

## LES による竜巻状旋回流に関する研究 A Numerical Study of Tornado-like Vortices using Large Eddy Simulation

- ファム バン フック, 清水建設 (株), 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-14-10, p\_phuc@shimz.co.jp  
野津 剛, 清水建設 (株), 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-14-10, nozu@shimz.co.jp  
野澤 剛二郎, 清水建設 (株), 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-14-10, nozawa@shimz.co.jp  
菊池 浩利, 清水建設 (株), 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-14-10, h\_kikuchi@shimz.co.jp

A numerical tornado simulator using LES has been constructed to generate the tornado-like vortices. Firstly, numerical simulations using the stationary tornado simulator were carried out. The performance of the numerical tornado simulator was verified in comparison the near-ground wind velocity profiles and pressure on ground surface with the experimental results, and also showed that the vortices were configured from the out-side rising and the inside falling vortices. The configuration of the vortices were also changed from the laminar to turbulence single core and expanded to multi cores in the increase of the swirl ratio, which is described the angular momentum input to the swirling flow. The moving of the tornado simulator was modeled using the dynamic meshes, and it also indicated that the vortices became weakly under the moving effect.

### 1. はじめに

気象庁の記録によると 1961 年から 2008 年までに竜巻の発生確認数は年間約 20 件前後である<sup>1)</sup> (海上竜巻を除く, 年平均: 13 件). 2006 年以前の過去 10 年間の被害を見ても竜巻被害による死者は 1 名である. しかし, 2006 年だけでは宮崎県延岡市と北海道佐呂間町で発生した一連の竜巻で, 12 名の死者と多数の負傷者や住宅全壊等の被害が出てきて, 竜巻に関する関心が集まる同時にその被害を軽減するための竜巻等突風対策も強化されている<sup>2)</sup>.

竜巻の特徴としては局所的かつ突発的であり, その寿命は数 10 分であるため, 竜巻発生を事前に正確に予測することや竜巻の流れ場の速度を実測することは極めて難しく, 竜巻についてはまだ不明な点が多い. また, 台風・暴風と異なって, 竜巻は激しい渦巻状の上昇流を伴い, 進路に当たる物体を巻き上げながら移動する. その被害については角材・屋根などの飛来物が多数に発生する共に, 新たな被害を拡大するという特有な特性があると知られている. これらの被害を低減するためにまずは竜巻に関する基本的な性質を明らかにすることは不可欠である.

竜巻の多発の米国においては 1960 年代から, 既に竜巻とそれを生み出す積乱雲の特性に関する研究が多く行われてきた. また, 1990 年代から DOW (Doppler On Wheels)<sup>3)</sup>と VORTEX1 (Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment)<sup>4)</sup>プロジェクトを通じて積乱雲の移動を追跡し, これらの情報に基づいて竜巻を生み出す可能性を判定する観測システム並びに注意報・警報システムを構築した. このシステムにより竜巻の発生の 13 分前に警報が作動できるという報告もある. 2009 年 6 月現在, 更に新たな VORTEX2 のプロジェクト<sup>5)</sup>が開始されて, 注意報・警報システムの予測精度の向上の他, 竜巻の発生機構と竜巻の構造の解明も期待されている. しかし, これらの観測システムは, 竜巻の発生機構の解明は主な目的であるため, 気象学的な観点から上空の速度場を評価しているが, 工学的に地上付近の速度場はまだ明らかにされていない<sup>6)</sup>. また, 気象学の数値シミュレーションの研究<sup>7-11)</sup>においてもメソスケールを用いて竜巻発生の再現や竜巻の発生機構の解明をしつつあるが, 竜巻と積乱雲のスケールが 2 桁に違うため, 竜巻の流れ場を評価するにはまだ難しいという現状である<sup>8)</sup>.

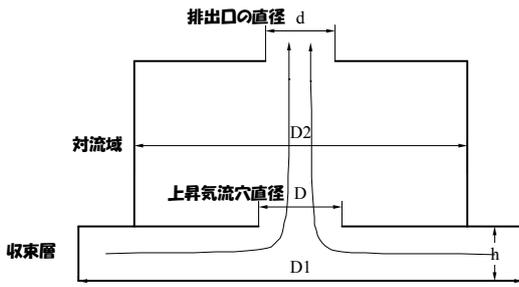
竜巻の流れ場による風荷重を評価するために, 竜巻の渦巻状 (以下, 竜巻状旋回流を称する) を Rankine 渦モデルでモデル化し<sup>12)</sup>, それを 2 次元の流入風として数値流体計算に導入することにより風力・風圧係数を評価する方法が用いられている<sup>13-20)</sup>. し

かし, これらの方法は吸い上げ風速成分を無視して, 得られた鉛直方向の風力係数は従来の強風で用いた係数より数倍に大きいという結果も報告され, その値の妥当性はまだ不明である<sup>20)</sup>.

