

竜巻中の飛散物の特性に関する数値計算

Numerical Study on Characteristics of Flying Debris in Tornado

丸山 敬・河井宏允⁽¹⁾・奥田泰雄⁽²⁾・中村 修⁽³⁾

Takashi MARUYAMA, Hiromasa KAWAI⁽¹⁾, Yasuo OKUDA⁽²⁾ and Osamu NAKAMURA⁽³⁾

(1) 東京電機大学

(2) 国土交通省国土技術政策総合研究所

(3) 株式会社風工学研究所

(1) Tokyo Denki University, Japan

(2) National Institute for Land and Infrastructure Management, Japan

(3) Wind Engineering Institute Co., Ltd., Japan

Synopsis

In order to evaluate the impact of missiles caused by tornado, a study on the velocity prediction of flying debris in a tornado-like vortex was carried out by numerical simulation. A series of unsteady flow fields of a tornado-like vortex was generated by Large Eddy Simulation. The aerodynamics of debris was examined and the range of aerodynamic parameters of debris resulting building damage was investigated. The trajectories of flying debris and the statistical distributions of the maximum speed of debris were obtained in various conditions i.e. the release height and the aerodynamic parameter of debris, the maximum tangential wind speed, the radius of maximum tangential wind speed and the traveling speed of tornado. Relation between the maximum ground speed of debris and the maximum wind and traveling speed of tornado was obtained as a function of aerodynamic parameter of debris.

キーワード: 竜巻, 飛散物, 飛散性状, 数値計算

Keywords: numerical simulation, tornado, flying debris, velocity prediction

1. はじめに

日本における強風災害としては台風に起因するものが大半であるが、竜巻による被害も少なくない。2012年5月に北関東の広い範囲で被害をもたらした竜巻では、連休中の日中に発生したこともあって携帯電話などでその映像が記録され、竜巻による強風被害の恐ろしさを多くの人の知るところである。竜巻による被害の範囲は台風に比べるとはるかに狭いが、強い竜巻の場合は発生する風速が100m/s近くに達し、通常の木造家屋などはバラバラに破壊される。

そのため、竜巻による被害は破壊された種々の破片が飛散物となって風下側の建物を破壊する被害の連鎖が特徴であり、飛散物の持つ衝撃力を知ることは竜巻による被害予測や防備にとって重要な情報となる。

本研究では、竜巻による飛散物のもつ衝撃力を推定するために、竜巻中の飛散物の速度推定を試みた。飛散物としては種々のものが考えられるが、ここでは過去の竜巻の被害調査などを参考に、竜巻時に多く飛散し、建物に被害を及ぼすと予想される物体を取り上げる。計算を行う気流については、3次元の

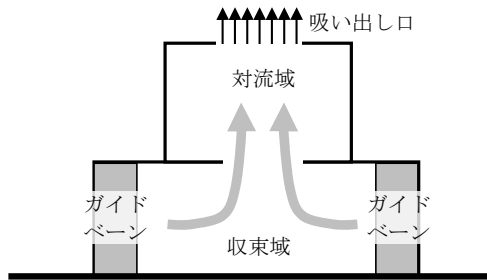


Fig. 1 Outline of tornado simulator

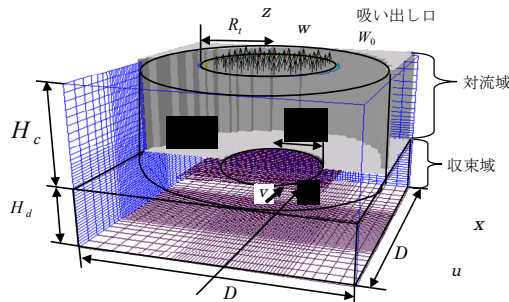


Fig. 2 Coordinate system and mesh discretization of calculation region

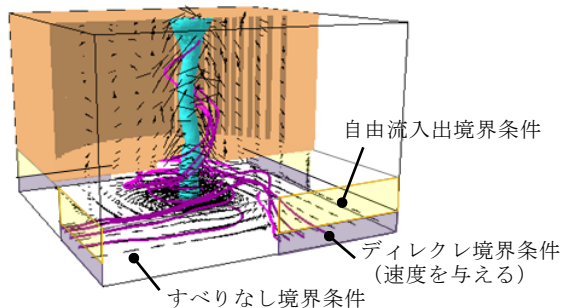


Fig. 3 Boundary conditions on inlet boundary of conversion region and generated vortex

流れ場の時刻歴が必要となることから、非定常乱流場を計算することのできるラージエディシミュレーションを用いて数値的に生成した竜巻状の渦を用いることとした。飛散させる物体は実際の飛散物と等価な空力パラメータをもち、単純な形状をもつ物体としてモデル化されたものを種々の条件で放出して飛翔運動を計算し、地面付近における飛散物の対地速度を求めることとした。

2. 計算手法

2.1 計算に用いた渦の作成方法

飛散物の飛翔性状の解析には、LES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Fig. 1に示すような数値竜巻シミュレーターにより行い、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対流域と収束域をもち、

Table 1 Specification of tornado simulator

吸い出し口の半径, R_t	; 0.05 m
対流域の半径, R_{cv}	; 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
吸い出し口の風速, 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)

上部の対流域は円筒状で、上面中央部には円形の吸い出し口があり、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、自由流入境界条件（勾配0）条件および風速を与え、流入する気流性状を制御している。対流域上部の吸い出し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。計算領域の緒元を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。竜巻状の渦の生成方法についての詳細は丸山（2010）を、飛散物のモデル化および計算方法についての詳細はMaruyama（2011）をそれぞれ参考にされたい。

