

平板の初期飛散状況に及ぼす陸屋根表面圧と風速分布の影響に関する研究

大西 智也

1. 序

建築物の強風災害は、風圧力による被害と飛散物による被害に大別できるが、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二次的な被害へと拡大することが大きな問題となっている。強風下での飛散物に関する研究には、平板の運動方程式の数値解析結果を風洞実験で確認した立川ら^{2,4)}の研究があり、近年ではそれらを応用し、飛散軌跡の推定⁵⁾や外装材への耐衝撃試験⁶⁾が行われている。著者ら^{7,8)}は、風向に対する平板の初期設置角度によって、一様流中で解放された平板状物体の飛散距離が大きく増減することを実験と数値解析を用いて明らかにした。

しかしながら、飛散物が地面や屋根面に固定された状況から離脱して、飛散するまでを追跡する飛散物の初期飛散状況に着目した研究は非常に少ない。本研究では、陸屋根を模した平面上に設置した平板状物体の離脱から飛散までを実験と数値解析で追跡した結果を報告する。

2. 風洞実験概要

2.1 実験装置と平板状物体概要

対象とする実験内容を以下に示す。風洞は九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェル型吸込式風洞を用いて行った。風洞断面内での各計測機器の配置状況を図1に示す。計測部断面寸法は1500mm×1500mm、計測部前面の風速調整部は約2000mm、計測部は約3000mmである。風速測定には超音波風速計を用いた。風速計の信号は200Hzでサンプルしている。建物模型には図2に示す陸屋根模型を用いた。模型各辺の寸法は幅1450mm×奥行800mm×軒高さ175mmであり風

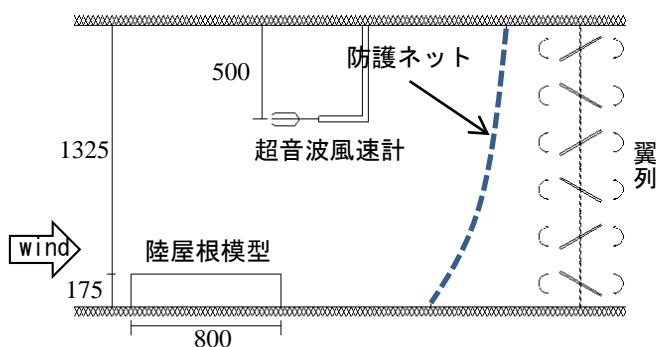


図1 風洞実験配置図 (mm)

洞断面に占める閉塞率は約11%である。同図に示す初期位置4箇所(A,B,C,D点)に平板を設置して飛散させる。平板は表1で示す一辺65mm、厚さ2mm、重さ1.3gのバルサ材正方形平板を使用し、平板が屋根面の高さとも一致するように調節した。この平板を屋根面に固定するためのエアパッド吸着装置を陸屋根模型内に設置した。エアパッド吸着装置により、平板は任意のタイミングで開放される。模型を風洞内に設置した様子を写真1に示す。実験の様子は風洞実験室横からハイスピードカメラを用いて撮影した。

2.2 平板設置位置での圧力測定実験

飛散開始時に平板に加わる力を測定するため、平板設置位置での表面圧測定を行った。測定点は飛散実験と同様に図2の設置位置A、B、C、Dの各点に圧力測定用の測定孔を設けた平板を固定し、導圧チューブを介して上述の多点圧カスキャナにより圧力を測定した。

