

平板状飛散物の飛行軌道に対する立川数および辺長比の影響

徳島大学 正会員 ○野田 稔  
 徳島大学 正会員 長尾 文明

1. はじめに

近年、突風による被害が増加する傾向にあり、竜巻やガストフロントによる被害が毎年のように発生している。基本的に強風時の建造物の被害は過大な風荷重により発生するが、被害を拡大させる要因として飛散物の存在も無視できない。飛散物がもたらす被害は、1つの飛散物が発生し、他の建造物に衝突することで新たな飛散物を生み、被害の連鎖を形作ることによって広がっていくというプロセスで発生する。飛散物がもたらす被害を予測し、そのリスクを評価するためには、飛散物の飛行軌道や建造物への衝突時の二次飛散物の生成過程をモデル化することが必要となる。強風中の飛散物の運動については立川やHolmesが行った研究<sup>1,2)</sup>はあるものの、基本的に鉛直面内での運動を取り扱った2次元問題として検討されており、飛散物の軌道が飛散物の重量に対する空気力の比で定義される立川数<sup>3)</sup>に支配されていることが指摘されてきた。しかし、実際の飛散物は3次元物体であり運動も風軸直交方向も含めた6自由度の運動である。より現実的な検討を進めるためには、3次元物体の6自由度運動を求めることが必要であり、筆者らは飛散物のモデルとして辺長比の異なる平板を対象に、強風中における運動を求めることに取り組んできた<sup>4)</sup>。ここでは、辺長比の異なる3種類の平板の飛散軌道に対する立川数および辺長比の影響について報告する。

2. 解析概要

飛散物の運動は、飛散物に作用する空気力と重力を外力する6自由度の運動方程式を解くことにより表現することができる。ここで、空気力を理論的に求めることは困難であるため、あらゆる風向、迎角に対する空気力を6分力計による風洞実験で求めたもの<sup>4)</sup>を用いた。軌道解析の例として、図1に辺長比 $H/B=1$ 、風速 $U=20\text{m/s}$ の一樣流場の下で立川数 $Ta$ を10に保ち、初期迎角および初期方向角を逐次変化させて求めた飛行軌道を示す。この図からも分かる通り、初期の姿勢によって飛行軌道は鉛直方向のみならず風向直交水平方向にも複雑に変化し広がっている。ここでは飛行軌道とその広がりを定量的に評価するために、同じ $x$ 座標ごとに飛散物の通過座標の平均位置および標準偏差を求め、平均軌道と軌道の平均広がり幅を求めた。図1(b)および(c)に示された緑の線は個別の飛行軌道を表しており、赤の3本の曲線は平均軌道と平均軌道を中心とした $1\sigma$ の平均広がり幅を表している。ここで、立川数 $Ta$ は平板の幅と高さを $B$ および $H$ とすると次式で定義される<sup>3)</sup>。

$$Ta = \frac{\rho_a U^2 A}{2mg} = \frac{\rho_a U^2 BH}{2\rho_d B H t g} = \frac{\rho_a U^2}{2\rho_d t g} \tag{1}$$

$\rho_a, \rho_d$ はそれぞれ空気および飛散物の密度であり、 $t$ は平板の厚さである。

ここでは、 $H/B=1, 0.5, 0.1$ の3種類の平板の厚さを2mm、一樣流の風速を $U=20\text{m/s}$ に保ち、立川数 $Ta$ を2, 5, 10, 20に変化させた場合について、初期迎角と初期方向角を逐次変化させて軌道計算を行い、求めた平均軌道および平均幅に対する立川数および辺長比の影響について検討した。

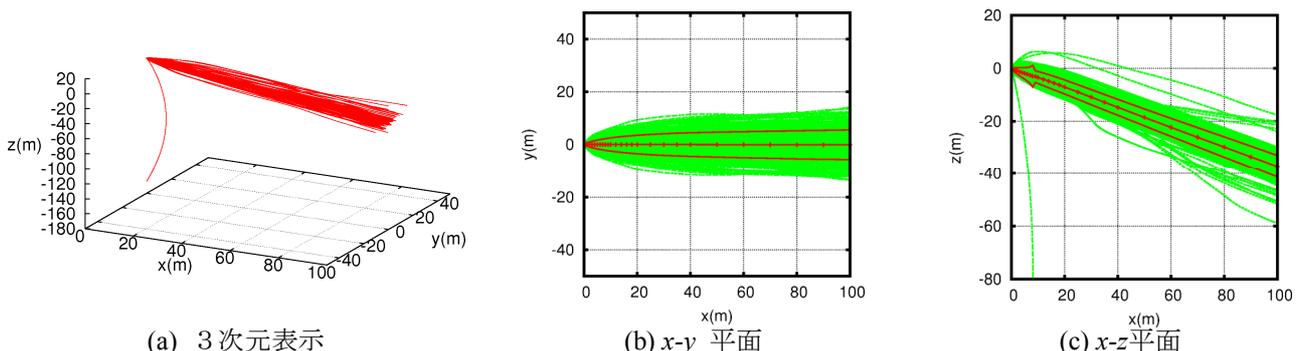


図1 3次元飛散物の軌道計算例および平均軌道と平均広がり幅 ( $H/B = 1.0, U = 20 \text{ m/s}, Ta = 10$ )