2.2 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である。今回、解析対象とする渦は、乱流化した渦の中央部分に平均的な下降流が存在する2セルタイプとし、前術の数値計算により2セルタイプの渦を作り出して渦内の速度場の時刻歴データを記録して用いた。なお前田ら（2013）によれば、2012年5月につくば市において多くの建物被害をもたらした竜巻でも、2セルタイプの渦が発生していたと推測されている。

計算に用いた渦内の気流性状の平均量を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成分の時間変化を保存した。飛散物の飛翔計算に際して、竜巻内の空間的な風速変動分布が実際の竜巻と計算で発生さ

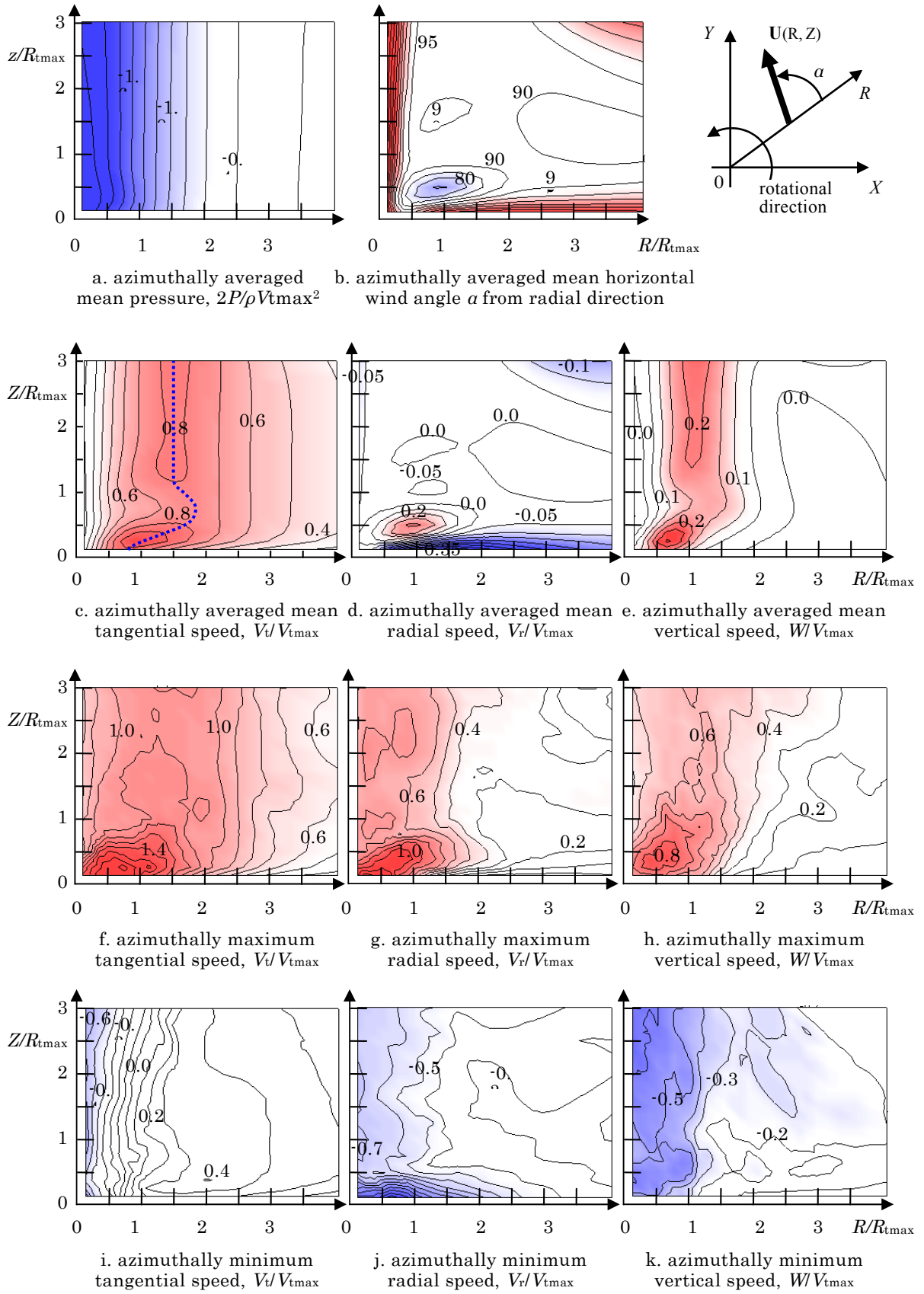


Fig. 4 Distributions of velocity and pressure field of single core two cell type shown in Figure 3 in a vertical plane.

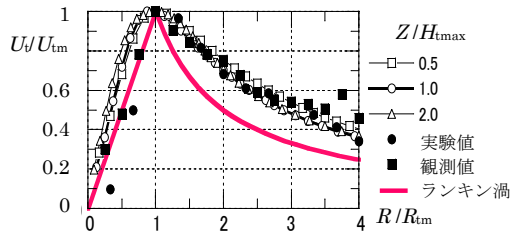


Fig. 5 Variation of tangential wind speed distribution along axial direction with height

U_t : tangential wind speed, U_{tm} : maximum tangential wind speed, Z : height, H_{tmax} : height where the maximum tangential wind speed occurs

