

## 強風下での飛散距離に及ぼす平板質量の偏心率の影響

大西, 智也  
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

工藤, 愛架  
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

森本, 康幸  
九州大学大学院人間環境学府

鶴, 則生  
九州大学大学院人間環境学府

他

<https://doi.org/10.15017/1485047>

---

出版情報 : 都市・建築学研究. 25, pp.43-48, 2014-01-15. 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 :

## 強風下での飛散距離に及ぼす平板質量の偏心率の影響

### Effects of Mass Eccentricity of Plate-like Debris on Flying Distance

大西智也\*<sup>1</sup>, 工藤愛架\*<sup>1</sup>, 森本康幸\*<sup>2</sup>, 鶴 則生\*<sup>2</sup>, 友清衣利子\*<sup>3</sup>, 前田潤滋\*<sup>3</sup>

Tomoya ONISHI, Aika KUDO, Yasuyuki MORIMOTO,

Norio TSURU, Eriko TOMOKIYO and Junji MAEDA

Many studies on flying of wind-borne debris are based on the assumption that the debris is non-eccentric under strong wind. Our report focused on the mass eccentricity of plate-like debris, and investigated its flying distance, angle and speed affected by eccentricity using numerical calculation. It was confirmed that the numerical results corresponded well to experimental results in wind tunnel test. As a result, it was found that the eccentricity of plates affected strongly flying distance under strong winds. Especially, flying distances of plates with eccentricity of 8% to 18% are much bigger than those of non-eccentricity plates. On the other hand, the change of final velocity of plate in the drop due to its eccentricity was little.

**Keywords:** Wind-Borne Debris, Flying Simulation, Strong Wind Damage

飛散物, 飛散シミュレーション, 強風被害

## 1. 序

わが国では一般に、建築物の耐風設計に強風下での飛散物に対する対衝撃設計は考慮されておらず、建物の外装材等の軽微な破損が飛散物となって、周辺の建物に衝突することで2次的な被害へと続く「被害の連鎖」の大きな要因になっている<sup>1)</sup>。強風下での飛散物に関する研究には、平板の飛散方程式の数値解析結果を風洞実験で確認した立川ら<sup>2,4)</sup>の研究や Holmes<sup>3)</sup>の研究などがあるが、多くの報告が球状物体や均質な平板の飛散を対象としている。飛散物の飛散範囲や飛散速度には平板の質量分布特性も影響を与えると考えられる。本研究では、平板の飛散距離に及ぼす質量分布の偏心率に着目して、平板の飛散状況を偏心の無い様な質量分布の場合と比較検証する。

著者らは既報<sup>6)</sup>で、強風下での球状物体の飛散状況に関する数値シミュレーション手法を示した。既報<sup>7,8)</sup>では、立川ら<sup>3,4)</sup>と Holmes ら<sup>3)</sup>の研究を参考にして、平板状物体の飛散シミュレーションを行って立川の風洞実験結果<sup>4)</sup>との対応を確認し、また質量分布の偏心の有無による平板の飛散状況を風洞実験で検証した。そこでは実験結果と数値計算値との比較検討を行って、質量分布が不均一な偏心を持つ平板に対して、既報で用いた飛散数値シ

ミュレーションの精度を確認している。既報<sup>7,8)</sup>では、試験体材料の制約から質量分布の偏心率が9.5%の場合を検討したが、本報告では、偏心率を49%まで拡張して、平板の飛散状況を数値シミュレーションで検証する。

## 2. 飛散シミュレーション概要

### 2.1 飛散シミュレーション条件

以下では、平板は2次元平面内を飛散するものとする。図1に示すように平板は一樣風速場でのある高さ $H$ に設置された状態から飛散する。平板は2種類の重さの異なる物質で構成された正方形平板で、図2に示すように端部により重い重量を付加し、付加した重量を変化させることで、偏心を与えた。図3は平板を二次元的に横から見た図であるが、本論文では平板の中心と密度の異なる2つの物質の重心との距離 $c$ を平板モデルの一辺の長さ $l$ で除したものを偏心率と定義する。図4に示すように、平板が風向に平行で、付加質量が風下に来る場合の設置角度を $0^\circ$ として、平板を時計回りに回転させ、風向と平板モデルのなす角度 $\theta$ を初期設置角度とする。

