

竜巻状流れの可視化に関する研究～漏斗雲による竜巻特性推定～

徳島大学大学院 学生会員 西村 公成 徳島大学 正会員 野田 稔  
徳島大学大学院 学生会員 八谷 実 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

竜巻はあらゆる甚大な被害を与える可能性があり、竜巻の対策を行うには竜巻の基本特性を解明する必要がある。現在日本では竜巻の強さを推定する方法として、地物に残された被害に基づいたフジタスケール<sup>1)</sup>が用いられているが、これはあくまで被害に基づくものであるため、竜巻による被害が確認できない場合は風速が推定できないという問題がある。その一方で、最近竜巻発生時に一般市民が竜巻を撮影し、画像や映像が記録されるようになり、竜巻に付随する漏斗雲や飛散物を確認できるようになった。そこで本研究では撮影された竜巻の画像や映像に注目し、数値流体解析によって作成した竜巻状流れ場を用いて、漏斗雲の見え方に対する竜巻特性の影響を検討し、漏斗雲の画像から竜巻特性を読みとることの可能性について考察した。

2. 解析概要

本研究では数値流体解析で得られた竜巻状流れ場に雲の発生条件を与えて漏斗雲を可視化する。その雲の発生条件については実スケールの竜巻を想定しており、断熱変化を前提として竜巻状流れ場による圧力低下と高度変化による圧力低下を考慮し、任意の場所の気温  $T(x, y, z)$ 、飽和水蒸気量  $a(x, y, z)$  を算出した。また、雲は空気中の基準位置における水蒸気量  $a_0$  が飽和水蒸気量  $a(x, y, z)$  を超えたとき発生するので雲の発生条件式は、 $a_0/a = 1$  となる。この雲の発生条件式を用いて雲を可視化させた上で、竜巻流れ場の流入口に生じる平均圧力を基準圧とした時々刻々の気圧変化を算出し、竜巻状流れの瞬間ごとのデータから、漏斗雲のアニメーションを作成した。また、湿度、地上の温度、最大接線風速、竜巻状流れ場のスケールを変えて漏斗雲の形の比較を行い、地上に達している漏斗雲の幅、地上に達していない漏斗雲の長さ、漏斗雲の中間幅により竜巻の風速などを推定することが可能かどうかについて検討した。

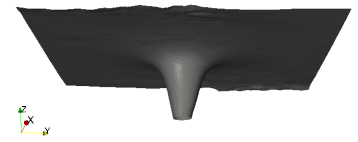
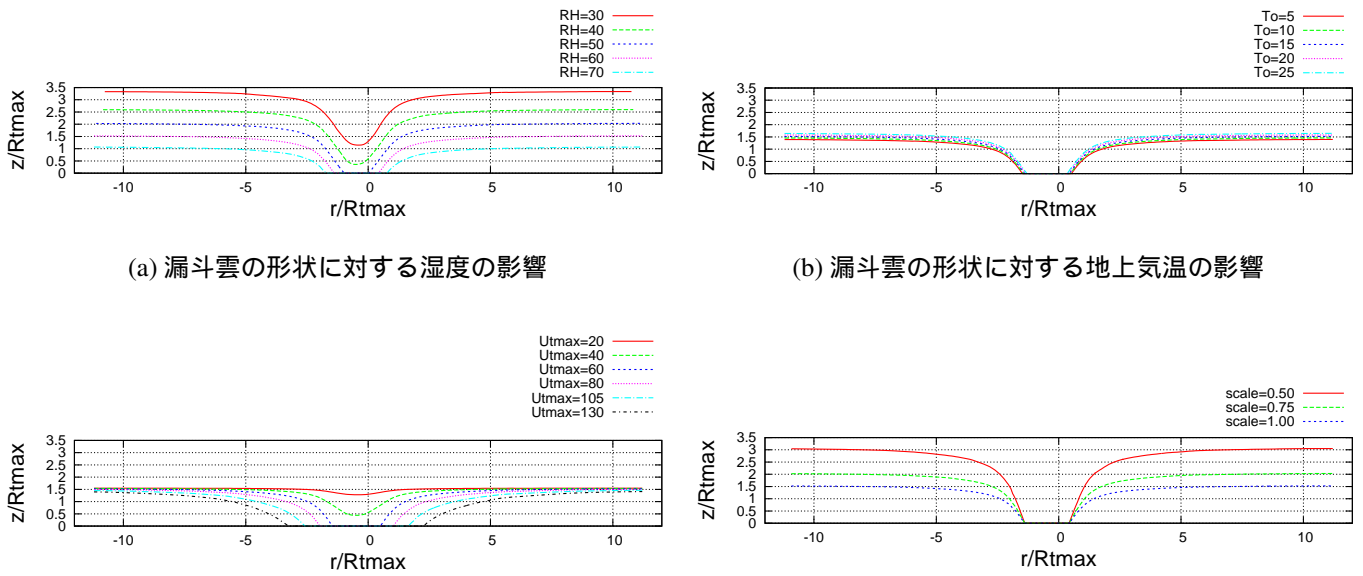


