

ドーム建物内における飛散物の動的空力特性の直接計測の試み

Experiment of Direct Measuring of Aerodynamic Characteristics of Flying Debris in a Dome

松居健人⁽¹⁾・丸山 敬・西村宏昭⁽²⁾・野田 博⁽³⁾・西嶋一欽

Kento MATSUI⁽¹⁾, Takashi MARUYAMA, Hiroaki NISHIMURA⁽²⁾, Hiroshi NODA⁽³⁾
and Kazuyoshi NISHIJIMA

(1) 京都大学大学院工学研究科建築学専攻

(2) 一般財団法人防災研究協会

(3) 近畿大学建築学部

(1) Department of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Japan

(2) Association for Disaster Prevention Research, Japan

(3) Department of Architecture, Kindai University, Japan

Synopsis

Damage to buildings or houses in strong wind like typhoon or tornado are caused by flying debris such as roof tile in most cases. Measuring aerodynamic characteristics of flying debris is required to predict the motion of flying debris and to evaluate the impact for the wind resistant design of claddings and the reduction of damage to houses.

This study aims to measure the aerodynamic characteristics of flying debris. Stand-alone measuring device assembled with microcomputer, three-axes accelerometer, gyro sensor, pressure sensors, SD card and small battery was built in three types of models of flying debris. These models were dropped from the stage located at 50m in the dome with no wind, and pressures, acceleration and angular velocity were measured, while capturing the motion of models by taking movies with video cameras and conducting image analysis. Based on the result of the measuring, the motion and wind force acting on each model was calculated.

キーワード: 飛散物, 空力特性, ブラフボディ, 自立型計測装置, 強風災害

Keywords: flying debris, aerodynamic characteristics, bluff body, stand-alone measuring device, strong wind disaster

1. はじめに

台風や竜巻などによる建物の被害は、強風によって飛ばされる屋根瓦などの飛散物の衝突に起因することが多い。飛散物の衝突による建物被害の例として Fig. 1 に示すように建物壁面の損傷や、屋内にまで貫通する事例がある (前田, 2013)。飛散物による建物被害を低減させるためには飛散物の衝突に耐え

るように外装材の設計をする必要がある。建物に衝



Fig. 1 Damage to houses by flying debris

突する際の飛散物の速度，姿勢を精度良く評価し，飛散物の建物衝突時の衝撃力を予測できれば，外装材の設計法の確立に資すると考えられる．そのためには飛散物の空力特性を知る必要がある．飛散物の形状はほとんどの場合，流線型でない物体，すなわちブラフボディである．そのため飛散物の空力特性を知るにはブラフボディの空力特性を求めることが重要になる．これまでブラフボディの空力特性を求める実験は数多く行われてきた．例えば立川ら(1982)は矩形平板の2次元的な飛散性状を求めた．丸山ら(2005)は正方形平板の3次元的な空力特性を風洞実験によって求めた．Richards et al.(2008)は平板と棒状の飛散物の3次元的な空力特性を風洞実験により計測した．岡崎・丸山(2012)は複雑な形状をもつ屋根瓦の3次元的な空力特性を風洞実験で求め，単純な形状である正方形平板の空力特性との差異を示した．また，飛散シミュレーションを行い，瓦と正方形平板との飛散性状の違いを示した．

これまでの研究では風洞実験によって飛散物に一樣流を与えて計測された空力特性を用いて飛散物の運動を計算し，衝撃力を求めることがほとんどであった．しかし実際の飛散物は姿勢を変えながら地表付近の乱流中を運動するため飛散物に作用する相対的な風向風速は時々刻々変化しており，この条件下での飛散物の空力特性を直接計測することは困難であった．

一方，近年では姿勢を計測するためのセンサーの小型化，高精度化が進んでおり，これらの技術を利用することにより，飛散物に作用する空力特性を直接計測することが出来ると考えられる．そこで，著者ら(丸山ら，2017)は加速度センサー，圧力センサー，マイコン，小型電源からなる計測装置を飛散物模型に内蔵し，飛翔中の物体の空力特性を自立的に直接計測する手法を提案した．ただしこの計測手法では角速度を計測することができず，測定値のみを用いて飛散物の姿勢を算出することができなかった．そこで本研究では，計測装置の結果から飛散物の姿勢，風力係数を算出することを目的として，計測装置に新たに角速度センサーを搭載し，角速度を計測できるようにした．また，計測装置を内蔵した飛散物模型を無風状態で自由落下させることで，飛散物模型に作用する加速度，角速度および模型表面に作用する空気力を直接計測した．