### 2.2 平板に加わる外力の算定

飛散中の物体に加わる外力は、物体周辺を流れる風と物体の運動によって発生する相対風の風力と常に鉛直下向きに加わる重力である。飛散状況によって変化する相対風を表わすため、図4のように、二次元 $xz$ 鉛直面内に水平・鉛直方向成分 $U$ ,  $W$ をもつ風速 $V$ を受け運動する

\*1 都市共生デザイン専攻 修士課程

\*2 人間環境学府

\*3 都市・建築学部門

面積  $A$ 、長さ  $l$  の平板を考える。平板に作用する相対風速  $V_r$  は平板と付加質量の重心  $G$  で考える。角度はすべて  $0^\circ$  から  $360^\circ$  までとする。運動中の平板は水平方向  $x$ 、鉛直方向  $z$  にそれぞれ速度  $(\dot{x}, \dot{z})$  で運動しているため、相対風速  $V_r$  の方向成分は図5のようになり、相対風速  $V_r$  の大きさと水平面となす角  $\gamma$  を式(1)と式(2)に示す。このとき、運動中の平板に作用する速度圧  $P$  は相対風速  $V_r$  と空気密度  $\rho$  から式(3)となる。

$$V_r = \sqrt{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2} \quad (1)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\{(W - \dot{z}) / (U - \dot{x})\} \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho V_r^2 = \frac{1}{2} \rho \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} \quad (3)$$

速度圧  $P$  をもとに抗力  $D$ 、揚力  $L$ 、空力モーメント  $M$  は風力係数  $C_D, C_L, C_M$  を用いて式(4)で算定できる。

$$\begin{cases} D = P \cdot C_D \\ L = P \cdot C_L \\ M = P \cdot l \cdot C_M \end{cases} \quad (4)$$

$x$  と  $z$  方向の風力の分力  $F_x$  と  $F_z$  を式(5)と式(6)に示す。平板に作用する外力は、鉛直下向きの重力 ( $m_1g, m_2g$ ) および相対風速による風力  $F_x, F_z$  である。ここで、 $m_1, m_2$  はそれぞれ平板質量と付加質量である。

$\gamma \leq \theta$  のとき

$$\begin{cases} F_x = D \cos \gamma + L \sin \gamma \\ F_z = D \sin \gamma - L \cos \gamma \end{cases} \quad (5)$$

$\gamma > \theta$  のとき

$$\begin{cases} F_x = D \cos \gamma - L \sin \gamma \\ F_z = D \sin \gamma + L \cos \gamma \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 角度ごとに異なる風力係数の設定

風力係数は立川<sup>2)4)</sup>とHolmes<sup>5)</sup>の風力係数を参照した。立川は風洞実験をもとに偏心のない場合の静的風力係数および動的風力係数を示し、Holmesは偏心の有無にかかわらず静的風力係数を理論式で示した。立川は回転時の風力係数  $C_D, C_L, C_M$  を静的風力係数  $C_{Ds}, C_{Ls}, C_{Ms}$  と回転が風力に及ぼす影響を考慮した動的風力係数  $C_{Dt}, C_{Lt}, C_{Mt}$  の和として考えて式(7)で与えた。

$$\begin{cases} C_D = C_{Dt}(\omega/\omega_0) + C_{Ds}(\theta_0 + \gamma) - \overline{C_{Ds}} \\ C_L = C_{Lt}(\omega/\omega_0) + C_{Ls}(\theta_0 + \gamma) \\ C_M = C_{Mt}(\omega/\omega_0) + C_{Ms}(\theta_0 + \gamma) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 $\omega = \dot{\alpha} \cong \dot{\theta}$ 、 $\omega_0 = 2k\sqrt{(U - \dot{x})^2 + \dot{z}^2}/l$ 、 $k$  は平板端部速度と風速の比で立川の実験値<sup>2)</sup>、 $\theta_0$  は平板の初期角度、 $\overline{C_{Ds}}$  は  $C_{Ds}$  の  $\alpha$  に対する平均値である。

### 2.4 平板の運動方程式

水平面と平板のなす角  $\theta$  と、相対風速  $V_r$  に対する平板のなす角  $\alpha$  は式(8)で示す。

$$\alpha = \theta + \gamma \quad (8)$$

辺長  $l$  の平板で中心  $O$  から風力中心  $E$  までの距離を  $c$  としてHolmesは  $c/l$  を示した。式(9)は図6のようになる。

