

粗面へと移動する竜巻を模した数値流体解析  
CFD simulation on tornado-like vortices translating to rough surface

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

Using Large Eddy Simulation, the transitional states of tornado-like vortices translating to rough surface were studied. When a low-swirl vortex translated to a surface with large roughness, the vortices eventually lost intensity and collapsed. On the other hand, when a high-swirl vortex translated to a surface with small roughness, the vortices were rather intensified. In any case, temporal increase of the wind speed occurred when the vortex approaches the interface between the smooth surface and the rough surface. When translation speed is large enough, this intensified wind appeared over rough surface. As the vortex moved over the rough surface, the pressure drop at the central axis of the vortex decreased at first just above the ground surface. Then this change in pressure structure propagated to the upper level. It seems that whether the vortex structure is sustained just above the ground surface strongly influence on the sustainability of the entire vortex structure (152 words).

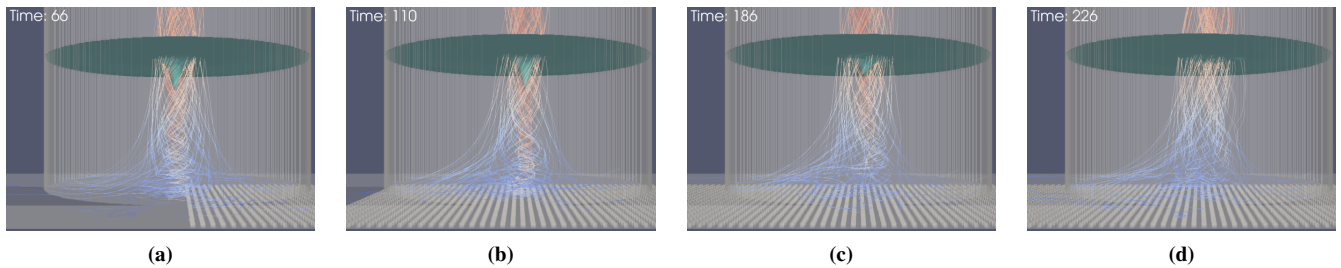


図 1: Streamlines and iso-surface of pressure. (RoughII,  $S = 0.12$ ,  $c = c_2$ )

## 1. 導入

海上で発生した竜巻が上陸する際、弱い渦は上陸後すぐに消滅する [1] 一方、たとえば 2006 年延岡竜巻 [2] など、比較的強力な渦については上陸後勢力をたもったまま数キロメートルにわたって被害をもたらす場合があることが知られている。このように、竜巻が粗度の異なる地表面へと移動する際に生じる強度・構造変化を調べるため、理想的な数値流体解析を行った。

## 2. 数値実験の設定

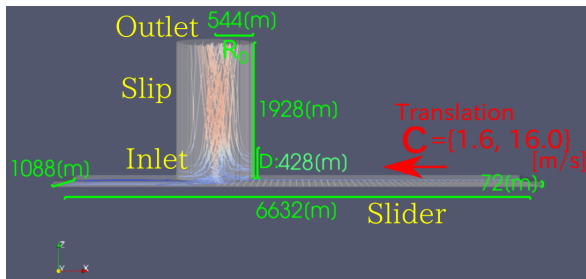


図 2: Computational domain

流体計算には OpenFOAM v2006 (OpenCFD Ltd) を用いた。計領域の概要を図 2 に示す。計算領域は半径  $R_0 = 544$  m, 高さ 1928 m の円筒部と、長さ 6632 m, 幅 1088 m, 高さ 72 m の可動部からなる。円筒部の側面のうち下側  $D = 428$  m は流入域となっており、ここに次のような流入風を与えた。

$$U_{r,in} = -u_0(z/z_1)^{1/7} \quad (1)$$

$$U_{\theta,in} = -2(D/R_0)SU_{r,in} \quad (2)$$

$$U_{z,in} = -1/2u_0 \quad (3)$$

ここで、 $u_0 = 7 \text{ m s}^{-1}$ ,  $z_1 = 10 \text{ m}$  である。また  $S$  はスワール比と呼ばれ、渦の構造に対して支配的な影響を与える量である。本研究では  $S = 0.12, 0.28$  の 2通りの値を設定した。円筒部上端は流出域となっている。

