

6 自由度飛行シミュレーションに基づいた平板の飛散速度のモデル式に関する検討

徳島大学大学院 学生員 政井 一仁 徳島大学 正員 野田 稔
 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

強風時の構造物の被害として、過大な風荷重によって発生する被害と飛散物の被害が挙げられる。飛散物の被害は、一つの飛散物が発生し、他の構造物に衝突することで新たな飛散物を生み、被害が連鎖的に広がっていく。この飛散物の危険性を評価するためには、強風中における飛散物の運動を求めることが必要である。強風中の飛散物の運動については立川ら¹⁾が行った研究があげられ、運動方程式を無次元化することにより、飛散物の重量に対する空気力の比で定義される立川数を提案した²⁾。飛散物の軌道はこの立川数に支配されることが指摘されてきた。しかし、これらの実験は鉛直面内での2次元的な運動として検討されており、実際の飛散物の運動に近い3次元物体の6自由度シミュレートが必要である。本研究では、一様な流れを想定し立川数、辺長比などをパラメータとして与え、六自由度運動方程式を解き、時間経過に伴う平板状モデルの飛散速度を算出し考察する。また、平均飛散速度の時刻歴変化のモデル式について検討した。

2. 解析概要

飛散物の運動をシミュレートするため以下の六自由度運動方程式を与えた。

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \frac{1}{m}F + G = \frac{1}{2m}\rho|v|^2A \cdot R_1^{-1}R_2C_F''(\phi, \psi) + G \\ \ddot{\theta} &= J^{-1}M = \frac{1}{2}\rho|v|^2Al \cdot R_1^{-1}J'^{-1}R_2C_M''(\phi, \psi)\end{aligned}\quad (1)$$

ここで x, θ は一般化座標系における並進座標 (x, y, z) 及び回転角 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ である。また、 m は飛散物の質量、 J, F, M, G は一般化座標系における極慣性モーメント (J_x, J_y, J_z) 、空気力ベクトル (F_x, F_y, F_z) 、空力モーメントベクトル (M_x, M_y, M_z) 、重力加速度ベクトル $(0, 0, -g)$ である。さらに ρ は空気密度、 v は一般化座標における相対速度ベクトル、 A および l は飛散物の代表面積と代表長さ $C_F''(\phi, \psi)$ 、 $C_M''(\phi, \psi)$ は風軸基準の空気力係数および空力モーメント係数である。 ϕ, ψ は構造座標系における水平角、迎角である。 R_1 、および R_2 は座標変換マトリクスである。本研究では3種類の平板を飛散物として解析を行い、立川数、辺長比、風速の3つのパラメータを変化させ、それぞれの飛行性状の変化を検討する。ここで、平板状飛散物の立川数は、空気密度と飛散物の密度を ρ_a, ρ_d とすると、以下のように表すことができる。

$$Ta = \frac{\rho_a U^2 A}{2mg} = \frac{\rho_a U^2 BH}{2\rho_d BHtg} = \frac{\rho_a U^2}{2\rho_d tg}\quad (2)$$

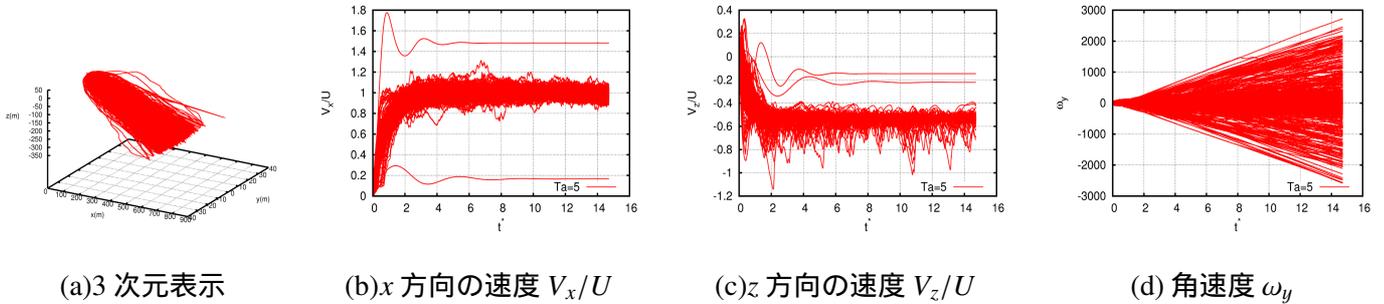
この結果から分かるように、厚さ t が一定の平板状飛散物においては飛散物の辺長 (B, H) は立川数に関係せず、風速と飛散物の密度のみで立川数が決定される。辺長比 $H/B = 1.0, 0.5, 0.1$ の3種類の平板を厚さ $2mm$ 、一様流の流れ場を想定し、風速 U を $10m/s, 20m/s, 30m/s$ のいずれかに設定し、立川数 Ta を $2, 3, 3.5, 4, 5, 10, 20$ に変化させる。回転角の初期条件は $\theta_x = 0^\circ$ としながら、 θ_y, θ_z を -90° から 90° まで 5° ピッチで変化させルンゲ・クッタ法で算出する。

