

数値的に生成された竜巻状の渦の性質

丸山 敬

要 旨

竜巻の渦内の気流性状や渦と物体との相互作用を明らかにすることを目的に、数値計算手法を用いて竜巻状の渦の作りだす数値シミュレーターを作成し、計算条件を変化させて、種々の形態をもった竜巻状の渦を作り出した。本報では、作り出された渦の生成条件や渦内の気流性状について報告する。

キーワード： 竜巻状の渦，数値シミュレーター，気流性状，生成条件

1. はじめに

竜巻の渦内の気流性状や渦と物体との相互作用を明らかにすることを目的に、丸山（2008）は数値計算手法を用いて竜巻状の渦の作りだす数値シミュレーターを作成した。このシミュレーターはChurchら（1979）や文字ら（1982, 1983）が用いた竜巻発生装置に準じ、Fig.1に示すような対流域と収束域をもち、解析領域の形状や境界条件などの計算条件を変化させて、種々の形態をもった竜巻状の渦を作り出すことができる。本報では、作り出された種々の渦の生成条件や渦内の気流性状について報告する。

2. 数値シミュレーターの概要

数値計算には差分法を用いて支配方程式を離散化し、Fig.2に示すような直交座標系を用いている。乱流モデルにはラージエディシミュレーション（LES）を用い、計算コードにはRIAM-COMPACT（内田ら2004）を一部改造したものを用いた。解析領域は竜巻発生装置を模擬したもので、上部に吸い出し口をもつ円筒形の対流域、下部に正方形水平断面をもつ直方体の収束域をもつ。計算条件、すなわち、上部吸い出し口の大きさ R_t や風速 W_0 、円筒形状の対流域の高さ H_c や半径 R_{cvt} 、収束域との繋ぎ目の開口部の半径 R_{ud} 、収束域の高さ H_d 、および幅 $2D$ 。また、収束域の側面境界条件、すなわち、固体壁面境界（non-slip boundary）条件、自由流入境界（free boundary）条件、および風速を与える境界（Dirichlet boundary）条件を組み合わせることによって種々の

性質をもった竜巻状の渦を作り出すことができる。なお、Churchら（1979）や文字ら（1982, 1983）、その他多くの実験室における竜巻発生装置では、渦形成のための速度シアをガイドベーンにより収束域へ供給しているが、本シミュレーションでは収束域の側面境界条件により速度シアを供給しており、ガイドベーンは用いていない。計算手法の詳細は丸山（2008, 2009）を参照されたい。

3. 作り出された渦

解析領域の形状や収束域の側面境界条件を変化させることにより種々の形態をもった竜巻状の渦を発生させることが可能である。Fig.3に対流域の半径 R_{cvt} による渦の変化の例を挙げる。

R_{cvt} が最も小さく0.15mのとき、渦は3.1節に述べるような1セル型の渦となるが、 R_{cvt} を大きくしていくと図に示すように接線風速は小さくなり、接線

