【Ⅰ－11】

竜巻の漏斗雲の見え方に関する研究

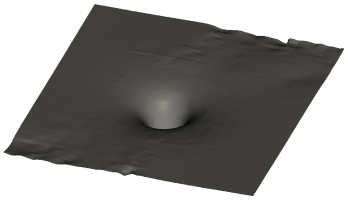
徳島大学大学院　学生会員　○西村 公成　徳島大学　正会員　野田 稔
徳島大学大学院　学生会員　八谷 実　徳島大学　フェロー　長尾 文明

1. はじめに

竜巻の対策を行う際，竜巻の基本特性を解明する必要があり，現在日本では竜巻の強さを推定する方法として，被害に基づいたフジタスケール[1)]が用いられている．しかし，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分からないという大きな問題が存在する．一方，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，その画像や映像からは竜巻が発生したことにより生成された漏斗雲や飛散物を確認できる．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，漏斗雲を可視化していく．漏斗雲が竜巻によって発生する過程は，竜巻中心付近の圧力が極端に低下し，気温が低くなるため飽和水蒸気量が小さくなり，空気中の水蒸気が水滴となったものが集まって雲になっていると考えられる．そこで，本研究では実スケールの竜巻を想定しているため断熱変化を前提とし，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て，任意の場所の気温，飽和水蒸気量を求めた．ここで，竜巻内の任意点の気圧 $P(x,y,z)$ は，基準点に対する流れ場による気圧変化 ΔP_f と高度によって決定される気圧変化 ΔP_z の和によって式 (1) のように表すことができる．また，基準点からの温度変化 ΔT は断熱変化を前提としているので，式 (2) となる．



図–1 可視化させた漏斗雲

$$P(x,y,z) - P_0 = P_(x,y,z) = \Delta P_f + \Delta P_z \quad (1) \qquad \Delta T = \frac{\Delta P}{C_p\,\rho} = \frac{\Delta P_f}{C_p\,\rho} - \frac{g}{C_p\,\rho}\Delta Z = \frac{\Delta P_f}{C_p\,\rho} - \Gamma_d \Delta Z \quad (2)$$

ここで，C_p は定圧比熱であり，空気に対しては 1006J/kg K，Γ は乾燥断熱減率であり，0.00976K/m である．従って，任意点 (x,y,z) における気温 T は式 (3) となる．また，基準位置 (x_0,y_0,z_0) における大気圧と気温をそれぞれ P_0,T_0 とすれば湿度が RH の空気の基準位置における水蒸気量 a_0 は式 (4) である．

$$T(x,y,z) = T_0 + \Delta T = T_0 + \frac{P_f - P_0}{C_p\,\rho} - \Gamma_d(z - z_0) \quad (3) \qquad a_0 = \frac{217}{T_0 + 273.15} \times 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_0}{T_0+237.3}} RH \quad (4)$$

任意点における飽和水蒸気量 $a(x,y,z)$ は式 (5) となるので，漏斗雲の表面では式 (6) を満たす．

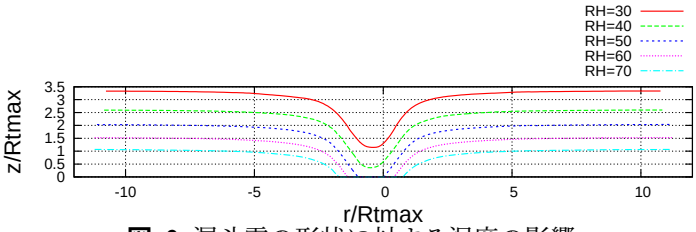
$$a(x,y,z) = \frac{217}{T_0 + 273.15} \times 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T}{T+237.3}} \quad (5) \qquad \frac{a_0}{a} = \frac{T + 273.15}{T_0 + 273.15} \times 10^{\frac{7.5T_0}{T_0+237.3} - \frac{7.5T}{T+237.3}} \times RH = 1 \quad (6)$$

この雲の発生条件式を用いて雲を発生させた上で，竜巻流れ場の流入口に生じる平均圧力を差し引くことにより，流入口を基準点とする時々刻々の気圧変化を算出しており，竜巻状流れの 0 秒～50000 秒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，漏斗雲の形の比較を行い，各パラメータの影響を検討する．