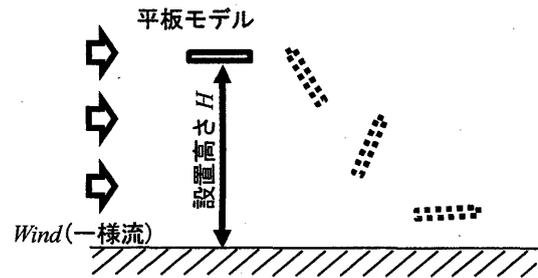


図1 シミュレーション条件

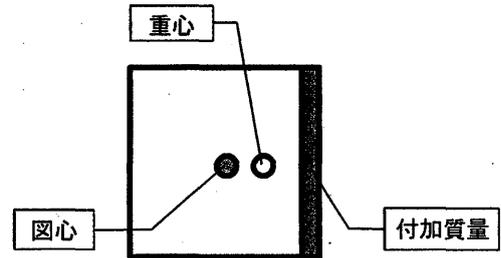


図2 平板モデル

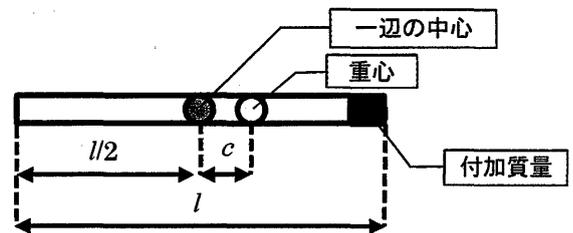


図3 偏心率の定義

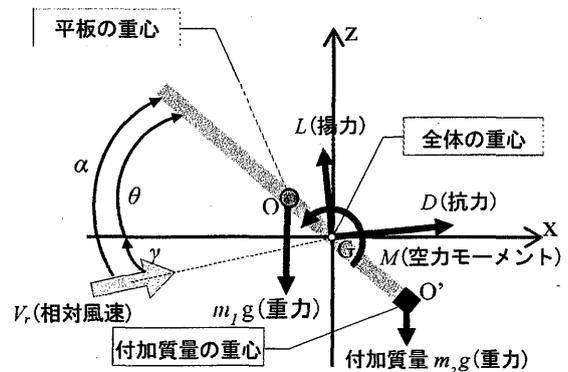


図4 平板モデルの飛散時のつり合い条件

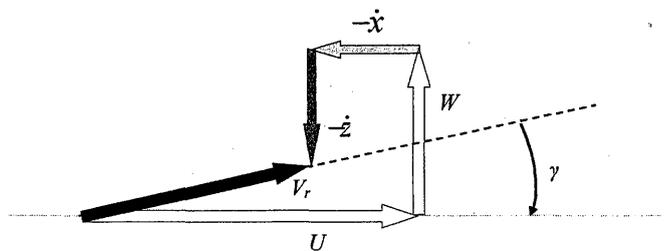


図5 任意時刻における風速と平板速度の相対風速

$$\begin{cases} c/l = 0.3 - 0.22(\alpha/38) & (0^\circ \leq \alpha < 38^\circ) \\ c/l = 0.08 \cos\{2(\alpha - 38)\} & (38^\circ \leq \alpha < 82.5^\circ) \\ c/l = 0.0 & (82.5^\circ \leq \alpha < 97.5^\circ) \quad (9) \\ c/l = -0.08 \cos\{2(142 - \alpha)\} & (97.5^\circ \leq \alpha < 142^\circ) \\ c/l = -0.3 + 0.22\{(180 - \alpha)/38\} & (142^\circ \leq \alpha < 180^\circ) \end{cases}$$

平板と端部質量とからなる質量を  $m'$ 、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式(10)と式(11)となる。

$\gamma \leq \theta$  のとき

$$\begin{aligned} m'\ddot{x} &= \frac{1}{2} \cdot \rho A \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} \\ &\quad (C_D \cos\gamma - C_L \sin\gamma) \\ m'\ddot{z} &= -m'g + \frac{1}{2} \cdot \rho A \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} \\ &\quad (C_D \sin\gamma + C_L \cos\gamma) \quad (10) \\ I'\ddot{\theta} &= \frac{1}{2} \cdot \rho A l \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} C_M \end{aligned}$$