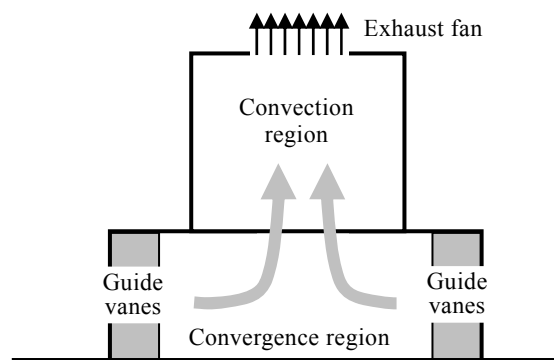


Fig. 1 Laboratory tornado simulator

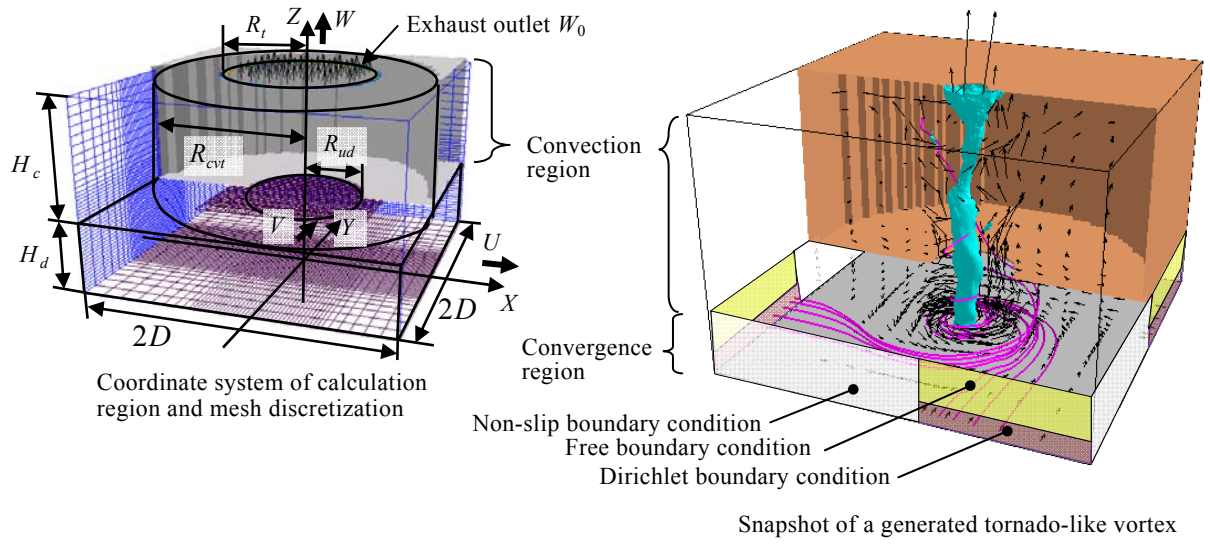


Fig. 2 Configuration of numerical tornado simulator

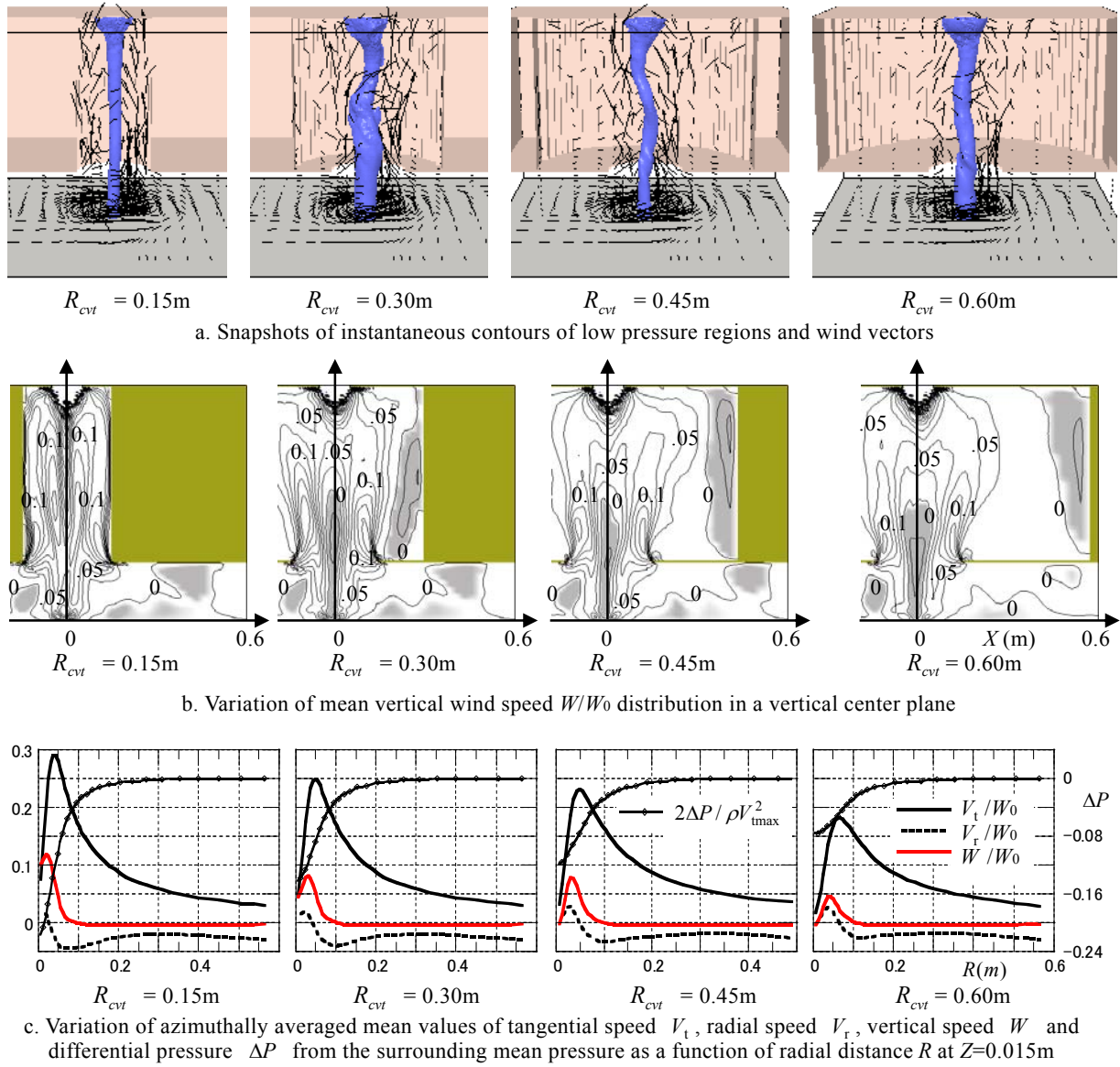


Fig. 3 Variation of wind fields with the width of convection region

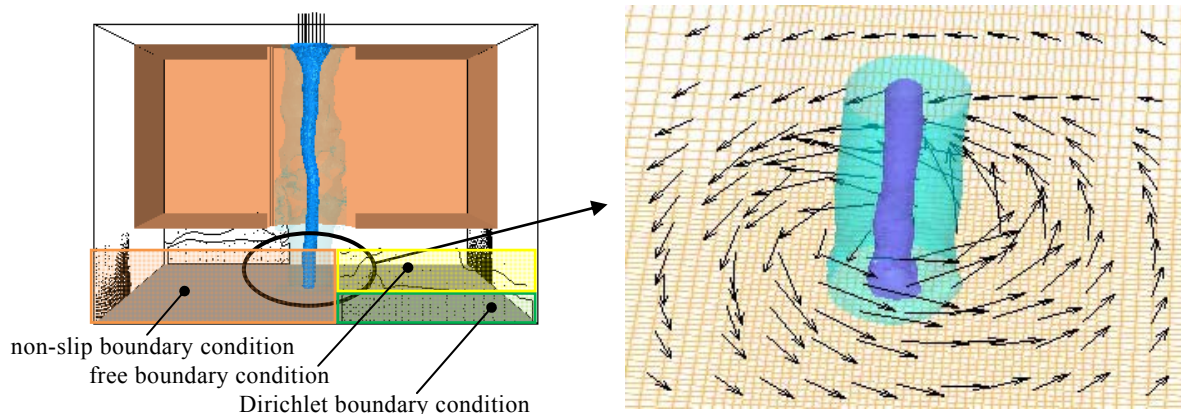


Fig. 4 Configuration and boundary conditions of calculation region with plots of instantaneous contours of low pressure regions and wind vectors near the ground ; single core type without mean down flow region in the core
 $R_t=0.05\text{m}$, $R_{cnv}=0.15\text{m}$, $R_{ud}=0.15\text{m}$, $H_c=0.6\text{m}$, $H_d=0.2\text{m}$, $D=0.6\text{m}$, $W_o=1.0\text{m/s}$, $V_{tmax}=0.31\text{m/s}$, $Sw=0.4$, $Re=620$

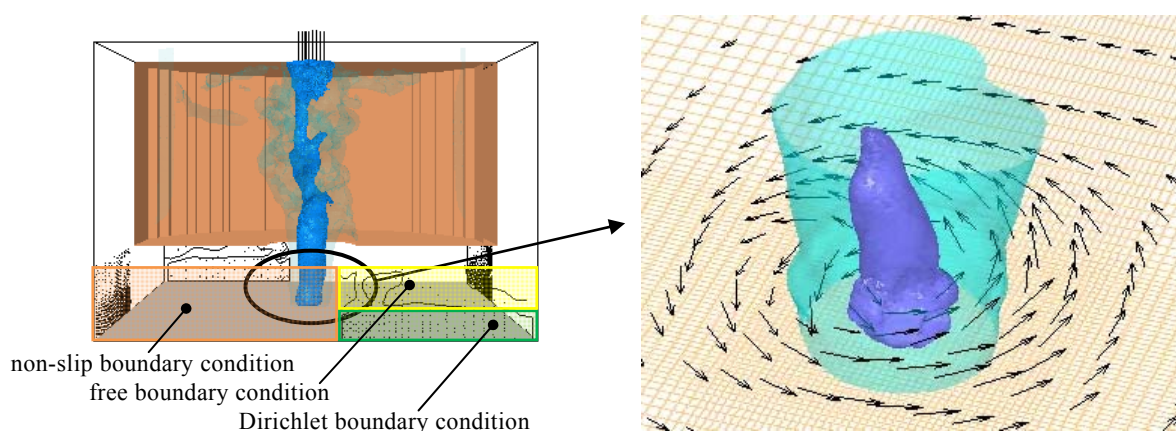