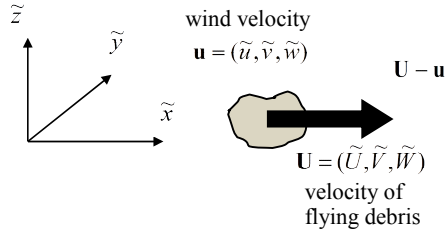


Fig. 6 Coordinate system and definition of wind velocity and velocity of flying debris

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。

2.3 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ことがわかっている（竹内ら、2010；野田ら 2012）。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。

(2) 運動方程式

ここでは、飛散物は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、 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（原点が渦の中心）に固定された座標系における有次元の値を表す。立川・福山（1980）に倣って基準風速 U_0 と重力加速度 g を用いて無次元化された時間、距離、速度および加速度、

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

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

$$\text{速度 (物体)} : u = \tilde{u} / U_0 = \dot{\tilde{x}}_1 / U_0,$$

$$v = \tilde{v} / U_0 = \dot{\tilde{x}}_2 / U_0, w = \tilde{w} / U_0 = \dot{\tilde{x}}_3 / U_0 \quad (4)$$

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

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

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。

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

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

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

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

$$T_a = \frac{\rho A U_0^2}{2mg} \quad (10)$$

$|\mathbf{U} - \mathbf{u}|$ は次式に示す無次元化された飛散物と気流の相対風速の大きさである。

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

Table 2 Aerodynamic parameters $C_D A/m$ and $T_a C_D$ of object which can be a flying debris in tornado

物体	高さ z (m)	幅 y (m)	奥行 x (m)	C_{Dz} 注 2)	C_{Dy} 注 2)	C_{Dx} 注 2)	質量 m (kg)	$C_D A/m$ (m^2/kg)	$T_a C_D$ 注 1)
木の棒	0.04	0.09	2.00	1.2	1.2	2.0	3.6	0.030	12
木片	0.10	0.10	0.10	2.0	2.0	2.0	0.5	0.040	16
石	0.10	0.10	0.10	2.0	2.0	2.0	3.0	0.007	3
小石	0.01	0.01	0.01	2.0	2.0	2.0	0.003	0.067	27
瓦	0.01	0.30	0.30	2.0	1.2	1.2	2.7	0.023	9
物置	1.80	0.90	1.50	2.0	2.0	2.0	120	0.032	13
室外機	0.80	0.25	0.30	2.0	2.0	2.0	10	0.034	14
乗用車	3.10	1.60	1.30	2.0	2.0	2.0	1430	0.005	2
トラック	5.00	1.90	1.30	2.0	2.0	2.0	4750	0.003	1
プレハブ小屋 (空)	1.85	1.85	2.60	2.0	2.0	2.0	460	0.019	8
庇	0.20	2.10	11.00	2.0	1.2	1.2	680	0.024	10
太陽光パネル	0.05	1.00	1.20	2.0	1.2	1.2	14.5	0.058	24
鉄パイプ	1.00	0.05	0.05	2.0	0.7	0.7	4.2	0.006	2
鉄パイプ	2.00	0.05	0.05	2.0	0.7	0.7	8.4	0.006	2
ドラム缶	0.90	0.60	0.60	2.0	0.7	0.7	24	0.021	8
木の棒 注 3)	3.66	0.29	0.09	2.0	1.2	1.2	14.3	0.040	16
自動車	5.00	2.00	1.30	2.0	2.0	2.0	1810	0.007	3

注 1) $U_0 = U_{\max} = 80m/s$ の場合の値

注 2) Simiu and Cordes (1967)に示された値で, 2 次元物体に対する実験値に相当

注 3) Simiu and Cordes (1967)では, C_{D*} の値は全て 2.0 となっているが, ここでは, 細長い棒の場合の側面の C_{D*} の値は 1.2 とした

(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, 計算に際して基準風速 U_0 は渦の最大接線風速 $U_{\max}$ (円周方向に平均した時間平均風速) として, 式中の $T_a C_{D*}$ において C_{D*} は各 x^* 軸 (x, y, z) 方向の抗力係数であるが, ここでは, 相対風向角によらないと仮定するので平均的な抗力係数 C_D を用いて,

$$T_a C_{D*} = T_a C_D \quad (12)$$

のように与える.

実際の渦中での飛散物の飛翔計算は, $U_{\max}$ を 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)~(9)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, 物体を回転しない球体として単純化しているので, 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. 棒状, 円筒状および平板状の物体は直方体とみなし, 平均的な $C_D A$ および $T_a C_D$ の値は, 風が各軸方向から均等に吹き付けると仮定し

て, 各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,

$$C_D A = \frac{1}{3}(C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z) \quad (13)$$

として求めた. 従って, $T_a C_D$ は上式(13)を用いて,

$$T_a C_D = C_D A \frac{\rho U_{\max}^2}{2gm} \quad (14)$$

となる. ここで, 式(14)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 $U_{\max}$ 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 $C_D A/m$ の値も求めた. 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. なお, 表中に用いられる各風向方向の風力係数 $C_{Dx,y,z}$ の値はSimiu and Cordes (1967)から引用しており, 2 次元物体に対する実験値に相当している. なお, この値は3次元物体に対する値よりも大きいので, 計算で得られる物体の速度は大きくなると予想されるが, 風速が乱れていることもあり, また, 安全側になることを考慮して採用することとした.

