

竜巻状渦に及ぼす地表面粗度の水平配置および高さの影響 Effects of the Distribution and Height of Roughness Obstacles on Tornado-like Vortices

○ 佐藤宏樹・竹見哲也
○ Hiroki SATO, Tetsuya TAKEMI

As tornadoes are rarely reported in large cities, they seem to somewhat suffer resistance from surface roughness. To reveal how surface roughness affect to tornado-like vortices, Large Eddy Simulation was applied on Ward type Simulator, changing height and horizontal distribution density of roughness Blocks. For horizontal distribution density, maximum tangential wind speed was lowest when the block occupied 25% of the ground area: further increasing in density rather strengthened vortices. Increasing block height, on the other hand, always lowered maximum tangential wind speed. To reveal this mechanism, we focused on angular momentum distribution and its depletion flux. Tall roughness blocks accompanied deep low-angular momentum layer, and this layer intruded vertically into the central axis of the vortex. Horizontal density seems to determine the angular momentum depletion rate from the inflow value, and by multiplying this rate with block height, the total depletion flow flux is determined. This may be the mechanism suppressing tornadoes from forming in large cities (158 words).

1. 導入

英国のロンドンや米国のシカゴなどの大都市の都心部では、周辺と比べて竜巻報告数が少ないことが知られている (Elsom and Meaden, 1982)。このことから、竜巻は地表面構造物の影響を受けていることが示唆される。

粗度が竜巻状渦に及ぼす影響を調べた研究は多数あり、粗面上では滑面上と比べてスワール比(循環と流量の比)が小さい場合に対応する渦ができることが知られている (Zhang and Sarkar, 2008 など)。しかし、これらの先行研究では、粗度の配置形態を様々に変化させて実験を行ったものは見られず、粗度の配置状態がどのように竜巻状渦に影響を与えるかは知られていない。

本研究では、粗度ブロックの水平配置と高さを変化させて実験を行い、粗度ブロック配置状態が竜巻状渦に与える影響を調べた。

{8 m, 16 m, 32 m, 64 m} から一様な値を設定した。これらのブロックは格子状に配列しており、その水平配置密度は、 $\lambda_p \in \{0.016, 0.032, 0.250, 0.444\}$ の 4 通りの設定を行った (λ_p : 地表面積に占めるブロック底面積の割合)。領域底面およびブロックの表面は滑り無しの固体壁とした。以降、例えば $\lambda_p = 0.250$, $h = 32$ m の実験を L250H32 などと表記し、粗度ブロックなしの実験を NOBLOCK と表記する。

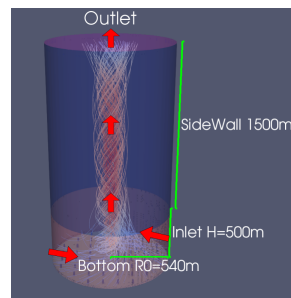


図 1: Overview of simulation

2. 実験設定

計算には OpenFOAM v2006 (OpenCFD Ltd.) の非圧縮流れ用ソルバ *pimpleFOAM* を用いた。LES には、ダイナミック k 方程式モデルを用いた。

計算領域は底面半径 540 m、高さ 2000 m の円筒形であり、この下側 500 m の側面は流入部、上面は流出部になっている。流入風速の動径成分 U_r^{in} 、接線成分 U_θ^{in} はそれぞれ次式の通りである。

$$U_r^{in} = -u_{10}(z/z_{10})^{1/7} \quad (1)$$

$$U_\theta^{in} = -2(SD/R_0) U_r^{in} \quad (2)$$

ここで $u_{10} = 7.0 \text{ ms}^{-1}$ 、 $z_{10} = 10 \text{ m}$ 、 $D = 500 \text{ m}$ 、 $R_0 = 540 \text{ m}$ であり、また $S = 0.28$ はスワール比である。

粗度ブロックは底面が $16 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ の正方形をしており、高さは実験ごとに $h \in$

3. 結果、考察

以降、時刻 420 – 600s の 180 秒間で時間平均した場について説明する。図 2 は、各実験の最大接線風速の分布である。ブロック高さ一定の場合を比較すると、 $\lambda_p = 0.250$ にて最大接線風速は最小となり、より配置密度の大きい $\lambda_p = 0.444$ ではむしろ最大接線風速が大きくなっていった。

図 3 は L250H64 実験における、軸まわりに周平均した場の角運動量分布である。ベクトルで、周平均した(動径, 鉛直)風速も表示している。粗度ブロックを配置した底面に沿って角運動量の減衰した層が形成されていた。低角運動量の層は中心軸に沿って鉛直方向にも形成されていた。これらの層はつながって(動径-鉛直)断面内で L 字型の構造を成していた。

Lewellen et al., (2000) は、局所コーナー流スワール比を定義するうえで、損失角運動量流束を次のように定義した。

$$\Upsilon = \int_A (\Gamma - \Gamma_\infty) U_z dS \quad (3)$$

ここで、 U_z は鉛直風速、 Γ は単位質量あたりの角運動量である。積分はコーナー流域直上の水平面においてなされる。コーナー流より下流では角運動量流束がほぼ保存されるものと考え、高度 $z = 500$ m、にて $\Gamma < \Gamma_\infty$ の範囲で面積分を行った。その結果を図 4(a) に示す。ここで、 $\Gamma_\infty = 2500 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ とした。最大接線風速の傾向と同様に、減衰角運動量流束は $\lambda_p = 0.250$ にて負の方向に最大となっており、またブロックの高さが増す程大きくなっていった。