Fig. 5 Configuration and boundary conditions of calculation region with plots of instantaneous contours of low pressure regions and wind vectors near the ground ; single core type with mean down flow region in the core
 $R_t=0.05\text{m}$, $R_{cnv}=0.6\text{m}$, $R_{ud}=0.15\text{m}$, $H_c=0.6\text{m}$, $H_d=0.2\text{m}$, $D=0.6\text{m}$, $W_o=1.0\text{m/s}$, $V_{tmax}=0.25\text{m/s}$, $Sw=0.5$, $Re=760$

風速の最大値をとる半径はわずかに大きくなる。渦中心部においても R_{cvt} が大きくなるにつれて時間平均風速の下降流域も Fig.3b 中明るい灰色の領域で示すように大きくなって、3.2 節に示す 2 セル型の渦に変わっていく。

以下では、生成された渦のうち、代表的な形態をもった渦を概観する。

3.1 1 セル型の渦

渦の中心部に風速の時間平均値で鉛直方向 W 成分が負の値をもたず、下降流となる領域をもたない、いわゆる 1 セル型と呼ばれる渦が、Fig.4 に示すような計算領域の形状と、収束域の側面境界条件により生成される。計算領域の形状、および収束域の側面境界条件はキャプションの通りで、計算領域内の最大接線風速 V_{tmax} および最大接線風速半径 R_{tmax} により $\pi R_{tm}^2 V_{tmax} / \pi R_0^2 W_0$ と定義されたスワール比 Sw 、およびレイノルズ数 $Re = V_{tmax} R_{tmax} / \nu$ の値を示す。ここ

