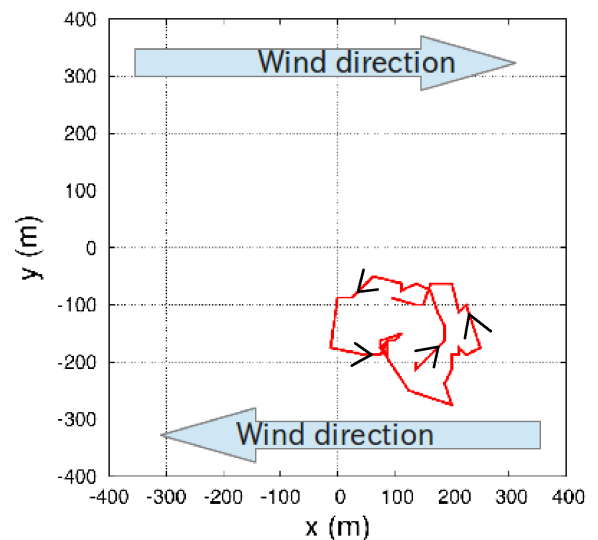


Figure 4 Locus of the vortex center ($z=20m$)

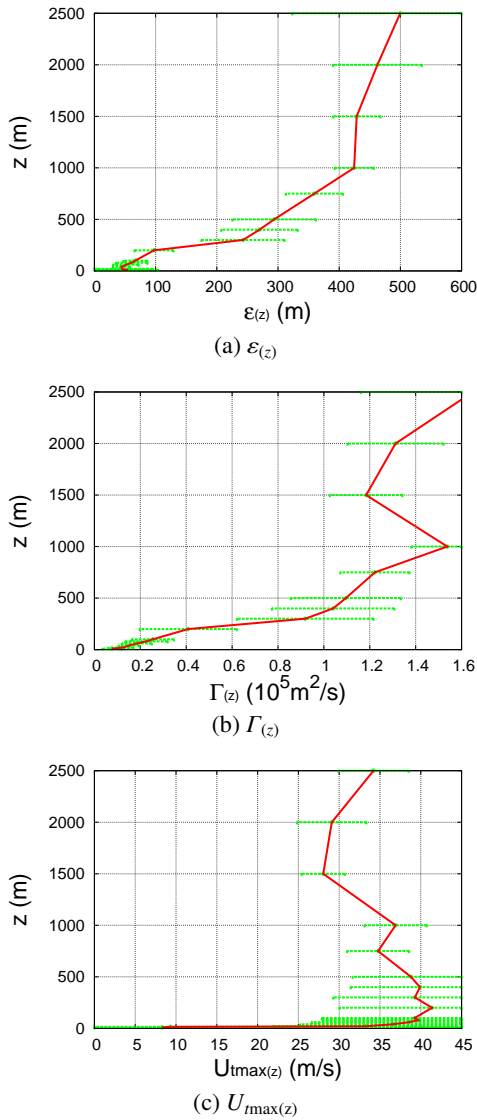


Figure 5 Vertical distributions of $\varepsilon(z)$, $\Gamma(z)$, $U_{\max(z)}$

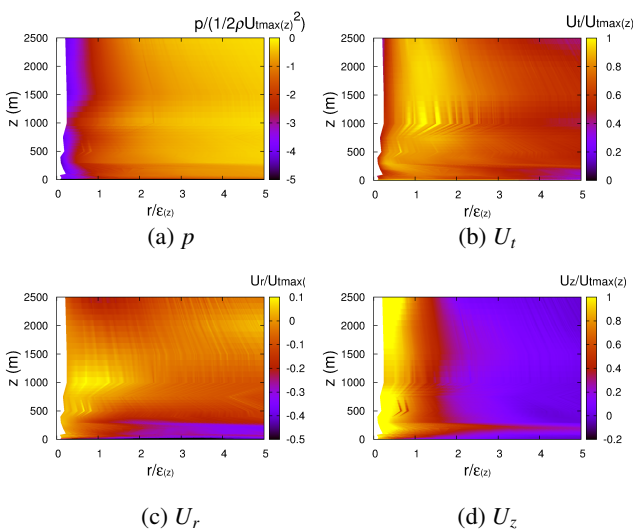


Figure 6 Distributions of p , U_t , U_r , U_z on r-z plane

3. 漏斗雲による可視化

(1) 解析概要

前節で作成した竜巻状流れに雲が発生する条件を与えることで漏斗雲による可視化を行った．ここで竜巻において漏斗雲が発生する基本プロセスは，竜巻中心付近の極端な圧力低下や高度変化に伴う圧力変化により，気温が下がることで飽和水蒸気量が低下し，空気中の水分が水滴となって形成すると考えられる．断熱変化を前提とすれば，任意点 (x, y, z) での温度 T は，竜巻状流れと高度変化による圧力低下から次式で求めることができる．

