

## 飛散物の動的空力特性の直接計測システムの試作

### Trial Manufacture of a System for Aerodynamic Characteristics Measurement of Flying Debris

丸山 敬・松居健人<sup>(1)</sup>・西村宏昭・野田 博<sup>(2)</sup>・西嶋一欽

Takashi MARUYAMA, Kento MATSUI<sup>(1)</sup>, Hiroaki NISHIMURA, Hiroshi NODA<sup>(2)</sup>  
and Kazuyoshi NISHIJIMA

(1) 京都大学大学院工学研究科建築学専攻

(2) 近畿大学建築学部

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

(2) Department of Architecture, Kindai University, Japan

#### Synopsis

Damages to houses in strong wind, e.g. typhoon or tornado, are caused by flying debris in most cases. The configuration of flying debris such as branches of tree, pebbles, pieces of broken structures and so on is categorized as a “bluff body”. Therefore, prediction of flying motion of bluff body is important to evaluate the impact of flying debris for the wind resistant design of claddings and the reduction of damage to houses.

This study aims to develop a system to measure the motion of bluff body and to clarify aerodynamic characteristics of flying debris. Some units of micro-computer, three axis accelerometer, pressure sensors, A/D converter, Wi-Fi adaptor and small battery were assembled as a stand-alone probe to measure the motions and wind forces on a flying body. The measuring probe was built in a rectangular shaped test body. The test body was dropped in a test region with no wind. The pressure and the acceleration on the test body were measured, while capturing the motion of the body by taking movies with video cameras and conducting image analysis.

**キーワード:** 飛散物, 空力特性, ブラフボディ, 計測システム, 強風災害

**Keywords:** flying debris, aerodynamic characteristics, bluff body, measuring system, strong wind disaster

#### 1. はじめに

近年の温暖化による台風の強大化, 竜巻や突風などの極端気象現象の多発化による建物の強風被害に対して防災・減災対策が望まれるところであるが, 建物の強風被害の実態調査から, 建物被害の原因の多くは, 飛散物の衝突によるものであることが知られており, Fig. 1に示すように多数の飛散物の衝突に

よって広範囲にわたる建物壁面の被害や, 飛散物が建物壁面を貫通し屋内にまで到達するという事例が見受けられる(前田, 2013). したがって, 建物の強風被害防止・低減対策として飛散物に対する防備は重要で, 建物の外装材が飛散物の衝撃力に耐えられるように設計する必要がある. 飛散物の衝突時の速度を予測することが求められる. そのためには, 飛散物の飛翔運動を精度よく求めねばならず, 風から



Fig. 1 Damage to the walls of houses by flying debris

受ける空気力を適切に評価する必要がある。

台風や竜巻などの強風により生じる飛散物の多くは、小石、木の枝、破壊された建物の部材など“流線型でない形状”をもった物体、すなわち“ブラフボディ”であり、飛散性状を予測するためにはそれらの空力特性を知ることが基本となる。これまでに行われたブラフボディの空力特性を明らかにする研究としては、Willsら（2002）が、飛散物の形状を塊状、シート状、棒状のものの3つに分類し、それぞれの形状のについて様々なサイズのものを用意し、風洞実験によって飛散開始時の風速を求めた。立川・原（1982）は様々な形状の物体を落下させ、落下の様子を観察し、物体によって落下の様子を4つの「形」に分類した。4つの形とは風を受ける面積が最大となる面を保って落下する「水平形」、1軸周りに回転しながら落下する「自転形」、波形の軌跡を描きながら落下する「振動形」、一定の斜めの角度を保ちながら滑るように落下する「すべり形」である。また4つの落下の「形」をもとに各物体の落下の様子を分析した。風洞実験による研究としては、立川ら（1982）が矩形平板について2次元的な空力特性を求めた。丸山ら（2005）は、6分力天秤を用いて、正方形平板の3次元的な静的空力特性を求めた。Richardら（2008）は、長方形平板と棒状の物体をそれぞれ3種類ずつ用意し、これらの静的空力特性を、6分力天秤を用いて求めた。岡崎・丸山（2012）は、対称な形を持った板状の飛散物だけでなく、複雑な形状を持つ屋根瓦の静的空力特性を、6分力天秤を用いて求め、対称な形の物体の空力特性との差異を示した。

