

## 強風下での平板状物体の飛散特性に及ぼす質量分布の影響

工藤, 愛架

大西, 智也

森本, 康幸

鶴, 則生

他

<https://doi.org/10.15017/1397764>

---

出版情報 : 都市・建築学研究. 23, pp.9-14, 2013-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン :  
権利関係 :

## 強風下での平板状物体の飛散特性に及ぼす質量分布の影響

### Some Effects of Mass Distribution on Flying Properties of Plate-like Body under Strong Winds

工藤愛架\*<sup>1</sup>, 大西智也\*<sup>2</sup>, 森本康幸\*<sup>3</sup>, 鶴 則生\*<sup>4</sup>, 友清衣利子\*<sup>5</sup>, 前田潤滋\*<sup>5</sup>  
Aika KUDO, Tomoya ONISHI, Yasuyuki MORIMOTO, Norio TSURU,  
Eriko TOMOKIYO and Junji MAEDA

Since wind-borne debris causes damage in strong winds, it is important to understand flying conditions of debris. In this paper, flying conditions of rectangular flat plates with uniform mass distributions and non-uniform mass distributions was investigated in a uniform flow based on wind tunnel experiments. And flying conditions of plates using a numerical simulation were compared with experimental results. Experimental flying conditions of flat plate with uniform mass distribution coincided with past test results by Tachikawa. Flying trajectories and motions of flat plates with non-uniform mass distribution differs due to an installation angle of plate. Flying conditions of flat plates using our numerical simulation corresponded to experiments in this paper. It seems that our computational method is validated in flying simulation of flat plates.

**Keywords:** Wind-borne debris, Wind Tunnel experiment, Numerical simulation

飛散物, 風洞実験, 数値シミュレーション

#### 1. はじめに

構造物の風荷重は作用する風圧力の大きさで評価されるが、実際の強風被害は風圧力による過大な風荷重によるものだけでなく、強風下で生じる瓦などの飛散物の衝突によるものも多く<sup>1)</sup>、飛散物による被害の低減は防災上重要な課題である。飛散物の飛散軌道に関する研究では、立川の研究<sup>2,4)</sup>がよく知られており、数値解析を用いた飛散物の運動に関する研究<sup>5,6)</sup>や風洞実験による飛散性状の検証例<sup>7)</sup>もある。著者らは既報<sup>8,9)</sup>で数値シミュレーションによる球状物体の強風下での飛散状況を報告し、立川<sup>2,4)</sup>およびHolmes<sup>5)</sup>らの研究を基に、平板状物体の飛散シミュレーションを行い、立川の風洞実験結果<sup>4)</sup>との検証を進めてきた。

本論では、平板状試験体の飛散特性に関する風洞実験手法を新たに組み立てて、一定風下で解放するための試験体の支持方法と飛散軌道の測定方法を工夫し、風向に対する平板物体の迎え角と平板の質量分布が飛散距離などの飛翔特性に及ぼす影響を実験的に検証する。また、実験結果をもとに、一般に使用される運動方程式による

飛散軌道の数値シミュレーションの妥当性を検証する。

#### 2. 実験概要

##### 2.1 実験装置と試験体概要

本実験は九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェル型吸い込み式風洞を用いて行った。計測部断面寸法は1500mm×1500mm、計測部前面の風速調整部は2000mm、計測部長さは約2800mmである。実験中の風速値は超音波風速計で記録し、電圧信号のサンプリング周波数は1000Hzである。

風洞断面内での各計測機器の配置状況を図1に示す。写真1に示すように、試験体を風洞壁面に平行に固定した左右の亚克力板から伸びた飛散物支持アームで挟んで固定する。支持アームの根元には設置角度調整用分度器を設置し、試験体の設置角度を調整する。また試験体を任意のタイミングで解放できるように、飛散物支持アームは制御通信用ケーブルで接続したコンピュータ操作で開閉制御する。飛散距離や飛跡などの飛散状況を撮影するため、風洞外部には2台のハイスピードカメラを配置した。カメラのフレーム数は毎秒120コマ、解像度は640×480ピクセルである。また、飛散距離や落下角度を測定するため、1000mm×500mmの粘土板を試験体固定装置の風下後方に配置した。

使用した平板状試験体は表1および図2に示すとおり、

\*1 都市共生デザイン専攻修士課程

\*2 工学部建築学科

\*3 男女共同参画推進室

\*4 都市共生デザイン専攻

\*5 都市・建築学部門

質量均一分布の正方形アルミ材の試験体 A, 同重量で一边に鉛を付加して質量を不均一分布にした試験体 B を用いた。試験体 A と試験体 B の作成誤差は 2% 以下である。