で、 ν は空気動粘性係数で 1.5×10^{-5} とした。

この形態の渦では、図中渦中心部分の低圧部分を示した青色の等値面が、地面から上部の吸い出し口までほぼ一定の径をもった円筒形となり、途中の曲がりも小さく、渦の中心もほぼ一定の位置にとどまって時間的な変動も少ない。地面付近の風速ベクトルもほぼ定常で、乱れも小さい。

3.2 2 セル型の渦

渦の中心部に風速の時間平均値で鉛直方向 W 成分が負の値をもち、下降流となる領域をもつ、いわゆる 2 セル型と呼ばれる渦が、Fig.5 に示すような計算領域の形状と、収束域の側面境界条件により生成される。

この形態の渦では、渦中心部分の低圧部分の等値面が地面から対流域に少し入ったところまでほぼ一定の径をもった円筒形となっているが、それより上方では乱れて時間的に変動している。また、地面付

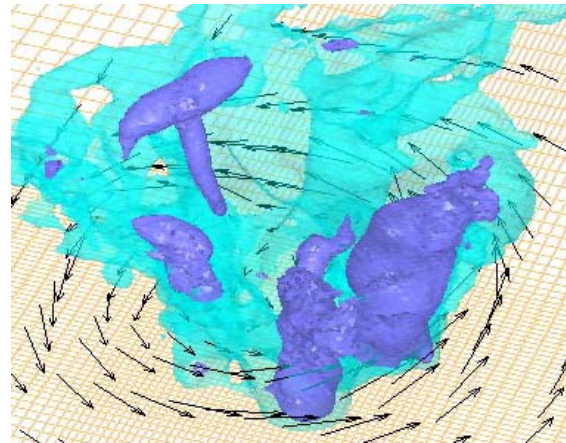
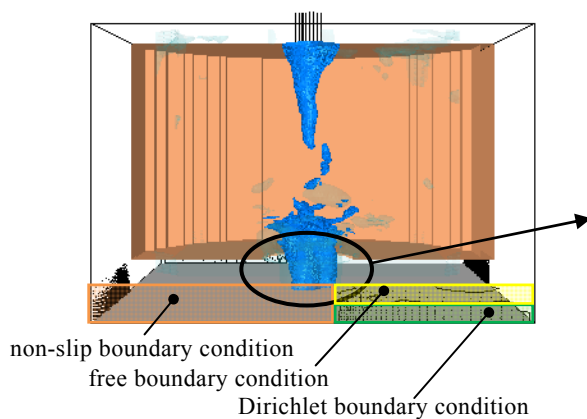


Fig. 6 Configuration and boundary conditions of calculation region with plots of instantaneous contours of low pressure regions and wind vectors near the ground ; multiple core type

$R_t=0.05m$, $R_{cnv}=0.60m$, $R_{ud}=0.15m$, $H_c=0.8m$, $H_d=0.1m$, $D=0.6m$, $W_o=1.0m/s$, $V_{tmax}=0.28m/s$, $Sw=1.5$, $Re=1800$

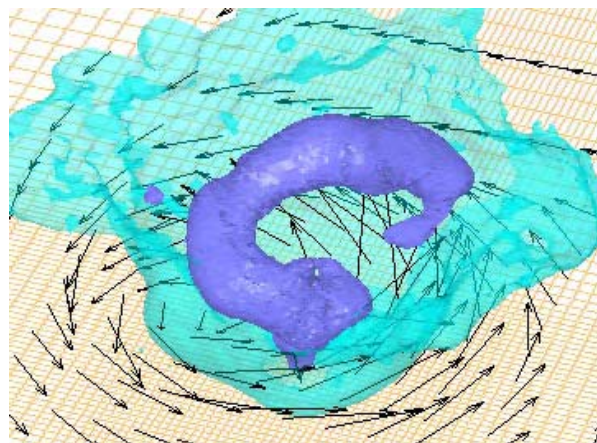
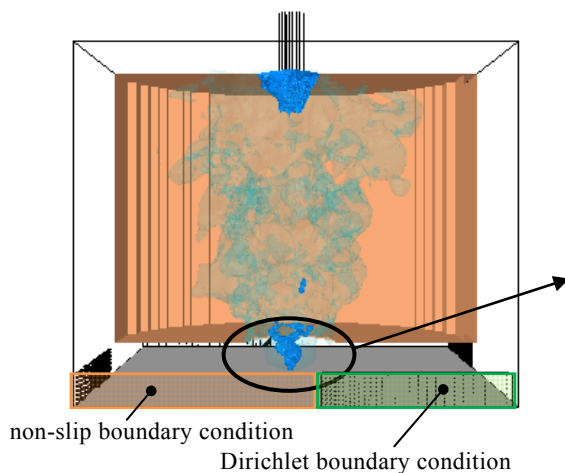


Fig. 7 Configuration and boundary conditions of calculation region with plots of instantaneous contours of low pressure regions and wind vectors near the ground ; swirling core type

$R_t=0.05m$, $R_{cnv}=0.60m$, $R_{ud}=0.15m$, $H_c=0.8m$, $H_d=0.1m$, $D=0.6m$, $W_o=2.0m/s$, $V_{tmax}=0.36m/s$, $Sw=1.1$, $Re=1660$