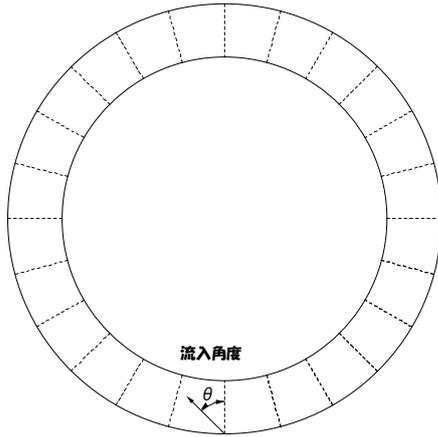
これらに対して, 竜巻を形成するメソサイクロンの Wall Cloud 以下の地上付近の渦運動が主として運動学的な要因に支配されており, Ward<sup>21)</sup>により図 1 に示すような竜巻状旋回流の実験シミュレータが提案された. この実験シミュレータは収束層と対流域により構成されて, 収束層に外部から流入する空気が中央上部の上昇流穴から吸い上げられる構造である. 収束層内の気流が竜巻状の旋回流を生成するためには外部から循環の流れ場を与える. その与え方は 2 種類に大きく分けられる. その 1 は収束層に流入する部分に接線方向の運動量を与えるものである. その 2 は上昇流部分に回転成分を与えるものである. また, 竜巻状旋回流に関するいずれの実験研究は同様な実験シミュレータに基づいてスワール比やレイノルズ数による渦の構造の変化を明らかにした<sup>22-29)</sup>. しかし, これらの実験装置は実スケールの 1/1000 以下であり, 建築構造物や土木構造物へ適用することは難しいとみられる. 最近, Sarkar<sup>30-33)</sup>は従来の実験装置より数 10 倍の移動式巨大な装置を作成し, 竜巻状旋回流の結果を実測の上空風速場とほぼ妥当な結果を示した. 更に, 今後にも構造物にも適用し, 竜巻状旋回流による風荷重を評価するとみられる.

一方, 近年の計算機性能が向上し, 数値流体計算は建築構造物の設計にも検討されはじめる<sup>34)</sup>. また, RANS や LES 乱流モデルを用い, 竜巻状旋回流の数値シミュレータを作成し, シミュレータの寸法や流入風の変化により竜巻状旋回流の発生状況の検討に関する研究<sup>35-39)</sup>も行われている. 今後, 数値流体計算は竜巻状旋回流による風荷重の評価に有力な方法であると考えられる.

本研究では数値シミュレータを作成し, 竜巻状旋回流の流れ場の性質を調べる. まず, LES を用いて竜巻状旋回流を発生できる数値シミュレータを構築し, 実験の風速場と風圧場との比較によりその妥当性を確認する. また, 流入角度を変化させ, 竜巻状旋回流内の渦の形状と生成過程を明らかにする. 更に, 自動メッシュ生成機能と移動境界モデルを用い, 移動式数値シミュレータを試作し, 竜巻の移動効果とそれによる流れ場の変化を評価する.



(a) 断面図



(b) 収束層の平面図 (点線はガイドベーン)

Fig.1 シミュレータの概要

### 3. 数値モデル

#### (1) 基礎方程式と乱流モデル

本解析は LES 乱流モデルを用い、流体運動を有限体積法により離散化した。流体運動は Navier-Stokes 式にフィルターをかけた非圧縮流れの連続の式と運動方程式により表す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{u}_j$  は  $x_j$  方向の格子平均された速度成分、 $p$  は圧力、 $\rho$  は流体の密度である。また、 $\sigma_{ij}$  は応力テンソルのグリッドスケール成分、 $\tau_{ij}$  はサブグリッドスケール応力である。これらは次式で定義される。

$$\sigma_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

ここで、 $\mu$  は粘性係数である。また、サブグリッドスケール応力  $\tau_{ij}$  は渦粘性モデルにより次式で表す。

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

ここで、 $\mu_t$  はサブグリッドスケールの乱流粘性、 $\bar{S}_{ij}$  はひずみ速度テンソルである。

サブグリッドスケールの乱流粘性は Smagorinsky-Lilly モデルにより次式で表される。

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (7)$$

ここに、 $|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$  であり、 $L_s$  はサブグリッドスケールの混合距離で次式により計算される。

$$L_s = \min(\kappa d, C_s \Delta^{1/3}) \quad (8)$$

$\kappa$  はカルマン定数、 $d$  は壁に最も近い距離、 $\Delta$  は計算セルの体積、 $C_s = 0.1$  である。

数値解法として風速と圧力の連成解法には SIMPLE 法を採用した。移流項の空間的離散化には 1 次精度中心差分を、時間発展には 1 次精度陰解法を用いた。表 1 には境界条件を示す。なお、本解析ではガイドベーン有りとガイドベーン無しの二つの数値シミュレータを用いた。上昇流穴から吸い上げられるファンの構造として上昇流を発生させるために、対流域排出境界は velocity-inlet 境界を適用した。収束層内の気流が旋回流を形成するためには、ガイドベーン有りの数値シミュレータでは収束層の流入境界に Pressure-inlet 境界を、ガイドベーン無しの数値シミュレータでは対流域排出流量を同じな量で流入させる Velocity-inlet 境界を適用した。また、数値シミュレータの壁面には no-slip 条件とした。