図-1 可視化させた漏斗雲

3. 解析結果・考察

図-2(a) に、湿度  $RH(\%)$  を  $30\% \sim 70\%$  で  $10\%$  ごとに変えて漏斗雲を可視化させた結果を示す。この結果から湿度が低くなるほど高い高度で漏斗雲ができることがわかる。



(a) 漏斗雲の形状に対する湿度の影響

(b) 漏斗雲の形状に対する地上気温の影響

(c) 漏斗雲の形状に対する最大接線風速の影響

(d) 漏斗雲の形状に対する竜巻状流れ場のスケールの影響

図-2 無次元化された漏斗雲の断面図

これは、湿度が低いほど、気温が低くなる高い高度でないと空気中の水蒸気量が飽和水蒸気量を超えて雲が発生しないためである。次に、図-2(b)に、地上の温度  $T_0$  ( ) を 5 ~ 25 で 5 ごとに変え、漏斗雲を可視化させたものを示す。この結果より、 $T_0$  は漏斗雲の形に大きく影響を与えていないことが分かった。さらに、図-2(c)に、最大接線風速  $U_{tmax}$ (m/s) を 20(m/s) ~ 130(m/s) と変え、漏斗雲を可視化させたものを示す。この特徴として最大接線風速が大きくなるにつれ漏斗雲は地上に降りてきている点が挙げられる。このことから強い竜巻ほど漏斗雲の先は地上に伸びている傾向があると考えられる。そして、竜巻状流れ場のスケールを元の 0.50 倍, 0.75 倍, 1.00 倍と変化させて、漏斗雲を可視化させたものを図-2(d)に示す。これより、地上に達している漏斗雲の幅は、竜巻流れ場のスケールを小さくするほど小さくなっており、地上での漏斗雲の中心からの距離  $r$ (m) を無次元化した値がどのスケールでも同じ値になっているため、地上での漏斗雲の中心からの距離  $r$ (m) は竜巻状流れ場のスケールに比例することが分かる。

ここで、漏斗雲が地上に達している場合は漏斗雲の地表面における幅  $W_{f0}$ (m)、地上に達していない場合は漏斗雲の長さ  $H_f$ (m) と漏斗雲の中間幅  $W_{fm}$ (m) から最大接線風速、最大接線風速半径を推定することを試みた。ここで漏斗雲の中間幅  $W_{fm}$ (m) は、漏斗雲の雲底と先端の中間の高さにおける幅と定義する。 $R_{tmax}$  と  $W_{f0}$  の関係を図-3(a)に示すが、両者の間には、RH によって傾きが変化する直線関係が存在する。そこで、この傾きと RH の関係を求めたところ、図-3(b)のようになった。一方で、 $U_{tmax}$  と  $R_{tmax}/W_{f0}$  の図の関係は全ケースにおいて図-3(c)に示すとおりとなった。従って、RH が与えられれば、図-3(b)(c)の関係から  $R_{tmax}$  と  $U_{tmax}$  が  $W_{f0}$  より推定可能と考えられる。次に、漏斗雲が地表面に達していない場合、 $H_f$  と  $U_{tmax}$  には図-3(d)の関係が認められた。圧力低下量が  $U_{tmax}$  の 2 乗に比例することから、 $H_f$  と  $U_{tmax}^2$  との関係を求めると図-3(e)のようになり、両者は線形関係となった。一方で、中間幅  $W_{fm}$  と  $U_{tmax}$  の関係は図-3(f)のように RH で変化する曲線で表されることが分かった。従って RH が分かればこの関係より  $R_{tmax}$  を推定可能と考えられる。今後  $U_{tmax}$  と  $W_{fm}/R_{tmax}$  の関係に対する RH の影響について検討することで、竜巻特性の推定法を向上させることができると考えられる。