$$T(x, y, z) = T_0 + \Delta T = T_0 + \frac{P_f - P_0}{C_p \rho} - \Gamma_d(z - z_0) \quad (2)$$

ここで， T_0 , P_0 は基準座標 (x_0, y_0, z_0) における気温と大気圧， P_f は竜巻状流れによる圧力， C_p は定圧比熱， Γ_d は乾燥断熱減率， ρ は空気密度を表している．さらに基準位置における水蒸気量を a_0 ，湿度を RH ，任意点における飽和水蒸気量を a とすれば水滴が生じる条件は，

$$\frac{a_0}{a} = \frac{T + 273.15}{T_0 + 273.15} \times 10^{\frac{7.5T_0}{T_0 + 273.3} - \frac{7.5T}{T + 273.3}} \times RH \geq 1 \quad (3)$$

と表され，式 (3) の両辺が等しくなる座標が漏斗雲の生成面となる．Figure 7 にある瞬間の漏斗雲の様子を示す．この図からは，雲底面から竜巻中心付近の圧力低下により雲の生成面の高度が下がり，現実の漏斗雲のような形状が得られたことが分かる．

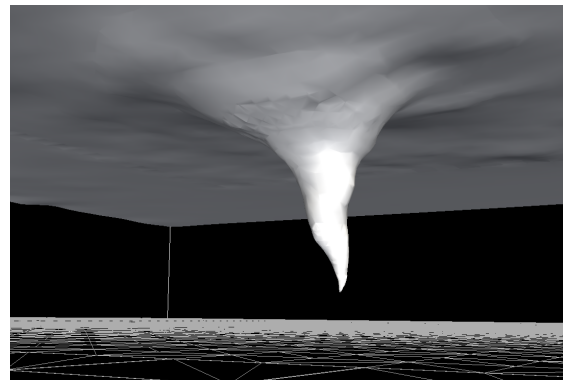


Figure 7 Tornado visualized by funnel cloud

(2) 漏斗雲の形状

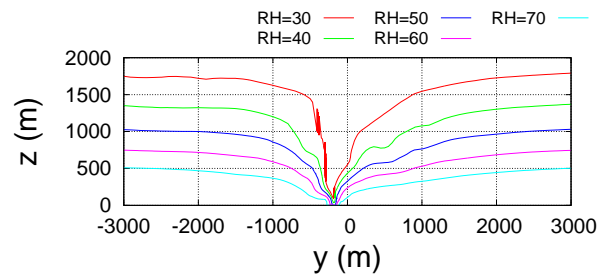
まず漏斗雲の形状と竜巻状流れの特性の関係を検討するために，漏斗雲により可視化した時々刻々変化する竜巻状流れのある瞬間 ($t = 47790s$) に注目し，湿度や最大接線風速，スケールを変化させることで漏斗雲の形状にどのような影響があるのかを検討した．

Figure 8(a) に湿度 RH を 30 ~ 70% に変化させた場合の漏斗雲の形状の変化を示す．この図より，基準座標での湿度が上昇するにつれ，雲底の高度が下がることが分かった．次に，湿度 RH を 60% とし，竜巻状流れ場に起因する圧力変化が代表風速の 2 乗に比例するという前提で， U_{\max} を 20 ~ 130m/s と変