表 1 境界条件

対流域排出境界	velocity-inlet
収束層の流入境界	ガイドベーン有りのモデル : Pressure-inlet ガイドベーン無しのモデル : Velocity-inlet
壁面境界	no-slip

#### (2) 解析条件と解析モデル

解析条件を表 2 に示す。図 2 には数値解析シミュレータの構造を示す (黒い部分は壁面である)。なお、解析モデルの寸法と解析条件については松井らの実験<sup>27)</sup>を参考にして、収束層と対流域をモデル化した。対流域排出境界には流出量  $Q$  を  $0.3\text{m}^3/\text{s}$  に相当する流出風速を  $U_0=6\text{m/s}$  にした。収束層の流入角を  $0$  から  $75\text{deg}$  まで変化した。これらは発生する渦の強さを表す無次元数スワール比  $S=0\sim 1.4$  に相当するものである。ここで、スワール比  $S$  は次式により定義する。

$$S = \frac{D}{4h} \tan \theta \quad (9)$$

収束層と対流域および全体の解析格子は図 3 に示す。また、シミュレータの移動を実現するために、自動メッシュ生成機能と移動境界モデルを用い、収束層と対流域の格子をダイナミックメッシュでモデルした。また、収束層と対流域の間にスライディングメッシュを採用した。なお、収束層中心の領域を立方体の固定メッシュ領域としてモデル化した (図 3 (a) の赤い領域)。この領域を今後には構造物の実験場として活用する予定である。

