

2012 年 5 月 6 日につくばで発生した竜巻中の飛散物の速度推定

Velocity Estimation of Flying Debris in Tornado Occurred in Tsukuba-city on May 6, 2012

丸山 敬

Takashi MARUYAMA

Synopsis

The characteristics of flying debris in the tornado occurred in Tsukuba-city on May 6, 2012 was numerically investigated. The trajectories of flying debris were calculated using numerically generated unsteady turbulent wind fields of tornado-like vortex. The ground speeds of flying debris were obtained with the variety of the strength, the scale and the moving speed of tornado measured from the visual records such as videos or photos. The calculated maximum ground speeds of debris show good accordance with the measured values.

キーワード: 竜巻, 飛散物, 速度推定, 数値シミュレーション, LES

Keywords: tornado, flying debris, velocity estimation, numerical simulation, LES

1. はじめに

2012年5月6日, 北関東の広い範囲で複数の竜巻が発生し, 死者1名を含む50名以上の人的被害をはじめとして, 全半壊約600棟を含む2300棟以上の家屋が被害を受けた. この竜巻は日中に発生したこともあり, 多くの目撃証言が残され, テレビのニュースでも多くの被害映像が流れていたのは記憶に新しいところである. それらの被害の様子をみると, 強風で飛ばされたり, 破壊された建物の破片が衝突したことによる被害が数多くみられた. 飛来物としては, 小石などの小さな塊, 瓦などの外壁材の破片, 木の枝や破壊された建物の部材, さらに破壊された建物の家財など, 種々の物体の飛散が見受けられた.

強風による飛来物は建物に大きな衝撃を与え, 外装材を破壊したり, 貫通して室内に侵入する. 外装材の破壊は, その後の強風による風圧力によって構造部材または建物全体にまで被害が及ぶような重大な被害に発展することさえある. また, 室内に侵入した飛散物は人の生命を危険にさらす. したがって, 飛来物に対して建物および建物内の人の安全を確保するには, 飛来物の持つ衝撃力を把握し, 建物側が

それらの衝撃力に耐えるように設計する必要がある. 建物において飛来物が初めに衝突するのは外殻である壁や開口部, 屋根などの外装材であるため, これらの耐衝撃性能を評価し, 安全性を確保するための所定の性能があることを確かめる必要がある. しかし, 残念ながらわが国では, 外装材の耐衝撃性能に関しては法的な規制がないのが現状であり, 建築基準法でも耐衝撃性能は要求されていない. ただ, 飛来物に対する性能評価・試験方法の必要性は強く認識されており, 早急な整備に向けて評価・試験と基準策定に向けた検討がなされている. 本研究では, つくばで発生した竜巻を例にとり, 飛散物の飛翔特性を数値計算により明らかにし, 竜巻中の飛散物の速度を推定する.

2. 解析手法

ここでは, 竜巻による飛散物のもつ衝撃力を推定するために, 数値的に竜巻状の渦を発生させ, 竜巻中の非定常な乱流場を再現し, モデル化された飛散物をその中で放出して飛翔運動を計算して, 地面付近における飛散物の速度を求めることとした. 計算

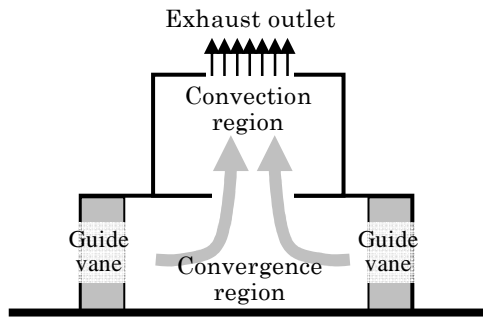


Fig. 1 Outline of numerical tornado simulator

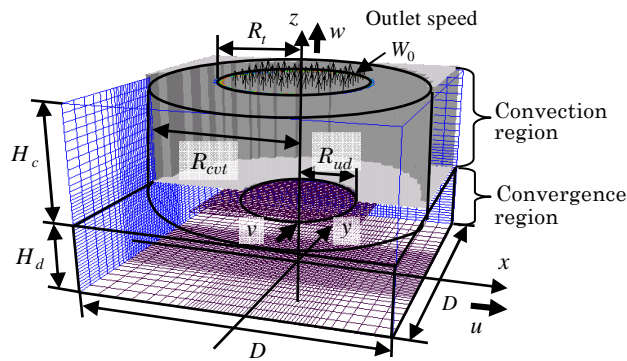


Fig. 2 Coordinate system and calculation grid

に用いた竜巻の代表的な風速や大きさ，すなわち，最大接線風速，最大接線風速半径，および移動速度は，被害調査結果から得られた範囲内で変化させた計算を行う．飛散物の空力特性は単純化し，記録された風速場に種々の位置から放出してその後の飛翔経路を求め，速度変化や最大値の発生位置などを調べた．以下では，用いた計算手法について解説する．

2.1 計算に用いた渦の作成方法

(1) 計算手法

ここで行う飛散物の飛翔性状の解析には，ラーゼ・エディ・シミュレーション（以下LESと表示）を用いた数値計算手法により発生させた竜巻状の非定常流れ場を用いる．計算は数値竜巻シミュレーター（Maruyama et al. 2011）により行い，竜巻状の渦を生成した．用いた数値竜巻シミュレーターは文字ら(1982,1983)が用いた竜巻発生装置に準じ，Fig. 1に示すように対流域と収束域をもっている．上部の対流域は円筒状で，上面中央部には円形の吸出口があり，一様な流出速度を与えて上昇流を発生させている．下部の収束域はFig. 2に示すように正方形断面をもつ直方体で，上部の対流域とは円形の開口部で繋がっている．下部の収束域の側面には，Fig. 3に示すように滑りなし境界条件，自由流入境界（勾配0）条件および風速を与えるディリクレ境界条件を用い，流入する気流性状を制御している．対流域上部の吸