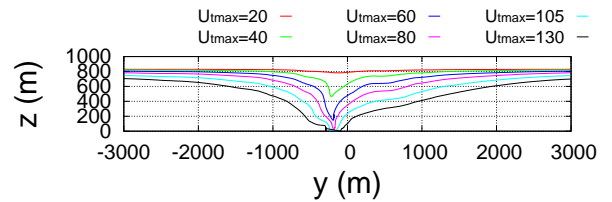
化させた場合の漏斗雲の形状の変化を Figure 8(b) に示す．この図からは，最大接線風速が増加することによって，竜巻状流れの中心付近で漏斗雲が低い高度に降りてくるのが分かる．また地表面に到達してからは，地表面での漏斗雲の幅が大きくなっていくことも分かる．これは竜巻が発生して成長していく過程で，漏斗雲が徐々に地表面に降りてくる様子や，衰退していく時に漏斗雲が短くなっていく現象と一致していると考えられる．Figure 8(c) には竜巻状流れのスケールを幾何学的に 0.5, 0.75, 1 倍に変化させた際の漏斗雲の形状の変化を示す．ここでは x, z 軸をそれぞれの高さ $z = 20\text{m}$ におけるコア半径 $\varepsilon(\text{m})$ を用いて無次元化している．この図からは，それぞれのコア半径を用いて無次元化した漏斗雲の幅が重なっていることから，地表面での漏斗雲の幅が竜巻状流れのスケールに比例していることが分かった．

次に漏斗雲が地上に達しているかないかの 2 つのパターンに分けて漏斗雲の形状から ε や U_{max} を推定する方法についての検討を行った．まず漏斗雲が地上に達していない場合は，Figure 9(a) のように，雲底から漏斗雲の先端までの漏斗雲長さ $H_f(\text{m})$ と，その中間での漏斗雲の幅である中間幅 $W_{fm}(\text{m})$ が画像等から読み取れると仮定し，これらのパラメータと竜巻状流れの特性の関係を定量的に検討した．前述した漏斗雲の発生条件より，漏斗雲長さは圧力低下量で決定されていることが分かるので， U_{max}^2 と漏斗雲長さ H_f の関係を Figure 10 に示す．この図から，湿度 RH と漏斗雲長さ H_f が分かれば Figure 10 から U_{max} を求めることが出来ると考えられる．そして得られた U_{max} から ε を求めるために，中間幅 W_{fm} と ε の比と U_{max} の関係を Figure 11 に示す．この図から湿度が違って同じような関係性がみられ，スケールを変化させてもほぼ一致した関係が得られたことが分かった．Figure 11 を用いれば，画像から得られる中間幅 W_{fm} と Figure 10 で求めた U_{max} から ε を求めることが出来ると考えられる．よって漏斗雲が地上に達していなければ，湿度と漏斗雲の形状から漏斗雲の強さと規模を推定できることが分かった．

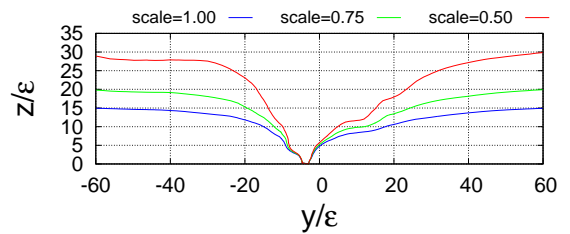
一方漏斗雲が地上に達している場合は，Figure 9(b) のように画像等から読み取れる有効な情報が漏斗雲の地上幅 $W_{f0}(\text{m})$ のみであると考えられるため，まず ε と W_{f0} の関係を Figure 12 に示す．この図より，両者の間には RH または U_{max} によって傾きが変化する直線関係が存在することが分かる．そこで，この傾きと RH または U_{max} との関係を求めると，Figure 13 のようになった．これらの図からも分かるように，地上幅 W_{f0} は湿度 RH と最大接線風速 U_{max} ，コア半径 ε によって決定される．漏斗雲が地上に達していない場合は漏斗雲長さから U_{max} を求めることが出来たので， ε まで推定することができたが，地上に達している場合は U_{max} と ε が未知の値となってしまうため，これらの情報だけでは竜巻状流れの特性を推定できないことがわかった．漏斗雲が地上に達している場合でも竜巻状流れの特性を推定できるようにするために，今後 U_{max} または ε の補間方法や別のアプローチから求める方法を検討する必要がある．



(a) Effect of RH ($U_{\text{max}}=105\text{m/s}$, scale=1)

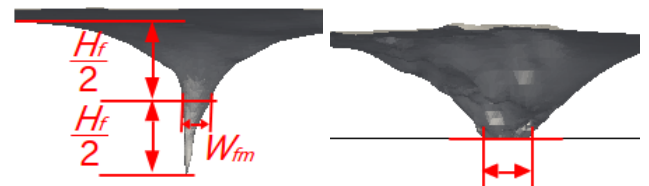


(b) Effect of U_{max} ($RH=60\%$, scale=1)