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, これら自動車等が他の建物等を破壊するほどの高さまで飛ん

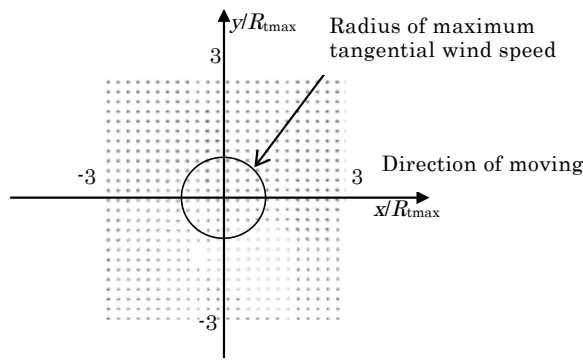


Fig. 7 Release points of debris

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、空力パラメータ $C_D A/m$ の値で 0.007 から $0.07 \text{ m}^2/\text{kg}$ までの範囲（実際に計算に用いた空力パラメータ $C_D A/m$ の値は 0.007 , 0.040 , $0.070 \text{ m}^2/\text{kg}$ ）の計算を行った。この空力パラメータ $C_D A/m$ の値の範囲には、例えば、 $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$, 3 g の小石、 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, 3 kg の石、 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, 0.5 kg の木片、 $0.04 \times 0.09 \times 2 \text{ m}^3$, 3.6 kg の木の棒などがあり、最大接線風速 $U_{\text{tmax}} = 80 \text{ m/s}$ とした場合、 $T_a C_D$ の値では 3 から 28 の範囲となる。

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。

(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、屋根の上や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、ここでは飛散物の放出高さ H_{rl} を U. S. Nuclear Regulatory Commission (2007) に準じて最大 40 m までとし、それ以下の $H_{\text{rl}} = 40, 30, 20, 10, 5 \text{ m}$ 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 $\times 3$ 倍の範囲で、最大接線風速半径の $1/4$ 間隔で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、対地最大実効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、速度、位置等を記録した。

(6) 竜巻の特性値

数値計算を行うに際して、竜巻の特性は最大接線風速 U_{tmax} により強さを、最大接線風速半径 R_{tmax} （円周方向に平均した時間平均値）により大きさを表し、移動速度 U_{tr} （時間平均値）も考慮した。これらの値について、日本における過去最大級の竜巻被害である 2012 年 5 月につくばで発生した竜巻被害の報告（前田ら、 2013 ）を参照すると、ビデオ映像や被害などの分布から最大接線風速 U_{tmax} が $24 \sim 80 \text{ m/s}$ 程度、最大接線風速半径 R_{tmax} が $18 \sim 30 \text{ m}$ 程度、被害の発生時刻の推移や気象レーダーの記録等からは、移動速度 U_{tr} が $11 \sim 18 \text{ m/s}$ 程度と見積もられている。今回の計算では、上述の過去最大級のつくばの竜巻に加えて、フジタスケールの $F1$ から $F3$ に対応した強さに対しても計算を行った。フジタスケールに対応した最大風速 u_{Fmax} は表気象庁で用いられている定義（気象庁ホームページ）を参照した。また、竜巻の移動速度 U_{tr} および最大接線風速半径 R_{tmax} の値は東京工芸大学（ 2011 ）から引用した。用いた値を Table 3 に示す。

前節 Fig. 5 で示した竜巻の LES による数値解析の結果から、竜巻中の最大瞬間水平風速の値は、最大接線風速の $1.5 \sim 1.7$ 倍になることが判っている。フ

Table 3 Fujita scale and its accompanied parameters

フジタスケール	最大風速 u_{Fmax} (m/s)	移動速度 U_{tr} (m/s)	最大接線風速半径 R_{tmax} (m)
F0	～32(約15秒間の平均)	5	32～38
F1	33～49(約10秒間の平均)	9	34～47
F2	50～69(約7秒間の平均)	12	38～59
F3	70～92(約5秒間の平均)	14	59～100

Table 4 Maximum tangential speed U_{tmax} for Fujita scale

フジタスケール	U_{tmax} (m/s)
F0	～18
F1	16～27
F2	25～38
F3	37～52

Table 5 Characteristic values of tornado for simulation

竜巻	平均最大接線風速 U_{tmax} (m/s)	移動速度 U_{tr} (m/s)	最大接線風速半径 R_{tmax} (m)
F1	25	10	30～40
F2	35	10～15	40～50
F3	40～50	15	50～70
ANSI/ANS等	23～75	11～31	56～165

Table 6 Parameters for simulation

平均最大接線風速 U_{tmax} (m/s)	最大接線風速半径 R_{tmax} (m)	移動速度 U_{tr} (m/s)
25,35,40,50,60,80	30,40,50,60,70	10,15,25,35