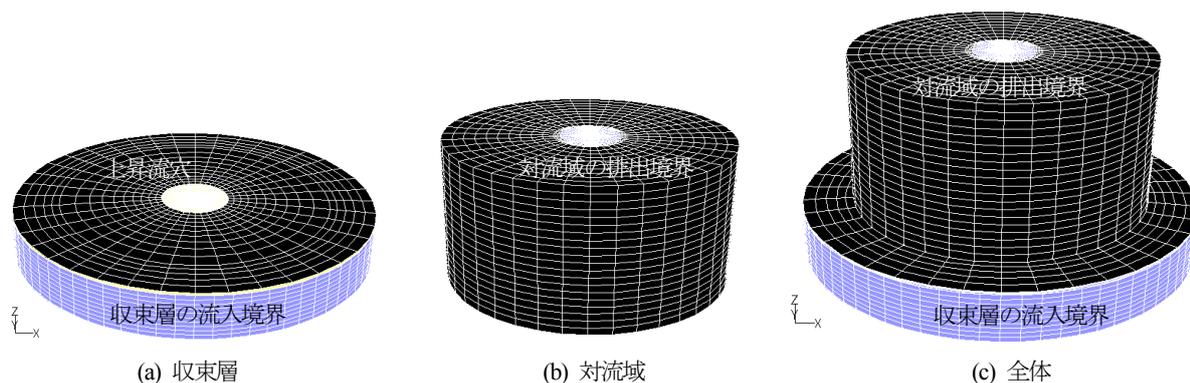


Fig.2 数値シミュレータの構造

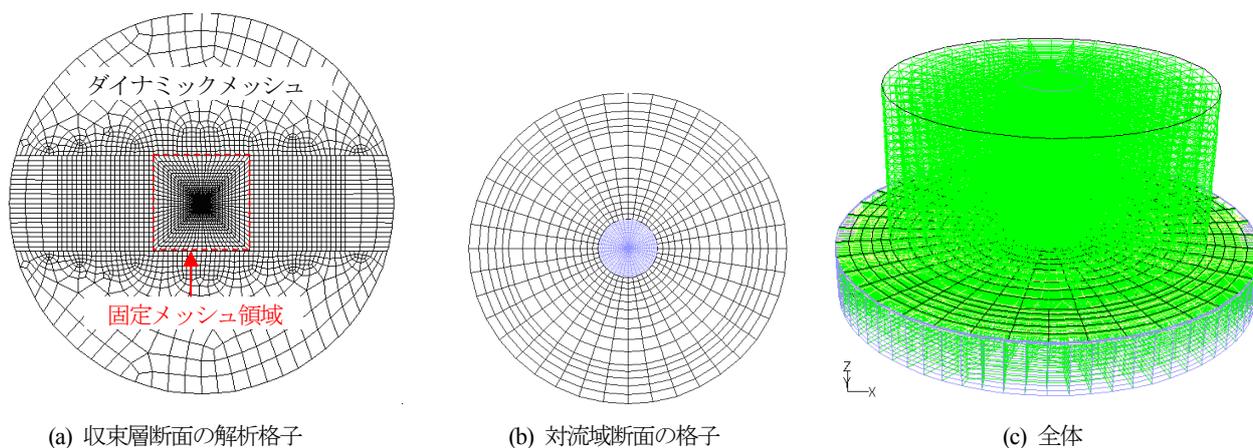


Fig.3 ガイドベーン無しモデルの解析格子

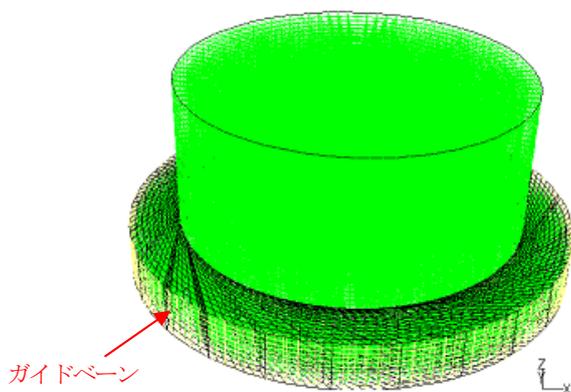


Fig.4 ガイドベーン有りモデルの全体解析格子

表2 解析条件

上昇流穴直径 D	0.3 m
収束層の高さ h	0.2 m
収束層の直径 D1	1.6m
対流域の排出口の直径 d	0.25m
対流域の直径 D2	1.2m
対流域排出流量 Q (流出風速 U0)	0.3 m <sup>3</sup> /s (6m/s)
収束層の流入角 $\theta$ (スワール比 S)	0, 15, 30, 45, 60, 75 (deg) (0.0~1.4)
シミュレータの 移動速度 $U_{mov}$	0, 0.6 (m/s)
解析要素数	ガイドベーン有りのモデル : 138,640 ガイドベーン無しのモデル : 98,480
時間刻み $\Delta t$	0.001(s)

計算時間刻みを  $\Delta t=0.001(s)$  とし、風速と風圧分布との解析については最初の 16000 ステップは助走計算で、次の 8000 ステップは統計計算を行い、風速と風圧の平均分布を求めた。スワール比による旋回流構造の評価については収束層の流入角度  $\theta$  は 0deg から 75deg まで 15deg 刻み間隔に増加させ、トータル 48000 ステップで解析を実施した(各流入角度に 8000 ステップで解析を行う)。また、巻状旋回流の移動効果の評価には、シミュレータの中心を -0.4m に移動させた後、シミュレータの静止状態で竜巻状旋回流の渦が形成される助走計算の 8000 ステップを解析した後、水平方向(x 方向)に移動速度  $U_{mov}$  でシミュレータを移動しながら、解析を行った。

### (3) 解析ケース

竜巻状旋回流の性質を調べるために、次の 3 ケースを実施する。まず数値シミュレータを静止状態にして、収束層の流入角を  $\theta=60deg$  ( $S=0.65$ ) のケースの風速分布と風圧分布を調べる。次に、収束層の流入角を変化することによりスワール比による竜巻状旋回流の構造の変化を評価する。最後に、収束層の流入角  $\theta=60deg$  のケースを対象にして、数値シミュレータを  $U_{mov}=0.6m/s$  ( $U=0.1U_0$ ) で水平に移動させて、竜巻状旋回流の移動効果を評価する。

#### 4. 竜巻状旋回流内の基本的な性質

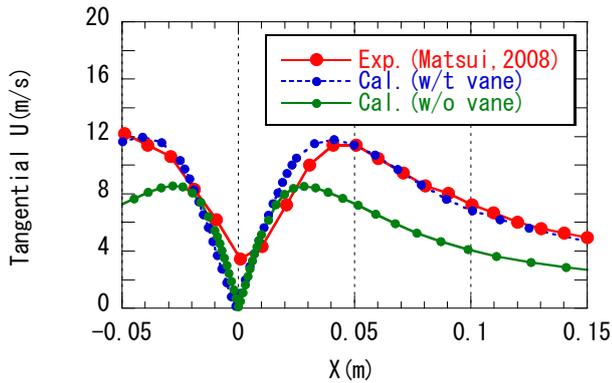
##### (1) 風速と圧力分布

竜巻状旋回流の基本的な性質を明らかにするために、収束層の流入角を  $\theta=60\text{deg}$  ( $S=0.65$ ) である場合を用い、風速分布とシミュレータ床面の風圧分布を調べた。図-5(a)には数値シミュレータ中心からの風速の接線成分(高さ0.15m)の平均値を示す。また、図-5(b)には床面の平均風圧分布を速度圧  $0.5\rho U_{\text{max}}^2$  で無次元化された風圧係数を示す。図中には松井らの実験結果<sup>27)</sup>もプロットした。松井らの実験装置と同様にガイドベーンをモデル化した数値シミュレータは実験の結果とほぼ一致である。また、いずれのモデルの風速の接線成分は中心で小さく、半径0.20~0.40m程度まで徐々に増加し、最大値  $U_{\text{max}}$  を到達し、中心から離れるとその風速は低下していく。更に、中心には風圧低下の結果も見られて、実験とほぼ同じ傾向を得られることがわかる。