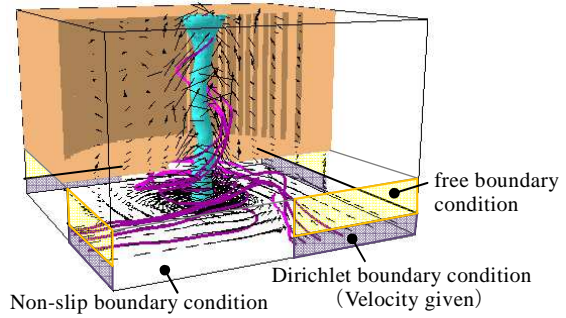


Fig. 3 Boundary condition of convergence region

Table 1 Dimension of calculation region

吸出口の半径, R_t	; 0.05 m
対流域の半径, R_{cvt}	; 0.6 m
対流域下部の開口半径, R_{ud}	; 0.15 m
収束域の幅, D	; 1.2 m
対流域の高さ, H_c	; 0.6 m
収束域の高さ, H_d	; 0.2 m
吸出口の風速, W_0	; 1.0 m/s
格子間隔（不等間隔）	
水平方向	; 0.006 – 0.03 m
鉛直方向	; 0.006 – 0.016 m
格子数	
水平方向	; 90
鉛直方向	; 55（対流域）
	; 35（収束域）

出口および収束域の側面以外はすべて個体壁面とし，滑りなし条件を与えている．数値計算は差分法を用い，乱流モデルにスマゴリンスキーモデルを用いたLES計算コードRIAM-COMPACT（内田ら2004）を一部改造して行った．計算領域のディメンションをTable 1に示す．後述する飛散物の飛翔計算に用いるために，計算された竜巻状の渦内部における3次元的な風速の時間変動データを記録した．

(2) 発生させた渦の気流性状

実際の竜巻は気象条件や発生位置などによって，渦の形態や内部の気流性状も様々に変化する．今回，解析対象とするのは，つくば市において多くの建物被害をもたらした竜巻で，後日行われた調査（前田ら2013）により計算に必要な諸要素が明らかにされているものである．その結果によると，対象とする竜巻は一つの渦管を持った渦で，回転方向は上から見て反時計回り，多くの記録から乱流化が進んだ状態であるとみなすことができることがわかっている．被害の発生時刻の推移，気象レーダーの記録等から，移動速度が11～34m/s（40～122km/h），ビデオ映像や被害などの分布から最大接線風速 V_{tmax} が24～83m/s，最大接線風速半径 R_{tmax} は直径18～30mと見積もられている．内部の気流性状に関しては渦の中央部分に平均的な下降流が存在する（2セルタイプ）か，存在しない（1セルタイプ）かは，ビデオ映像

からははっきりしないが、乱流化した気流性状が見られることから、2セルタイプの状況も起こっていたと推測される。

竜巻中の風速分布はランキン渦で近似されることが多いが、ここでは、前術のようにLESを用いた数値計算により作り出された渦内の速度場の時刻歴データを用いる。数値竜巻シミュレーターを用いると上部吸出口の流出速度、対流域の形状（半径、高さ）、対流域と収束域の間の開口部の大きさ、収束域の形状（幅、高さ）、収束域の壁面の境界条件を変化させることにより、種々の性質をもった渦を発生させることができる（Maruyama et al. 2011）。自然における渦の形態も種々のものが観察されるが、2セルタイプの竜巻はスワール比が高いときに比較的多く発生すると考えられる。以上の考察、および前述の観測等から得られたつくばの竜巻の性状を参考にし、渦中心に平均的な下降流がある2セルタイプの渦を飛散物の計算に用いる気流性状として選んだ。渦内の気流性状をFig. 4, 5に示す。計算結果は、水平方向に渦の平均的な中心から最大接線風速半径の約13倍、鉛直方向に最大接線風速半径の約18倍の大きさを持つ直方体領域内の計算格子点における値を出力し、風速3成分と圧力の時間変化を保存した。飛散物の飛翔計算に際して、竜巻中の空間的な風速変動分布が実際の竜巻と計算で発生させた渦において相似であると仮定し、最大接線風速と最大接線風速半径を相似パラメータとして、両者の時間スケールを対応づけた。なお、渦の計算において計算格子の最少幅は、渦中心部地面付近において、水平・垂直方向ともに最大接線風速半径の1/8程度である。

2.2 飛散物の飛翔計算

(1) 飛散物の空気力学的モデル化

飛散物は様々な形状を持っており、それに応じた空力特性を示す。これまでに行われた飛散物の空力特性や飛散性状に関する研究成果を見ると、飛散物は形状により、塊状・板状・棒状に大別され、それぞれの形状によって異なる飛散性状を示すことがわかっている。また、飛散物の飛翔性状は飛散開始時の姿勢、気流との相対速度などの初期条件、飛翔中の気流性状などによっても影響を受けて変化する。しかし、これらの影響を調べた結果によると、平均的な軌道は相対的な風向角に依存しない物体の軌道とほぼ等しいとみなせる（竹内ら2010、野田ら2012）ことがわかっている。また、竜巻の乱流中では風向や風速が大きく変化すると考えられるので、風向角に対する空力特性は平均的な値を用いても計算結果に大きな影響を与えないと考えた。そこで、平均的な空力係数は各軸方向の代表的な値を各方向の面積

で重み付した平均値として飛散物の空力特性を代表させた。また、風向風速が大きく変化する気流内ではマグナス効果の影響も小さいと考え、無視している。

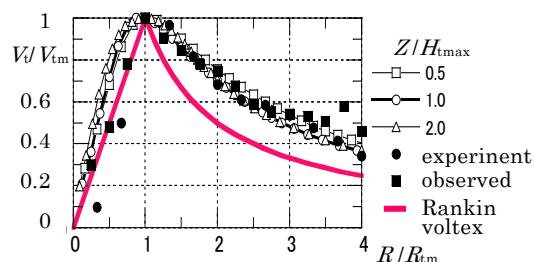


Fig. 4 Comparison of azimuthally averaged mean values of tangential speed V_t

V_{tm} : maximum tangential speed of each height, R_{tm} : maximum tangential speed radius, V_{tmax} : maximum value of V_{tm} , H_{tmax} : height where V_{tmax} is observed, experimental observed data is from Kuai et al., 2008

(2) 運動方程式

前述の考察のもと、ここでは飛散物が回転運動をしない球体とみなして、空気力は相対風向角方向にのみ加わるものとする。この場合の飛散物の飛翔運動を記述する方程式は、次式(1)のように表される

$$m\ddot{\mathbf{x}} = \frac{\rho C_D A}{2} |\tilde{\mathbf{U}} - \dot{\mathbf{x}}| (\tilde{\mathbf{U}} - \dot{\mathbf{x}}) - \delta_{i3} g \quad (1)$$