これら風洞実験により求められる物体の空力特性は、通常風洞に物体が固定された状態で測定が行われることが多いので、物体と気流の相対風向風速がほぼ一定な状況の結果となる。一方で、実際の飛散物は、周囲の気流性状の非定常性および自身の運動による姿勢の変化により、相対風向風速が時々刻々と変化する状況で飛散する。さらに、流線型の物体に比べてブラフボディ周囲の流れは複雑で、物体が受ける空気力も動的に変化するため、物体自身の姿勢変化も大きい。このため、強風時の飛散物のように、地上付近で飛翔するブラフボディに加わる空気

力を実験的に測定することは困難なことが多く、これまでほとんど測定されてこなかったため、そのような状況におけるブラフボディの空力特性に関する情報は、ほとんどないのが現状である。そのため、飛散物の飛翔運動を精度よく予測するために非定常な流れの中を飛翔するブラフボディのもつ動的な空力特性を明らかにし、風洞実験のような定常流中で得られた静的な空力特性との差異を明らかにすることが強く望まれる。

一方、計測技術に関して、加速度、回転速度などの姿勢情報を測定するモーションセンサー、GPSなどを用いた位置センサー、空気力を測定するための圧力センサーなどの小型化・高精度化の進歩には目覚ましいものがある。また、撮像素子の高密度化・低価格化により、高解像度の動画が高速で安価に撮影できるようになった。さらに、計算機の能力や画像解析技術の向上により、安価で高速な画像解析も可能になってきている。したがって、これらの技術を集積し、複雑な運動を行うブラフボディの飛翔運動を直接測定・解析することが可能となってきている。

以上のような状況を鑑み、本研究では最新の計測技術を駆使して飛翔中のブラフボディのもつ空力特性および運動を直接計測する手法を提案し、自立的計測が可能な装置の開発と測定法の構築を目指すのである。これにより、ブラフボディの飛翔運動を予測し、建物の強風被害の原因である飛散物の衝突による衝撃力を精度よく推定することが可能となる。その結果、飛来物に対して要求される耐衝撃性能を適切に評価し、建物の飛散物に対する防御性能を高めるための、より合理的な耐風設計法の確立し、建物の強風被害低減に貢献するものである。

## 2. 計測システムと計測方法

本研究では、飛翔中のブラフボディに加わる風圧力と運動を直接測定する手法を提案し、ブラフボディに加わる動的な空力特性を明らかにするためのシステム・計測装置の開発を行い、その有効性を以下の手順で検証する。

- ・ 速度あるいは加速度の測定、風圧力の多点測定が可能なセンサー、データロガー、無線ユニット、および、電源からなる計測システムの設計。
- ・ 上記の計測システムを組み込んだ自立型の計測プローブを内蔵するブラフボディ試験体の作成。
- ・ ブラフボディ試験体による飛翔実験。
- ・ 飛翔運動解析用のビデオ映像の撮影と解析。
- ・ センサーによる計測結果とビデオ映像の解析

結果の比較による計測システムの精度検証。

## 2.1 計測システムと試験体

試作した計測システムは、マイコン（RSコンポーネンツ社製Raspberry Pi Model B）、3軸加速度センサー（ANALOGDEVICES社製ADXL-335：計測可能範囲±3g, 1gあたりの出力電圧0.33V）、圧力センサー（All Sensors社製1 INCH-D1-4V-MINI：差圧型±1 inH<sub>2</sub>O, オフセット電圧2.25 V, 出力スパン；オフセット電圧±2V, ヒステリシス0.05 %FS, スパンシフト（5°C-50°C）±2 %FS, 許容過圧力±100 inH<sub>2</sub>O）、A/DコンバータにはMicrochip製MCP3208（12bit, アナログ入力電圧範囲0~5.0V）、および、Wi-Fiアダプタで構成され、無線LANを介して外部PCからシステムの制御や計測データの読み出しができるように設計した（Fig. 2,3）。