$\gamma > \theta$  のとき

$$\begin{aligned} m'\ddot{x} &= \frac{1}{2} \cdot \rho A \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} \\ &\quad (C_D \cos\gamma + C_L \sin\gamma) \\ m'\ddot{z} &= -m'g + \frac{1}{2} \cdot \rho A \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} \\ &\quad (C_D \sin\gamma - C_L \cos\gamma) \quad (11) \\ I'\ddot{\theta} &= \frac{1}{2} \cdot \rho A l \{(U - \dot{x})^2 + (W - \dot{z})^2\} C_M \end{aligned}$$

## 2.5 実験による飛散シミュレーション精度の確認

既往の研究<sup>7,8)</sup>では、瓦を想定した平板状物体の飛散特性を把握するため、一様風速場で偏心のない平板と偏心率9.5%の平板の初期設置角度を変えながら、高さ582mmから飛散させる実験を行い、偏心や初期設置角度の影響を検討した。また同時に、実験に使用した平板に対して本報告と同様の飛散シミュレーションを行い、図7の結果を得た。飛散シミュレーションの結果は実験値にほぼ対応し、本飛散シミュレーションの精度を確認した。

## 2.6 シミュレーションでの検討パラメータ

本報告では、一定の強風下での飛散を想定した。平板の設置高さを3m、風速を一般に瓦屋根への被害が始めるとされる30m/sとし、平板モデルの初期設置角度を0~360°まで、偏心率を0~49%まで変化させて解析を行う。表1に設定パラメータを示す。また平板モデルを、瓦を模擬した全重量3kg、一辺が300mmの正方形平板とし、その形状を図8に示す。端部の付加質量の重量を変えることで、偏心率を変化させる。

## 2.7 平板の設置高さや飛散時の風速の影響の確認

一般的な住宅を想定し、平板の設置高さを3m、風速を30m/sとして飛散シミュレーションを行ったが、設置高さや飛散時の風速の違いが飛散状況に与える影響を確認する。図9に既往の研究<sup>7,8)</sup>で用いた平板と同程度の偏心率(10%)で風速を30m/sで固定した場合での、設置高さ1m、3m、5m、における飛散距離を示す。すべての初

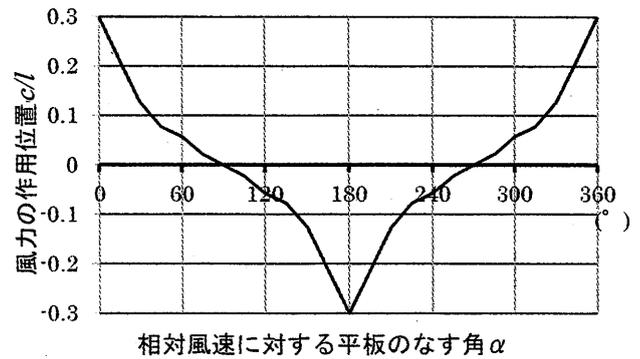


図6 平板中心Oから風力中心Eまでの距離

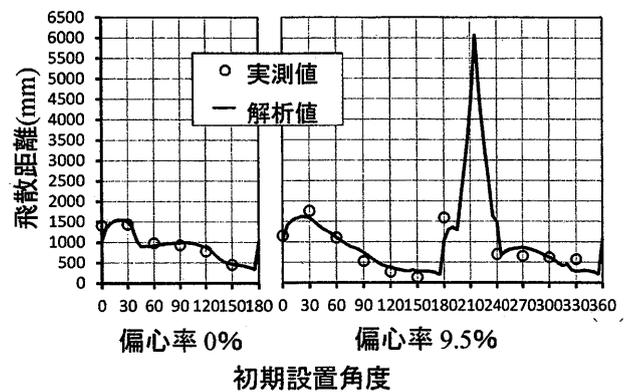


図7 既往の研究結果<sup>7,8)</sup>

(実験とシミュレーションの比較)