## 2.2 飛散状況の計測手順

試験体を風洞内に設置した様子を写真 2 に示す。平板状試験体を高さ 582mm に設置し, 試験体を風流れ方向に対して時計回りに 30° ごとに変化させた。設置角度は図 3 のように風向に平行な設置角度を 0° とし, 平板を時計回りに回転させた時の風向と平板のなす角度  $\theta$  を設置角度とする。試験体 B の場合は, 鉛を付けた端辺が風下に来る場合の設置角度を 0° とする。均一な質量分布を有する試験体 A は設置確度を 0° から 150° までの 6 通り, 質量分布を不均一にした試験体 B は設置確度を 0° から 330° まで 12 通りの各設置角度で, それぞれ 5 回ずつ実施した。

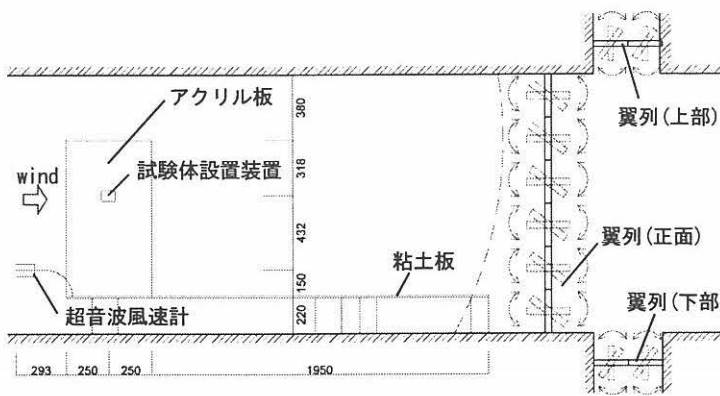


図 1 実験装置配置状況

飛散状況は風洞外に設置した 2 台のハイスピードカメラで動画記録し, 試験体支持装置の風下後方に設置した粘土板についての飛散物の落下痕から飛散距離を計測した。実験風速は 12m/s の一様流とし, 計測時の風洞内の乱れの強さは 2% 以下であった。ただし, 不均一な質量分布の試験体 B を設置角度 210° で飛散させた場合, 風洞実験室の計測可能距離 (2200mm) を上回り, 距離の計測ができなかったため, 風速を 9.5m/s にした実験も行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 飛散距離の特性

各設置角度で 5 回の実施での水平飛散距離と中心線からの離散距離を図 4 に示す。図 4 より, 水平飛散距離が大きいほど中心線からの離散距離が大きくなる傾向があ

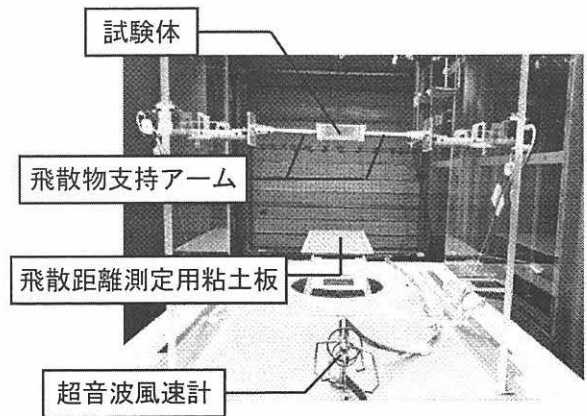


写真 1 試験体設置の様子

表 1 試験体概要

|       | 形状(mm) |     |     | 単位重量(g/cm <sup>3</sup> ) |      | 重量(g) |      | 図心と重心の距離(mm) |     |
|-------|--------|-----|-----|--------------------------|------|-------|------|--------------|-----|
|       | 辺長     | 厚さ  | 端部幅 | アルミ                      | 鉛    | アルミ板  | 端部鉛  |              |     |
| 試験体 A | 100.0  | 2.0 | 0.0 | 2.3                      | -    | 52.7  | 0.0  | 52.7         | 0.0 |
| 試験体 B | 100.0  | 1.6 | 8.0 | 2.3                      | 11.3 | 39.2  | 14.5 | 53.7         | 9.5 |