ここで、 $\ddot{\mathbf{x}} = (\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})$, $\dot{\mathbf{x}} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) = (\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})$, $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ はそれぞれ、飛散物の加速度ベクトル、速度ベクトル、位置ベクトルで、 ρ は空気密度、 C_D は抗力係数、 A および m は飛散物の代表面積および質量、 $\tilde{\mathbf{U}} = (\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{W})$ は風速、 g は重力加速度、 δ_{ij} はクラネッカーのデルタで、下付きの添え字 i, j は3が鉛直軸方向を表し、 i, j が同じ場合に1、その他で0を表す。また、上付きの \sim はFig. 6に示すように数値計算領域内の空間に固定された座標系における有次元の値を表す。立川ら（1980）に倣って代表風速 U_0 と重力加速度 g で無次元化された時間、距離、速度および加速度

$$\text{時間} : t = \tilde{t} g / U_0 \quad (2)$$

$$\text{距離} : x = \tilde{x} g / U_0^2, y = \tilde{y} g / U_0^2, z = \tilde{z} g / U_0^2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{速度 (物体)} : u &= \tilde{u} / U_0 = \dot{\tilde{x}}_1 / U_0, \\ v &= \tilde{v} / U_0 = \dot{\tilde{x}}_2 / U_0, \\ w &= \tilde{w} / U_0 = \dot{\tilde{x}}_3 / U_0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{速度 (流体)} : \\ U &= \tilde{U} / U_0, V = \tilde{V} / U_0, W = \tilde{W} / U_0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{加速度 (物体)} : \\ \ddot{x} &= \ddot{\tilde{x}}_1 / g, \ddot{y} = \ddot{\tilde{x}}_2 / g, \ddot{z} = \ddot{\tilde{x}}_3 / g \end{aligned} \quad (6)$$

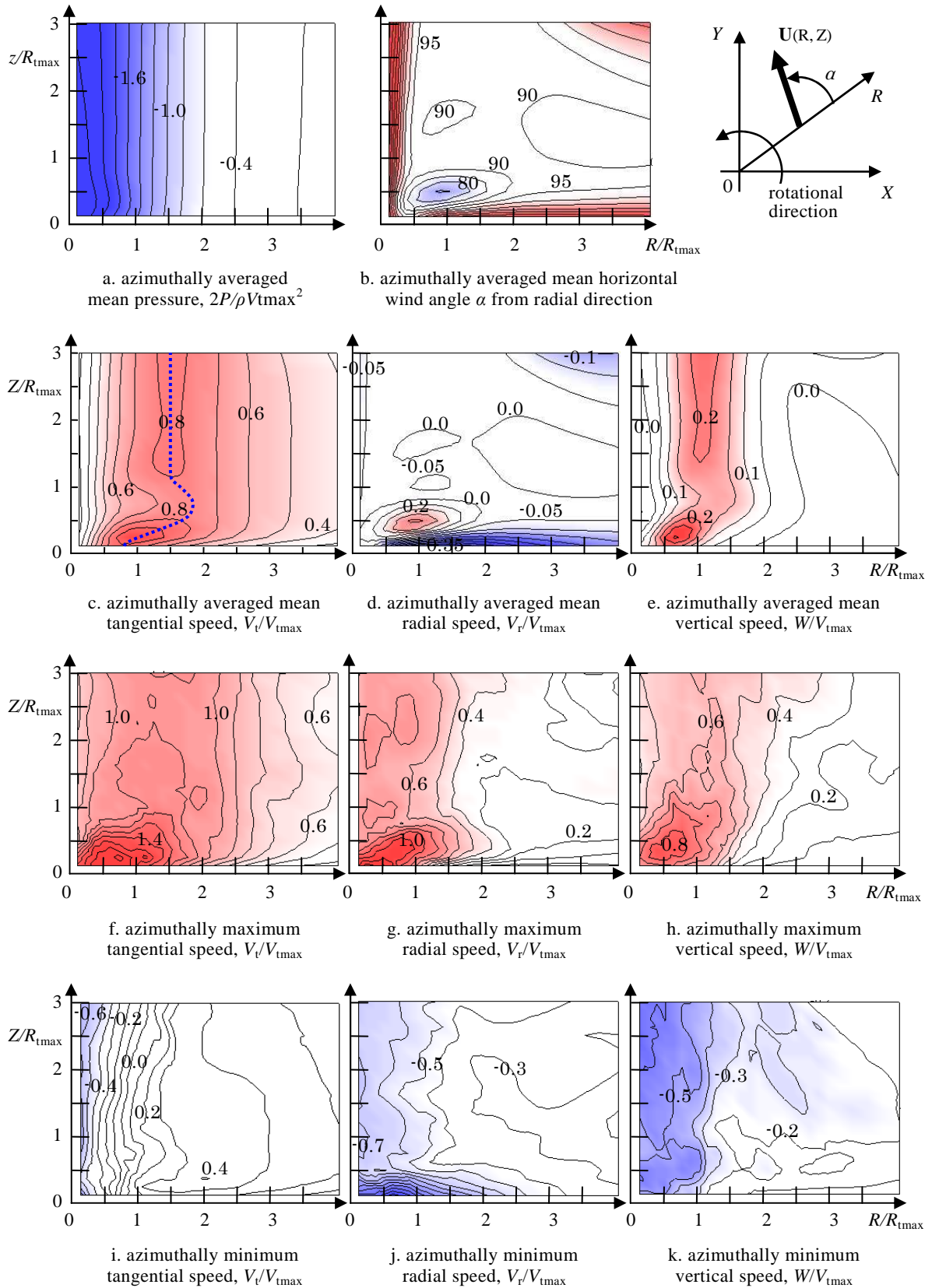


Fig. 5 Flow characteristics of tornado like vortex which was use for the calculation of flying debris.

All plots are shown the azimuthally averaged mean values. ΔP : pressure difference from the averaged surrounding pressure, V_{tmax} : maximum value of tangential speed, R : distance from the center of vortex, R_{tmax} : maximum tangential speed radius, pressure is normalized by $\rho V_{tmax}^2/2$, where ρ is the density.