表1 飛散シミュレーションのパラメータ

平板の設置高さ	3m
風速	30m/s
平板の初期設置角度	0° ~ 360°
偏心率	0% ~ 49%

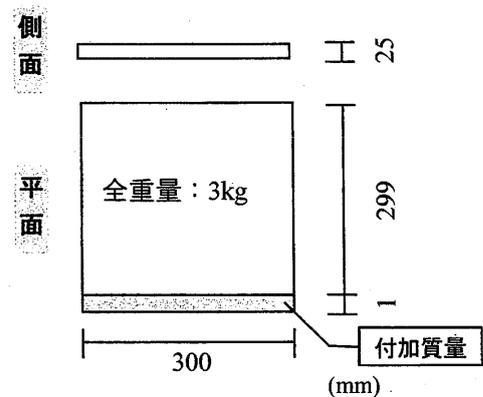


図8 平板モデルの形状及び寸法

期設置角度に対して、設置高さの増加に伴って、飛散距離が比例して増加する。初期設置角度 210° 付近で飛散距離が著しく増加するが、設置高さの違いによってその傾向は変化しなかった。図 10 に偏心率 10% で平板の設置高さを 3m で固定した場合の、風速 30m/s, 40m/s, 50m/s における飛散距離を示す。飛散距離が最大となる初期設置角度は変化しないが、設置高さを変化させた場合と比較すると、飛散距離の大きな初期設置角度 0° や 210° 周辺では、風速を変化させた場合の飛散距離の増加が大きく、飛散距離の小さな初期設置角度では飛散距離の増加にあまり変化がない。このことより、平板は飛散中の風速の影響を大きく受け、風速のわずかな変化によって飛散距離が大きく変動する場合があると言える。変動風を用いた場合や、風速の変化の激しい模型周辺での飛散状況の把握を行う際には注意が必要である。

### 3. 偏心率の違いによる飛散状況の比較

#### 3.1 飛散距離の変化

飛散シミュレーションで、偏心率を 10% ずつ変化させた場合の初期設置角度と飛散距離の関係を図 11 に示す。初期設置角度によって飛散状況は変化する。ほとんどの初期設置角度において、偏心率による影響は小さいが、初期設置角度 200° 付近において飛散距離が著しく大きくなる偏心率のモデルが確認できる。飛散距離の増大の原因としては回転の様子の違いが考えられる。図 12 に初期設置角度 210° 付近で、飛散距離が大きかった場合(偏心率 10%)の平板モデルの角速度と、小さかった場合(偏心率 0%)の飛散シミュレーションによって示された飛散の様子を示す。飛散距離の小さな偏心率 0% の平板モデル

は回転しながら飛散しているが、飛散距離の大きくなる、偏心率 10% 初期設置角度 214° での飛散の様子は、ほぼ一定の角度を保持したまま飛散している。この場合の平板の角速度の変化を図 13 に示す。飛散距離が大きかった平板モデルの回転は、正方向の回転と負方向の回転を交互に繰り返しているのに対し、飛散距離が小さな平板モデルの回転は一定方向の回転をし続けていることが確認できる。飛散状況の様子は表 2 に示す 3 タイプに分類できる。

平板の飛散距離に与える偏心率の大きさの影響を考察するために、図 14~16 に平板の偏心率に対するすべての初期設置角度の平均飛散距離と変動係数と、最大飛散距離を示す。ここでの平均飛散距離と変動係数を式(12)、式(13)で定義する。