(c) Effect of scale ($U_{\text{max}}=130\text{m/s}$, $RH=60\%$)

Figure 8 Shapes of funnel clouds



(a) Case that clouds don't reach to the ground

(b) Case that clouds reach to the ground

Figure 9 Parameters of the funnel clouds obtained from the image

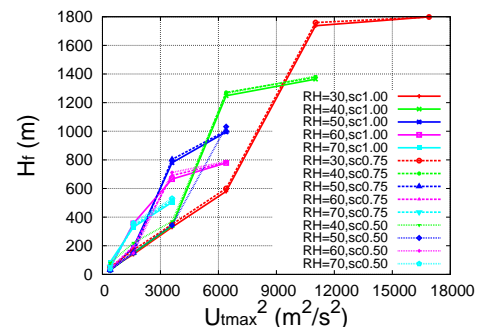


Figure 10 Relationship between U_{max}^2 and H_f

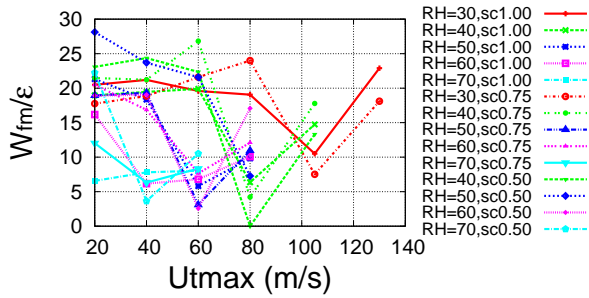


Figure 11 Relationship between U_{max} and W_{fm}/ϵ

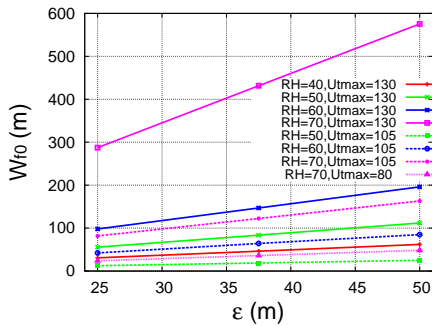


Figure 12 Relationship between ϵ and W_{f0}

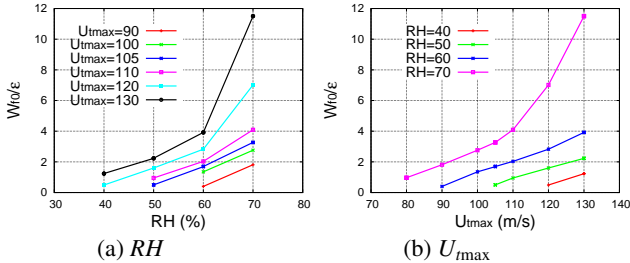


Figure 13 Relationship between W_{f0}/ϵ and RH, U_{max}

4. まとめ

本研究では、水平シアを与えることで現実的な実スケールの竜巻状流れを生成し、漏斗雲による可視化を行うことで、流れ場の特性と漏斗雲の見え方の関係を考察した。その結果、竜巻の画像等の中で、漏斗雲が地上に達していないものは、形状から竜巻の特性が推定可能であることを示したが、一方で漏斗雲が地上に達している場合は推定できないことが分かった。今後は地上に達している場合の推定に必要な情報の補間方法の検討を行い、漏斗雲がどのような形状でも竜巻の特性を推定できる評価方法の確立を目指したい。

5. 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 26282112, 15H04034 の助成を受けたものです。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) T.Theodore Fujita, " Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity ", Satellite & Mesometeorology Research Project Paper No.91, (1971)
- 2) 野田 稔, 岡本 力也, 山中 大輔, 細谷 顕史, 長尾 文明, " 漏斗雲と飛散物による竜巻の可視化に関する研究 ", 第 23 回風工学シンポジウム論文集, (2014), pp385-390
- 3) 野田 稔, 八谷 実, 西村 公成, 長尾 文明, " 水平シアによって生じた竜巻状流れ場の構造と漏斗雲の生成 ", 日本流体力学学会年會講演論文集, (2015)
- 4) OpenCFD Ltd, "OpenVFOAM ", <http://www.openfoam.org>, (2014)
- 5) Burgers, J. M., " A mathematical model illustrating the theory of turbulence ", Advances in Applied Mechanics, (1948), pp171-199