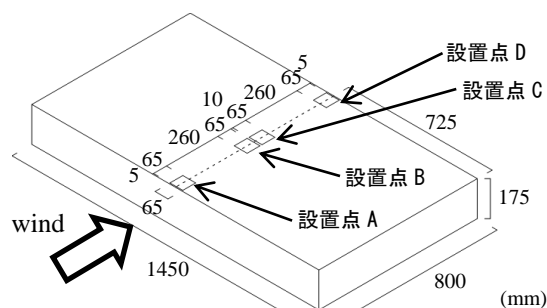


図2 陸屋根模型と飛散する平板の位置
表1 平板状物体の概要

辺長(mm)	厚さ(mm)	質量(g)
65×65	3	1.3

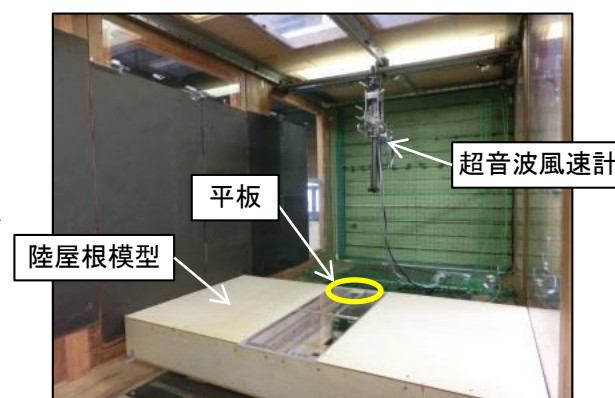


写真1 模型設置状況

圧力は平板設置位置で9点測定し、測定点Bの実験の様子を写真2に示す。風速は10m/sの一様流下で20秒間圧力を測定し、各設置点で3回ずつ記録した。圧力スキヤナの信号は500Hzでサンプルした。測定した圧力と平板の面積から飛散開始時に平板に加わる初期吸い上げ力を算定し、結果を表2に示す。

2.3 模型周辺の風速場測定実験

飛散開始時に平板に作用する風力を算定するために、模型周辺の風速場を測定した。風洞実験室の模型前方での風速は10m/sである。使用した風速計はX型プローブ熱線風速計で、風速の水平成分と鉛直成分を測定した。測定した範囲を図3に示す。測定点の間隔は水平方向が20mm、鉛直方向は模型上部表面から125mmまでが10mm、125mmより上が20mmである。例として図4に平板設置点A周辺とB周辺の平均風速の分布を示す。平板を設置している点は風洞床面からの高さは175mmで、模型風上壁面から距離は設置点Aが5~70mm、設置点Bが330~395mmである。2つの範囲の風速場を比較すると風洞床面からの距離が350mm以下の範囲では模型の影響により設置点A周辺の風速の方が上向きの風速が強く、350mm以上ではほぼ同じ風速場である。本実験で用いた模型にはエアパッド吸着装置の配線のため、平板設置点に風洞外と繋がる開口部を設けている。そのため平板設置点の直上では設置点Bにおいても模型内からの吹上により上向きの風となる。

3. シミュレーション概要

模型表面から飛散する飛散物の運動を再現するために運動方程式を立て、シミュレーションによる解析を行った。二次元xz鉛直面内において模型から飛散する平板が受ける外力は物体の運動速度を考慮した相対風速 V_r による風力と鉛直下向きの重力である。平板の移動速度を \dot{x} 、 \dot{z} とすると、風速 U 、 W との相対風速 V_r は図5のようになり、相対風速 V_r の大きさ、風向と x 軸とのなす角 γ は式(1)、式(2)で表される。

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

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

また飛散開始時は平板の上下の圧力差による初期吸い上げ力 P_f が働くことと推定されるため、解析開始直後のみ平板の面直行方向に2.2節で示した圧力差による力を加える。

図6のように正方形平板(面積 A 、長さ l 、質量 m)が回転角を θ で飛散している時の運動方程式は、重心 G 回りの回転慣性モーメントを I とすると式(3)となる。空気密度を ρ 、重力加速度を g とした。