近でも低圧部分の中心は時間的に移動し、周囲の風速ベクトルも変動が大きくなっている。

ルは前述の 1 セル， 2 セルの渦に比べて風向風速ともに大きく変動している。

3.3 多重渦型の渦

渦の中心部に圧力の低圧部分が複数存在する多重渦型の渦が、Fig.6に示すような計算領域の形状と、収束域の側面境界条件により生成される。

この形態の渦では、計算領域の中心部分に圧力の低圧部分が複数発生し、時間とともに渦の回転方向に回転している。局所的な低圧部分は地面付近でそれぞれ核を形成しているが、その数は時間とともに 2 から 5 程度に増減している。この低圧部分の核周りに副次渦の形成が観察されるが、水平方向の最小計算格子間が副次渦の直径の約 1/10 程度であるため、副次渦内の渦が明瞭に判別できるほどの風速ベクトルは得られていない。また、地面付近の風速ベクトル

3.4 渦中心付近の低圧部の等圧面が螺旋状にねじれた渦

渦中心付近の低圧部の等圧面が、螺旋状にねじれた渦がFig.7に示すような計算領域の形状と、収束域の側面境界条件により生成される。

この形態の渦では、計算領域の中心部の低圧部分が螺旋状に渦の回転方向に回転している。時間平均的にみると、流は地面付近で渦中心に向かって吹き込み、螺旋状の低圧部分に沿って上方外側に向かって広がりながら吹き出している。その内部、渦中心付近には上空で下降流の領域が存在する。地面付近の風速ベクトルは渦中心付近で風向風速ともに大きく変動している。

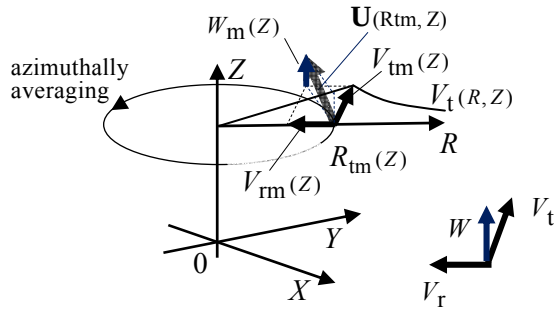


Fig. 8 Coordinate system and the definition of variables

4. 2セル型の渦内の気流性状

前述の種々の形態の渦のうち、自然界では3.2節で取り上げた2セル型の渦が多く観察されると考えられるので、本章では2セル型の渦内の気流性状について詳しくみる。

地面付近の渦内外の気流性状を、Fig.8に示すように接線方向風速 V_t 、半径方向の風速 V_r 、鉛直方向風速 W で評価し、時間平均値および最大値、最小値の鉛直面内の分布を調べる。各値は円周方向に平均した値、および、円周方向の最大値、最小値を求め領域内の最大接線風速 V_{tmax} により、各軸は最大接線風速半径 R_{tmax} により無次元化してFig.9に示す。

図より、接線方向風速 V_t 、鉛直方向風速 W とともに、地面から少し離れたところで最大値をとるが、半径方向風速 V_r はそれよりも地面近くで最も強くなり、その向きは渦の中心に向う風向（負の値）となっている。また、接線方向風速が最大値をとる付近では中心から外向きに向い、対応してFig.9bに示すように径方向からの風向角 α が90度よりも小さくなる。その他の部分、すなわち、地面付近および渦中心部の大部分では、風向角が90度より大きくなり風向は渦中心に向う。また、半径方向風速 V_r の最大値が生じる高度は接線方向風速、鉛直方向風速が最大値をとる高度よりも上方になる。各高さで、接線方向風速が最大値をとる半径 R_{tm} は地面付近で高さとともに大きくなる（Fig.9cに破線で示す）が、 $Z/R_{tmax}=0.8$ 付近で最大値をとったあと少し小さくなり、 $Z/R_{tmax}=1.2$ 以上ではほぼ一定の値を取る。鉛直方向風速が最大値をとる半径は R_{tm} よりも少し小さいが、 R_{tm} とほぼ同様の分布を示す。Fig.9f-kに示す接線方向、半径方向、鉛直方向各風速成分の最大値、最小値の分布をみると、いずれの成分でも最大値（正の値）は各方向風速の平均値が最大値をとる半径付近で生じているが、接線方向および鉛直方向風速の最小値（負の値）は渦中心部で、半径方向風速の最小値（負の

値）は地面付近で、それぞれ生じている。また、渦の中心付近では接線方向風速は最小値が負の値をとるので、瞬間的に渦の回転方向と反対になることがあるが、外側では接線方向風速は瞬間的にも負の値になることはない。