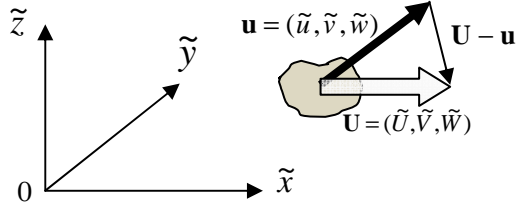


Fig. 6 Coordinate system and velocity of flying debris and wind

を用いて式(1)を無次元化すると、物体の飛散を記述する運動方程式は以下のように記述できる。

$$x \text{ 軸方向: } \ddot{x} = T_a C_{Dx} (U - u) |\mathbf{U} - \mathbf{u}| \quad (7)$$

$$y \text{ 軸方向: } \ddot{y} = T_a C_{Dy} (V - v) |\mathbf{U} - \mathbf{u}| \quad (8)$$

z (鉛直) 軸方向:

$$\ddot{z} = T_a C_{Dz} (W - w) |\mathbf{U} - \mathbf{u}| - 1 \quad (9)$$

ここで、 T_a は次式で表されるTachikawa数 (Holmes et al., 2006) で、

$$T_a = \frac{\rho A U_0^2}{2mg} = \frac{\rho U_0^2}{2C_{D^*} g} \frac{C_{D^*} A}{m} \quad (10)$$

C_{D^*} は C_{Dx} , C_{Dy} , C_{Dz} で、それぞれ代表面積 A に対する x , y , z 方向の抗力係数。 \mathbf{U} は無次元化風速、 $|\mathbf{U} - \mathbf{u}|$ は飛散物と気流の相対風速の大きさ

$$|\mathbf{U} - \mathbf{u}| = \sqrt{(U - u)^2 - (V - v)^2 - (W - w)^2} \quad (11)$$

である。

(3) 数値計算法

数値計算に際しては式(7)~(9)を線形加速度法により離散化し、積分した。なお、渦の流体計算は飛散物の飛翔計算とは別に行い、物体に加わる風力の反力を流場に反映させていない。また、計算に際して U_0 は渦の最大接線風速 V_{tmax} として、式中の $T_a C_{D^*}$ は次式で与えた。

$$T_a C_{D^*} = \frac{\rho V_{tmax}^2}{2g} \frac{C_{D^*} A}{m} \quad (12)$$

飛散物の渦内における計算に先立ち、上述の離散化による計算方法が物体の運動をどの程度の精度で再現するか、水平方向の風速が一定であるとした場合の移動距離を解析値と比較した。Holmes 2007によると、風速が一定値 U_0 であるような気流中を飛翔する x 軸方向の物体の加速度 \ddot{x} と速度 u_m は

$$\ddot{x} = T_a C_D (U_0 - u_m) |U_0 - u_m| \quad (13)$$

と記述でき、 $t=0$ のとき $x=0$ とすると、上式は解析的に解けて

$$u_m(t) = \frac{kU_0^2 t}{1 + kU_0 t} \quad (14)$$

$$x(t) = U_0 \left[t - \left(\frac{1}{kU_0} \right) \ln(1 + kU_0 t) \right] \quad (15)$$

となる。ここで k は物体の密度 $\rho_m = m/V$ と代表長さ l を用いて

$$k = \frac{\rho C_D}{2\rho_m l} \quad (16)$$

と表されるので、物体が球と等価であると仮定すると、

$$V = \frac{4\pi r^3}{3}, \quad l = 2r, \quad T_a = \frac{\rho A U_0^2}{2mg}$$

$$k = \frac{A \rho C_D}{3m} = T_a C_D \frac{2g}{3U_0^2} \quad (17)$$

の関係がある。 $U_0 = 50 \text{ m/s}$, $r = 1 \text{ m}$ として立川数 T_a を0.1から1000、積分時間ステップを無次元化時間 dt で0.0001から0.05まで変化させて計算し、式(14), (15)による解析値と数値計算結果を比較したところ dt の値が小さいほど解析解との誤差は小さくなり、 $dt = 0.05$ のときに最大で $T_a = 100$, 1000m進んだときに距離で最大16.4mの差が生じ、1.7%以下の誤差、速度で0.2m/sの差が生じ、0.4%以下の誤差であった。実際の渦内での飛散物の飛翔計算は、最大接線風速 V_{tmax} を基準風速 U_0 として無次元化した時間ステップ $dt = 0.001$ ごとに積分して物体の位置、速度、加速度を求めた。

(4) 空力パラメータ

飛散物の空力特性は式(7)~(10)中のパラメータ $T_a C_{D^*}$ あるいは $C_{D^*} A/m$ で与えられる。ここでは、物体を球体と単純化しているため、実際に飛散する可能性のある物体の空力パラメータの値を見積もっておく。塊状の物体の代表面積 A は物体の体積 V が球と等価な場合の見つけ面積

$$A = \pi r^2 = \frac{3V}{4r} \quad (18)$$

として評価した。ここで、 r は体積が物体と等価な球の半径で $r = \sqrt[3]{3V/4\pi}$ である。また、棒状および平板状 (直方体とする) の物体の平均的な $C_{D^*} A$ は各

Table 2 Aerodynamic parameters of flying debris

物体	高さ z (m)	幅 y (m)	奥行 x (m)	C_{Dz}	C_{Dy}	C_{Dx}	質量 m (kg)	$C_D A/m$ (m^2/kg)	TaC_D 注1)
木片	0.04	0.09	2.00	1.2	1.2	2.0	3.6	0.030	11.9
木片	0.04	0.09	0.10	1.2	1.2	2.0	0.18	0.042	16.9
石	0.10	0.10	0.10	2.0	2.0	2.0	3.0	0.007	2.8
小石	0.01	0.01	0.01	2.0	2.0	2.0	0.003	0.067	26.7
瓦	0.01	0.30	0.30	1.2	2.0	2.0	2.7	0.015	5.9
物置	1.80	0.90	1.50	2.0	2.0	2.0	120	0.032	12.6
室外機	0.80	0.25	0.30	2.0	2.0	2.0	10	0.034	13.8
乗用車	3.10	1.60	1.30	2.0	2.0	2.0	1430	0.005	2.1
トラック	5.00	1.90	1.30	2.0	2.0	2.0	4750	0.003	1.0
プレハブ小屋 (空)	1.85	1.85	2.60	2.0	2.0	2.0	460	0.019	7.6
庇	0.20	2.10	11.0	1.2	2.0	2.0	680	0.016	6.5
太陽光パネル	0.05	1.00	1.20	1.2	2.0	2.0	14.5	0.038	15.3
鉄パイプ	1.00	0.05	0.05	2.0	0.7	0.7	4.2	0.006	2.4
鉄パイプ	2.00	0.05	0.05	2.0	0.7	0.7	8.4	0.006	2.4
ドラム缶 (空)	0.90	0.60	0.60	2.0	0.7	0.7	24	0.021	8.2
木の厚板 注2)	3.66	0.29	0.09	2.0	2.0	2.0	14	0.027	10.8
自動車 注2)	5.00	2.00	1.30	2.0	2.0	2.0	1810	0.007	2.8