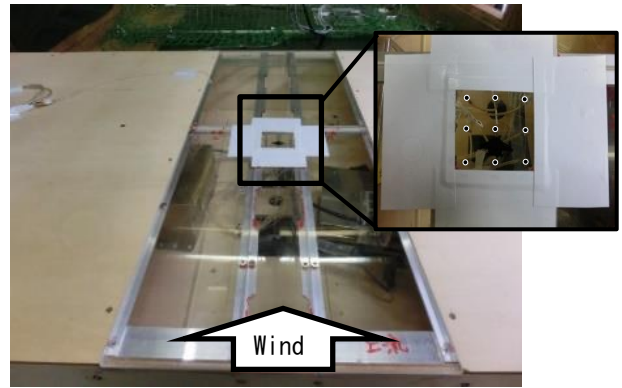


写真2 圧力測定実験の様子

表2 飛散開始時に平板に加わる力の平均値

測定箇所	A	B	C	D
圧力差により発生する力(N)	0.45	0.38	0.36	0.29

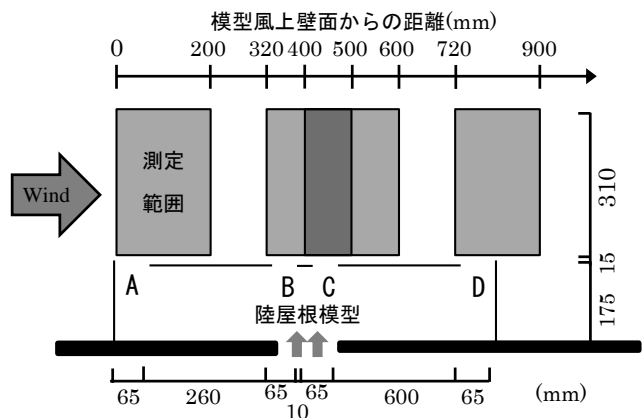


図3 模型周辺の風速測定範囲

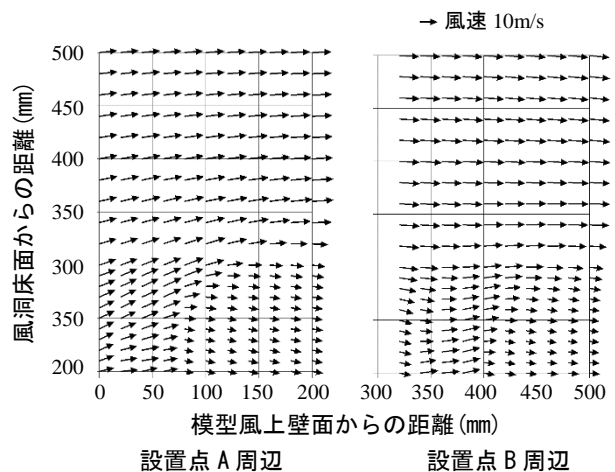


図4 平板設置点周辺の風速場

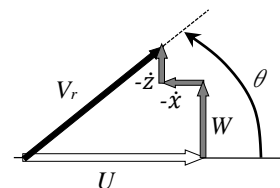


図5 風速 U 、 W と平板の運動によって発生する風速 (\dot{x}, \dot{z}) の相対風速 V_r

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= \frac{1}{2}\rho AV_r^2(C_D \cos\gamma - C_L \sin\gamma) + P_i \sin\theta \\ m\ddot{z} &= -mg + \frac{1}{2}\rho AV_r^2(C_D \sin\gamma + C_L \cos\gamma) + P_i \cos\theta \\ I\ddot{\theta} &= \frac{1}{2}\rho AV_r^2 C_M \end{aligned} \right\} (3)$$

ここに、 C_D 、 C_L 、 C_M はそれぞれ平板の運動中の抗力、揚力、空力モーメントの風力係数で立川の実験値を線形補間した値²⁾である。運動方程式の計算にはルンゲ・クッタ・ギル法を用いており、計算時間刻みは 1/1000 秒とした。

4. 初期吸上げ力の影響

上記で示した運動方程式に、実験で測定した模型周辺の平均風速場を使用して解析を行った。図7に実験で測定した平板設置点での初期吸い上げ力を入力した場合と、入力しなかった場合の飛散状況の違いを示す。平板の描画間隔は 0.01sec 刻みである。初期吸上げ力を入力しなかった場合、平板は飛散開始直後から回転を初める。初期吸上げ力を入力した場合は、飛散直後に平板が水平状態を保ったまま浮上する。図8に白色で示す実験画像では、実験においても平板が水平状態を保ったまま浮上する現象が確認される。すなわち初期吸上げ力を入力することにより、より実験に近いシミュレーションを行うことができる。

5. 実験による平均風速場を使用した飛散シミュレーション

実験で撮影した飛散軌跡と初期吸上げ力を考慮した飛散シミュレーションの飛散軌跡の比較を行う。図8は実験で撮影した画像に飛散シミュレーション結果を重ねた結果を設置点ごとに示したものである。設置点 A の飛散軌跡は実験の試行ごとのばらつきが小さく、平均風速を用いた飛散シミュレーションでも実験とよく対応している。その他の設置点では実験の飛散軌跡が試行ごとに異なっているため、平均風速を用いた飛散シミュレーションでは飛散軌跡を表せていない。平板設置位置上部の風洞床面からの距離が300mm での風速の標準偏差を比較すると、設置点 A では0.73m/s であるのに対し、設置点 B, C, D ではそれぞれ2.05 m/s, 2.16 m/s, 1.93 m/s と風速の乱れが大きな値となっていることが原因であると考えられる。しかし、すべての点において実験での飛散直後に接地面から平行に浮き上がる様子を飛散シミュレーションで再現出来ている。