2. 開発した計測装置

本研究で開発した計測装置は，以下で構成されて

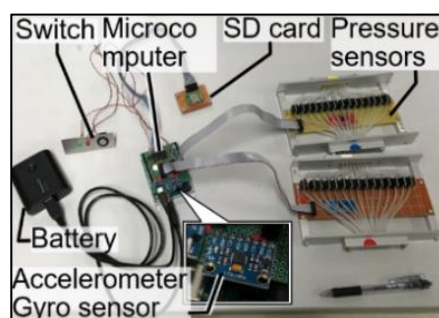


Fig. 2 Independent measurement system

おり，自立的に計測を行うことができる．実際の計測装置をFig. 2に示す．

- ①マイコン
Arduino UNO
- ②A/D コンバーター
Arduinoに内蔵(分解能10bit, 0~5.0V入力)
- ③6軸センサー(加速度, 角速度)
InvenSense社製MPU-6050 計測範囲: 加速度 $\pm 2G$, 角速度 $\pm 1000\text{deg/s}$
- ④圧力センサー
All Sensors社製1 INCH-D1-4V-MINI: 差圧型 $\pm 1\text{inH}_2\text{O}$, オフセット電圧2.25 V, 出力スパン; オフセット電圧 $\pm 2V$, ヒステリシス0.05 %FS, スパンシフト(5°C - 50°C) $\pm 2\%$ FS, 許容過圧力 $\pm 100\text{inH}_2\text{O}$
- ⑤SDカード
計測データは，マイコンに接続されたSDカードに保存され，実験終了後にSDカードからデータを収集することが出来る．
- ⑥スイッチ
計測開始時刻を与える．
- ⑦バッテリー

3. CFDによる風圧測定点の決定

飛散物の空力特性を測定するために，飛散物を模した模型(飛散物模型)を作成し，計測装置を内蔵する．その際，限りある風圧測定孔で飛散物模型の表面に作用する風力を効率よく測定するには，適切な位置に風圧測定点を設ける必要がある．具体的には，一面において風圧分布の変化が緩やかな部位には風圧測定孔は粗く配置してもよいが，風圧分布の変化が急激な部位には密に配置する必要がある．本研究では，数値流体計算により，各模型の表面に作用する風圧分布を調べた．

使用した数値流体計算ソフトはOpenFOAM-2.4.xである. Table 1に示す3つの飛散物模型を対象に風向

Table 1 Sizes of calculation models

No	Model	Length	width	depth
1	Cube	1	1	1
2	Flat plate	1	1	0.33
3	Rod	1	0.33	0.33
				unit:m

Table 2 Summary of computational method

Spatial difference scheme	Conv. term:Filtered Linear Other terms:Linear interpolation + TVD
Time advancing	2 order backward
Pressure coupling	Piso method
Sub-grid scale model	Standard Smagorinsky (Cs=0.13) with Van Direst law near wall
Calculation domain	$x \times y \times z = 20D \times 10D \times 10D$
Grid number	Coarse stage: $N_x \times N_y \times N_z = 80 \times 40 \times 40$ 4 stage octree method
Minimum Grid spacing	$dx \times dy \times dz = D/64$
Reynolds number	Re=10000
Time step	dt=0.005 sec.
Calculation time	150sec.(T=50-150 for averaging)
Inflow wind speed	Uin=1.0m/s
D:model Length	

角 0° (物体上面が正対する風向)と 45° について計算した. 計算条件をTable 2に示す. 計算メッシュの状況をFig. 3に示す.

計算結果の一例として, 立方体の平均風圧係数分布をFig. 4に示す. 風向角 0° の場合, 前面中央部は風圧係数の変化は緩やかであるが, 端部に進むに従い急激な変化がみられる. 上面, 下面, 右面, 左面については, 変化はあるものの前面端部付近のような急激な変化はない. 背面については概ね一様な分布となっている. 風向角 45° の場合, この場合の風上面となる前面と右面では, 全体的に大きな風圧変化がみられる. 上面と下面では風上側となる隅角部付近で急激な風圧変化がみられる. 風下面となる背