注 1) $V_{\max} = U_0 = 80m/s$ の場合の値

注 2) 文献 11) に示された値

軸方向の見つけ面積 A_x, A_y, A_z , および抗力係数 C_{Dx}, C_{Dy}, C_{Dz} を用いて,

$$C_D A = \frac{1}{3} (C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z) \quad (19)$$

として求めた. ここで, 式(12)からわかるように, 空力パラメータ $T_a C_D$ の値は基準風速 V_{\max} によって変化するので, 基準風速によって変化しない空力パラメータ $C_D A/m$ の値も示してある. 幾つかの代表的な飛散物に対する $C_D A/m$, $T_a C_D$ の値を, Table 2 にまとめる.

(5) 飛散開始条件

飛散物の速度は物体の形状, 重さ, 物体の飛散開始位置 (地面からの高さ, 渦に対する相対的な位置), 初期速度, さらには渦の移動速度や渦内の気流性状の違いによって様々に変化する. 実際の竜巻による飛散物の飛散開始状況を考えると, 物体は必ずしも地面から飛び出すわけではなく, 屋根の上から飛び出したり, 壊れた建物の部材が飛び始める場合もある. また, 飛び始める際の周囲の風速も, 物体を移動させるに十分な空気力が加わるほど大きな場合だけでなく, 風速が小さくても他の飛散物の衝突による衝撃力により飛び出す, 飛散している物体が分解する, など, 様々な条件が考えられる. このように, 飛散開始条件を評価することは複雑で多岐にわたっているため, ここでは, 渦の中央付近のある範囲内において時空間的に一様に物体を放出し, 十分多くの飛翔経路を計算することによって, 統計的に偏り

のない飛散特性を求めることを考えた. 物体を投入する高さは, 物体がどのくらいの高さまで到達するか, を考慮して決めることになると思われるが, ここでは物体の投入高さを U . S. Nuclear Regulatory Commission 2007 に準じて最大40mまでとし, それ以下の幾つかの高度から放出した. また, 放出時の速度も種々考えられるが, ここでは地面に対する相対速度が0として飛散し始めるとする.

上述の考察により物体の投入位置は一定高度で, Fig. 7に示すように最大接線風速半径の3倍×3倍の範囲で, 最大接線風速半径の1/4間隔で一様な分布となるように投入し, 各物体が地面に落下するまで追跡し, その間の飛翔性状を記録した. したがって, プログラムの中で一度に計算する飛散物の数は625個とし, 各飛散物が地面に落下する, あるいは水平方向に最大接線風速半径の約13倍, 鉛直方向に最大接線風速半径の約18倍の大きさを持つ解析領域から外に出るごとに新しい飛散物を投入し, 同じ投入位置では異なる時刻に次の物体を放出することになる. 各投入位置から放出する物体の個数について事前に幾つかの条件で放出数を変化させて調べたところ, 最大速度に関しては放出数500個と2000個では2000個の場合の方が1%程度大きくなっただけで, ほとんど違いがなかったため, ここでは500個放出した結果を示す. 各飛散物が地面に落下する, あるいは解析領域から外に出るまでの速度, 位置等を記録した.

つくばの竜巻被害では, 自動車等かなり重たく大きな物体も強風により飛ばされていたが, これら自

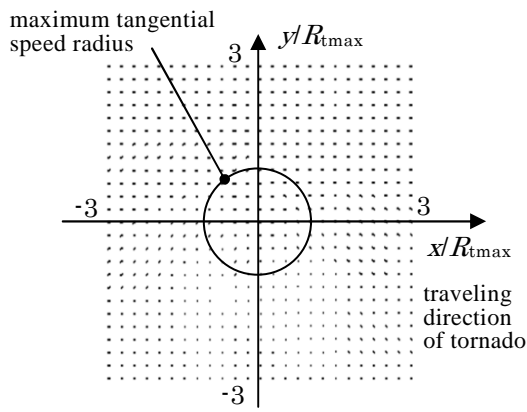


Fig. 7 Release points of flying debris

動車等が他の建物等を破壊するほどの高さまで飛んだものは少なかったと考えられる。ここでは、衝突により風下の建物を破壊して被害を及ぼす可能性の高い、比較的遠くまで飛ぶ物体（小石や木片）の飛翔性状を調べることとし、前項で示した空力パラメータ $C_D A/m$ の値で0.007から0.07までの範囲（ $C_D A/m = 0.007, 0.04, 0.07$. 最大接線風速=80m/sとした場合、 $T_a C_D$ の値で2.7から27）の計算を行った。計算に際して、投入高さを5,10,20,30,40m, 最大接線風速を50,80m/s, 最大接線風速半径を20,25,30m, 渦の移動速度を15,25,35m/sと、それぞれ変化させて影響を調べた。計算に用いた渦の気流性状は渦が移動しない場合の竜巻シミュレーターによる計算結果を用いており、渦の移動は、渦の計算を行った座標系を渦の移動速度で動かしているだけである。すなわち、物体の運動を計算する座標系では投入時の物体の速度は渦の移動速度（反対方向）とし、飛散物の対地速度は物体の計算結果と渦の移動速度の和として求めた。

3. 計算結果

3.1 物体の飛散性状

Fig. 8に物体の飛散例を示す。渦は上から見て反時計回りに回転し、 x 軸方向に移動している。物体はおおむね渦の回転に沿って飛翔する。物体は放出位置において、物体を持ち上げるのに十分な鉛直上方の風速成分が存在すると、いったん上昇した後、下降する。以下では、建物に被害を及ぼす効果を評価するという観点から、飛散物の対地最大水平速度

$$\sqrt{(\tilde{u} + \tilde{V}_r)^2 + \tilde{v}^2} \quad (\text{ここで } \tilde{V}_r \text{ は渦の移動速度})$$