過去に実験室で行われた竜巻状の渦の研究によると、渦の形態はレイノルズ数による変化よりも、スワール比（Swirl ratio）による変化の方が大きいので、スワール比で整理されることが多い。その際、ガイドベーンで与えられる風向角、および上部の吸出し口と流入面のアスペクト比によりスワール比が定義されることが多いが、本研究では収束域に流入する風速はガイドベーンで調整されておらず、基準となる風向角を定義できないうえに、流入面の配置も一定ではないので上述のスワール比が定義できない。上部で吸出した流れを回流させ、収束域の周囲に吹き下ろして渦を発生させる形式の実験装置でも事情は同じで、収束域に流入する風向角を評価することが難しく、その際には高さ Z において接線方向風速が最大値をとる半径 $R_{tm}(z)$ 、 R_{tm} における接線方向風速の最大値 $V_{tm}(z)$ 、および上方から吸出される運動量 $Q=\pi R_t^2 W_0$ でスワール比 S を $\pi R_{tm}^2 V_{tm} / Q$ と定義することがあるが（Kuai et al., 2008）、本報でも同様の定義を用いる。したがって、ここではスワール比 S は高さ Z の関数として表され、Fig.10に $S(z)$ の分布を半径 R_{tm} における風速各成分 $V_{tm}(z)$ （接線方向成分）、 $V_{rm}(z)$ （半径方向成分）、 $W_m(z)$ （鉛直方向成分）とともに示す。

図より半径 R_{tm} におけるスワール比 S は地面付近で高さとともに大きくなり、 $Z/R_{tmax}=0.8$ 付近で最大値をとったあと少し小さくなり、 $Z/R_{tmax}=1.2$ 以上ではほぼ一定の値を取る。半径 R_{tm} の鉛直方向の分布形状も S の分布を同様な変化を示す。最大接線風速 V_{tmax} は $Z/R_{tmax}=0.3$ 付近で発現し、 R_{tm} が最大値を示す $Z/R_{tmax}=0.8$ 付近では接線風速の最大値 V_{tm} は極小値 0.75 を示し、それより上方ではほぼ一定値約 $V_{tm}/V_{tmax}=0.8$ となる。半径 R_{tm} における半径方向風速 V_{rm} は地面付近では負の値（中心に向う風向）をもつが、高さとともに大きくなって、一度正の値（外側に向う風向）をとった後、上方ではほぼ零となる。半径 R_{tm} における鉛直方向風速 W_m は正の値でほぼ一定値（ $W_m/V_{tmax}=0.1\sim0.2$ ）をとる。

次に最大接線風速の発現する高さ $Z=0.3 R_{tmax}$ における水平方向の圧力および風速の分布をみる。Fig.11に示すように、圧力 ΔP は最大接線風速 V_{tmax} による速度圧 $\rho V_{tmax}^2 / 2$ で割った風圧係数で最小-2.5程度、最大接線風速半径 R_{tmax} の位置で-1.5程度の値となる。接線方向風速 V_t は R_{tmax} より内側で渦中心か