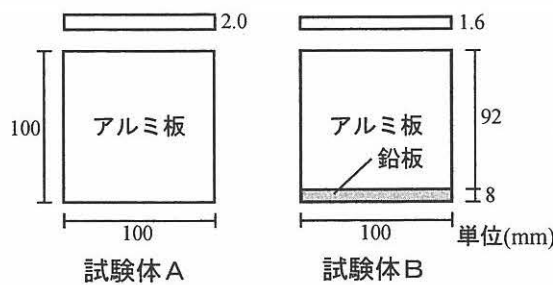


図 2 試験体概要

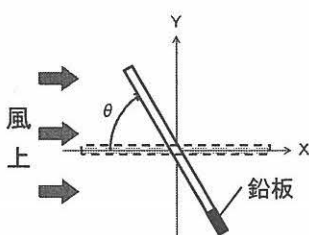


図 3 設置角度  $\theta$  の定義

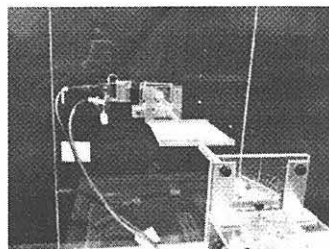


写真 2 試験体設置部詳細

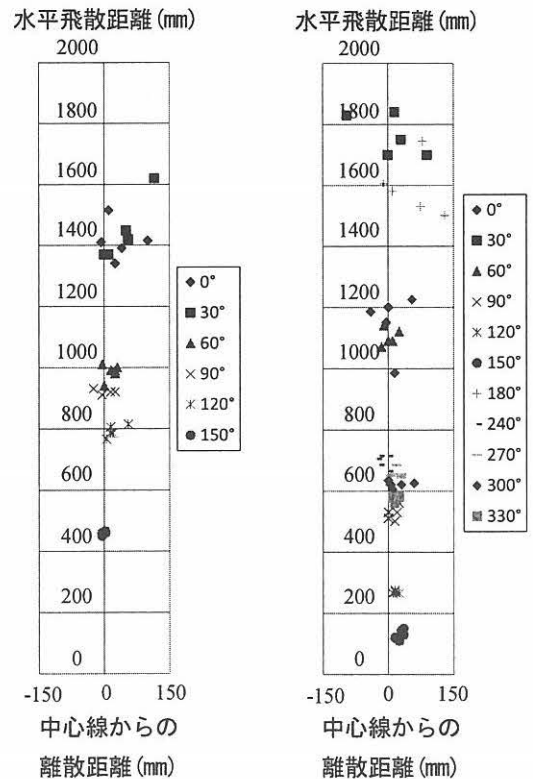


図 4 水平飛散距離と中心線からの離散距離

ることがわかる。最大の離散距離は試験体 B を設置角度  $180^\circ$  で飛散させた場合の  $130\text{mm}$  であった。水平飛散距離のばらつきは、変動係数で試験体 B の設置角度  $150^\circ$  での  $11.4\%$  が最大で、その他の設置角度では変動係数は  $8.0\%$  未満であった。

均一質量分布の試験体 A では設置角度  $150^\circ$  での水平飛散距離が最も短く平均  $459\text{mm}$ 、設置角度  $30^\circ$  での水平飛散距離が最も長く平均  $1446\text{mm}$  だった。不均一質量分布の試験体 B は試験体設置角度によって水平飛散距離が大きく異なるが、最も水平飛散距離が短いのは設置角度  $150^\circ$  の場合で平均  $131\text{mm}$ 、最も遠くまで飛散したのは設置角度  $210^\circ$  の場合で、計測可能距離を上回った。

### 3.2 試験体 A (偏心のない平板) の飛散状態

一例として試験体 A の設置角度  $0^\circ$  と  $30^\circ$  の飛散状態を写真 3 に示す。平板状試験体は設置角度によって飛跡や平板の回転数などに差異が見られるが、設置角度  $0^\circ$  では、試験体は最初に垂直に落下するので、相対的に斜め方向からの風力を受けて、速い速度で時計回りに回転運動を始めた。飛散軌跡はほぼ直線である。設置角度  $30^\circ$  では、試験体は最初から時計回りに回転運動をしながら飛散した。これらの結果は既往の立川による風洞実験結果<sup>3)</sup>に対応した。

### 3.3 試験体 B (偏心のある平板) の飛散状態

写真 4 に実験での水平飛散距離が最も大きく測定可能範囲 ( $2200\text{mm}$ ) を超えた設置角度  $210^\circ$  の試験体 B の飛散状態と、設置角度が正負に  $30^\circ$  異なる  $180^\circ$  と  $240^\circ$  の場合の試験体 B の飛散状態を示す。飛跡を比較すると、設置角度  $210^\circ$  では飛散開始直後はほとんど回転運動を示さず、試験体には揚力が大きく作用して上昇しながら飛散するが、水平飛散距離が  $1000\text{mm}$  を過ぎると、反時計回りに回転を始める。設置角度  $180^\circ$  では、飛散開始直後、垂直に落下してから時計回りの回転を始め、飛散中

に反時計回りの回転に変化する。設置角度  $240^\circ$  の場合には、試験体は反時計回りの回転をして、短い水平飛散距離で落下した。設置角度  $30^\circ$  の差は水平飛散距離に大きな影響を与えることがわかった。

### 3.4 試験体の偏心の影響

図 5 に風洞実験による試験体 A と試験体 B の設置角度による平均水平飛散距離の関係を示す。各 5 回の試行の平均値である。均一質量分布の試験体 A は回転中心に対して点対称であるため、設置角度  $0^\circ$  から  $180^\circ$  までの水平飛散距離と  $180^\circ$  から  $360^\circ$  までの結果は等しいものとして、質量分布に偏りがある試験体 B の結果と比較した。図 5 より、偏心のある試験体 B は設置角度  $90^\circ \sim 150^\circ$  と  $240^\circ \sim 300^\circ$  の範囲では試験体 A に比べて水平飛散距離が短く、特に  $120^\circ$  と  $150^\circ$  では  $1/2$  以下となった。設置角度  $210^\circ$  では試験体 A の水平飛散距離が  $1446\text{mm}$  であるのに対して試験体 B では少なくとも風洞内の測定可能範囲  $2200\text{mm}$  以上である。