実験画像が示すように、平板が時計回りに回転を始めた場合は上昇する飛散軌跡となり、反対に反時計回りに回転を始めるとすぐに落下している。平板の初期飛散状況には初期吸上げ力が重要であるが、その後の飛散距離や飛散速度には、平板が回転を開始する位置

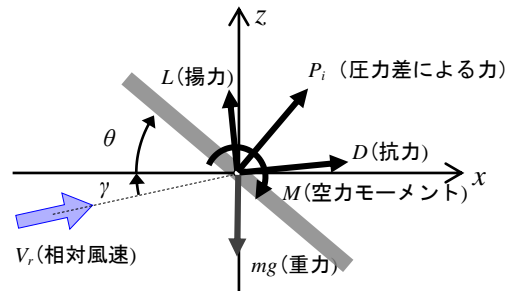
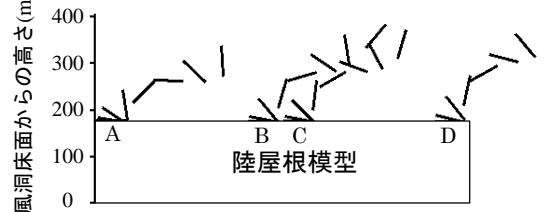
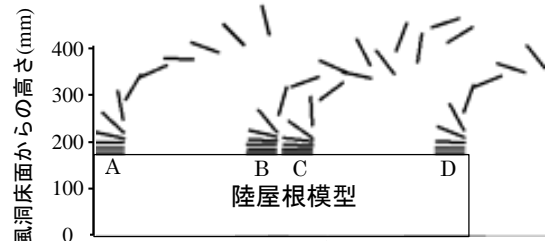


図6 平板モデルの飛散時のつり合い条件

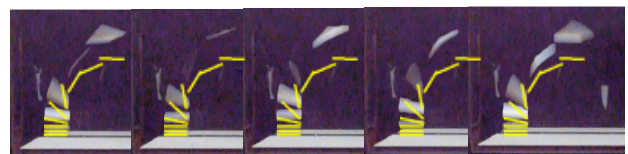


(a) 初期吸上げ力無し

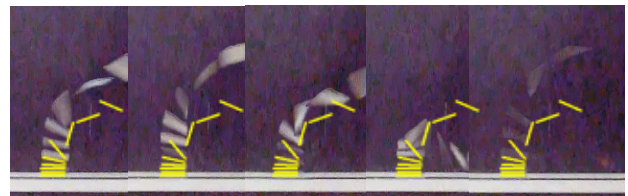


(b) 初期吸上げ力有り

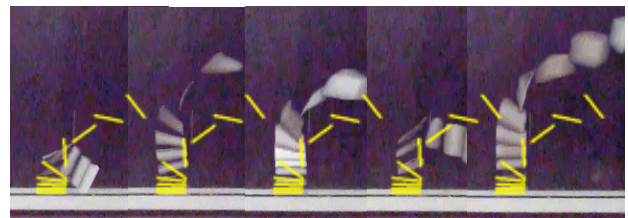
図7 飛散シミュレーションにおける初期吸上げ力の入力の有無による飛散軌跡の違い



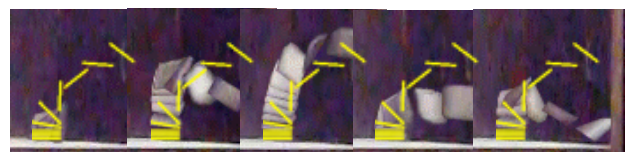
(a) 設置点 A



(b) 設置点 B



(c) 設置点 C



(d) 設置点 D

図8 実験とシミュレーションの模型表面からの飛散状況の比較 (背景：実験画像、線：シミュレーション)