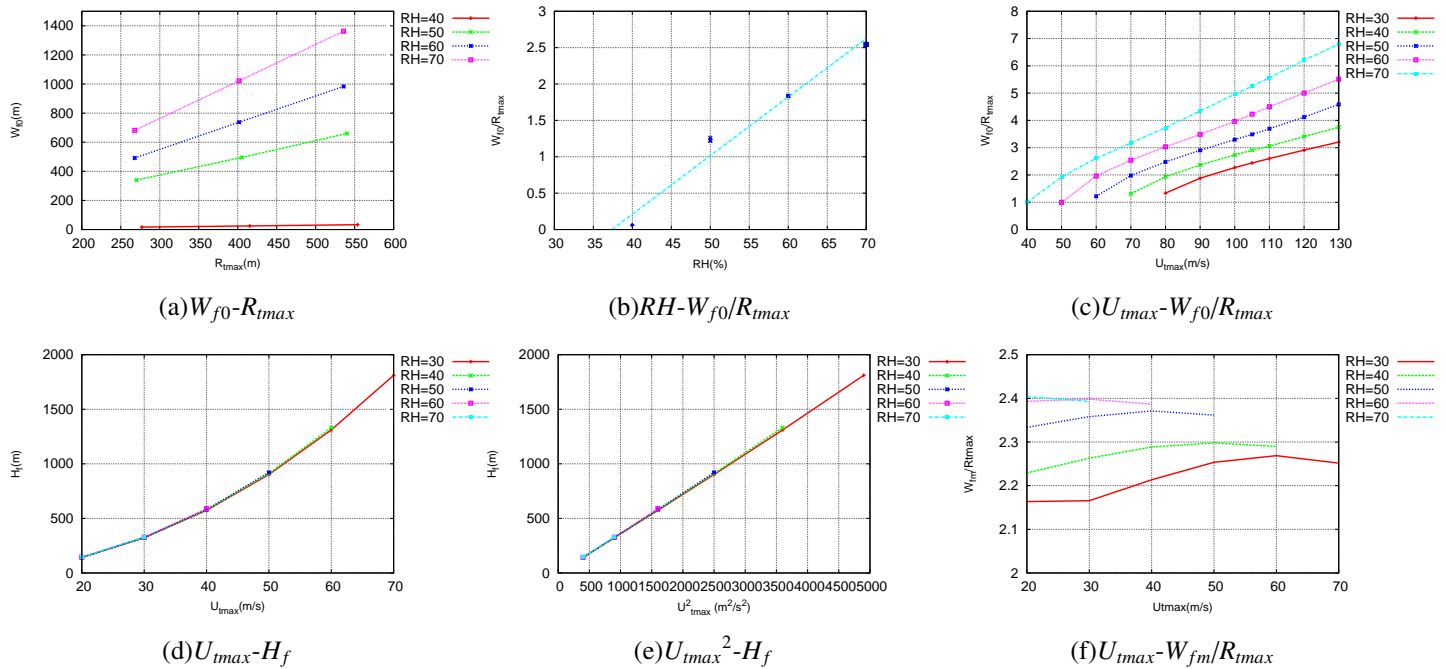


図-3 漏斗雲の地表面における幅、長さ、中間幅の竜巻パラメータとの関係

4. おわりに

これらの結果から、それぞれのパラメータが漏斗雲に及ぼす影響が明らかとなり、漏斗雲の地表面における幅、長さ、中間幅から竜巻の特性の推定が可能であることを示した。したがって、竜巻の写真や映像から竜巻の特性の推定が可能と考えられる。また、飛散物の動きなども考慮することにより、竜巻の評価方法の高度化が期待できる。

5. 謝辞

本研究の遂行においては、JSPS 科研費 (24560583, 26282112) および東京工芸大学風工学共同研究拠点共同研究の助成を受けた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁；竜巻等の突風データベース