### 3. 立川数が飛行軌道に及ぼす影響

図2に辺長比 $H/B=0.5$ において、立川数を変化させた場合の平均軌道および平均広がり幅を示す。ここで、縦軸および横軸は立川数を導く際に用いられる重力加速度 $g$ と風速 $U$ による無次元座標 $yg/U^2$ および $zg/U^2$ としている。平均軌道については、一様流場であり $x$ 軸に対して対称な軌道が得られることから $y$ 座標は0を保ち、 $z$ 方向のみに変化する結果となった。また、立川が示した結果と同様に立川数の増加とともに飛距離が増加していることがわかる。これは飛行軌道が基本的に空気力と重力の釣り合いによって決定付けられるためである。一方で、軌道の平均広がり幅については立川数の増加に合わせて狭まる結果となった。この原因としては、立川数が大きい方が飛散物の速度が増加する一方で、風軸直交水平方向および鉛直方向の軌道の変動は空気力のみ支配されているために同じ時間経過に対しては軌道の変動が相対的に減少するためと考えられる。しかし、飛行距離の広がり幅に注目すると、立川数の増加に伴う平均軌道の勾配の減少によりむしろ広がっている。

### 4. 飛散物の辺長比が飛行軌道に及ぼす影響

図3に立川数を $Ta=5$ に保ち、辺長比を変化させた場合の平均軌道および平均広がり幅を示す。この場合、無次元座標系における平均軌道は辺長比の違いに影響を受けず完全に一致する結果となった。これは一様流中において立川数が飛散物の運動の支配パラメータとしてきわめて重要な役割を担っていることを示す結果と言える。しかし、平均広がり幅に注目すると、飛散物の辺長比の増加に対して広がる結果となっている。これは辺長比の増加によって風軸直交水平方向や鉛直方向の空気力(横力, 揚力)が強まるため、軌道の変動も大きくなるためと考えることができ、立川数は平均的な空気力にのみ支配的であり、飛散物の姿勢の変化による軌道の変動までを支配するわけではないことを示している。

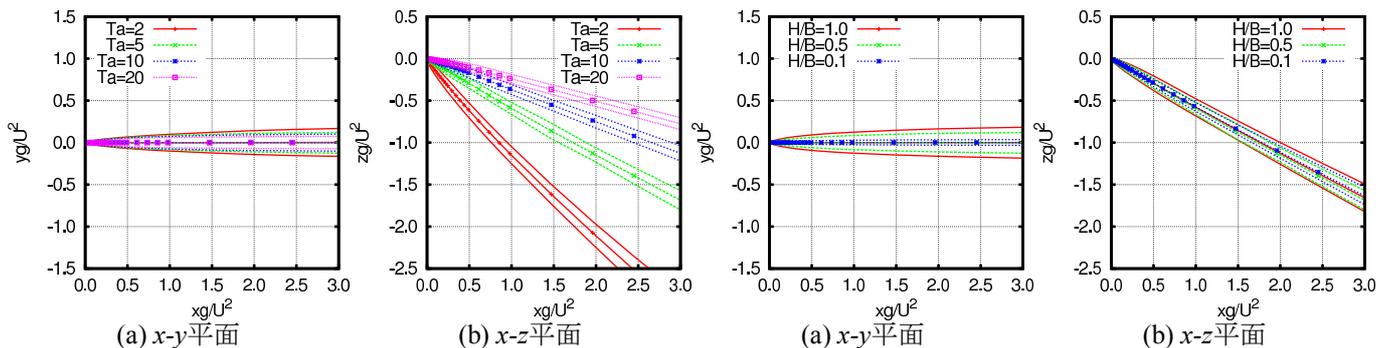


図2 平均軌道に対する立川数の影響 ( $U = 20$  m/s,  $H/B = 0.5$ ) 図3 平均軌道に対する辺長比の影響 ( $U = 20$  m/s,  $Ta = 5$ )

### 5. まとめ

ここでは辺長比の異なる平板について一様流中の飛行軌道について検討したが、横力や揚力の変化が軌道の変動を生むことを考えると、竜巻のような非一様な流れ場においては立川数が絶対的な支配パラメータとして働かない可能性があると考えられる。今後は、竜巻や建造物周辺を想定した非一様場における飛散物の挙動についても検討を進め、立川数の有効性について検証していく予定である。

### 6. 参考文献

- 1) Tachikawa, M., "Trajectories of flat plates in uniform flow with application to wind-generated missiles", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 14, pp.443-453, 1983.
- 2) Holmes, J. D., "Trajectories of spheres in strong winds with application to wind-borne debris", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92, pp.9-22, 2004.
- 3) Holmes, J. D.ほか, "The Tachikawa number - A proposal", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 98, pp.41-47, 2006.
- 4) 藤本, 野田, 長尾: 「3次元飛散物の6自由度軌道予測に関する研究」, 平成21年度土木学会全国大会年次学術講演会概要集, 2009.