図 5 は、ブロック上面の高さよりやや下の水平断面における損失角運動量流束 ((3) 式の被積分関数) の分布である。ただし、ここでは $\Gamma_\infty = \Psi_h / \Phi_h$ 、 $\Phi_h = \int_0^{2\pi} R_0 d\theta \int_0^{h-1} dz (-U_r^{in})$ 、 $\Psi_h = \int_0^{2\pi} R_0 d\theta \int_0^{h-1} dz R_0 U_\theta^{in} (-U_r^{in})$ としてある。また、この流束を水平断面全体に渡って積分した結果を図 4(b) に示す。図 4(a) と 4(b) は同様の傾向を示していることから、粗度ブロック高度以下の流体に生じた損失角運動量が、ブロックの隙間から上向きに噴き出す流れに輸送されて上方の渦にもたらされていたことが示唆される。また、その高度以下の側面からの流入量 Ψ_h で図 4(b) の Υ を規格化すると、流入量に対する減衰率はブロックの高さによらずほぼ一定であった (図略)。水平配置により流入に対する角運動量損失率が定まり、またそれに角運動量損失を受けた流体体積をかけることで、最終的な Υ が定まるものと考えられる。
 $\lambda_p = 0.444$ では $\lambda_p = 0.250$ の場合よりブロック高度以下の流体体積が 74% しかない。そのため Υ の大きさは $\lambda_p = 0.250$ にて最大になったものと思われる。また、図 2 及び図 4(a) に見られる $\lambda_p = 0.25$ での極値は、図 4(b) ほど極端ではない。図 5(b) のように、 λ_p が大きくなると角運動量流束の大きい領域が筋状に組織化することで、中心軸付近での角運動量損失の影響が緩和されていたものが見られる。

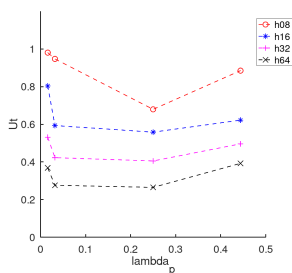


図 2: Maximum tangential wind speed, normalized by that of NOBLOCK experiment.

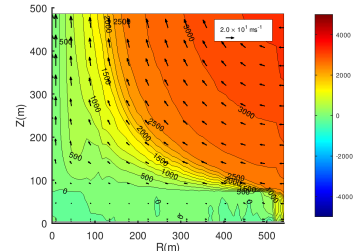


図 3: Azimuthal mean angular momentum distribution in L250H64

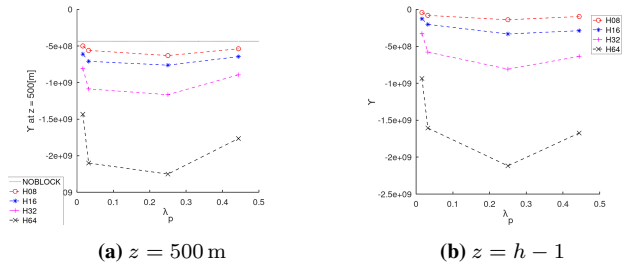


図 4: Total Depleted angular momentum flow flux (Υ)

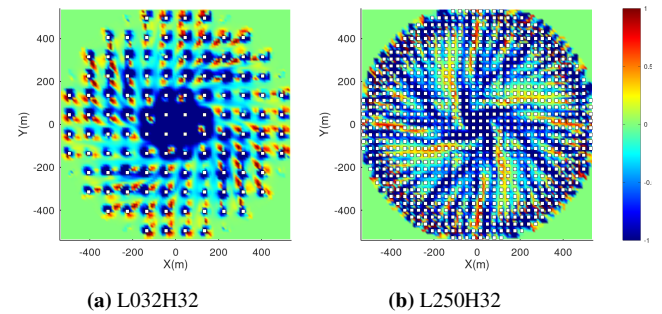


図 5: (Υ/Ψ_h) at $z = h - 1$ [m]

4. まとめ

粗度ブロックの水平配置密度により渦を減衰させる効果には上限 ($\lambda_p = 0.25$ 付近) があり、一方粗度ブロックの高さについては、高ければ高いほど著しく渦を減衰させることが示された。これについて、粗度ブロックにより生じる損失角運動量流束から考察した。

本研究より、大都市において竜巻報告数が少ない理由として、背の高い建築物がある程度の配置密度で並んでいることで竜巻を減衰させやすい構造を実現しているためである、という可能性が示唆された。

参考文献

- [1] Elsom, D.M., Meaden, G.T., (1982). Monthly Weather Review 110, 745-756
- [2] Lewellen, D.C., Lewellen, W.S., Xia, J., (2020). Journal of the Atmospheric Science 57, 527-544
- [3] Zhang, W., Sarkar, P.P., (2008). Proceedings of the AAWE workshop, Vail, Colorado