$$L_{ave} = \frac{\sum_{i=0}^{360} L_i}{360} \quad (12)$$

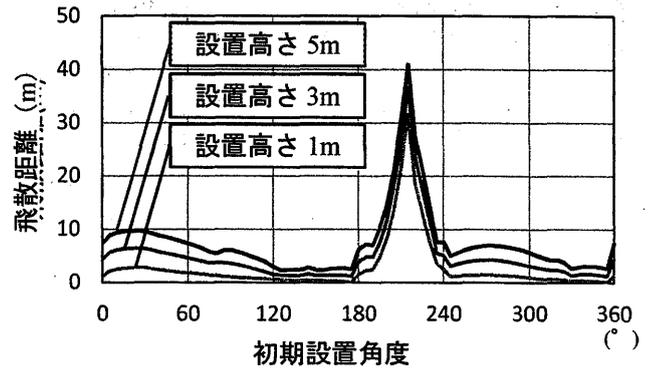


図 9 設置高さの異なる平板モデルの飛散距離の変化

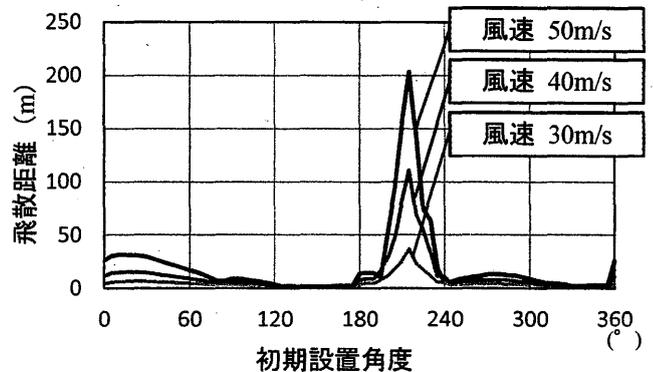


図 10 飛散時の風速の異なる平板モデルの飛散距離の変化

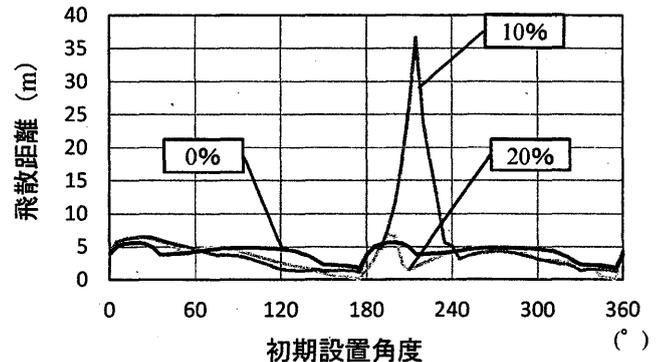


図 11 偏心率を 10% 変化させた場合の初期設置角度と飛散距離の関係

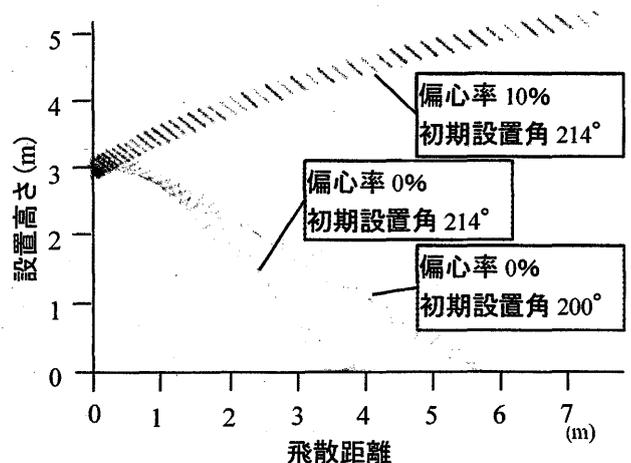


図 12 飛散シミュレーションによる平板の飛散状況

$$C.V. = \frac{1}{360} \sum_{i=0}^{360} \sqrt{(L_i - L_{ave})^2} / L_{ave} \quad (13)$$

ここで、 $L_{ave}$ は全角度の平均飛散距離、 $C.V.$ は全角度の変動係数、 $L_i$ は初期設置角度*i*の時の飛散距離を示す。図14より、偏心率18%程度までの飛散距離が大きく、偏心率の増大とともに飛散距離は低下したのち、緩やかに上昇している。最も平均飛散距離が大きかったのは偏心率13%の5.21mで、偏心率0%の4.11mの1.27倍である。また、最も平均飛散距離が小さかったのは偏心率23%で、3.31mであった。偏心が無い場合よりも平均飛散距離が大きくなるのは、偏心率4%~18%と48%~49%である。図15より、すべての偏心率において、変動係数は偏心が無い場合を上回っている。すなわち、偏心を持つ平板の飛散特性は初期設置角度の影響を大きく受け、初期設置角度によって飛散距離が大きく変動する。図16より、偏心率8%~18%程度までの最大飛散距離が大きく、偏心率が20%を超えると、偏心がない場合とほぼ同程度になる。最も飛散距離が大きかったのは、偏心率10%の36.8mで、設置高さ3mに対して10倍以上の距離を飛散する。

二次元平面内の一様流中での検討ではあるが、偏心率が20%を超える平板では最大飛散距離と平均飛散距離がともに低減され、反対に偏心率が10%前後では、飛散距離が著しく大きくなる。

### 3.2 飛散距離と飛散速度の比較

飛散物が周辺の建物へ衝突した際の衝撃力の算定に必要なパラメータには、衝突時の飛散速度や回転速度、衝突面積等がある。飛散距離の大きく異なる偏心率0%、10%、20%の平板モデルの初期設置角度と落下時の平板の速度を図17に示す。平板の速度は、x方向の飛散速度