平板に偏心がある場合、ほとんどの設置角度で偏心のない場合に比べて水平飛散距離は小さくなるが、設置角度  $210^\circ$  では、偏心のない場合を大きく上回った

## 4. 飛散シミュレーション概要

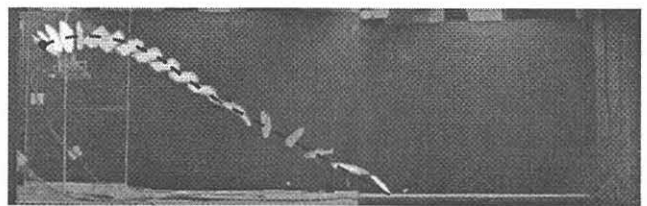
立川の研究<sup>2,4)</sup>を参考に、通常の平板状モデル A および偏心のあるモデル B が一様流中を飛散する二次元鉛直  $xz$  平面内の飛散軌道を数値解析により求めた。数値解析で用いるモデルの諸元は表 1 と同様風洞実験で用いた試験体と一致させ、風速は風洞実験で設定した  $12\text{m/s}$  の一様流とした。運動方程式の計算はルンゲ・クッタ・ギル法を用い、計算時間刻みは  $1/1000$  秒とした。

### 4.1 質量に偏りを持つ平板の運動方程式

水平風速  $U$ 、鉛直風速  $W$  の成分をもつ風速  $V$  は平板の重心に作用するものとする。運動中の平板は  $x, z$  方向に



(a) 設置角度  $0^\circ$



(b) 設置角度  $30^\circ$

写真 3 試験体 A の飛散状況

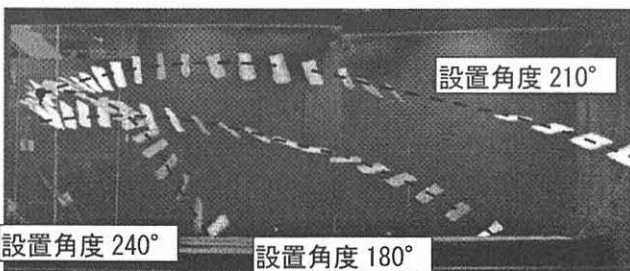


写真 4 試験体 B の飛散状況の比較  
(設置角度  $180^\circ, 210^\circ, 240^\circ$ )

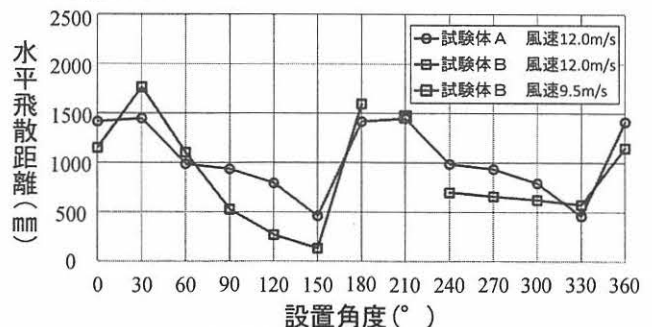


図 5 試験体 A と試験体 B の比較

それぞれ速度 $\dot{x}$ ,  $\dot{z}$ で運動するので、相対風速 $V_r$ の各方向成分は $U - \dot{x}$ ,  $W - \dot{z}$ となる。このとき平板に作用する風力(合力) $P$ は以下の式(1)で表され、図6に示すように相対風速 $V_r$ と同方向に作用する。

$$P = 1/2 \rho A V_r^2 = 1/2 \rho A \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ : 空気密度、 $A$ : 平板の受風面積である。風力作用点 $E$ は平板の質量分布と無関係に平板中心 $O$ から距離 $c$ だけ離れた点となり、辺長 $l$ の平板の風力作用位置 $c/l$ は迎角 $\alpha$ によって図7のように変化することが報告<sup>5)</sup>されている。

風力 $P$ に対する抗力 $D$ , 揚力 $L$ , 空力モーメント $M$ は定義に基づき風力係数 $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_M$ を用いて以下の式(2)で表される。

$$\begin{cases} D = P \cdot C_D \\ L = P \cdot C_L \\ M = P \ell \cdot C_M \end{cases} \quad (2)$$