図 2 のように、可動部は円筒部に対して一定速度  $c$  で相対運動し、これにより渦の底面に対する相対運動を表す。相対運動速度は、 $c_1 = 1.6 \text{ m s}^{-1}$  および  $c_2 = 16 \text{ m s}^{-1}$  の 2通りの設定を行った。可動部の右側には粗度ブロックが配置した。ブロックの底面は  $16 \text{ m} \times 16 \text{ m}$  の正方形であり、水平配置密度  $\lambda_p$  と高さ  $h$  の組は RoughI ( $\lambda_p = 0.032$ ,  $h = 8 \text{ m}$ ), RoughII ( $\lambda_p = 0.250$ ,  $h = 16 \text{ m}$ ), RoughIII ( $\lambda_p = 0.111$ ,  $h = 64 \text{ m}$ ) の 3通りである。可動部の底面および粗度ブロックの表面には滑りなし境界条件を適用した。その他の壁面、および可動部上面のうち円筒部と接していない部分には自由すべり境界条件を課した。

流れは非圧縮とした。計算には Large Eddy Simulation を用いた。すなわち、格子解像度以上の場については直接計算し、格子解像度以下の乱流の影響は、標準 Smagorinsky モデルの渦粘性係数により取り入れた。計算格子解像度は大域で水平  $\Delta x, \Delta y = 2-8 \text{ m}$ , 鉛直  $\Delta z = 2-86 \text{ m}$  であり、さらに壁面近傍では  $10^{-1} \text{ m}$  程度まで解像している。

はじめ、可動部を静止させた状態で 600 s かけて準定常な渦を作成した後、可動部の運動を開始した。この時点時刻  $t = 0$  とする。

## 3. 結果と考察

図 1 は (RoughII,  $c = c_2$ ,  $S = 0.12$ ) 実験の結果を流線と等圧面によって可視化したものである。はじめ、螺旋状の流線と漏斗型に窪んだ等圧面により竜巻状の流れ場が確認された (図 1(a))。粗面上へと移動後、しばらくの間はこの構造を保っていたが (図 1(a),(b))、やがて底面付近から構造がくずれはじめ (図 1(c))、最終的にこれらの構造が目立たなくなった (図 1(d))。

図3は  $c = c_2$  実験における、底面から高度 100 m 以下での最大風速を表す。ここで  $X$  は粗面上の渦の移動距離であり、 $X < 0$  は渦が粗面に到達する前の状態を表す。また、初期時刻  $t = 0$  での最大風速を破線で示す。 $S = 0.12$  の場合、粗面上に移動後、最終的に初期時刻よりも最大風速が減少した。一方、 $S = 0.28$ , RoughI および RoughII の場合は粗面上へと移動後にむしろ最大風速が増大した。いずれの場合についても、粗面上に移動後一時的な風速強化が見られた。

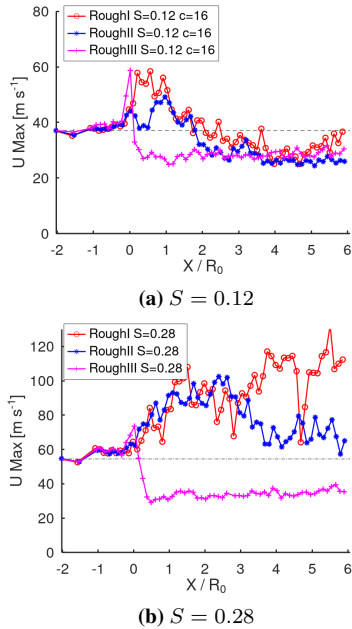


図 3: Comparison of the maximum wind speed among cases ( $c = c_2$ ).