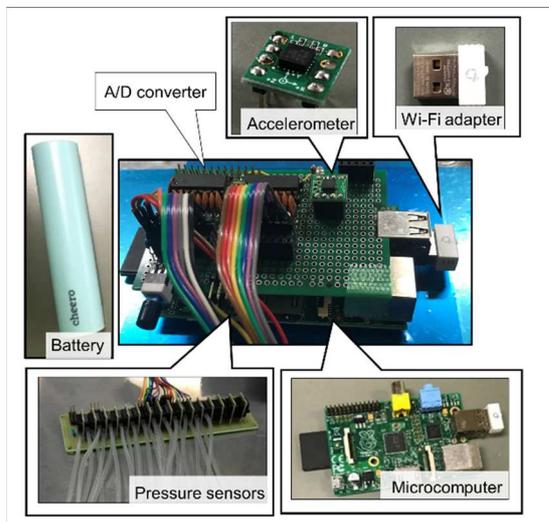


Fig. 2 Components of the measuring probe

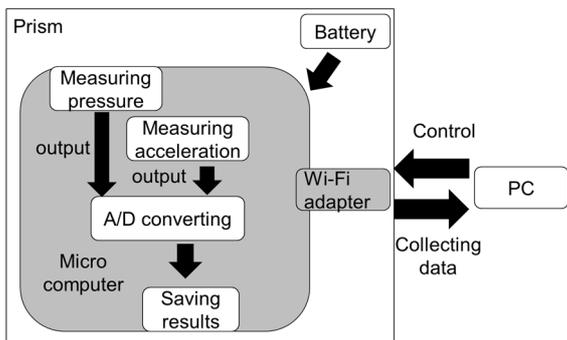


Fig. 3 Flow of the measuring system

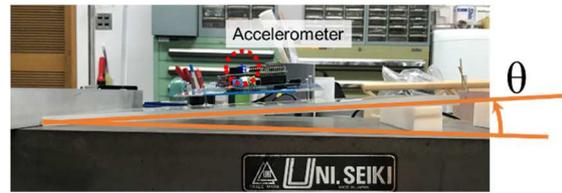


Fig. 4 Setup of accelerometer test

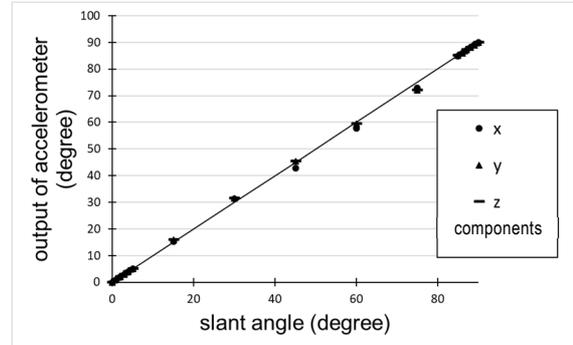


Fig. 5 Output of accelerometer with slant angle

## 2.2 加速度センサーの検定

加速度センサーを Fig. 4 のように傾け鉛直軸との傾きから各軸方向の重力加速度成分から求められる傾きと実際の傾きの関係を求めると Fig. 5 のようになり、両者の直線性が確かめられた。

## 2.3 圧力センサーの検定

複数枚の基板の上に実装された計測システムは小型電源と共に1塊の計測プローブにまとめられ、Fig. 6に示すようにブラフボディ試験体に内蔵される。試験体にはFig. 7示すように各面に4点の測定孔を開け、正対する測定孔に加わる風圧力を12個の圧力センサーに導き、両者の差圧を測定した。飛翔実験を行う場合は高所から落下させて行うため、Fig. 8のような