で衝撃力を検討する。Fig. 8に示すように物体の飛散は3次元的に分布するが、以下では、解析範囲内の全ての x における対地最大水平速度を、渦の進行方向前方から渦の方を見た $y-z$ 鉛直面に投影した図で検討を行う。

(1) 放出高さの影響

Fig. 9に示すように、対地最大水平速度は渦の中心の左側、渦の回転と移動速度が加わり風速の大きくなる領域で大きくなる。物体の存在する範囲は放出高さに伴って高くなる。また、飛散物の最高速度の発現位置も渦の左側、最大接線風速半径の3倍以内に見られ、放出高さと共に上空に広がる。ただし、対地最大水平速度は放出高さ40mよりも低い方が大きくなったが、5から20mではほとんど変わらなかった。Fig. 9に示した条件（ $C_D A/m = 0.07$, 最大接線風速80m/s, 最大接線風速半径30m, 渦の移動速度35m/s）では対地最大水平速度は99~109m/sとなった。衝撃力を評価するうえでは、飛散物の持つ運動量やエネルギーの値も重要なので、対地最大実効速度

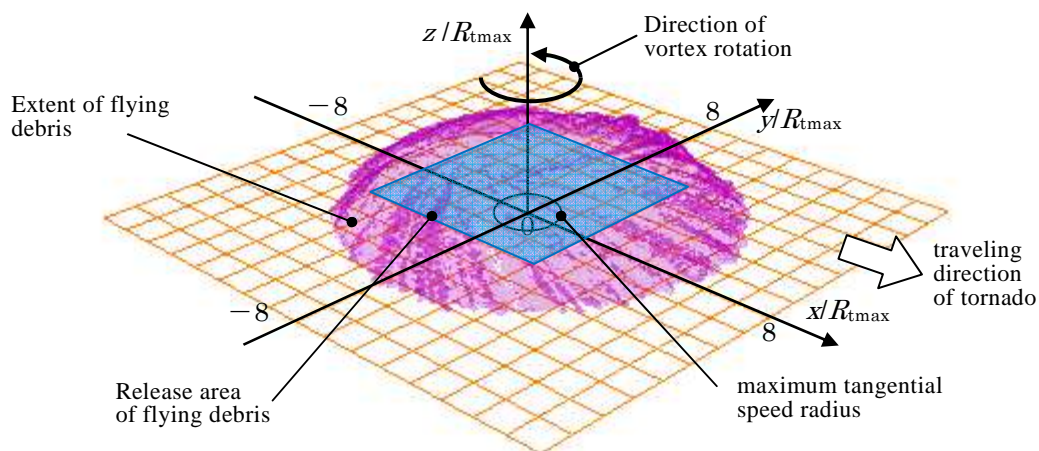


Fig. 8 Extent of flying debris released from square plane shown in the coordinate fixed on the vortex

$\sqrt{(\tilde{u} + \tilde{U}_m)^2 + \tilde{v}^2 + \tilde{w}^2}$ についても調べると99～112m/sとなり、対地最大水平速度とほとんど変わらず、いずれも最大値は高さ5mから放出した場合に生じた。

(2) 空力パラメータ $C_D A/m$ の影響

空力パラメータ $C_D A/m$ の値は物体の飛び易さを示すので、Fig. 10に示すように $C_D A/m$ の値が大きくなるほど最大水平対地速度は大きくなり、今回計算を行った、最大接線風速80m/s、最大接線風速半径30m、放出高さ5、40m、渦の移動速度35m/sの範囲では、対地最大水平速度は67～109m/s、対地最大実効速度は70～112m/sとなり、いずれも最大値は $C_D A/m = 0.07$ の場合に生じた。

(3) 最大接線風速 V_{max} の影響

物体が受ける空気力は風速の2乗に比例して大きくなるので、Fig. 11に示すように最大接線風速が大きくなるほど最大水平対地速度は大きくなった。今回計算を行った、 $C_D A/m = 0.07$ 、最大接線風速50、80m/s、最大接線風速半径30m、放出高さ5、10、40m、渦の移動速度35m/sの範囲では、対地最大水平速度は80～109m/s、対地最大実効速度は81～112m/sとなり、いずれも最大値は最大接線風速80m/sの場合に生じた。

(4) 渦の移動速度 V_v の影響

Fig. 12に示すように、渦の移動速度が大きくなるほど最大水平対地速度は大きくなった。今回計算を行った、 $C_D A/m = 0.07$ 、最大接線風速80m/s、最大接線風速半径30m、放出高さ5、10、40m、渦の移動速度15、25、35m/sの範囲では、対地最大水平速度は86～109m/s、対地最大実効速度88～112m/sとなり、いずれも最大値は渦の移動速度35m/sの場合に生じた。

(5) 最大接線風速半径 R_{max} の影響

今回計算を行った、 $C_D A/m = 0.07$ 、最大接線風速80m/s、最大接線風速半径20、25、30m、放出高さ5、10、40m、渦の移動速度35m/sの範囲では、Fig. 13に示すように、放出高さ5mでは最大接線風速半径が大きくなるほど最大水平対地速度は大きくなった。図には示していないが、放出高さ40mでは放出高さ5mよりも最大値はわずかに小さくなった。最大水平対地速度は98～109m/s、対地最大実効速度99～112m/sとなり、いずれも最大値は最大接線風速半径30mの場合に生じた。

3.2 飛散物の衝撃力の検討および考察

前節の計算結果をまとめると、以下のようになる。

- ・物体の飛び易さを示す $C_D A/m$ が大きいほど、最大接線風速や最大接線風速半径、さらには渦の移動速度が大きいほど飛散中の対地最大速度は大きくなる。
- ・飛散物の対地最大速度は渦の回転と移動速度が加わり風速が大きくなる領域で大きくなり、対地最大速度の発現位置は最大接線風速半径の3倍以内に見られ、放出高さに伴って上方に広がる。

飛散物の衝撃力は速度が大きいほど大きいと考えられるので、飛散物の持つ衝撃力を飛散中の最大速度を持つときの運動量、運動エネルギーで評価する。2.2(5)の考察から、ここで評価する飛散物は衝突により風下の建物を破壊して被害を及ぼす可能性の高い小石や木片を想定し、Table 2の中で $C_D A/m$ の値が計算で用いた値に近い石(3kg)、木片(0.18kg)、小石(0.003kg)とした。今回行った計算条件の範囲内で飛散中の対地水平速度、および、対地最大実効速度が最大値を取る場合の運動量、運動エネルギーを求めTable 3にまとめた。それによると、石(3kg)、木片(0.18kg)、小石(0.003kg)に対する運動量、運動エネルギーの最大値は、それぞれ、216,19,0.3 kgm/s、156,1.9,0.04 kJとなった。