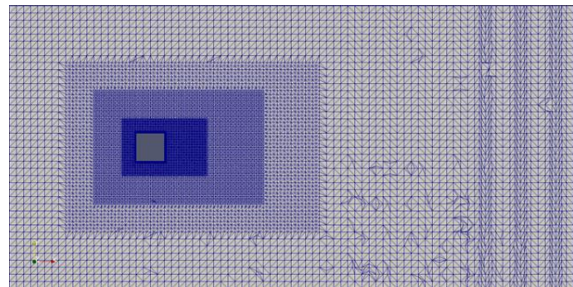


Fig. 3 Example of calculation grid

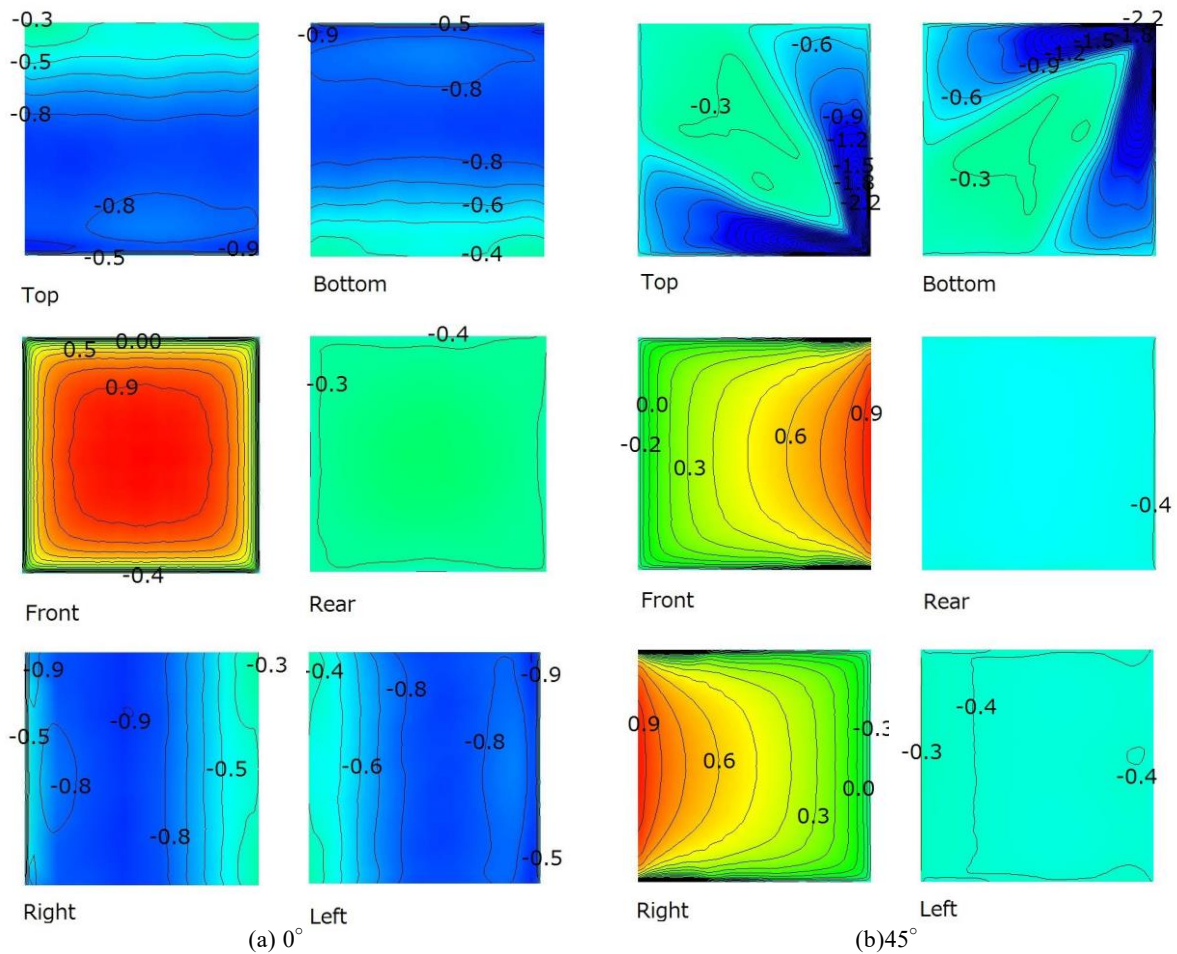


Fig. 4 Distribution of mean pressure coefficients

面と左面では概ね一様な分布となった。

他の飛散物模型においても概ねこのような風圧係数分布となった。これらの結果より、風圧測定孔は各面の中央部以外は、面端部付近に寄せて設けることとした。

4. 大空間における飛散物模型の落下実験

飛散物の空力特性の直接測定の第一段階として、無風空間において自由落下する物体の空力特性を測定した。これは、無風時の自由落下運動では飛散物まわりの風の流が既知(風速=0m/s)となり、飛散物の空力特性を検討する場合の理想化された条件であ

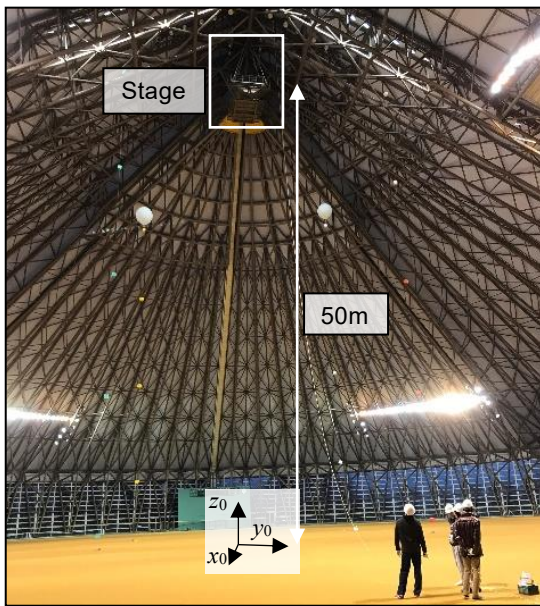
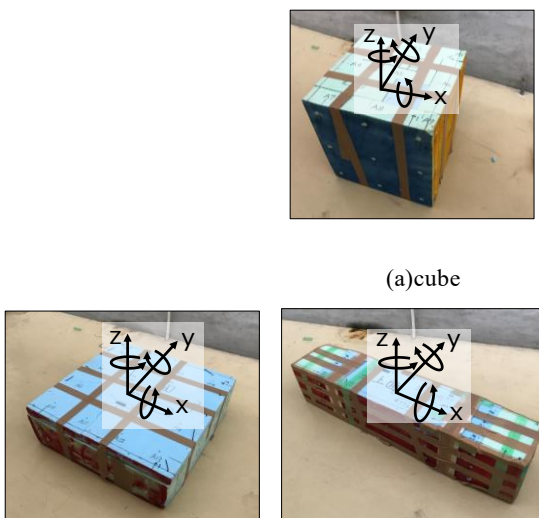


Fig. 5 Measurement site



(b) flat plate (c) rod

Fig. 6 Flying debris models

ると考えられるためである。

4.1 実験概要

(1) 実験場所ならびに実験方法

Table 3 Sizes of flying debris models

No	Model	Length	width	depth
1	Cube	600	600	600
2	Flat plate	900	900	300
3	Rod	1400	300	300
				unit:mm