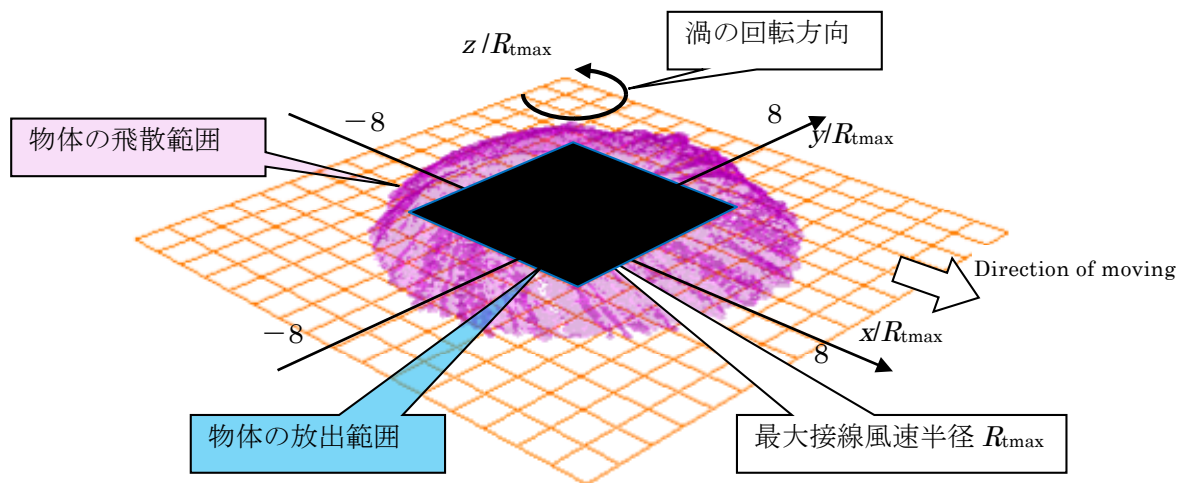


Fig. 8 An example of flying debris' simulation (plotted on the coordinate fixed to the vortex)

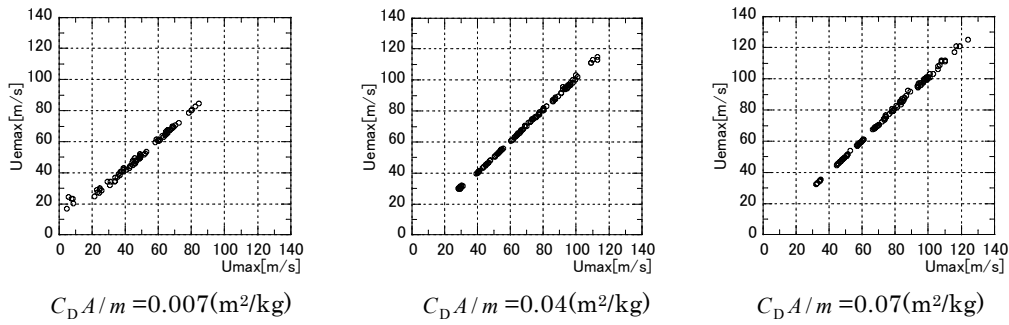


Fig. 9 Maximum ground effective speed U_{emax} vs Maximum ground horizontal speed U_{hmax}

ジタスケールに対応した最大風速 u_{Fmax} は竜巻の移動速度 U_{tr} と最大瞬間水平風速の和と考え、最大瞬間水平風速が最大接線風速 U_{tmax} の1.5倍とみなして、 U_{tmax} を u_{Fmax} と U_{tr} から求めると式(15)となる。

$$U_{\text{tmax}} = (u_{\text{Fmax}} - U_{\text{tr}}) / 1.5 \quad (15)$$

表気象庁の u_{Fmax} を用いて式(15)より得られた U_{tmax} の値をTable 4に示す。以上より、計算に用いる値はフジタスケールF1～F3および、過去最大級のつくばで発生した竜巻やANSI/ANS(1983)の値を参照して、Table 5のように求めた。以上より計算に用いた各パラメータの範囲をTable 6に示す。

3. 計算結果

3.1 竜巻中の物体の飛散性

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。飛散物の衝撃力を評価するという観点から、ここでは飛散物の対地最大実効速度 $U_{\text{emax}} = \sqrt{(\tilde{u} + U_{\text{tr}})^2 + \tilde{v}^2 + \tilde{w}^2}$ (ここで U_{tr} は渦の移動速度) について検討を行う。ちなみに、飛散物の対地最大水平速度 $U_{\text{hmax}} = \sqrt{(\tilde{u} + U_{\text{tr}})^2 + \tilde{v}^2}$ と U_{emax} を全計算例について比較すると、Fig. 9に示すように差はほとんどなかった。これは、対地最大実効速度が発生する状態における水平方向速度は鉛直方向速度に比べて十分大きいことを示している。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った。

(1) 放出高さ H_{rl} の影響

Fig. 10に示すように、対地最大実効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が大きくなる領域で大きくなる。物体の存在する範囲は放