飛散物の重心 $G$ 回りの回転慣性モーメントを $I'$ とする  
と運動方程式は以下の式(3)で表される<sup>2,5)</sup>。

$$\begin{cases} m' \ddot{x} = 1/2 \rho A \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} (C_D \cos \gamma - C_L \sin \gamma) \\ m' \ddot{z} = -m' g - 1/2 \rho A \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} (C_D \sin \gamma + C_L \cos \gamma) \\ I' \ddot{\theta} = 1/2 \rho A \ell \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} \cdot C_M \end{cases} \quad (3)$$

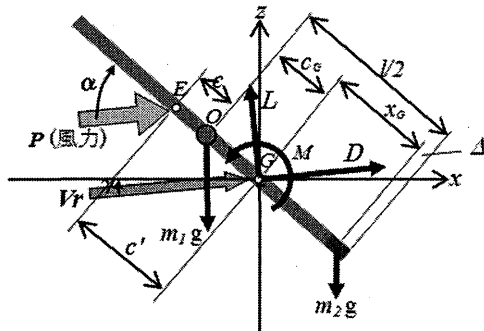


図6 モデルに働く力

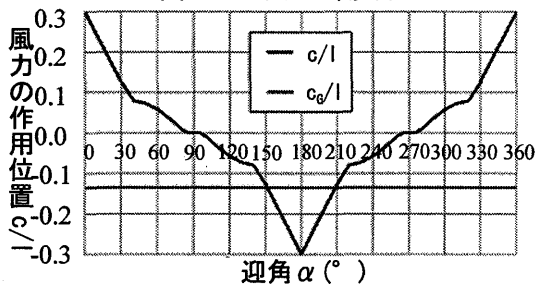


図7 風力の作用位置  $c/l$

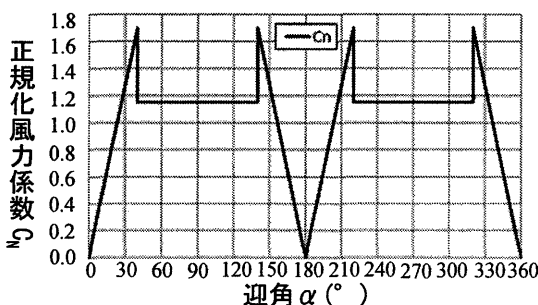


図8 正規化風力係数  $C_n$

ここで、 $m'$ : モデルBの質量、質量 $m_1$ の平板と質量 $m_2$ のおもりの和で表し $m' = m_1 + m_2$ ,  $g$ : 重力加速度、 $\ell$ : 平板の辺長 $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_M$ : 抗力・揚力係数および風力モーメント係数、 $(\dot{\quad})$ : 時間 $t$ に対する微分記号である。 $\gamma$  ( $\geq 0$ ) は水平方向と相対風速 $V_r$ の風向のなす角とする。

## 4.2 風力係数

立川の釣り合い式<sup>2)</sup>を参考に、回転時の風力係数 $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_M$ は静的風力係数 $C_{DS}$ ,  $C_{LS}$ ,  $C_{MS}$ と回転が風力係数に及ぼす影響を考慮した動的風力係数 $C_{Dt}$ ,  $C_{Lt}$ ,  $C_{Mt}$ の和とし、以下の式(4)を用いた。

$$\begin{cases} C_D = C_{Dt}(\omega/\omega_0) + C_{DS}(\theta_0 + \gamma) - \overline{C_{DS}} \\ C_L = C_{Lt}(\omega/\omega_0) + C_{LS}(\theta_0 + \gamma) \\ C_M = C_{Mt}(\omega/\omega_0) + C_{MS}(\theta_0 + \gamma) \end{cases} \quad (4)$$

ここで平板の運動時の回転角速度 $\omega = \dot{\alpha} \cong \dot{\theta}$ , 定常回転時の角速度 $\omega_0 = 2k\sqrt{(U - \dot{x})^2 + \dot{z}^2}/\ell$ ,  $k$ は平板端部速度と風速の比、 $\theta$ は任意時刻の平板の水平からの角度、 $\theta_0$ は平板の初期角度である。 $\overline{C_{DS}}$ は $C_{DS}$ の平板の迎角 $\alpha$ に関する平均値( $\cong 0.7$ )である。

質量分布が均一な平板の静的風力係数 $C_{DS}$ ,  $C_{LS}$ ,  $C_{MS}$ は立川の実験に基づく静的風力係数を用いる。不均一質量平板の静的風力係数 $C'_{DS}$ ,  $C'_{LS}$ ,  $C'_{MS}$ は平板の正規化風力係数 $C_N$ を用いて以下の式(5)で求めた

$$\begin{cases} C_{DS} = C'_{DS} = 0.1 + C_N \cdot \sin \alpha \\ C_{LS} = C'_{LS} = C_N \cdot \cos \alpha \\ C_{MS} = C'_{MS} = C_N \cdot c/l = C_N \cdot (c \pm c_g)/l \end{cases} \quad (5)$$