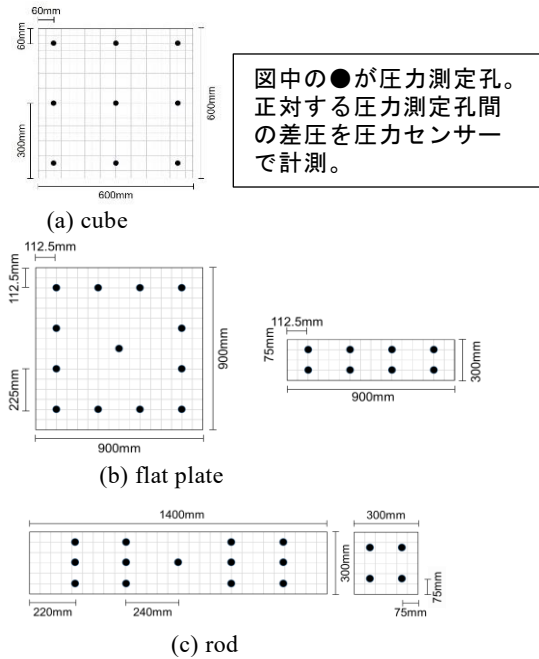


Fig. 7 Arrangement of pressure measurement points

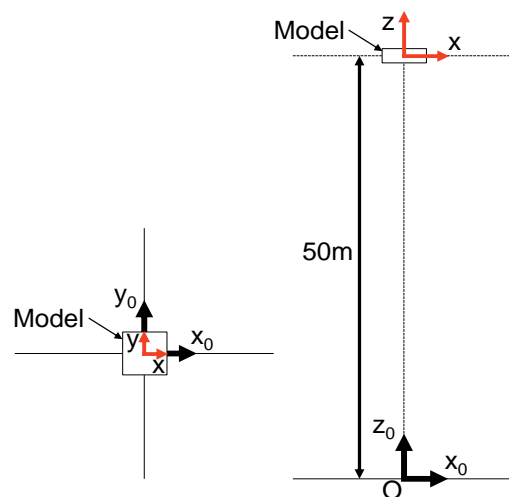


Fig. 8 Relationship between two coordinate systems in initial condition

実験に使用した施設は、兵庫県豊岡市日高町にある但馬ドームである。実験場所をFig. 5に示す。ドーム棟の建築面積は19,006.58m²、グランド面積14,000m²、天井最高高さ59.81mである。但馬ドームには開閉式屋根を有しているが、実験時は全閉とした。また、他の開口部も全て閉じ、空調も全てオフとし無風状態とした。自由落下実験は、ドーム中央の天井部分にある地上から高さ約50mのステージから飛散物模型を落下させた。また、Fig. 5中に示す通りに絶対座標系(x_0, y_0, z_0)を定義した。実験では、飛散物模型に内蔵された計測装置による空力特性測定のほかにも複数のビデオカメラで撮影した映像から画像解析により飛散物模型の軌跡を計測した。

(2) 飛散物模型

実験に使用した飛散物模型はWills et al. (2002) を参考に塊状(立方体)、平板状、棒状の3つの飛散物模型を作成した。飛散物模型をFig. 6に、各飛散物模型寸法をTable 3に示す。模型にはFig. 6に示すように模型に固定した座標系(x, y, z)を定義し、以下模型座標系と呼ぶことにする。全ての飛散物模型には、本研究で開発した計測装置が内蔵されている。飛散物模型に設けた風圧測定孔の決定には前章のCFD結果を参照した。ただし、飛散物模型の辺長比はCFDで検討したものと若干異なる。各飛散物模型の風圧測定孔をFig. 7に示す。飛散物模型の風圧測定孔は正対する面の同じ位置にも設けてあり、正対する位置の風圧測定孔間の差圧を圧力センサーで測定した。

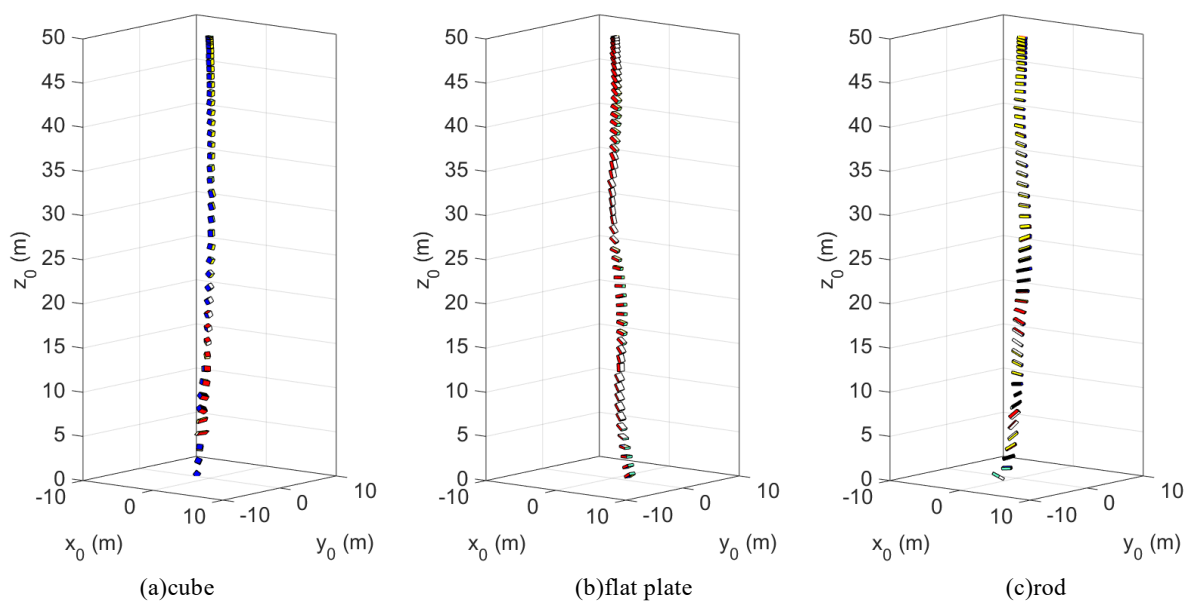


Fig. 9 Trajectory of falling debris models by image analysis (1/10 sec pitch)