次に、移動速度の異なる実験の結果を比較する。図4は、(RoughII,  $S = 0.12$ ) について  $c = c_1, c_2$  の最大風速を比較したものである。渦の移動速度の小さい  $c = c_1$  実験では滑面-粗面境界付近で風速強化が見られた後、粗面上に移動後すぐに風速が減衰した。一方、移動速度の大きい  $c = c_2$  実験では粗面上に移動後に風速強化が起きていた。いずれの場合も、風速強化が見られた時間の幅は同程度であった(図略)。このことから、 $c = c_2$  では、渦移動に関する

時間が渦の変形に関する時間に対して同程度以上であったために、渦の構造変化に伴う過渡的な強風が粗面上で現れたものと考えられる。

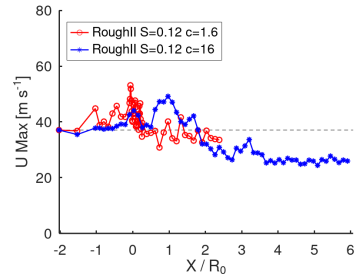


図 4: Comparison of the maximum wind speed between the cases with different translation speed:  $c = c_1$  and  $c = c_2$  (RoughII,  $S = 0.12$ ).

竜巻状の渦においては、圧力傾度力と遠心力が釣り合うようにして接線風速が定まる。よって、風速を維持・強化するためには低圧部を維持することが重要であると考えられる。図5は、(RoughII,  $S = 0.12$ ,  $c = c_2$ ) 実験における非静水圧  $p$  の等圧面と、その圧力勾配力を表す。渦が粗面上に移動後すぐに、滑面上にてみられた  $p/\rho = -1000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  の等値面(青色)が見られなくなった。このように、粗面上へと移動後瞬時に圧力構造が変化したことが分かる。竜巻状渦の中心付近は強力な上昇気流の場であることから、底面近傍で生じた状態変化が上方へと移流され、渦全体の圧力分布が変化するものと考えられる。

以上から、構造物の影響を強く受ける底面近傍にて渦の構造が維持できるか否かが、渦全体の持続可能性に大きな影響を与えるものと考えられる。

#### 参考文献

- [1] Miglietta, M.M., Matsangouras, I.T., (2018) An updated "climatology" of tornadoes and waterspouts in Italy. International Journal of Climatol-ogy 38, 3667-3683
- [2] 宮城弘守、菊川裕規、松井正宏、曹曙陽、田村幸雄 (2007) 2006 年台風 13 号に伴って発生した竜巻による延岡市の被害調査速報. 日本風工学会誌 32, 47-59

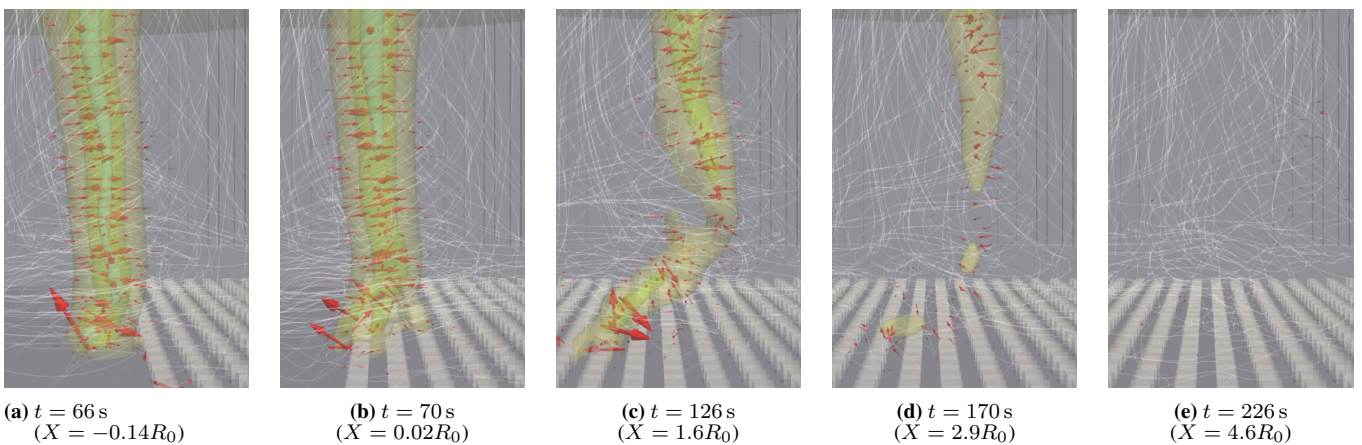


図 5: Iso-surface of non-hydrostatic pressure and pressure gradient force (vector) (RoughII,  $S = 0.12$ ,  $c = c_2$ ).