計算に用いた渦の風速は、ビデオ画像や被害程度から推測されたものである。とくに、ビデオ画像の解析は、飛散物の速度を測定しているために、実際の風速はそれよりも大きくなっている可能性が高い。また、上空の風速は地面付近よりも早いとみられるので、上空の渦内の風速は被害から推定された速度より大きいと考えられる。しかし、平均風速の最大値がどれくらい大きいかについては不明な点が多いので、今回の解析ではビデオ画像などで求めた値を渦の最大平均風速として用いた。一方、ここで評価した石や木片では、最大飛散速度は渦の最大接線風速の時間平均値と移動速度の合計の63%から97%となった。計算に用いた渦内の気流性状は非正常乱流場なので、Fig. 5に示したように瞬間的には平均値の最大1.7倍程度になり、また、上空に舞上がった飛散物は落下時に加速されることを考慮すると、飛散物が平均風速の最大値まで増速している結果は妥当なものと考えられる。この結果は、ビデオ画像の解析結果などから得られた飛散物の最大速度で、渦の最大平均風速を評価しても大きな差は生じないことを示唆している。

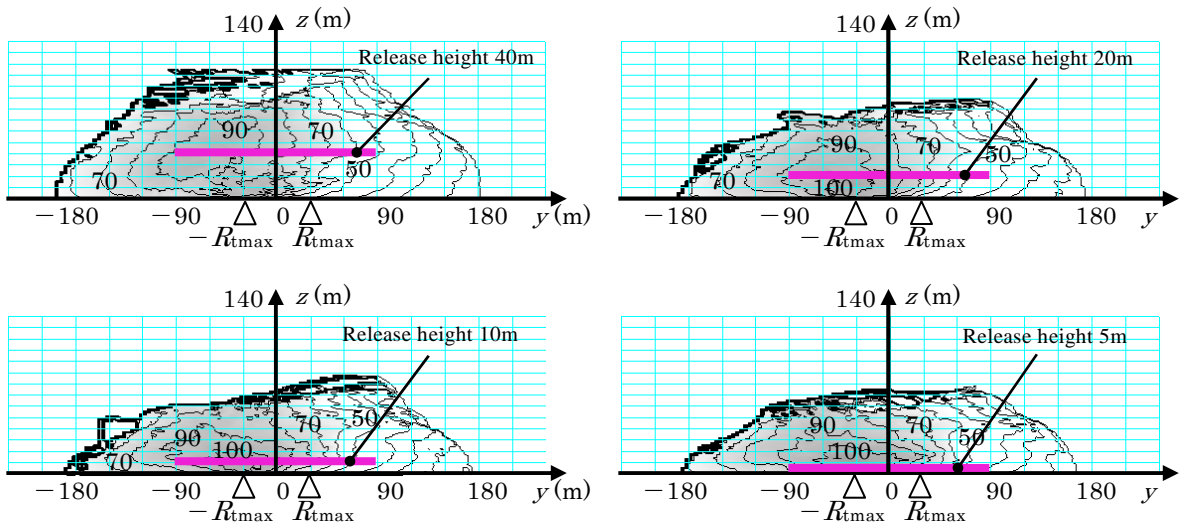


Fig. 9 Variation of distribution of maximum horizontal speed U_{rgmax} (m/s) of flying debris with release height
 $C_D A/m = 0.07(m^2/kg)$, $V_{tmax} = 80(m/s)$, $R_{tmax} = 30(m)$, $V_{tr} = 35(m/s)$

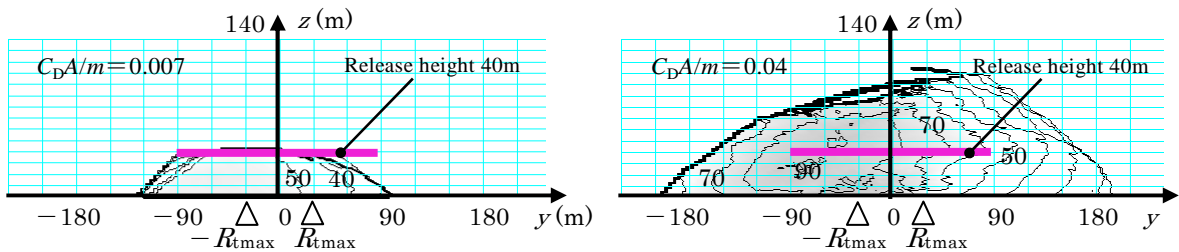


Fig. 10 Variation of distribution of maximum horizontal speed U_{rgmax} (m/s) of flying debris with $C_D A/m$
 Release height 40m, $V_{tmax} = 80(m/s)$, $R_{tmax} = 30(m)$, $V_{tr} = 35(m/s)$

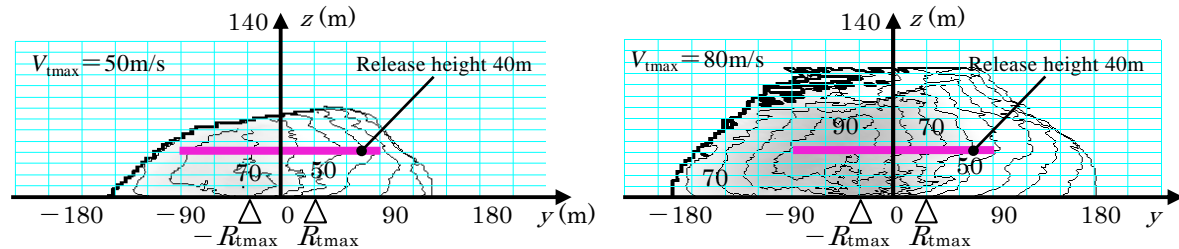


Fig. 11 Variation of distribution of maximum horizontal speed U_{rgmax} (m/s) of flying debris with V_{tmax}
 $C_D A/m = 0.07(m^2/kg)$, release height 40m, $R_{tmax} = 30(m)$, $V_{tr} = 35(m/s)$