Fig. 6 Prism for pressure sensors' test

計測値の妥当性を検討するため、ここでは非定常乱流場の計算を行うことのできるラージエディシミュレーション

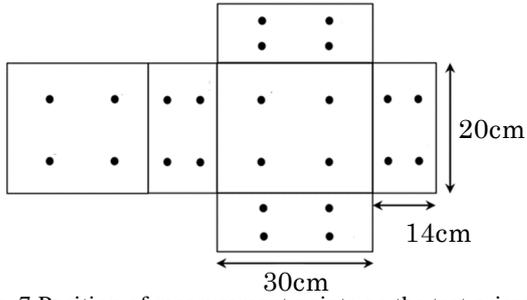


Fig. 7 Position of measurement points on the test prism (black dots)



Fig. 8 Test prism for measurement

スタイロフォーム（発泡ウレタン）で作成された試験体に計測プローブを緩衝剤（ポリエステル性の綿）と共に挿入して、地面との衝突の衝撃を和らげるように工夫した。

圧力センサーの検定には京都大学防災研究所内の単回路吹き出し型の境界層風洞を用い、センサー検定用のブラフボディ試験体を測定胴（高さ 2.5m × 幅 2m）の中央、床面から 0.75m の地点に 3 軸方向に移動することができるトラバース装置に取り付けた支持棒を用いて Fig. 9 のように設置し、風速 10m/s のほぼ一様な風（乱れの強さ 1%以下）試験体の風向角度を変化させて、各圧力センサーに加わる差圧を測定した。

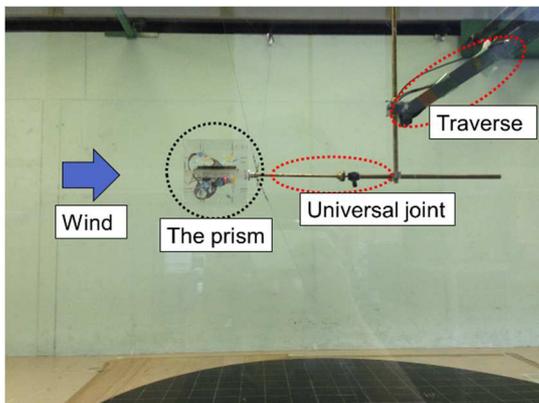


Fig. 9 Setup of pressure sensors' test in the wind tunnel

Table 1 Conditions for numerical calculation

空間差分	移流項 3次風上(UTOPIA) その他 2次中心
時間進行法	Adams-Bashforth法
計算アルゴリズム	HSMAC法
乱流モデル	標準Smagorinsky Model( $C_s=0.13$ )
計算領域	$x \times y \times z = 21D \times 7D \times 7D$
計算格子数	$N_x \times N_y \times N_z = 147 \times 119 \times 119$
最小格子幅	$dx = dy = dz = 0.05D$
レイノルズ数	$Re = 22000$
計算時間*	$T = 150$
時間間隔	$\Delta t = 0.002$
流入部平均風速	$U_{in} = 1$