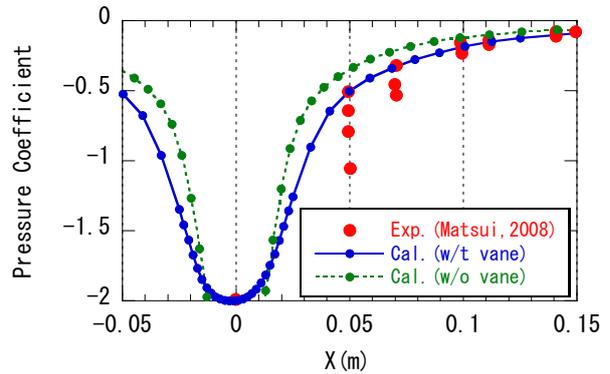
また、図-6 は平均風速の接線成分と鉛直成分の断面コンターを示す。図-6(a)により、収束層中心の周辺には風速の接線成分は大きく、大きな回転運動が生じて、その回転運動は対流域に入ると徐々に減少していくことがみられる。これらは収束層の循環の流れ場と対流域の吸い上げられる流れ場によるものと考えられる。ただし、図 6(b)の風速の鉛直成分をみると、上昇気流穴から吸い上げられる上昇の流れ場の他、中心軸近傍に下降の流れ場もみられ、竜巻状旋回流は外側の上昇渦巻と内側の下降渦巻で構成されることは本解析でわかる。

##### (2) スワール比による影響

竜巻状旋回流の構造はスワール比  $S$  に支配される。その旋回流の構造の生成過程と旋回流内の流れ場を更に詳細に検討するために、収束層の流入角  $\theta$  を  $0\sim 75\text{deg}$  ( $S=0\sim 1.4$ ) に変化させて、解析

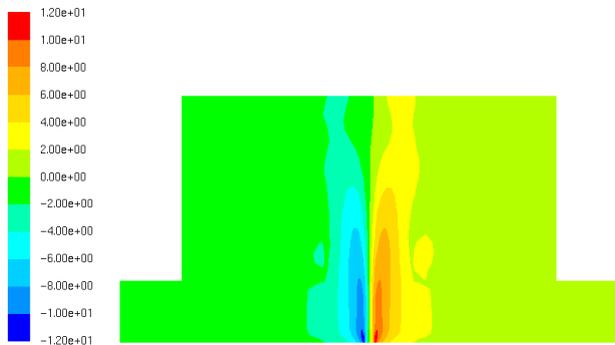


(a) 中心からの接線成分の平均風速分布 (高さ0.15m)

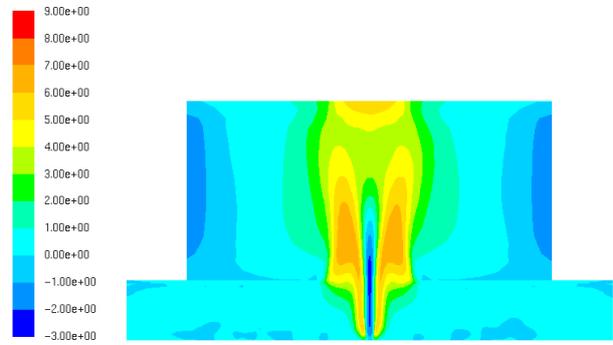


(b) 中心からの距離と床面平均風圧分布

Fig.5 竜巻状旋回流内の平均風速分布と風圧分布( $S=0.65$ )