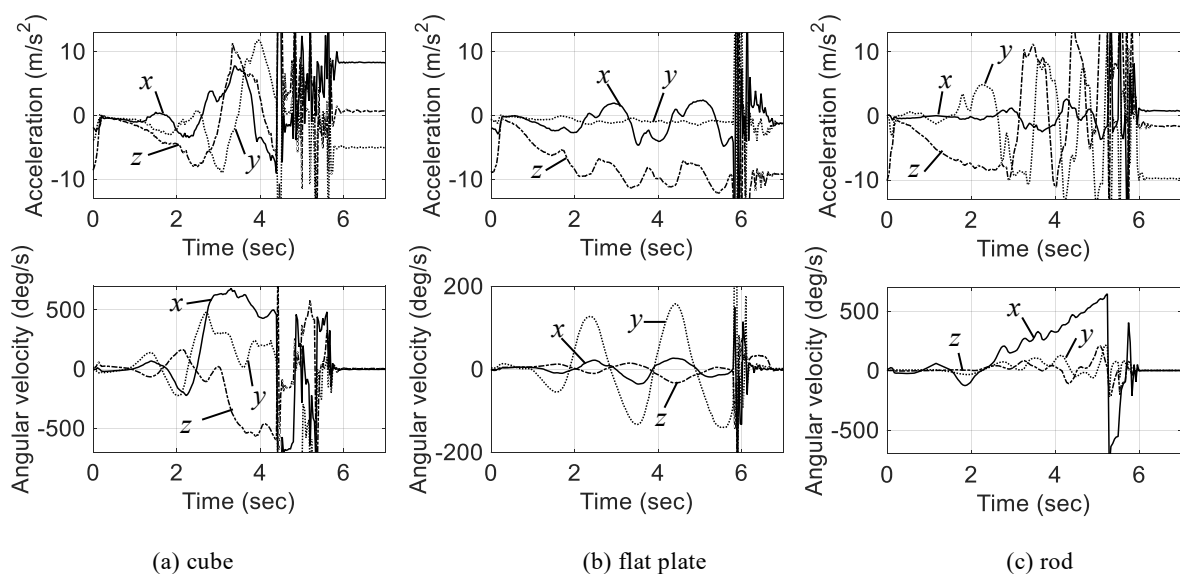


Fig. 10 Time histories of accelerations (upper) and angular velocities (lower) of falling debris models

すなわち、部位ごとの面に正対する差圧として測定した。落下開始時の絶対座標系と模型座標系との関係はFig. 8の通りである。落下開始時は模型の姿勢がなるべく水平になるようにした。

4.2 実験結果

(1) 画像解析による飛散物模型の軌跡

画像解析により求めた3つの飛散物模型の自由落下の軌跡のFig. 9に示す。立方体(cube)の軌跡は、落下開始直後は水平な姿勢を保って落下するが、地上30mあたりから、3軸方向に回転が始まっている。平板状(flat plate)の場合、落下開始直後から姿勢が斜めになり、地上30mあたりから平板(x-y軸面)が縦向きになり、更に地上20mあたりから水平となり、木の葉が舞うような状態で落下していることが分かる。棒状(rod)の場合は、長軸(x軸)を概ね水平にして落下しているが、地上30mあたりから長軸(x軸)が左右にゆれると共に長軸(x軸)廻りの回転が始まっている様子が捉えられている。