ここで、平板の図心 $O$ から重心 $G$ までの距離は $c_g = l/2 - x_G - \Delta = m_2/(m_1 + m_2) \cdot l/2$ で表される。 $x_G$ は端部に付加した質量 $m_2$ の重心位置とモデルB全体の重心 $G$ との距離で、端部質量が右にあるときは $c' = c + c_g$ , 端部質量が左にあるとき $c' = c - c_g$ で表される。図7中に重心位置 $c_g/l$ を示す。図7より設置角度 $150^\circ$ と $210^\circ$ 付近で $c/l$ と $c_g/l$ が交わり、風力の作用位置 $E$ と重心 $G$ は一致する。この時設置角度 $150^\circ$ では風力は平板の上から作用し、設置角度 $210^\circ$ では平板を下から持ち上げるように作用する。平板の正規化風力係数 $C_N$ はHolmesの報告<sup>5)</sup>に基づき、図8で示す迎角 $\alpha$ (deg)の関数で表した。

動的風力係数 $C_{Dt}$ ,  $C_{Lt}$ ,  $C_{Mt}$ は質量分布の違いに関わらず、立川の研究<sup>4)</sup>に基づく均一質量平板の動的風力係数を用いた。

## 5. 飛散シミュレーション結果

### 5.1 モデルA(偏心のない平板)の飛散状態

図9(a)にモデルAの各設置角度での飛跡のシミュレーション結果を示す。モデルAでは設置角度 $150^\circ$ での水平飛散距離が最も短く408mm, 設置角度 $30^\circ$ での水平飛散距離が最も長く1498mmだった。その他の設置角度は800~1000mmに収まっている。

## 5.2 試験体B(偏心のある平板)の飛散状態

図9(b)にモデルBの各設置角度での飛跡のシミュレーション結果を示す。モデルBは設置角度によって水平飛散距離が大きく異なるが、水平飛散距離が短いのは設置角度150°と330°の場合でそれぞれ241mmと233mmであった、最も遠くまで飛散したのは設置角度210°の場合で水平飛散距離は4340mmとなり、次に水平飛散距離の長い設置角度30°の1506mmや240°の1452mmを大きく上回った。

## 5.3 モデルAとモデルBの比較

図10に飛散シミュレーションによるモデルAおよびモデルBの設置角度と水平飛散距離の関係を示す。図より、不均一質量モデルBは設置角度90°から150°、270°から330°でモデルAに比べて水平飛散距離が小さく、特に設置角度120°ではその差が大きい。設置角度210°ではモデルAの水平飛散距離が1498mmであるのに対してモデルBでは風力中心と平板モデルの重心が一致し、平板はほとんど回転せず同じ向きを保って飛散しており約3倍の4340mmとなった。

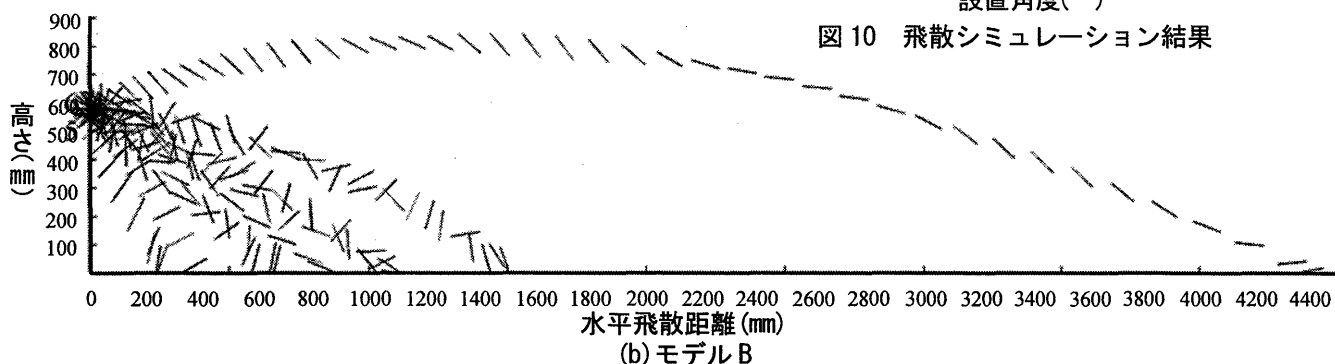
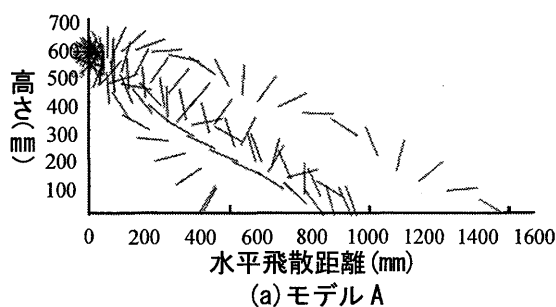