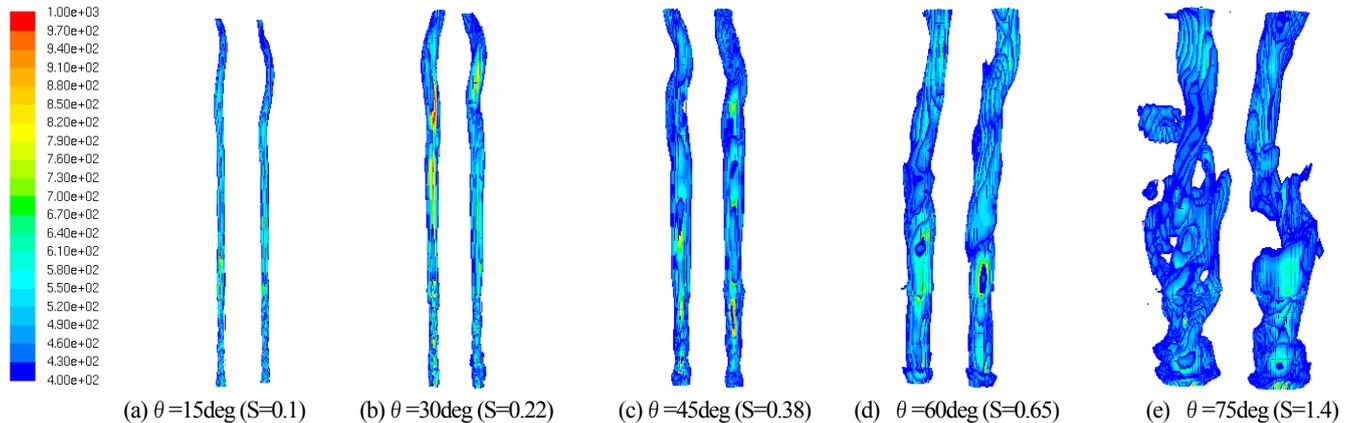


(a) 接線成分の平均風速コンター



(b) 鉛直成分の平均風速コンター

Fig.6 断面の風速コンター( $S=0.65$ )



(a)  $\theta=15\text{deg}$  ( $S=0.1$ ) (b)  $\theta=30\text{deg}$  ( $S=0.22$ ) (c)  $\theta=45\text{deg}$  ( $S=0.38$ ) (d)  $\theta=60\text{deg}$  ( $S=0.65$ ) (e)  $\theta=75\text{deg}$  ( $S=1.4$ )

Fig.7 収束層の流入角による竜巻状旋回流の温度コンターの变化 (それぞれの二つの瞬間値)

を行った。

本論文では、生成された旋回流の渦度を評価する。図 7 にはそれぞれ収束層の流入角  $\theta$  が 15, 30, 45, 60, 75deg である時に渦度の変化を示す。  $\theta$  は 0deg である場合、渦度の明確なコアが形成されていないため、その結果を省略した。図により、  $\theta$  は小さい時 (30deg 以下) には層流の渦で生成される。  $\theta$  が大きくなると、渦度が大きくなり、渦のコアが拡大するとともに、その渦は上部から破壊されていく。その破壊により渦全体が乱流化されていくようにみられる。特に、  $\theta=75\text{deg}$  のケースには、渦度の中心は 2~3 コアに分離され、複数セルの渦が生じることは分かる。

また、既往研究の実験により、スワール比は 0.4 以上に乱流渦が生じ、0.8 以上に複数セルの渦が生じることが示されていた。本解析にも同様な傾向を得られることもわかった。

### (3) 移動効果

竜巻状旋回流の移動効果を評価するために、収束層の流入角  $\theta=60\text{deg}$  の場合を対象にして、数値シミュレータ (収束層のダイナミックメッシュ領域と対流域) を  $U_{\text{mov}}=0.6\text{m/s}$  ( $U=0.1U_0$ ) で水平に移動させた。図 8 には得られた速度場の渦度の変化を示す。また、移動効果を明らかにするために、本解析モデルの固定メッシュ領域と渦の頂部の対流域排出口もプロットし、竜巻状旋回流は固定メッシュ領域に通過前、通過中と通過後の渦度コンターを示す。なお、竜巻状旋回流が固定メッシュ領域に通過する前に、渦が生成までに数値シミュレータを静止状態にした。

図により、数値シミュレータを移動することにより、渦の上部の渦度は弱まっていて、徐々に破壊されると共に、渦が消えていくような傾向がみられる。

## 5. まとめ

本研究では LES を用いて竜巻状旋回流を発生できる数値シミュレータを構築し、その流れの性質を調べた。以下は主な結果を得た。

1. 数値流体解析から得られた竜巻状旋回流内の接線成分の平均風速と床面平均風圧分布は既往の実験とほぼ同じな傾向を得られた。また、竜巻状旋回流は、収束層の循環の流れ場と対流域の吸い上げられる流れ場により外側の上昇渦巻と内側の下降渦巻で構成されて、その性質は本数値解析によりわかった。
2. 収束層の流入角度及びスワール比が増加すると、渦度が増加し、その渦度からみたコアが拡大していく。更に、流入角度が大きくなると、渦の上部から破壊していくことによ

り層流渦から乱流渦に移行する。

3. 自動メッシュ生成機能と移動境界モデルを用いることにより、移動式数値シミュレータを実現でき、竜巻状旋回流の移動効果により渦上部が弱まっていて、渦が消えていく傾向がみられる。