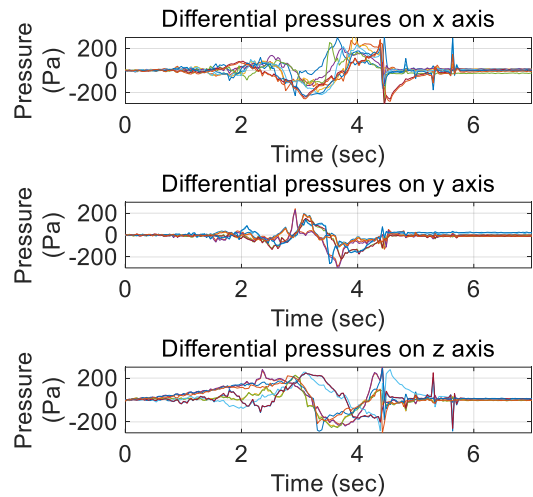
(2) 自立型計測装置の計測結果

(a) 加速度・角速度

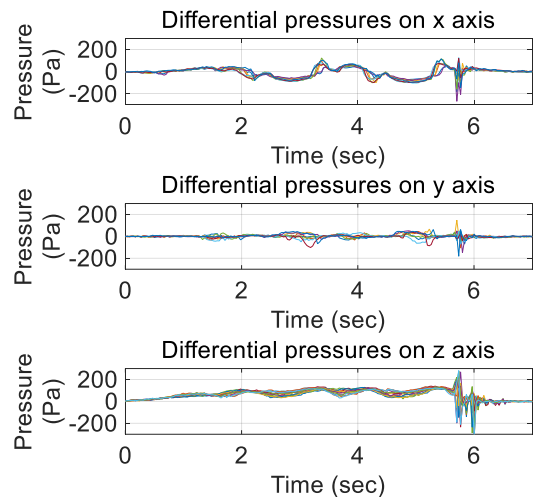
計測装置で測定した3つの飛散物模型の加速度と角速度をFig. 10に示す。何れの飛散物模型においても、最初はz方向に -9.8m/s^2 の重力加速度が作用しているが、すぐに他の2方向と同じく 0m/s^2 になる。このz方向の加速度が 0m/s^2 になった時点で自由落下を開始した時刻である。地上への落下時刻は加速度の値が急に大きく変動が生じたときであり、立方体(cube)では4.4秒、平板状(flat plate)では5.8秒、棒状(rod)では5.2秒である。3つの飛散物模型の落下時間は平板状が最も長い。これは平板状が最も受圧面積が大きく、鉛直方向の空気力(抗力)が最も大きいと考えられる。

立方体(cube)の場合、z方向の加速度が 0m/s^2 になった後に徐々に負の値が大きくなるが、2.5秒辺りから急激に 0m/s^2 に近づく。その時刻あたりから3方向の加速度と3軸廻りの角速度も大きく変動している。全ての加速度、角速度が変動しているときが、3軸廻りに複雑に回転しながら落下している時間であると考えられる。

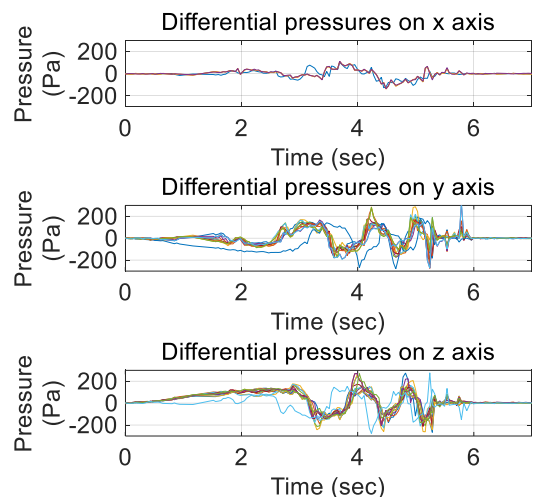
平板状(flat plate)の場合、z方向の加速度は一旦 0m/s^2 (落下開始直後)になった後に変動しながら負の値が大きくなる。立方体の場合と違い 0m/s^2 にはならない。角速度は、2秒あたりからy軸廻りに大きく正負の値をとりながら変動している。これらより、z軸方向を上向き(x-y軸面を水平)にし、y軸廻りで木の葉が舞うように揺らぐ様子が捉えられている。また、z軸方向の値は3秒以降では平均的にほぼ -9.8m/s^2 付近



(a) cube, upper: x-axis, middle: y-axis, lower: z-axis



(b) flat plate, upper: x-axis, middle: y-axis, lower: z-axis



(c) rod, upper: x-axis, middle: y-axis, lower: z-axis

Fig. 11 Time histories of wind forces acting on debris models

の値を示していることから、平板状模型ではおよそ3秒後に終端速度に達したことが分かる。

棒状(rod)の場合、立方体の場合と同様にz方向の負の加速度が徐々に大きくなり、3秒辺りから大きく変動している。このとき、x軸廻りの角速度が徐々に大きくなっている。すなわち、z方向の加速度が正負に大きく変動しx軸廻りの角速度が大きくなっているときが長軸(x軸)廻りに回転している状態であり、画像解析の結果と対応している。

(b) 差圧

3つの飛散物模型の自由落下時の差圧をFig. 11に示す。3つの飛散物模型とも、x, y, z面内では全ての差圧は概ね同じ性状(変動)となっている。

立方体(cube)の場合、概ね水平を保っている状態ではz方向差圧が徐々に大きくなっている。様々な方向に回転し始めると何れかの方向の差圧とも大きく変動し始める。

平板状(flat plate)では、揺らぎ始める2秒付近からx方向の差圧が大きく変動している。また、z方向の差圧は小さな変動をしながら徐々に大きくなっていることが分かる。特に3秒以降では平均的にほぼ一定の値で推移していることが分かる。このことから、加速度の結果でも示した通り模型が終端速度に達したことが確認できる。y方向の差圧は他の方向の差圧に比べて小さい。

棒状(rod)の場合、x軸周りに回転しているとき(3秒以降)y方向、z方向の差圧は正負が逆転しながら大きく変動している。x方向の差圧は他の2方向に比べて値は小さく変動も小さい。

5. 平板状模型の落下運動の算出

以降は平板状模型を例に、模型の落下運動について示す。

5.1 算出方法

落下実験で計測された加速度、角速度を用いて落下中の模型の姿勢と絶対座標系における模型の落下速度および軌道を算出した。まず模型の姿勢は角速度の値からクォータニオンを求め、回転行列を表すことで求めた(廣瀬・近藤, 2014)。絶対座標系における模型の落下速度および軌道を求めるためには、絶対座標系における加速度を求める必要があるが、計測された加速度の値は模型座標系での値であるため座標変換が必要になる。そこで角速度の値から求めた回転行列を用いることで絶対座標系における加速度を求め、台形公式による時間積分によって模型の落下速度および軌道を算出した。