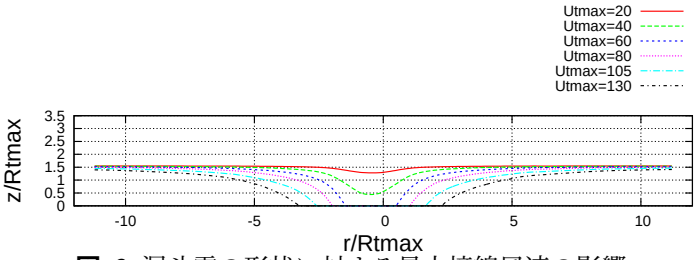
3. 解析結果・考察

はじめに，最大接線風速 U_{tmax}=58m/s に設定し，湿度 RH を 30 %～70 %で 10 %ごとに変え，漏斗雲を可視化させたものを図–2 に示す。図から見受けられる特徴としては，湿度が低くなるほどに高い高度で漏斗雲ができているのが分かる。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ことを示しているといえる。

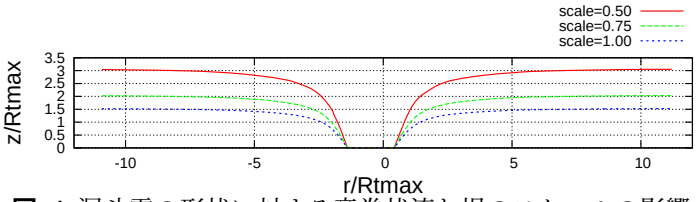
また，漏斗雲の地上の温度 T_0 による影響についての比較も行ったが，影響がほぼないことが分かったので，以下は地上の温度 T_0 を 15.4 ℃ (東京都の年平均気温) に設定する．図–3 に湿度 RH=60 %に設定し，フジタスケールによる推定風速 F0～F5 を想定して補正した風速ごとに変え，漏斗雲を可視化させたものを示す．フジタスケールの最大接線風速を F0=20m/s,F1=40m/s,F2=60m/s,F3=80m/s,F4=105m/s,F5=130m/s とする．ここでは，ベルヌーイの定理を用いて竜巻状流れによる圧力を補正し，竜巻状流れの最大接線風速ごとの漏斗雲の影響をみた．特徴としては，最大接線風速が大きくなるにつれて漏斗雲は地上に降りてきていることが分かる．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にあるといえる．図–4 は，竜巻状流れ場のスケールによる影響を調べるために，竜巻状流れ場のスケールを元の 0.50 倍，0.75 倍，1.00 倍と変化させて比較を行ったものを示したものである．



図–2 漏斗雲の形状に対する湿度の影響

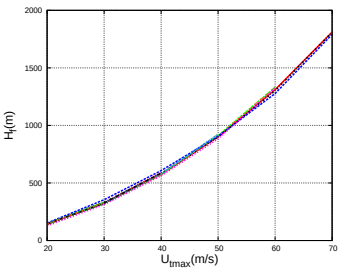


図–3 漏斗雲の形状に対する最大接線風速の影響

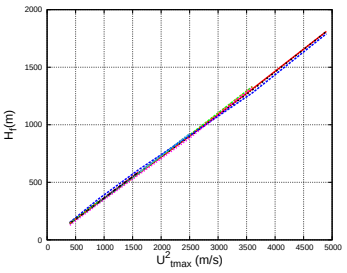


図–4 漏斗雲の形状に対する竜巻状流れ場のスケールの影響

なお，湿度 RH=60 %，最大接線風速 U_{tmax}=58m/s に統一し，比較を行なっている．特徴としては，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．このことから，竜巻流れ場のスケールを小さくするほど，地上に達している漏斗雲の幅は小さくなり，漏斗雲の地上での中心からの距離 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．また，図–5 は竜巻状流れ場のスケールを変化させて漏斗雲の先端が地表面に届いていない場合の漏斗雲の長さ H_f と最大接線風速 U_{tmax} の関係を重ねたものであるが，どのスケールでもほぼ同じ関係になっている．さらに，図–6 は，図–5 の横軸 U_{tmax}(m/s) を U_{tmax}(m/s) の二乗に変えたもので，U_{tmax}(m/s) の二乗と漏斗雲の長さ H_f(m) が比例関係となっていることを示している．これらの結果から，漏斗雲の先端が地上に届いていない場合の漏斗雲の長さ H_f による最大接線風速 U_{tmax}(m/s) の推定は可能であり，漏斗雲の長さ H_f と最大接線風速半径 R_{tmax}(m/s) の湿度 RH との関係性を示せば，竜巻の大きさの推定につなげることもできると考えられる．



図–5 漏斗雲の長さと最大接線風速半径の関係



図–6 漏斗雲の長さと最大接線風速半径の 2 乗の関係

4. まとめ

以上の結果から，それぞれのパラメータが漏斗雲に及ぼす影響を明らかにすることができた．

本研究では漏斗雲に注目したが，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) 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