\*; 平均値算定には  $T = 50 \sim 150$  のデータを用いた。

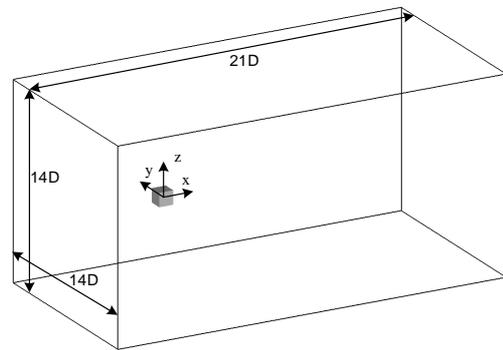
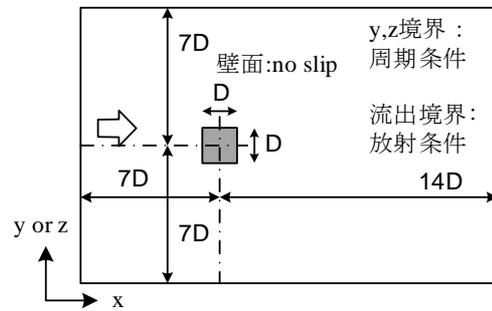


Fig.10 Calculating domain

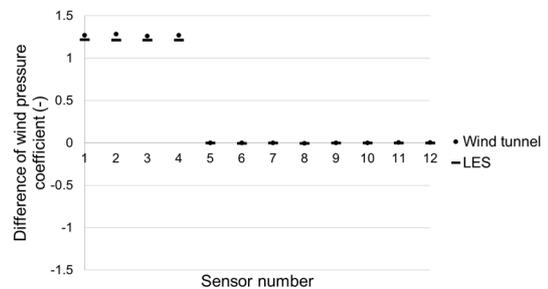


Fig.11 Comparison of wind pressure coefficient between wind tunnel tests and numerical calculation

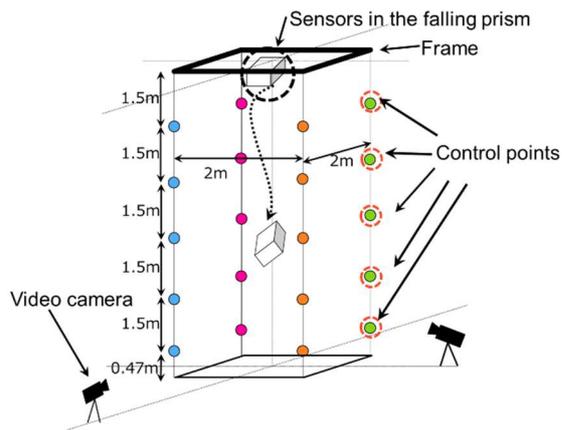
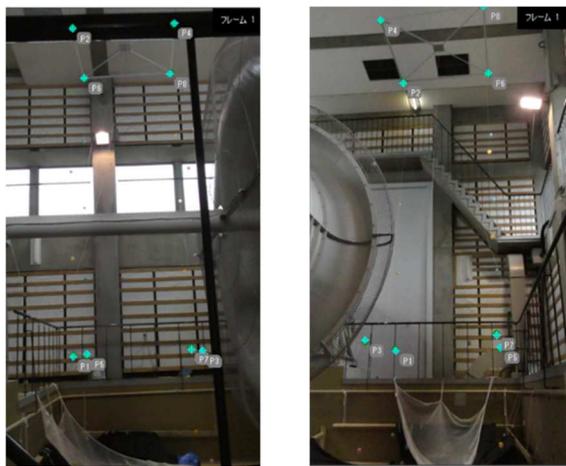


Fig. 12 Video camera setup for recording movies of falling prism



Movie from camera 1      Movie from camera 2

Fig. 13 Movies for image analysis

ュレーション (LES) を用い、風洞内と同等な解析領域を再現した数値流体計算 (Table 1, Fig.10) による解析結果と実験結果を比較する。

立方体の表面に開けた測定孔と同じ位置における計算点の圧力値を比較すると、立方体の 1 面に平均風速の方向が直角に吹き付ける場合の風圧力は、Fig. 11 に示すように計算による解析値とよく一致した。

## 2.4 飛翔運動のビデオカメラによる測定

加速度センサーや圧力センサーによる測定だけでなく、Fig. 12に示すように試験体の落下の様子を2台のビデオカメラを用いて撮影し、ビデオ映像を解析することにより試験体の軌跡を求めた。解析には複数台のカメラと空間座標が既知である基準点 (コントロールポイント) を用いて映像内の3次元空間を推定するDLT法 (Direct Linear Transformation method) を用いた。実際にはFig. 13に示すように