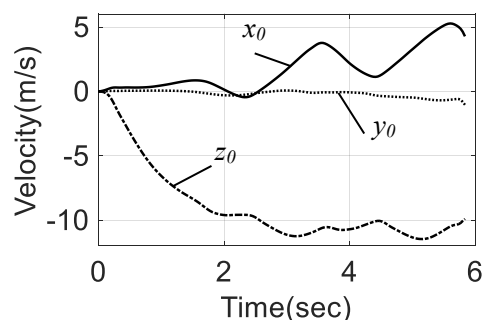


Fig. 12 Velocity of falling model (flat plate)

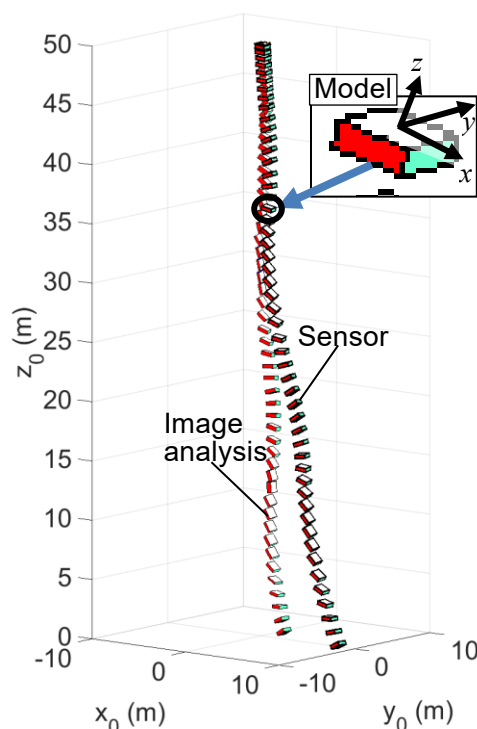


Fig. 13 Trajectory of plate model (flat plate, 1/10 sec pitch)

5.2 算出結果

平板状模型の絶対座標系における落下速度をFig. 12に示す。x0軸方向の値は増減を繰り返していることから、模型に空気が両方向に作用していることが分かる。y0軸方向の値はほとんど変化がなく、z0軸方向の値は徐々に減少し3秒以降では-10m/s付近で推移していることから、4章でも述べたように模型が終端速度に達したことが確認できる。

模型の軌道について、画像解析(Image analysis)によって算出された運動とセンサー(Sensor)から算出された運動をFig. 13にそれぞれ示す。画像解析およびセンサーによって算出された模型の運動は共に模型座標系のy軸まわりに揺らいでおり、絶対座標系のx0軸方向に往復しながら落下している様子が捉えられ、比較的傾向が一致していることが確認できる。一方、センサーによって算出された軌道は画像解析と比べ、

$z_0=30\text{m}$ あたりから x_0 軸正方向にずれ、 x_0 軸方向に 5m 程度ずれたところに着地する結果となった。軌道に誤差が生じた理由として加速度を二階積分したことによる誤差の累積や、落下開始時の姿勢を水平と仮定していたが、実際の落下開始時の姿勢が水平でないことによる誤差、加速度センサーの計測値そのものに含まれる誤差が考えられる。

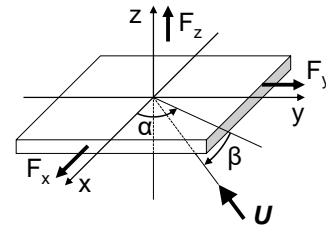


Fig. 14 Definition of wind direction

6. 平板状模型の風力係数

6.1 算出方法

風力を次に示す2通りの方法を用いて算出した。

(1) 加速度を用いた算出

加速度センサーで得られた加速度、および角速度センサーで得られた回転行列および5.1で得られた模型の落下速度を用いて、模型座標系での風力を算出した。質量 $m(=6.54[\text{kg}])$ 、および加速度センサーで計測された各軸方向の加速度をそれぞれ $a_x, a_y, a_z[\text{m/s}^2]$ として、模型座標系において各軸に作用する風力 $\mathbf{F}=[F_x F_y F_z][\text{N}]$ を(1)式で表した。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ma_x \\ ma_y \\ ma_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 差圧を用いた算出

圧力センサーから得られた差圧を用いて以下のように風力を算出した。 x 軸方向の圧力測定孔 i 、 y 軸方向の圧力測定孔 j 、 z 軸方向の圧力測定孔 k とし、各測定孔に作用する差圧をそれぞれ $P_i, P_j, P_k[\text{Pa}]$ 、測定孔 i, j, k の支配面積をそれぞれ $A_i, A_j, A_k[\text{m}^2]$ とすると、模型座標系での風力 $\mathbf{F}=[F_x F_y F_z][\text{N}]$ を(2)式で表した。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^8 P_i \cdot A_i \\ \sum_{j=1}^8 P_j \cdot A_j \\ \sum_{k=1}^{13} P_k \cdot A_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