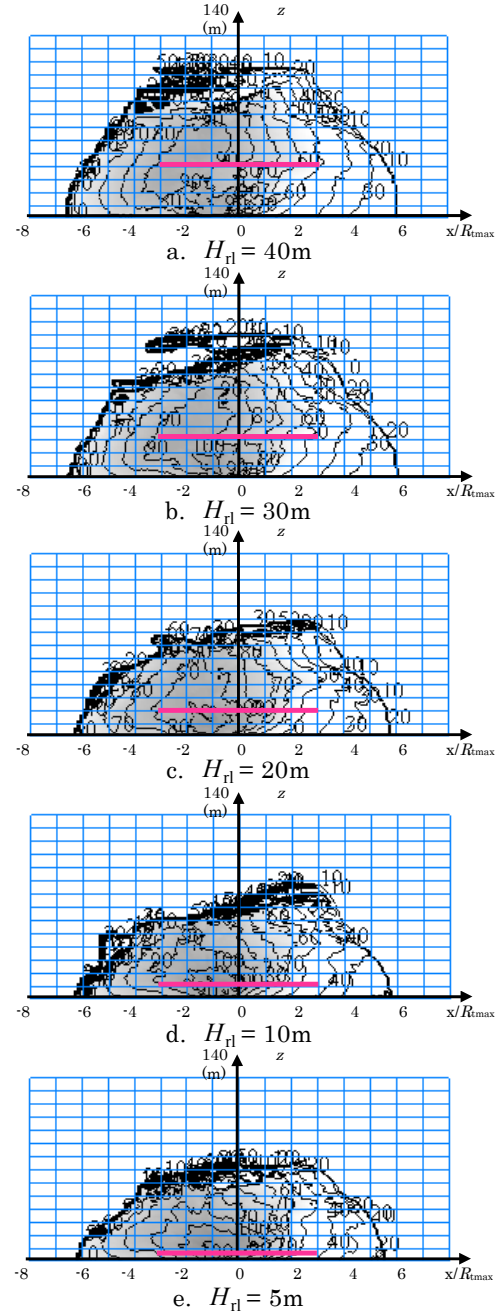


Fig. 10 Frontal view of contour plot of maximum ground speed of debris, U_{emax} (m/s). Variation with release height, H_{rl} . Release positions are on the red lines. $C_D A / m = 0.07 (\text{m}^2/\text{kg})$, $U_{\text{tmax}} = 80 (\text{m/s})$, $R_{\text{tmax}} = 30 (\text{m})$, $U_{\text{tr}} = 35 (\text{m/s})$

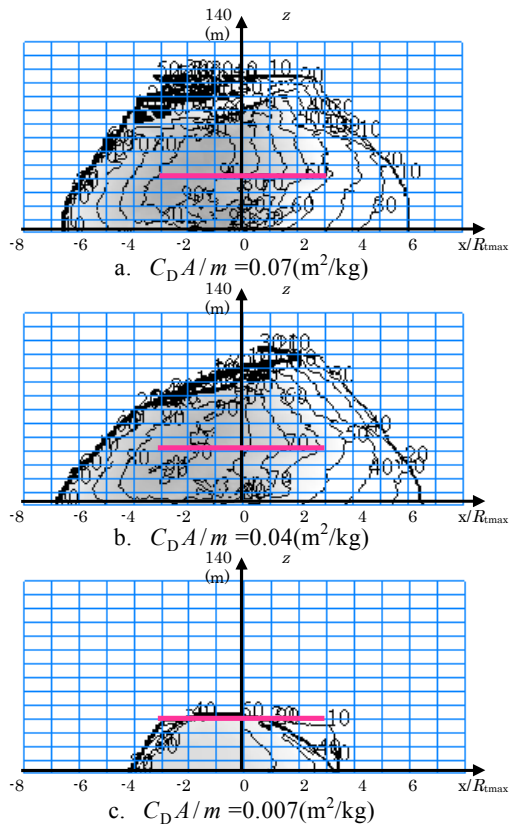


Fig. 11 Frontal view of contour plot of maximum ground speed of debris, $U_{\max}$ (m/s). Variation with aerodynamic parameter, $C_D A/m$. Release positions are on the red lines. $H_{rl}=40$ (m), $U_{tmax} = 80$ (m/s), $R_{tmax} = 30$ (m), $U_{tr} = 35$ (m/s)

出高さに伴って高くなる。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，対地最大実効速度は放出高さが40mよりも低い方が大きかったが，放出高さ5から20mではほとんど変わらなかった。今回行った空力パラメータ，最大接線風速，最大接線風速半径，渦の移動速度を変えて行った計算の範囲でも同様な傾向がみられた。

(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. 11に示すように $C_D A/m$ の値が大きくなるほど対地最大実効速度は大きくなり，その飛散範囲も大きくなる。今回計算を行った最大接線風速，最大接線風速半径，放出高さ，渦の移動速度の範囲では，いずれも対地最大実効速度の最大値は $C_D A/m$ が $0.07 \text{ m}^2/\text{kg}$ の場合に生じた。最大実効速度の高さ方向の分布をみると，Fig. 12に示すように， $C_D A/m$ の値が小さい場合には対地最大実効速度の発現は地面近くにみられるが， $C_D A/m$ の値が大きくなるにつれて上空に広がっていく様子が見られる。

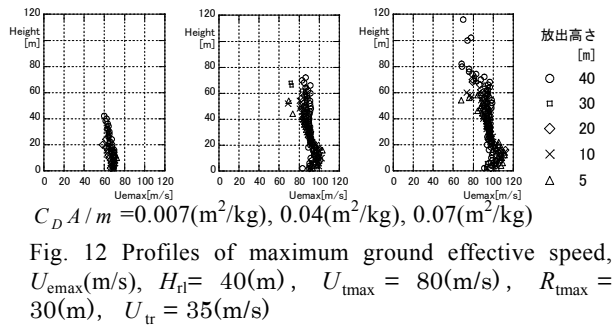


Fig. 12 Profiles of maximum ground effective speed, $U_{\max}$ (m/s), $H_{rl}= 40$ (m), $U_{tmax} = 80$ (m/s), $R_{tmax} = 30$ (m), $U_{tr} = 35$ (m/s)

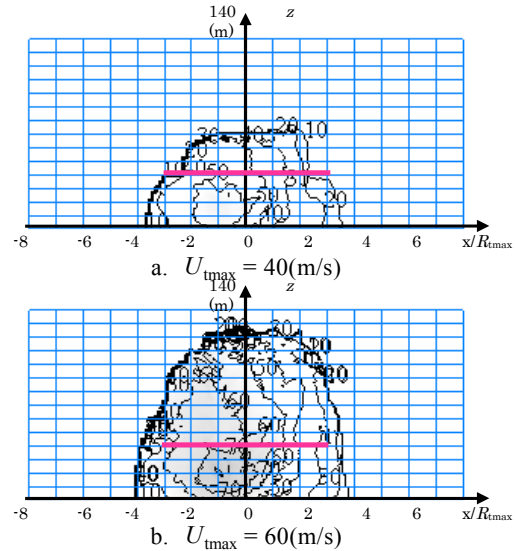


Fig. 13 Frontal view of contour plot of maximum ground speed of debris, $U_{\max}$ (m/s). Variation with maximum tangential speed, U_{tmax} . Release positions are on the red lines. $C_D A/m = 0.07 \text{ (m}^2/\text{kg)}$, $H_{rl}=40$ (m), $R_{tmax} = 60$ (m), $U_{tr} = 15$ (m/s)