Table 2 Error of position of control points

	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
<i>P1</i>	-0.04	-0.02	0.02
<i>P2</i>	0.02	-0.01	-0.03
<i>P3</i>	-0.01	0.01	-0.09
<i>P4</i>	0.02	0.00	-0.04
<i>P5</i>	-0.07	-0.04	0.08
<i>P6</i>	0.00	-0.04	-0.02
<i>P7</i>	-0.01	0.00	-0.07
<i>P8</i>	0.02	0.01	-0.04

(unit in m)

Table 3 Distance between control points

Two points		Distance between two points (True value) (m)	Distance between two points (Calculation) (m)
P1	P5	1.50	1.56
P2	P6	1.50	1.51
P3	P7	1.50	1.52
P4	P8	1.50	1.51
P1	P2	2.00	2.06
P5	P8	2.83	2.93
P6	P7	2.83	2.87
P1	P8	3.20	3.23
P2	P7	3.20	3.21
P3	P6	3.20	3.27
P4	P5	3.20	3.34

2 台のビデオカメラを用いて撮影した映像から DITECT 社製の 3 次元運動解析ソフト (Dipp-Motion V) を用いて試験体の落下運動の 3 次元の軌跡を求めた。Fig. 13 に示す実際のビデオ映像内で基準点間の距離を解析結果と比較すると、2m×2m×8m の範囲において、Table 2,3 に示すように、最大 10cm 程度の誤差を生じた。

ブラフボディ試験体の形状が分っているので、試験体の最低 1 面の四隅の頂点が同時に複数のビデオ映像に映っていれば、試験体が剛体運動を行うと仮定して残り 5 面の位置を推定することができる。これにより、物体の姿勢 (並進および回転) を求めた。ビデオ映像から求めたブラフボディ試験体の落下の様子を Fig. 14 に示す。この場合、試験体は 0.7 秒程度までは落下開始時の状態と比較して傾きが小さいが、0.7 秒以降は時間に伴って図中に示す試験体の上に定義した y 軸まわりに x 軸が鉛直下向き方向に回転し、また微小に y 軸も鉛直上向きに回転しながら落下している様子が求められている。