本研究では、LES 乱流モデルを用いた数値シミュレータを構築し、竜巻状旋回流の基本的な性質の評価を試みた。今後は、移動効果を含む竜巻状旋回流内の速度場・風圧場更に詳細に検討し、固定メッシュ領域に建物構造物などをモデルし、竜巻状旋回流による荷重の変化を明らかにする。

謝辞：本研究は、実験方法及び実験結果にあたり東京工芸大学の松井正宏教授と徳島大学の野田稔准教授から貴重な情報を頂いた。ここに、記して謝意を表す。

### 参考文献

- (1) 気象庁, "年別の発生確認数", <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tomado/stats/annually.html>.
- (2) 竜巻等突風対策検討会, "竜巻等突風対策の強化に向けた検討会報告", 内閣府, 2007.
- (3) Wurman, J., "The DOW mobile multiple-Doppler network", 30th International Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society, Munich, Germany, (2001).
- (4) Rasmussen, E.N., et al., "Verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX", Bulletin of the American Meteorological Society, 75(1994), pp.995-1006.
- (5) VORTEX2, <http://www.vortex2.org/home/>
- (6) Alexander, C.R. and J. Wurman, "The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part I: The structural evolution and environment of the tornadoes", Monthly Weather Review, 133(2005), pp.72-97.
- (7) T. Noda, A. and H. Niino, "Genesis and structure of a major tornado in a numerically-simulated supercell storm: importance of vertical vorticity in a gust front", SOLA, 1(2005), pp. 5-8.
- (8) 野田 暁, "スーパーセル型積乱雲に伴う竜巻の発生過程とその構造に関する数値的研究", 博士論文, (2002).
- (9) 新野 宏, 野田 暁, "竜巻の数値シミュレーション: 現状と課題", 理論応用力学講演会 講演論文集, 54 (2005), pp.19-23.
- (10) Lewellen, W.S., D.C. Lewellen, and R.I. Sykes, "Large-eddy simulation of a tornado's interaction with the surface", Journal of the Atmospheric Sciences, 54(1997), pp.581-605.

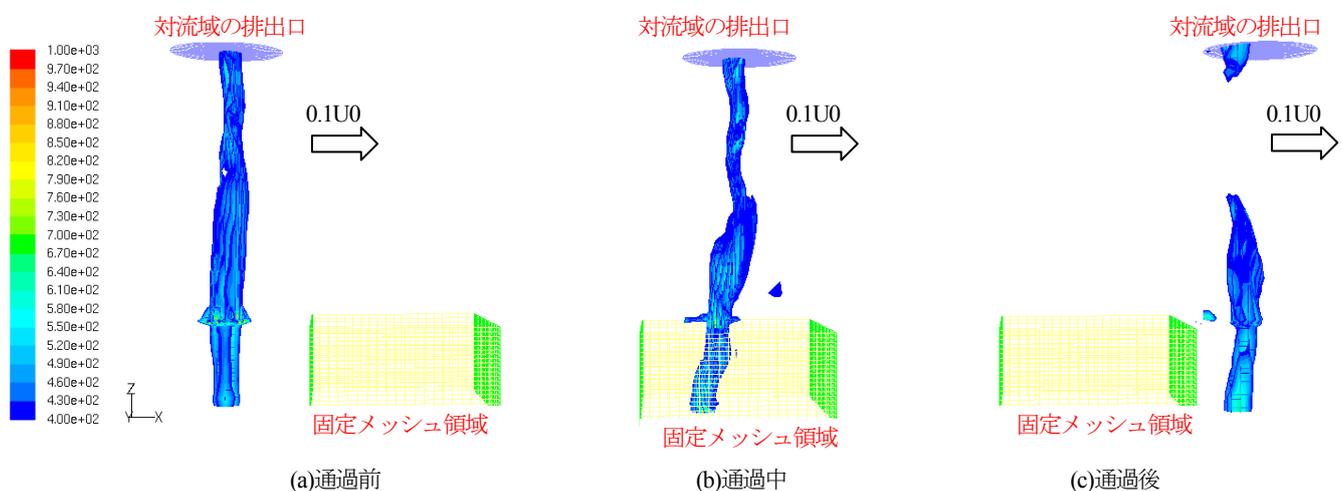


Fig. 8 移動時の竜巻状旋回流の渦度コンターの変化 (瞬間値)