図9 シミュレーションによる各設置角度の飛跡

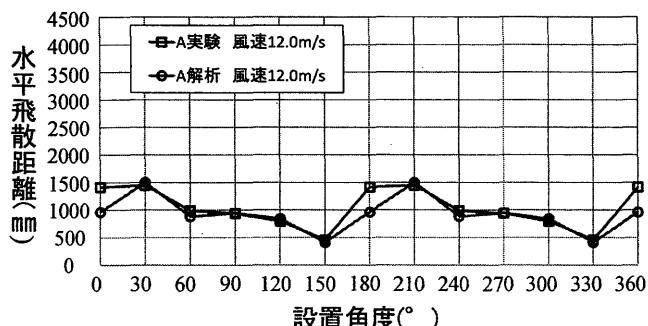


図11 試験体Aの実験値とシミュレーション値の比較

## 6. 風洞実験結果と数値解析結果の比較

### 6.1 均一質量平板

均一質量平板の水平飛散距離の実験値、解析値を図11に示す。実験での飛散距離は風向方向だけでなく風直交方向にもばらつきが生じるが、数値シミュレーションでは2次元鉛直平面内の飛散軌道を求めているため、実験による風向方向の水平飛散距離の平均値に着目して比較を行う。3.1節に示したように、中心線からの離散距離は水平飛散距離に比べて十分に小さい。図11より、設置角度0°を除けば、どの設置角度でも実験と飛散シミュレーションは比較的良く対応している。設置角度0°の場合に実験値1414mmに対して解析値960mmと異なる値を示したが、この時の風洞実験結果と飛散シミュレーション結果の飛散モードを重ね合わせたものを図13(a)に示す。水平飛散距離は風洞実験の方がより大きいが、平板の回転方向や回転数などの運動を比較すると飛散シミュレーションは概ね風洞実験を追跡できている。

### 6.2 不均一質量平板

不均一質量平板の水平飛散距離の実験値、解析値を図12に示す。なお、設置角度210°の場合、風速12.0m/sで

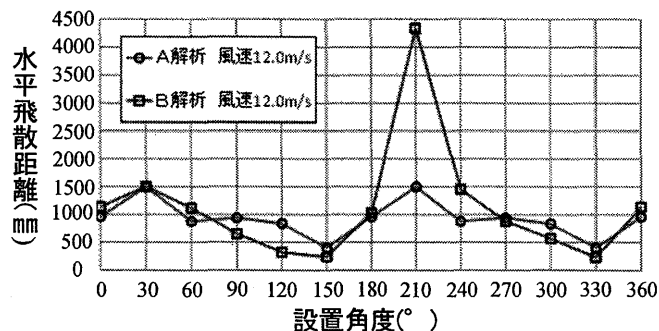


図10 飛散シミュレーション結果

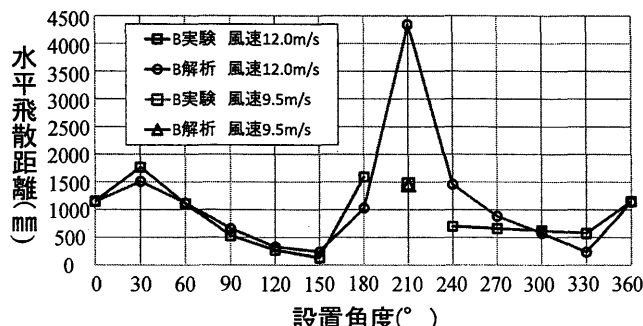


図12 試験体Bの実験値とシミュレーション値の比較

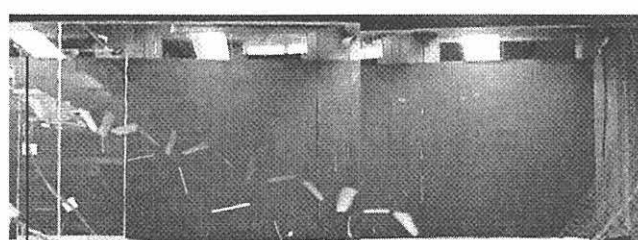
は風洞内の測定可能範囲を超え実験値が得られなかった  
ので、風速 9.5m/s の場合での風洞実験と数値解析による  
最大水平飛散距離を参考として示す。図 12 より、偏心の  
ある平板でも風洞実験と数値解析結果はほぼ対応したが、  
設置角度 30°, 180°, 330° では実験の平均水平飛散距離  
が解析値より大きく、240°, 270°では逆に実験値より解  
析値が大きく、その差が 200mm を超えた。本論では、  
偏心のある平板の飛散シミュレーションでも、偏心のない  
平板の動的風力係数を用いており、飛散物の回転に伴う  
動的な力が十分考慮されていないためと考えられる。