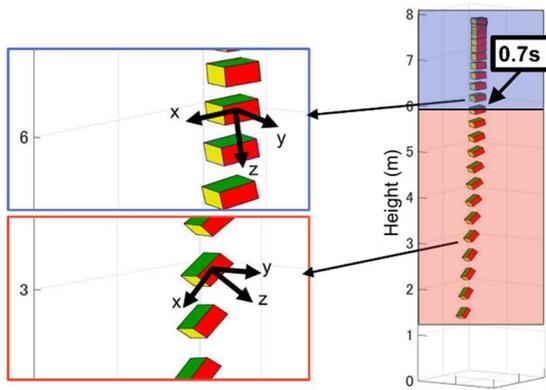


Fig. 14 Trajectory of falling prism by image analysis at interval of 1/20 sec

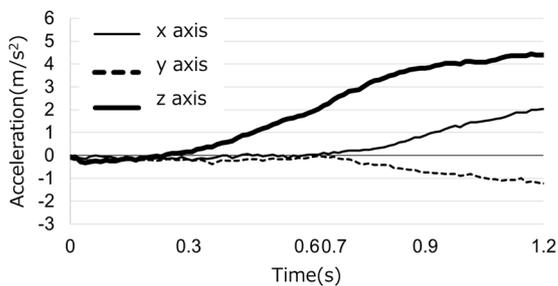


Fig. 15 Time history of acceleration by accelerometer

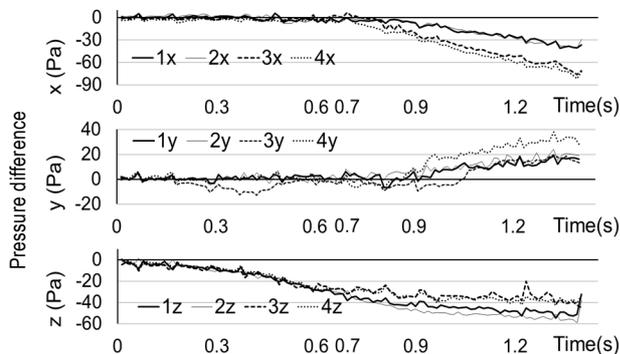


Fig. 16 Time history of pressure difference

### 3. 計測結果

Fig. 14の落下運動に対応する加速度センサーの測定結果をFig. 15に示す。試験体の姿勢は加速度センサーのz軸ができるだけ鉛直下方向を向くように設置しているが、完全に一致していないために、x軸、y軸の出力が0となっていない。しかし、落下開始後少しすると、すべての加速度センサーの出力が0になり、自由落下し始める。その後、試験体の落下速度が大きくなるにつれて、風圧力も大きくなり、z軸方向成分加速度も対応して大きくなり、そ

の後0.7秒ごろからx軸、y軸の出力も0から離れた。これは、Fig. 14に示したように、試験体が傾き始めてz軸が鉛直下方向からずれたためと考えられる。このように加速度センサーからの出力は、ビデオ画像解析で得られた試験体の姿勢変化と良い対応が得られた。

同じ時刻の圧力センサーからの出力の変化をみると、Fig. 16に示すように、風圧力は0.7秒までは圧力測定位置3y以外ではいずれの軸方向成分も測定位置によらずほぼ同じ変化をしている。x、y軸方向の値は0近くを保ち、試験体がxy軸平面に平行な面をほぼ水平にしながら落下しており、z軸方向の値は落下速度に対応して上記加速度センサーの出力と同様な変化をしている。この間、模型の姿勢がほとんど変わっていないことに対応した値となっている。しかし、0.7秒を過ぎると模型の回転に対応してx、y軸方向の風圧力も0から離れて増大する。0.3秒から0.5秒付近で、y軸方向の圧力測定位置3yの風圧力が変化して負の値をとることから、この時点で模型周辺の流れ場および風圧分布が対称でなくなり、それによる風圧力の偏によって回転モーメントが作用して試験体が回転を始めたと考えられる。これにより、試験体周辺の流れの対称性をさらに崩したため、0.7秒以降のx、y軸方向の風圧力の大きな変化を引き起こしたと考えられる。

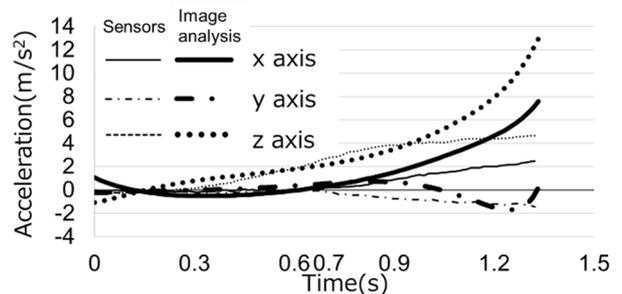


Fig. 17 Comparison of acceleration between accelerometer and image analysis

最後に、画像解析から算出された3軸方向の加速度と加速度センサーからの出力を比較する。

画像解析からは、まず試験体の位置の変化が求められる。今回の実験では、ビデオ画像が暗く、また、コントラストも小さかったため、ビデオ画像で、試験体の頂点を求める際に、手動で作業を行った。そのため、試験体の位置および姿勢を求めるためのピクセルデータにばらつきが多く入り込み、位置データを2回微分して求めた加速度の時間変化も大きくばらつく結果となった。そこで、まず、画像解析から得られた変位の時系列変化を5次関数で近似し、それを2階微分した結果をFig. 17に示す。