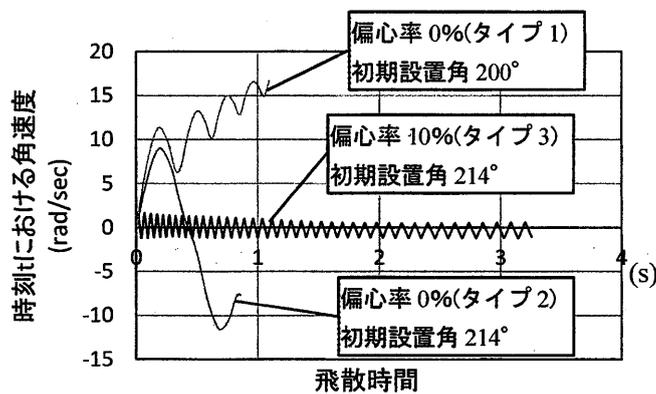


図13 飛散時間と平板モデルの角速度との関係

表2 飛散状況の分類

type	飛散状況
1	同方向に回転を続ける
2	正負の回転を繰り返す
3	ほぼ一定角度で飛散し、微小な正負の回転をする

とz方向の飛散速度のベクトル和で算出した。偏心率10%の平板モデルでは、飛散距離が大きかった初期設置角度210°付近で飛散速度が大きくなっていることが確認できる。最も大きな飛散速度となったのは、偏心率10%、初期設置角度210°の17.1m/sで、同じ初期設置角度で偏心率0%での飛散速度11.1m/sに対して約1.6倍であった。

しかしながら、飛散距離が著しく大きいにもかかわらず、飛散速度の変化はあまり大きくない。図18に偏心率0%、10%、20%の平板モデルの飛散距離と落下時の平板の速度の関係を初期設置角度ごとに示す。飛散距離の増加に伴って、落下時の平板の速度は増加しているが、そ