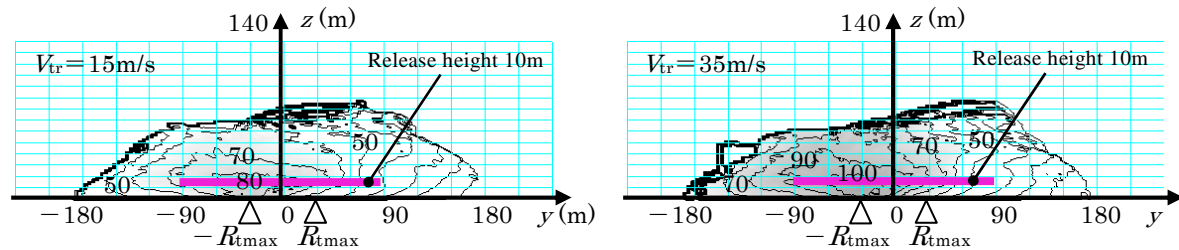


Fig. 12 Variation of distribution of maximum horizontal speed U_{rgmax} (m/s) of flying debris with V_{tr}
 $C_D A/m = 0.07(m^2/kg)$, release height 10m, $R_{tmax} = 30(m)$, $V_{tmax} = 80(m/s)$

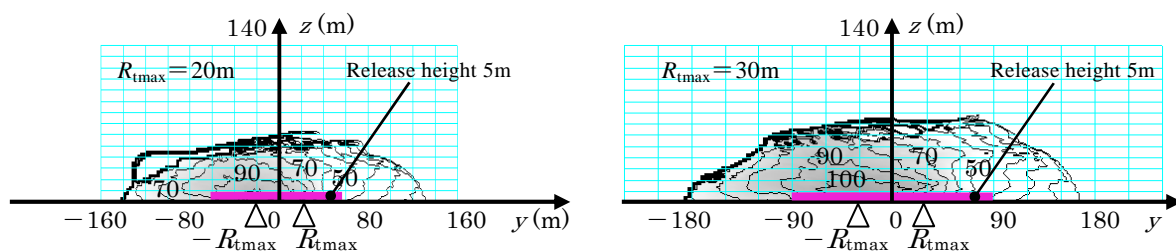


Fig. 13 Variation of distribution of maximum horizontal speed U_{rgmax} (m/s) of flying debris with R_{tmax}
 $C_D A/m = 0.07(m^2/kg)$, release height 5m, $V_{tr} = 35(m/s)$, $V_{tmax} = 80(m/s)$

Table 3 Maximum values of momentum and kinetic energy of flying debris

Body	Aerodynamic parameter $C_D A / m$ (m^2/kg)	Ground speed (m/s)	Mass (kg)	Momentum (kgm/s)	Energy (kJ)
Stone	0.007	72	3	216	156
Timber	0.04	103	0.18	19	1.9
Gravel	0.067	112	0.003	0.3	0.04

4. まとめ

竜巻中の飛散物の速度を推定するために、つくば市で発生した竜巻と同様な気流性状をもつ竜巻状の渦を数値的に発生させ、モデル化された飛散物の中で放出し、飛翔運動を計算して地面付近における飛散物の速度を求めた。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 物体の飛び易さを示す $C_D A/m$ の値が大きいほど、最大接線風速や最大接線風速半径、さらには渦の移動速度が大きいほど飛散中の対地最大速度は大きくなる。
- 飛散物の速度は渦の回転と移動速度が一致する領域で大きくなり、その発現位置は最大接線風速半径の3倍以内に見られる。
- 今回の竜巻で発現したと考えられる気流性状の範囲内で、代表的な飛散物の衝撃力の最大値を速度、運動量、運動エネルギーとして求めると、石 (3kg)、木片 (0.18kg)、小石 (0.003kg) に対して、それぞれ 72, 103, 112 (m/s), 216, 19, 0.3 (kgm/s), 156, 1.9, 0.04 (kJ) となった。また、最大飛散速度は渦の最大接線風速の時間平均値と移動速度の合計の63%から97%となった。
- ビデオ画像の解析結果などから得られた飛散物の最大速度で、渦の最大平均風速を評価しても大きな差は生じないことが示された。

謝辞

本研究は、平成24年度文部科学省科学研究費補助金（特別研究推進費）24900001の補助を受けて行われたものである。

参考文献

- 内田孝紀・杉谷賢一郎・大屋裕二（2004）：一樣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.
- 竹内真弓・近藤潤一・森本康幸・前田潤滋（2010）：強風下での球状体の飛散状況に及ぼす変動風速の鉛直横方向成分の影響，その1 鉛直横方向成分を考慮した変動風速場の生成，日本建築学会学術講演梗概集・B-1，構造I，pp.117-118.
- 立川正夫・福山雅弘（1980）：平板の空力特性と飛散の性状について，第6回風工学シンポジウム論文集，pp.231-238.
- 野田稔・長尾文明・政井一仁（2012）：六自由度飛行軌道解析による平板状飛散物の飛行性状の検討，構造工学論文集，Vol.58A，pp.542-551.
- 前田潤滋（研究代表者，2013）：平成24年5月6日に北関東で発生した竜巻の発生メカニズムと被害実態の総合調査，平成24年度文部科学省科学研究費補助金（特別研究促進費課題番号24900001）報告書.
- 文字信貴（1982）：竜巻渦の室内実験，京都大学防

- 災研究所年報, vol.25 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, vol.26 B-1, pp.393-401.
- U. S. Nuclear Regulatory Commission Revision 1
(2007): DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO
MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANT, OFFICE
OF NUCLEAR REGULATORY RESEARCH
REGULATORY GUIDE 1.76 (Draft was issued as
DG-1143, dated January 2006)
- Holmes, J. D., Baker, C. J., Tamura, Y. (2006) : Short
note Tachikawa number: A proposal, Journal of Wind
Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.94,
pp.41-47.
- Holmes, J. D. (2007) : Wind Loading of Structures,
Taylor & Francis second edition, p.22.
- Kuai, L. F.L.Jr. Haan, W.A.Jr. Gallus and P.P. Sarkar
(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), pp.75-96.
- Maruyama, T. (2011) : Simulation of flying debris using a
numerically generated tornado-like vortex, Journal of
Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 99(4),
pp.249-256.

(論文受理日 : 2013年6月11日)