設置角度 210° における風洞実験結果と飛散シミュ  
レーション結果の飛跡を重ね合わせたものを図 13(b)に示  
す。図より飛散シミュレーション結果はほとんど回転を  
せず、同じ姿勢を保ったまま飛散しており、偏心をもつ  
平板の風洞実験での飛散状態をほぼ追跡できた。しかし、  
風洞実験では 1500mm 付近で回転方向の正負の変化によ  
り角度を持ちなおしそのままネットに到達しているのに  
対し、飛散シミュレーションでは 1000mm および  
2500mm 付近の 2 度角度を持ち直しており、より水平飛  
散距離が長くなっている。

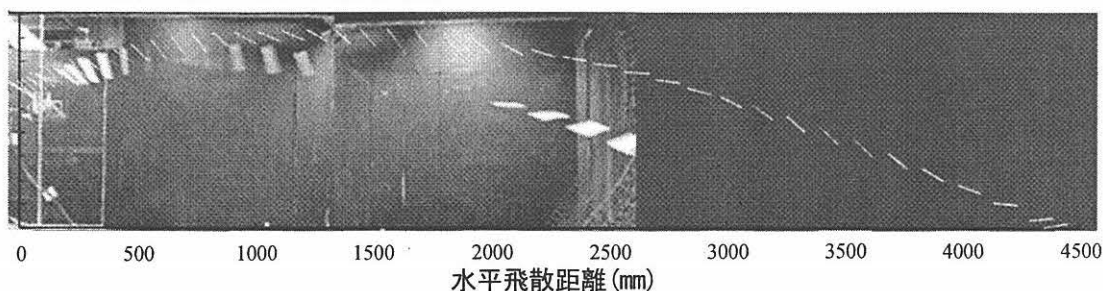
## 7. まとめ

本報告では、強風時の飛散物の運動を検証する目的で、  
正方形平板及び同サイズの偏心を施した平板の飛散状況  
を風洞実験により確認し、コンピュータによる飛散シミュ  
レーションを用いて風洞実験の飛散状況の再現を試みた。  
得られた所見を以下に示す。

- 1) 風洞実験で、偏心のある平板は偏心のない平板に比べ  
多くの設置角度で水平飛散距離が短かったが、風力中  
心と重心が一致する設置角度 210° では姿勢を保つ



(a) 偏心のない平板設置角度 0°



(b) 偏心のある平板設置角度 210°

図 13 風洞実験と飛散シミュレーションの飛散状況の比較

たままほとんど回転せず、水平飛散距離は著しく長くな  
った。

- 2) 均一質量平板の飛散シミュレーションによる水平飛  
散距離や平板の回転運動は風洞実験結果と対応した。
- 3) 不均一質量平板の飛散シミュレーションでは、平板の  
回転運動の状態は風洞実験と概ね対応したが、水平飛  
散距離にはやや差が見られた。

飛散シミュレーションと風洞実験との整合性をより  
高めるためには、実験による動的風力係数の計測は今後  
の課題として取り組まなければならないが、今回の研究  
結果から数値解析で通常の正方形平板と偏心のある平板  
の風洞実験結果をほぼ再現できることが分かった。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金「台風・竜巻等のスー  
パー突風による建物の風荷重の増大インパクト（基盤研究  
(B)22360230 代表：前田潤滋）」の助成を受けました。

## 参考文献

- 1) 吉田昭仁, 松井正宏: 飛散物の種類と発生要因, 日本風工  
学会誌, 第 122 号, pp.6-11, 2010.1.
- 2) 立川正夫, 福山雅弘: 台風時の飛散物の軌跡と速度に関す  
る研究, その 1 平板の空力特性と運動方程式, 日本建築学  
会論文報告集, 第 302 号, pp.1-11, 1980.
- 3) 立川正夫, 福山雅弘, 原英基: 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, 第 314 号, pp.17-25, 1982.
- 4) 立川正夫, 原英基: 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, 第 319 号, pp.23-31, 1982.
- 5) J. D. Holmes, C. W. Letchford, Ning Lin: Investigations of  
plate-type windborne debris – Part II: Computed trajectories,  
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,  
Vol.94, pp.21-39, 2006.
- 6) C. J. Baker: The Debris flight equations, Journal of Wind  
Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.95, pp.329-353,  
2007.
- 7) Lin, N. et. al.: Investigation of plate-type windborne debris I,  
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,  
Vol.94, pp.51-76, 2006.
- 8) 近藤潤一, 竹内真弓, 森本康幸, 前田潤滋: 強風下での  
球状物体の飛散状況に及ぼす地表面粗度の影響に関する  
数値実験, 風工学シンポジウム論文集, 第 21 回, pp.173-178,  
2010.12.
- 9) 近藤潤一, 竹内真弓, 森本康幸, 前田潤滋: 初速度を有  
する球状物体の強風下での飛散状況に及ぼす変動風速水  
平成分の影響, 都市・建築学研究 九州大学大学院人間  
環境学研究院紀要 第 17 号, pp.49-54, 2010.1.

(受理：平成 24 年 11 月 29 日)