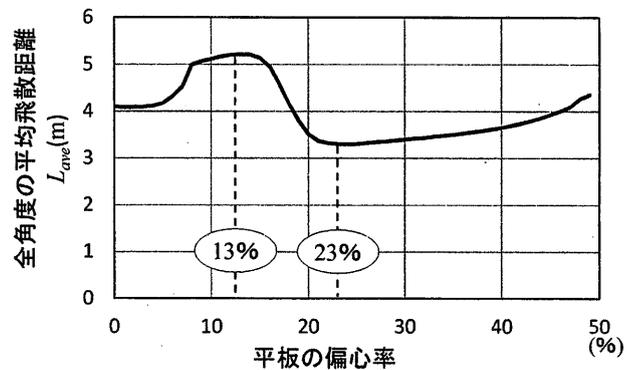


図14 平板の偏心率と平均飛散距離との関係

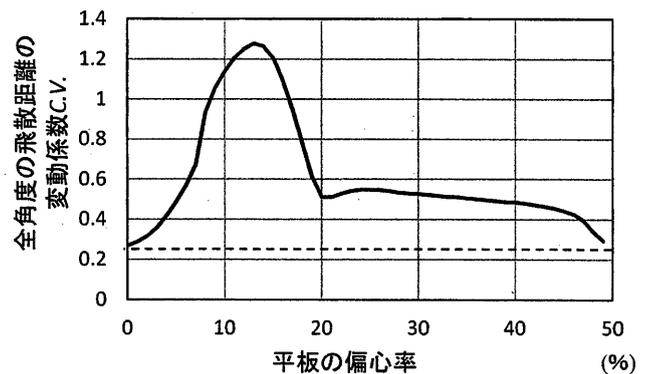


図15 平板の偏心率と飛散距離の変動係数との関係

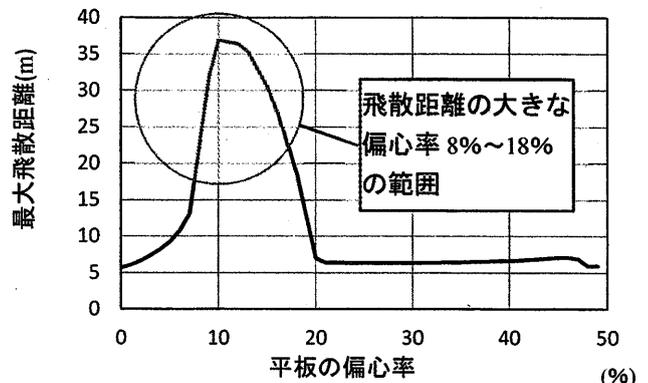


図16 平板の偏心率と最大飛散距離との関係

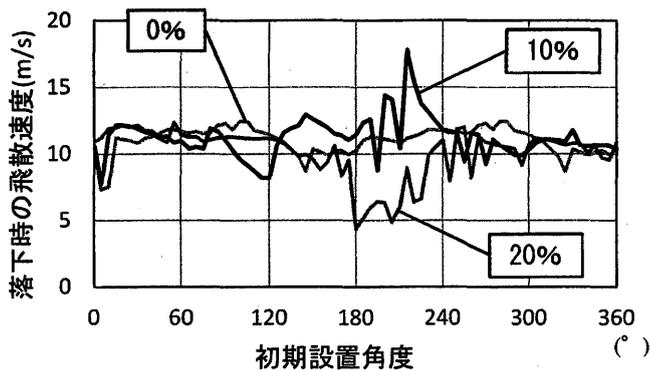


図 17 初期設置角度と落下時の平板の速度の関係

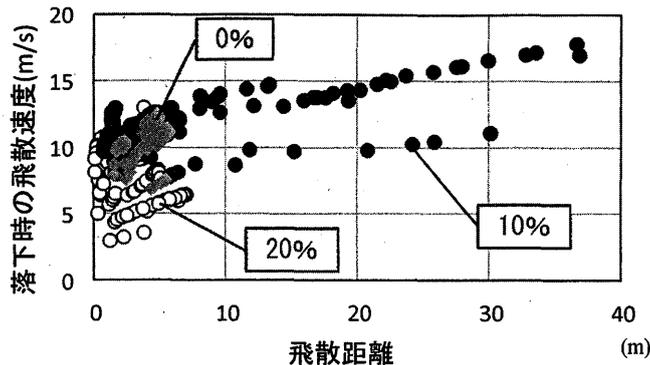


図 18 各初期角度での飛散距離と落下時の平板の速度の関係

の変化は大きくない。4.1 節において、偏心率が 20%以上であれば飛散距離が減少することを確認したが、偏心率の変化による飛散速度の低減は顕著ではない。

#### 4. まとめ

本報告では、強風下で飛散する平板状物体に、平板の質量の偏りが与える影響を把握するため、二次元平面内で一様風を受けて飛散する質量分布に偏心を有する正方形平板の運動をシミュレーション行って、以下の所見を得た。

- 1) 偏心のある平板の飛散距離は、すべての初期設置角度において、設置高さの増加に伴って一様に増加する。しかし、飛散距離の大きな初期設置角度は、飛散時の風速の影響を大きく受ける。
- 2) 平板の初期設置角度 200° 付近では飛散距離に及ぼす偏心率の影響が大きい。
- 3) 著しく飛散距離が増大する平板の飛散状況は、他の場合の飛散状況と異なり、正方向と負方向の回転を交互に繰り返し、回転の角速度が小さい。
- 4) 偏心率 8%~18%程度の平板モデルは、偏心がない場合に比べて飛散距離が著しく増加するが、偏心率が 20%を超える平板の飛散距離は、偏心がない場合と同じか減少する。
- 5) 平板の偏心率の変化に伴って飛散距離が変化しても、衝撃力に関連する落下時の飛散速度は大きく変化しない。

なお、三次元や乱流風中における飛散状況を今後検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 田村幸雄, 最近の話題を交えて, 社団法人日本建築構造技術者協会 structure, No.108, pp.16-19, 2008
- 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) 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.
- 7) 大西智也, 工藤愛架, 森本康幸, 鶴則生, 友清衣利子, 前田潤滋, 強風下での平板状物体の飛散状況に及ぼす偏心の影響, その 1 風洞実験による正方形平板の飛散特性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, P151-152, 2013.
- 8) 工藤愛架, 大西智也, 森本康幸, 鶴則生, 友清衣利子, 前田潤滋, 強風下での平板状物体の飛散状況に及ぼす偏心の影響, その 2 風洞実験結果と飛散シミュレーションとの比較検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, P154-155, 2013.

(受理：平成 25 年 11 月 14 日)