(3) 最大接線風速 U_{tmax} 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. 13に示すように最大接線風速が大きくなるほど対地最大実効速度は大きくなった。今回行った空力パラメータ，最大接線風速半径，放出高さ，渦の移動速度を変えて行った計算の範囲では，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 U_{tr} の影響

Fig. 14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。今回行った空力パラメータ，最大接線風速，最大接線風速半径，放出高さを変えて行った計算の範囲では，いずれも最大値は渦の移動速度が速い場合に生じた。

(5) 最大接線風速半径 R_{tmax} の影響

Fig. 15に示すように，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。今回行った空力パラメータ，最大接線風速，放出高さ，渦の移動速度を変えて行った計算の範囲では，いずれも最大値は最大接線風速半径が大きい場合に生じた。

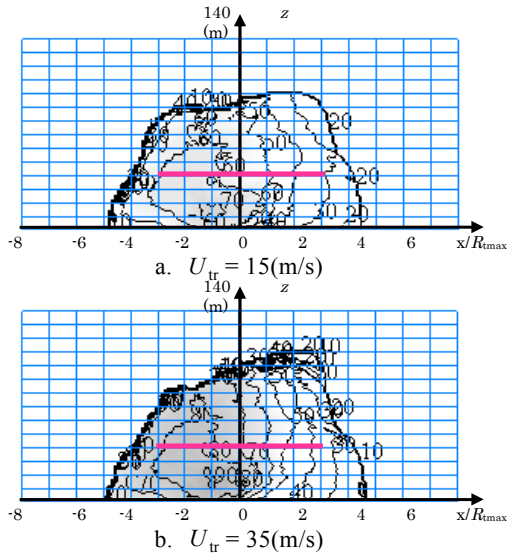


Fig. 14 Frontal view of contour plot of maximum ground speed of debris, U_{emax} (m/s). Variation with traveling speed, U_{tr} . Release positions are on the red lines. $C_D A/m = 0.07(\text{m}^2/\text{kg})$, $U_{\text{tmax}} = 60(\text{m/s})$, $R_{\text{tmax}} = 40(\text{m})$, $H_{\text{rl}} = 40(\text{m})$

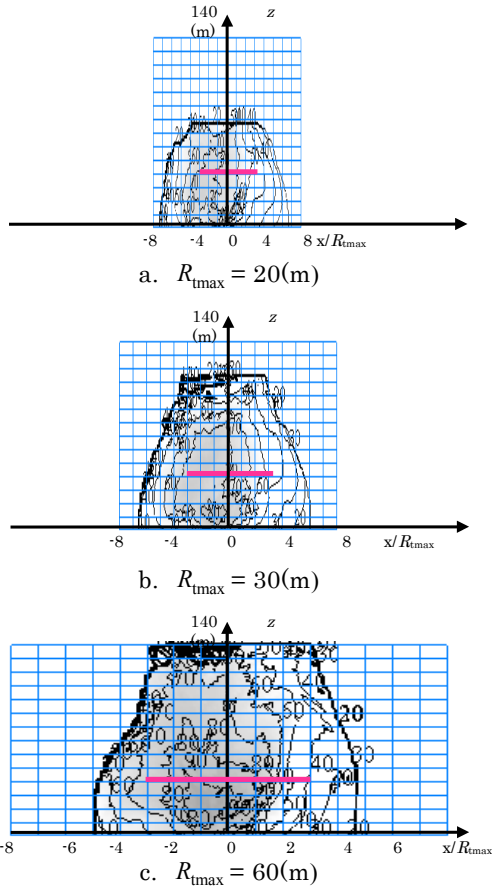


Fig. 15 Frontal view of contour plot of maximum ground speed of debris, U_{emax} (m/s). Variation with maximum tangential speed radius, R_{tmax} . Release positions are on the red lines. $C_D A/m = 0.07(\text{m}^2/\text{kg})$, $U_{\text{tmax}} = 80(\text{m/s})$, $H_{\text{rl}} = 40(\text{m})$, $U_{\text{tr}} = 15(\text{m/s})$

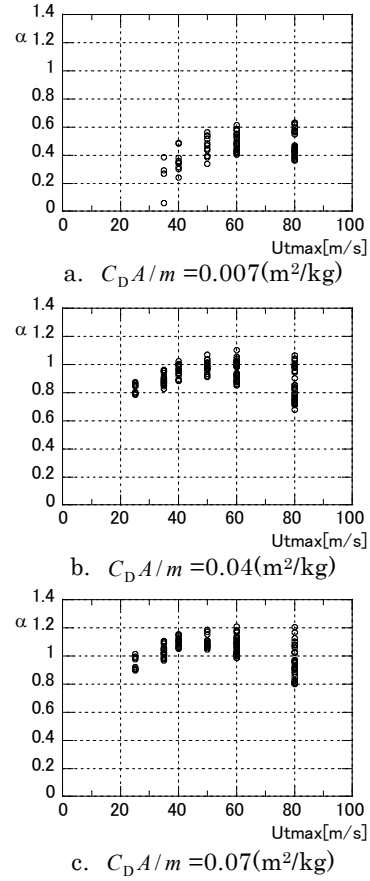


Fig. 16 Variation of amplification factor α with maximum tangential speed U_{tmax}