での風速分布も重要である。

6. 数値流体解析を用いた飛散シミュレーション

試行ごとのばらつきが大きい設置箇所からの飛散状況を飛散シミュレーションで再現するためには風速場と模型表面圧の時刻歴変化を使用する必要があるが、実験で測定することは難しいため、数値流体解析ソフト STAR-CCM(CD-adapco 社製)を使用して、模型周辺の風速場と模型屋根面圧の時刻歴変化を求めた。

6.1 数値流体解析の最適化

数値流体解析の精度は風速場と圧力値を実験と比較することで確認した。図 9 に数値流体解析で算定した平均風速場と実験で測定した平均風速場を示す。模型周辺の低風速の範囲が解析できていた。また一例として設置点 C から 100mm 上の点における風速と設置点 C 中心の模型表面圧の平均値と標準偏差を表 3 と表 4 に示す。圧力は風洞内の静圧を基準とした。平均値と標準偏差ともに実験値と解析値がよく対応している。

6.2 飛散シミュレーションの時刻歴解析

実験での飛散状況の試行ごとのばらつきが大きかった設置点 C に着目する。図 10 に数値流体解析の風速場と模型表面圧の時刻歴変化を使用し、適当な時刻から飛散を開始させた設置点 C における飛散シミュレーション結果を示す。図に示すように、数値流体解析の風速分布を使用することで、実験で測定した平均風速場では表現できなかった試行ごとのばらつきが表現できている。

7. まとめ

陸屋根模型表面に設置された平板の飛散状況を模型周辺の風速分布と平板設置位置での圧力を使用し、飛散シミュレーションで再現した結果、以下の知見を得た。

- (1) 飛散シミュレーションにおいて、平板設置位置での圧力を飛散開始時に初期吸上げ力として加えることで、飛散直後に平板が平行状態を保ったまま浮上する実験の様子を再現できる。
- (2) 風速の乱れの小さな模型風上端から飛散する平板の飛散状況は、平均風速場でも再現できるが、模型屋根面の中腹や風下側は、飛散状況にばらつきが大きく平均風速場では再現できない。
- (3) 数値流体解析で得られた風速場と模型表面圧を用いた飛散シミュレーションでは、実験で見られた飛散状況のばらつきを再現可能である。

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) 野田稔, 長尾文明, 平板状飛散物の 6 自由度飛散軌道シミュレーション, 風工学シンポジウム論文集, 第 21 回, pp.167-172, 2010.
- 6) 丸山敬, 河井宏允, 西村宏昭, 加茂正人, 外装材耐衝撃性能試験用エアークャノン, 日本風工学会論文集, 研究報告, pp.31-38, Vol.34, No.2, 2009.
- 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, pp.151-152, 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, pp.154-155, 2013.

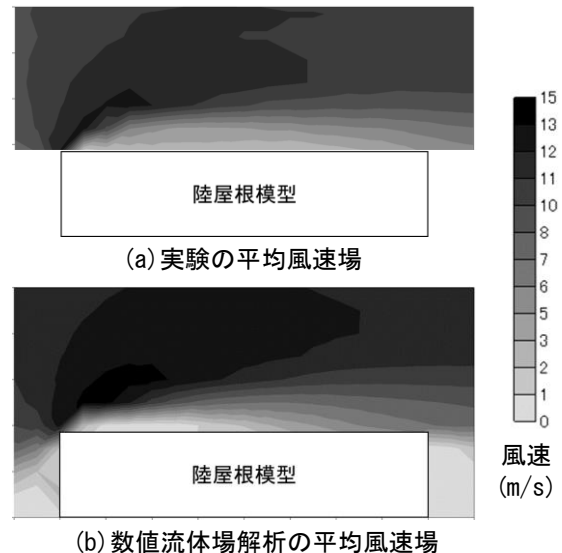


図 9 数値流体解析ソフトの最適化のための実験風速分布との比較

表 3 設置点 C から 100mm 上における数値流体解析と実験の風速の比較

設置点C	平均風速(m/s)	標準偏差(m/s)
実験値	10.30	2.51
解析値	10.81	2.59

表 4 設置点 C の中心における数値流体解析と実験の模型表面圧の比較

設置点C	平均圧力(Pa)	標準偏差(Pa)
実験値	-14.80	11.29
解析値	-11.14	11.45



図 10 数値流体解析の時刻歴結果を用いた設置点 C における飛散シミュレーション結果