- (11) Xia, J., "Large-Eddy Simulation of a Three-dimensional Compressible Tornado Vortex", Ph.D. Thesis, (2001), West Virginia University.
- (12) Lewellen, W.S., "Theoretical models of the tornado vortex", Proceedings of the Symposium on Tornadoes, RE Peterson, Texas Tech University, Lubbock. 1976.
- (13) Wen, Y., Dynamic tornadic wind loads on tall buildings. Journal of the Structural Division, 1975. 101(1): p. 169-185.
- (14) Wilson, T., "Tornadic structure interaction: A numerical simulation", Report: UCRL-52207, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, 1977.
- (15) McDonald, J.R. and R.P. Selvam, "Tornado Forces on Buildings Using the Boundary Element Method", Proceedings of Fifth US National Conference on Wind Engineering. 1985.
- (16) Bienkiewicz, B. and P. Dudhia, "Physical modeling of tornado-like flow and tornado effects on building loading", Proceedings of the 7th US National Conference on Wind Engineering, (1993).
- (17) Selvam, R.P. and P.C. Millett, "Computer modeling of tornado forces on buildings", Proceedings of the 7th US National Conference on Wind Engineering, Edited by: Gary C. Hart, Los Angeles, (1993), pp.605-613.
- (18) Selvam, R.P., Roy, U.K. and Jung, Y., "Investigation of tornado forces on 2D cylinder using computer modeling", Wind Engineering. Proceedings of NCWE 2002, Edited by: K. Kumar, Phoenix Publishing. House, New Delhi, (2002), pp.342-353.
- (19) Selvam, R.P. and P.C. Millett, "Computer modeling of tornado forces on buildings", Wind and Structures, 6(2003): pp. 209-220.
- (20) Selvam, R.P. and P.C. Millett, "Large eddy simulation of the tornado-structure interaction to determine structural loadings", Wind and Structures, 8(2005), pp.49-60.
- (21) Ward, N.B., "The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model", Journal of the Atmospheric Sciences, 29(1972), pp.1194-1204.
- (22) Wan, C.A. and C.C. Chang, "Measurement of the velocity field in a simulated tornado-like vortex using a three-dimensional velocity probe", Journal of the Atmospheric Sciences, 29(1972): pp.116-127.
- (23) Church, C.R., J.T. Snow, and E.M. Agee, "Tornado vortex simulation at Purdue University". Bulletin of the American Meteorological Society, 58(1977), pp. 900-908.
- (24) Fouts, J.L., D.L. James, and C.W. Letchford, "Pressure distribution on cubical model in tornado-like flow", (2002).
- (25) 佐々浩司, 竹村早紀, 道下翔吾, "移動竜巻の下層構造の実験的解明", 第 20 回風工学シンポジウム論文集, 20(2008), pp.157-162.
- (26) 松井正宏, 田村 幸雄, "竜巻状流れ場に対するスワール比, 粗度の影響に関する室内実験", 第 19 回風工学シンポジウム論文集, (2006), pp.7-12.
- (27) 松井 正宏, 田村 幸雄, 吉田 昭仁, "竜巻状旋回流中におかれた立方体に作用する風圧力と移動効果による旋回流形成への影響に関する実験的研究", 風工学シンポジウム論文集, 20 (2008), pp.319-324.
- (28) 松井 正宏, 田村 幸雄, "竜巻シミュレータの開発—流れ場の可視化とその特徴—", 第 58 回理論応用力学講演会, (2009), pp.374-374.
- (29) 山下翔平, 長尾文明, 野田稔, 宗田和之, "竜巻状流れの流入角による制御の可能性", 第 64 回土木学会全国大会年次学術講演梗概集, (2009).
- (30) Sarkar, P., et al., "Velocity Measurements in a Laboratory Tornado Simulator and their comparison with Numerical and Full-Scale Data. Technical", Memorandum of Public Works Research Institute, (2005). pp. 197-211.
- (31) Sarkar, P.P., et al. "Laboratory Simulation of Tornado and Microburst to Assess Wind Loads on Buildings", American Society of Civil Engineers, (2006).
- (32) Haan, F.L., Sarkar, P.P., Galuss, W.A., "Design construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications", 30(2008), pp. 1146-1159.
- (33) 喜々津 仁密, サーカー パーサ, ハーン フレッド, "トルネード発生装置を活用した低層建築物に作用する風力特性に関する研究", 日本風工学会年次研究発表会梗概集, (2009), pp.67-68.
- (34) 日本建築学会, "建築物の耐風設計のための流体計算ガイドブック", 丸善 (株), (2005).
- (35) 丸山 敬, "竜巻状の渦の数値シミュレーション", 日本風工学研究会誌, 111(2007), pp. 99-100.
- (36) 丸山 敬, "LES による竜巻状の渦のシミュレーション", 日本建築学会学術講演梗概集, 2007, pp.181-182.
- (37) 丸山 敬, "ラージ・エディ・シミュレーションによる竜巻状の渦を作る試み", 京都大学防災研究所年報, 第 51 号 B, 51B(2008), pp.481-488.
- (38) 宮田 秀太, 野村 卓史, 長谷部 寛, 栗津 翔太, "流体解析による竜巻状旋回流シミュレーションの試み", 第 20 回風工学シンポジウム論文集, 20 (2008), pp.211-216.
- (39) Sengupta, A., et al., "Transient loads on buildings in microburst and tornado winds", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 96(2008), pp.2173-2187.