図に示されるように、加速度センサーの出力と画像解析結果の大まかな傾向は合致しているが、0.7 秒以降の違いは大きくなった。

#### 4. まとめ

本研究では、飛散物の動的な空力特性および運動を直接測定可能な自立型の計測システムを試作し、試験体に組み込んで風圧力と加速度を測定した。さらに、ビデオカメラで撮影された映像の画像解析を行い、物体の落下運動の軌跡を求めた。以下にそれぞれの結果をまとめる。

##### 直接計測システムの試作

マイコン、加速度センサー、圧力センサー、A/D コンバータ、Wi-Fi ユニットからなり、外部 PC による計測の制御や計測データを転送、收拾を行うことができる計測システムを設計した。そして、飛散物の動的な空力特性を明らかにするために、小型電源とともにブラフボディ試験体に組み込むことのできる自立型の計測プローブを作成し、試験体の飛散時の運動と空気力の測定を行った。

##### 圧力センサーを用いた測定

風洞実験、数値計算との比較により、圧力センサーを用いてブラフボディ試験体表面に作用する空気力を精度よく測定できることを確かめた。

##### 加速度センサーによる測定

落下中のブラフボディ試験体の加速度の変化を測定できることを確認した。計測値は、圧力センサーによる空気力の変化、および、ビデオ映像の解析によって得られた物体の運動と矛盾しない結果が得られたことを確かめた。

##### ビデオ画像解析による運動の測定

ブラフボディ試験体の運動を複数台のカメラで撮影し、画像解析ソフトを用いて試験体の運動を三次元的に明らかにすることができた。得られた結果は、圧力センサーおよび加速度センサーで得られた物体の運動と矛盾しない結果が得られたことを確かめた。

以上により、本研究で作成した計測システムおよび自立型の計測プローブによるブラフボディ試験体の飛散運動の計測が可能であること。本計測プローブを内蔵したブラフボディ試験体を無風な空間で飛散させることにより、飛散物の動的な空力特性を直接計測の可能性を示すことができた。

#### 今後の課題

今回の測定では、作成した計測システムとプローブの有効性を示すことができたものの、ブラフボディ試験体の加速度に関しては、センサーからの出力と画像解析からの値は定量的に精度よく一致が得られなかった。とくに、画像解析用のビデオ映像画質が、十分な精度をもって加速度を求められるほどの質がなかった。また、今回開発したシステムでは、3軸方向の加速度成分しか測定できない。したがって、回転運動を直接計測するための角速度、あるいは、角加速度が計測できるセンサーを追加する必要がある。さらに、物体表面の風圧力の測定点も増やすことにより、より精度の高い風力測定を行うことも望まれる。

今後、これらの点を改良し、種々の形状を持ったブラフボディ試験体を用いた飛翔実験を、広い空間で行うことを予定している。これにより、相対的な風向風速が時々刻々変化する中で飛翔する飛散物の運動を予測し、建物の強風被害の原因である飛散物の衝突による衝撃力を精度よく求め、建物の飛散物に対する防御性能の向上に寄与してゆきたい。

#### 謝 辞

本研究は平成 28 年度科研費 (16K14341) および平成 28 年度京都大学防災研究所一般共同研究 28G-10 の助成を受けたものである。また、実験にあたっては近畿大学建築学部 4 年の三好寛太君の協力を得た。

#### 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・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3 各種飛散物の空力特性-, 日本建築学会論文報告集, vol. 319, no. 1, pp. 23-30.
- 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.
- 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.

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. Aerodyn.*, vol. 96, no. 10–11, pp. 2188–2202, 2008.

Wills, J. A. B., Lee, B. E. and Wyatt, T. A. (2002) : A model of wind-borne debris damage, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 90, no. 4–5, pp. 555–565.

(論文受理日 : 2017年6月13日)