3.2 飛散物の対地最大速度

対地最大実効速度 U_{emax} と渦の移動速度 U_{tr} の差 $U_{\text{emax}} - U_{\text{tr}}$ の最大接線風速 U_{tmax} に対する倍率

$$\alpha = (U_{\text{emax}} - U_{\text{tr}}) / U_{\text{tmax}} \quad (16)$$

を、ここでは飛散物の増速率 α と呼ぶことにし、この増速率 α と竜巻の強さとの関係を求める。計算結果から得られた増速率 α と最大接線風速 U_{tmax} の関係をみると、Fig. 16のように、空力パラメータ $C_D A/m$ が大きくなるほど、また、最大接線風が大きくなるほど増速率 α は大きくなる様子が見られる。ただし、最大接線風がある程度以上大きくなると、増速率 α の最大値は一定となる傾向があり、 $C_D A/m = 0.007\text{m}^2/\text{kg}$ の場合には最大接線風が60m/s以上で、 $C_D A/m = 0.04\text{m}^2/\text{kg}$ の場合には最大接線風が40 m/s以上で、 $C_D A/m = 0.07\text{m}^2/\text{kg}$ の場合には最大接線風が40m/s以上で、それぞれ増速率 α の最大値は0.6、1.1、1.2となりその関係はFig. 17のようになり、

$$\alpha = \left(\frac{C_D A}{m} \frac{1}{0.033\text{m}^2/\text{kg}} \right)^{0.3} \quad (17)$$

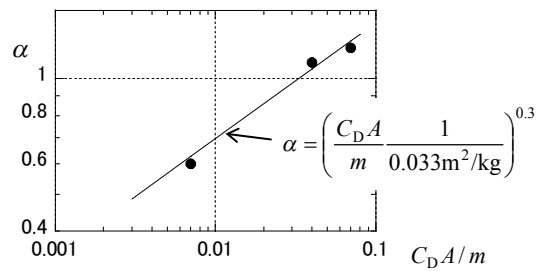


Fig. 17 Variation of amplification factor α with aerodynamic parameter $C_D A / m$

の関係が得られた。これより、衝撃の程度に対応した飛散物の対地最大実効速度 U_{emax} を式(15), (16), (17)使って

$$U_{\text{emax}} = \left(\frac{C_D A}{m} \frac{1}{0.033 \text{ m}^2/\text{kg}} \right)^{0.3} (u_{\text{Fmax}} - U_{\text{tr}}) / 1.5 + U_{\text{tr}} \quad (18)$$

の関係が得られる。

4. まとめ

竜巻中の飛散物の速度を推定するために、建物に大きな被害をもたら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をその中で放出して渦の中における飛翔運動を計算した。得られた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空力パラメータ $T_a C_D$ あるいは $C_D A / m$ 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実効速度は大きくなった。ここで、 T_a は Tachikawa 数、 m は飛散物の質量、 $C_D A$ は飛散物を代表する抵抗係数と見つけ面積の積で平均的な値を用いて計算した。
- ・ 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倍以内に見られた。
- ・ 建物被害を起こす可能性のある代表的な飛散物の空力パラメータの範囲、 $0.007 \text{ m}^2/\text{kg} \leq C_D A / m \leq 0.07 \text{ m}^2/\text{kg}$ について、衝撃の程度に対応した飛散物の対地最大実効速度 U_{emax} と、フジタスケールに対応した最大風速 u_{Fmax} 、および、竜巻の移動速度 U_{tr} の関係を以下の式として求めた。

$$U_{\text{emax}} = \left(\frac{C_D A}{m} \frac{1}{0.033 \text{ m}^2/\text{kg}} \right)^{0.3} (u_{\text{Fmax}} - U_{\text{tr}}) / 1.5 + U_{\text{tr}}$$

謝 辞

本研究は総プロ「災害拠点建築物の機能継続技術の開発－外装材の飛散物耐衝撃試験法・評価法の開発」、 「JSPS 学術研究助成基金助成金23560671」 および「京都大学防災研究所一般共同研究25G08」の助成を受けて行われたものです。

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.
- 気象庁ホームページ：フジタスケールとは，
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/tornado1-5.html>
- 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，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.
- 東京工芸大学（2011）：設計基準竜巻のパラメータ，平成21～22年度原子力安全基盤調査研究（平成22年度）竜巻に関する原子力施設への影響に関する調査研究，pp.175-180.
- 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，課題番号24900001，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）研究成果報告書
- 丸山 敬（2010）：数値的に生成された竜巻状の渦の性質，京都大学防災研究所年報（2010）：数値的に生成された竜巻状の渦の性質，第53号B，pp.383-390.
- American Nuclear Society(1983): American National Standard for Estimating Tornado and Extreme Wind Characteristics at Nuclear Power Sites, ANSI/ANS-2.3-1983
- Holmes, J. D., Baker, C. J. and Tamura, Y. (2006) : Short note Tachikawa number: A proposal, Journal of Wind

Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.94, pp.41-47.

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.

Simiu, B. and Cordes, M. (1967) : Tornado-Borne Missile Speeds : NBSIR 76-1050, National Bureau of

Standards, Washington DC.

U. S. Nuclear Regulatory Commission (2007) : Design-basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plant, Regulatory Guide 1.76, Office of Nuclear Regulatory Research, Revision 1.

(論文受理日 : 2014年6月11日)