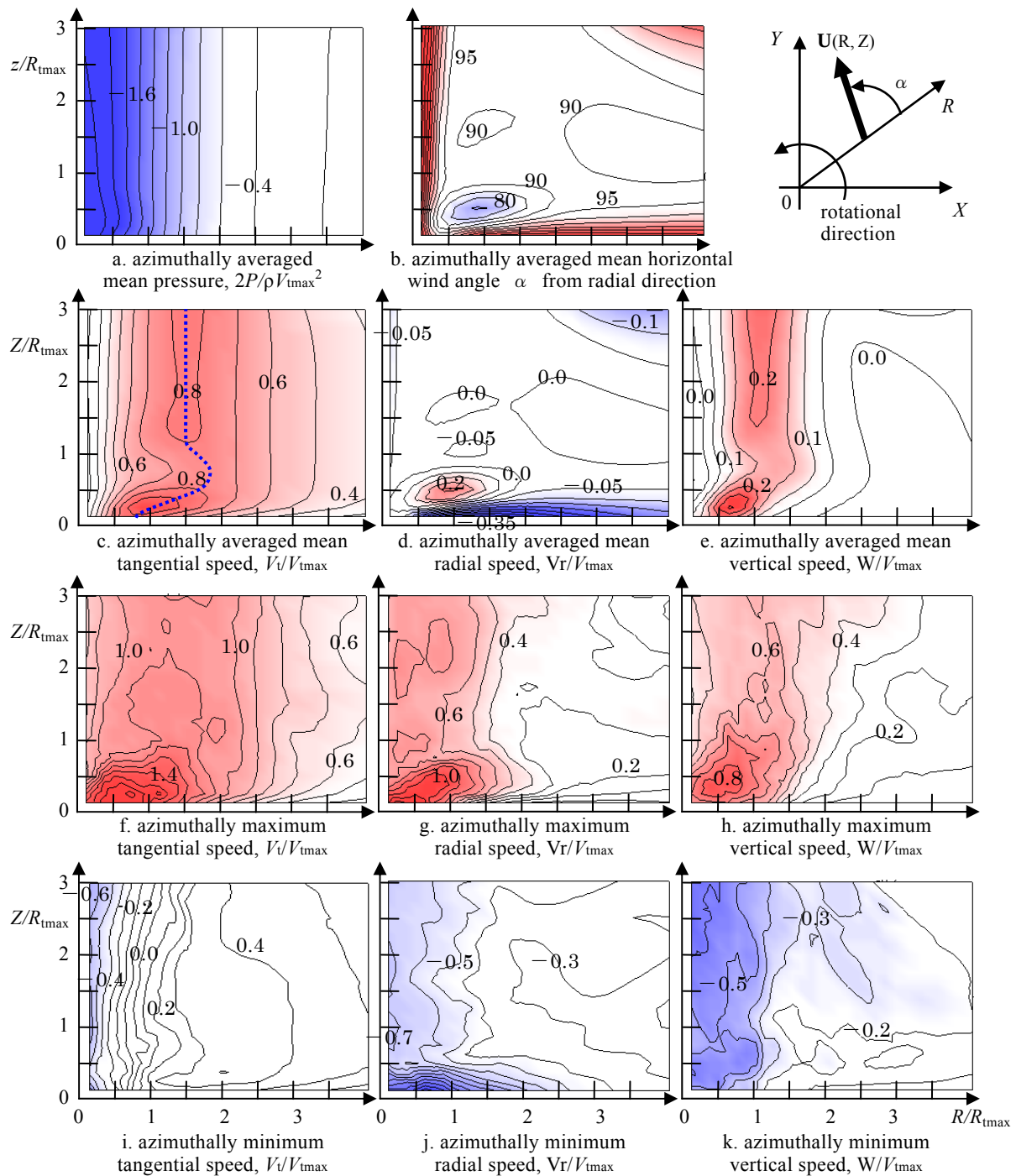


Fig. 9 Distributions of azimuthally averaged mean velocity and pressure field in a vertical plane.

Mean (time averaged) value of single core two cell type in Figure 4

らの距離 R にほぼ比例し、外側では R^{-1} にほぼ比例するランキン渦の分布に近くなっている。半径方向風速 V_r は中心付近で正（外側へ向かう風向）、 $0.7 R_{tmax}$ より外側では負の値（中心に向う風向）となっており、 $2R_{tmax}$ 付近で最小値をとる。鉛直方向風速 W は $0.7R_{tmax}$ 付近で最大値をとったあと外側に向うにつれて小さくなりほぼ零となる。

5. 渦内の平均風速と圧力分布

最後に、竜巻通過時の耐風設計用に重要となる渦内の気流性状について、平均風速と平均圧力分布を渦の形態別に調べる。Fig.12に示すように、最大接線風速が発現する高さにおける水平方向の平均風速と平均圧力分布をみると、多重渦型の渦では渦中心部分で平均圧力が少し上昇する。渦中心付近の低圧部

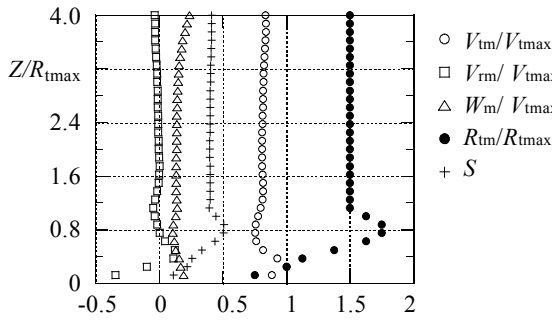
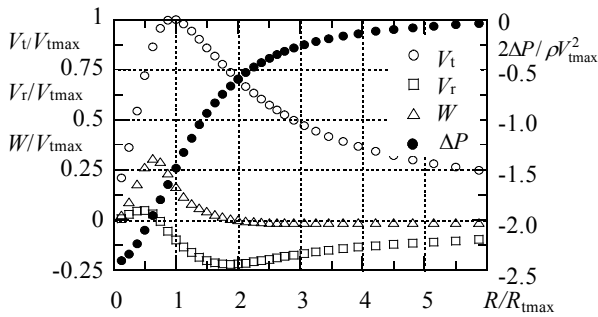
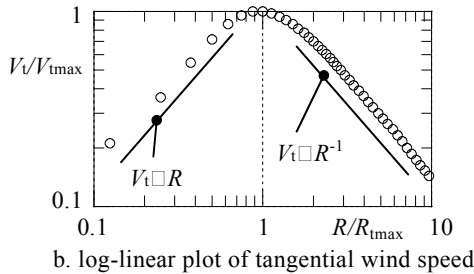


Fig. 10 Profiles of azimuthally averaged mean values of maximum tangential speed V_{tm} , the maximum tangential speed radius R_{tm} at which V_{tm} occurs, the radial speed V_{rm} , the vertical speed W_m and Swirl ratio S at R_{tm}



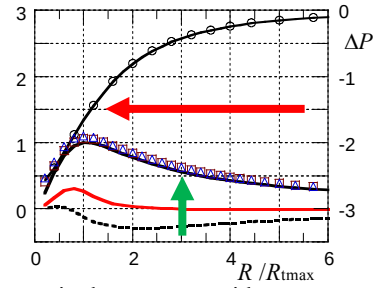
a. radial profiles of velocity and pressure



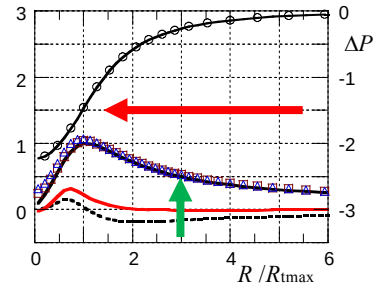
b. log-linear plot of tangential wind speed

Fig. 11 Variation of azimuthally averaged mean values of tangential speed V_t , radial speed V_r , vertical speed W and differential pressure ΔP from the surrounding mean pressure as a function of radial distance R at $Z = 0.3 R_{tmax}$.