模型に作用する風速については、模型を無風状態で自由落下させたため、模型の落下速度ベクトルに正対する速度ベクトルが模型に作用する風速ベクトルなる。それぞれの方法から得られた \mathbf{F} と風速 $|\mathbf{U}|[\text{m/s}]$ を用いて模型座標系における風力係数 C_f を

$$C_f = \frac{|\mathbf{F}|}{\frac{1}{2} \rho |\mathbf{U}|^2 A} \quad (3)$$

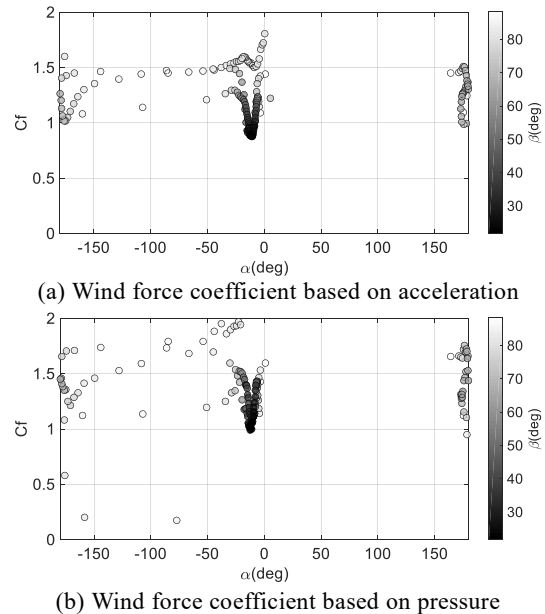


Fig. 15 Wind force coefficient of flying debris

それぞれ(3)式で表した。

ここで、 ρ は空気密度で $1.2[\text{kg/m}^3]$ 、 A は模型の代表面積でありここでは $0.81[\text{m}^2]$ とした。また、回転行列を用いて模型座標系での相対風速ベクトルを求め、模型座標系上で風向角を算出した。Fig. 14に示すように風向角 $\alpha, \beta[^\circ]$ を定義した。

6.2 算出結果

風力係数と風向角との関係をFig. 15に示す。加速度から算出された風力係数(a)と差圧から算出された風力係数(b)は比較的一致していること確認できる。風向角の範囲は $-180^\circ < \alpha < 0^\circ$ 、 $20^\circ < \beta < 90^\circ$ に収まっている。風向角と風力係数の関係をみると、 $\alpha=0^\circ$ 付近および $\alpha=-180^\circ$ 付近に風力係数のデータが密集している。このことから模型座標系の x 軸方向に風力を受けていることが分かる。また、データが密集しているところでは β の値にほとんど変化がないにもかかわらず、 α の変化に対して C_f が大きく変化することも分かる。

7. おわりに

本研究では、飛散物に作用する空力特性を測定す

るため、加速度センサー、角速度センサー、圧力センサー、マイコン、SDカード、小型電源からなる自立型計測装置を開発した。計測装置を内蔵した飛散物模型を大空間ドーム施設内において無風状態で自由落下させ、その際の空力特性を測定した。測定時には、複数のビデオカメラで自由落下状況を撮影し、画像解析により模型の姿勢と軌跡を測定した。

角速度センサーを新たに導入することによって計測装置から得られる情報のみを用いて模型の姿勢や落下速度、軌道を求めることができた。測定された加速度、角速度、ならびに差圧は、水平落下、揺らぎ、回転など様々な状態で自由落下する模型の物理量を捉えることが出来た。計測された情報をもとに平板状模型について風力係数を算出することができ、風向角との関係を示すことができた。今後は今回の手法で求めた飛散物の空力特性と風洞実験によって計測された空力特性とを比較することで、既往の研究によって求められる空力特性との差異を明らかにし、また、飛散シミュレーションを用いて飛散性状の違いを明らかにする予定である。

謝 辞

本研究は科研費16K14341および平成29年度京都大学防災研究所一般共同研究の助成を受けたものである。また、実験では近畿大学建築学部4年(当時)の木村優太君他、同大学および京都大学の学生の協力を得た。

参考文献

岡崎純也・丸山 敬(2012)：瓦と正方形平板の飛散

性状のシミュレーション, 第22回風工学会シンポジウム, pp.377-382.

立川正夫・福山雅弘・原 英基(1982)：台風時の飛散物の軌跡と速度に関する研究- その2 一様流中での平板の2次元飛散運動-, 日本建築学会論文報告集, vol. 314, no. 1, pp. 17-25.

廣瀬 圭・近藤亜希子(2014)：特集3:人間工学のための計測手法 第1部 動作計測(2)—慣性センサによる動作計測—, 人間工学, Vol50, No.4, pp.182-190.

前田潤滋(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市街実態の総合調査(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・河井宏允・樋本圭佑(2005)：6分力天秤を用いた正方形平板の空気力特性の測定, 日本建築学会大会学術講演便概集, pp. P177-178.

丸山 敬・松居健人・西村宏昭・野田 博・西嶋一欽(2017)：飛散物の動的空気力特性の直接計測システムの試作, 京都大学防災研究所年報, 第60号B, pp.523-530.

J. A. B. Wills, B. E. Lee, T. A. Wyatt(2002)：A model of wind-borne debris damage, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 90, No.4-5, pp. 555-565.

Richards, P. J., Williams, N., Laing, B., McCarty, M. and Pond, M. (2008): Numerical calculation of the three-dimensional motion of wind-borne debris, J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics., vol. 96, no. 10-11, pp. 2188-2202.

(論文受理日：2018年6月13日)