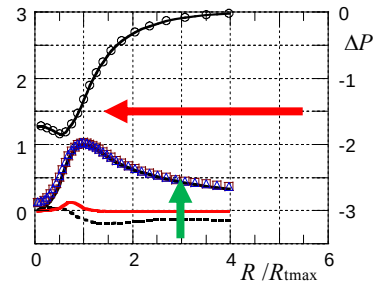
の等圧面が、螺旋状にねじれた渦では、中心付近の鉛直方向および半径方向の風速成分が大きく、風速絶対値の分布と接線方向風速成分の分布が異なる。等の違いがあるが、渦の形態によらず、最大接線風速発現位置における圧力降下は、最大接線風速で無次元化された風圧係数で周囲の気圧から1.5程度低くなること、渦中心から最大接線風速半径の3倍離れた位置では、接線風速が最大接線風速の約半分になること、がわかる。



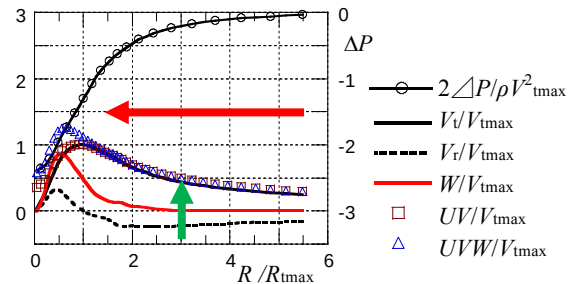
a. single core type without mean down flow region in the core



b. single core type with mean down flow region in the core



c. multiple core type



d. swirling core type

Fig. 12 Variation of azimuthally averaged mean values of tangential speed V_t , radial speed V_r , vertical speed W , horizontal speed UV , absolute speed UVW and differential pressure ΔP from the surrounding mean pressure as a function of radial distance R at the height where the maximum tangential speed occurs

6. おわりに

上部に吸い出し口をもつ円筒形の対流域、下部に正方形水平断面をもつ直方体の収束域をもつ竜巻発生装置を模擬した数値トルネードシミュレーターを作り、計算条件を変更することによって、種々の渦

を生成することができることを示した。生成された渦の中から、代表的な形態をもつものを取り上げ、渦内の気流性状を明らかにした。また、形態の異なる渦の共通の特徴として、1. 最大接線風速発現位置における圧力降下は最大接線風速で無次元化された風圧係数で周囲の気圧から1.5程度低くなること、2. 渦中心から最大接線風速半径の3倍離れた位置では、接線風速が最大接線風速の約半分になること、がわかった。一方、風速の鉛直方向成分および半径方向成分、最大接線風速半径内の圧力分布は渦の形態により複雑に変化した。

謝 辞

本研究は科研費（20560519）の助成を受けたものである。

参考文献

内田孝紀・杉谷賢一郎・大屋裕二（2004）：一様流中に置かれた急峻な単純地形まわりの気流性状の評価，日本風工学会論文集，No.100，pp.35-43.

丸山 敬（2008）：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，pp.481-488.

丸山 敬（2009）：数値トルネードシミュレータの特性，第23回数値流体力学シンポジウム論文集CD，12，G1-4.

文字信貴（1982）：竜巻渦の室内実験，京都大学防災研究所年報，第25号A，pp. 27-45.

文字信貴・光田寧（1983）：竜巻実験装置を用いた1セル及び2セル渦の研究，京都大学防災研究所年報，第26号B-1，pp. 393-401.

Church, C.R., Snow, J.T., Baker, G.L. and Agee, E.M. (1979) : Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio, J. Atmos., Sci., Vol.36, pp.1755-1776.

Kuai, L., Haan, F. L., Gallus, W. A. Jr. and Sarkar, P. P. (2008) : CFD Simulations of the flow field of a laboratory-simulated tornado for parameter sensitivity studies and comparison with field Measurements, Wind and Structures, 11(2), 75-96.

Characteristics of Numerically Generated Tornado-like Vortex

Takashi MARUYAMA

Synopsis

A numerical tornado simulator was developed and a tornado-like vortex was generated numerically by Large Eddy Simulation. The tornado simulator consists of a convection region and a convergence region. A series of unsteady flow fields of vortex were generated and examined the flow characteristics with varying the inflow conditions, the boundary conditions, and the configuration of calculating domain. Some of the typical vortices ; single core type without mean down flow region in the core, single core type with mean down flow region in the core, multiple core type and swirling core type were presented. The flow characteristics of the single core type with mean down flow region in the core were examined. The common feature of these vortices was summarized as, 1. The differential pressure ΔP from the surrounding mean pressure decreases to the value of $2\Delta P / \rho V_{t\max}^2 = -1.5$ at the position where the maximum tangential wind speed occurs, where ρ is the air density, $V_{t\max}$ the maximum tangential wind speed. 2. The tangential wind speed decreases to the half of $V_{t\max}$ at three times of the maximum tangential wind speed radius.

Keywords: tornado-like vortex, numerical simulator, flow characteristics, condition of generation