3. 解析結果

解析結果の一例として、 x, z 方向の飛散速度および y 軸回りの角速度の時刻歴変化を図-1、 x, z 方向の平均飛散速度、 ω_y の確率密度分布の時間変化を図-2 に示す。ここで各方向の一般化座標における速度 $\dot{x} = V_n$ とし、風速 U で無次元化している。また、時間は $t^* = tg/U$ により無次元化している。図-2 に示した x 方向では平均飛散速度の収束値は立川数 Ta に関わらず $V_x/U = 1$ 、すなわち風速と同じとなるまで加速し、後に収束する変化となっている。 z 方向では平均飛散速度は x 方向の飛散速度より遅くなり、同じようにある値に収束する変化を示した。また、平均飛散速度が立川数によって収束値、立上り方が変化したことから立川数は飛散速度を支配する重要なパラメータということが考えられる。 ω_y の確率密度分布の中央値すなわち平均値は0となっており、平均的な飛散物の回転運動は起こらないことが分かった。

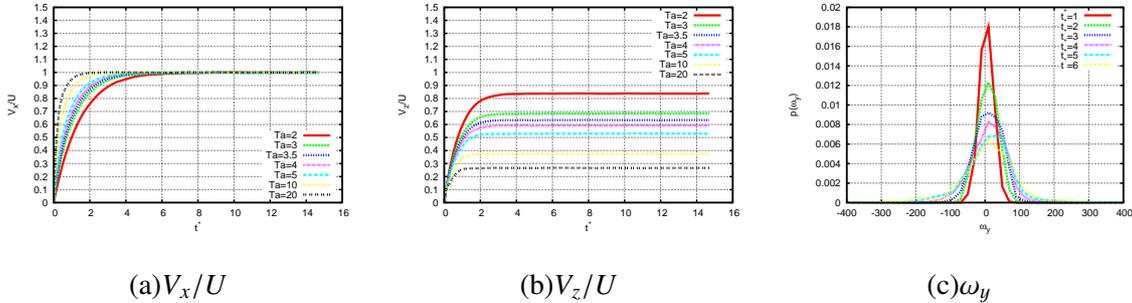
キーワード 解析, 飛散物, 立川数

〒770-8506 徳島県徳島市南常三島 2-1 徳島大学 TEL/FAX:088-656-7323



(a)3次元表示 (b)x方向の速度 V_x/U (c)z方向の速度 V_z/U (d)角速度 ω_y

図-1 3次元飛散物の軌道計算例と x, z 方向の飛散速度分布及び角速度 $\omega_y(H/B = 0.5, Ta = 5, U = 20m/s)$



(a) V_x/U (b) V_z/U (c) ω_y

図-2 x, z 方向の平均飛散速度及び角速度 ω_y の確率密度分布 ($H/B = 0.5, U = 20m/s$)

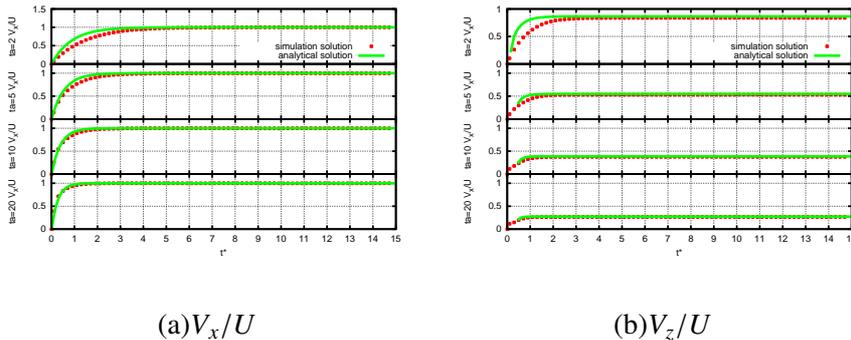
4. 飛散速度のモデル式の検討

確率密度分布より平均的には角速度は0となり回転を無視できるので、平均的には回転なしの2自由度問題として考えることができる。紙面の都合上、誘導過程は省くが、2自由度の運動方程式より以下の様なモデル式を誘導した。

$$v_x = \exp(-\sqrt{C_D \cdot Ta} \cdot t^*) \tag{3}$$

$$v_z/U = \frac{1}{\sqrt{C_D \cdot Ta}} \sqrt{1 - C_D \cdot Ta \cdot \exp(-2\sqrt{C_D \cdot Ta} \cdot t^*)} \tag{4}$$

ここで C_D は平均空気力係数である。二次元的な考え方ではあるが、すなわち x 方向の平均飛散速度と z 方向の平均飛散速度は立川数 Ta と平均空気力係数 C_D によって決定できることが分かる。図-3 に解析結果との比較を示す。なお平均空気力係数 C_D は解析の結果より求めたものを用いた。加速域に若干の誤差は生じるものの速度の収束値はほぼ一致した。



(a) V_x/U (b) V_z/U

図-3 シミュレーション結果とモデル式の比較 ($H/B = 0.5, U = 20m/s$)

5. おわりに

本研究では平板について6自由度飛行軌道シミュレーションにより飛散速度のモデル式を検討した。今後は飛散速度の標準偏差を評価の対象にし、立川数、辺長比、風速など飛散現象を支配していると考えられるパラメータとの関係性を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 立川正夫, 飛散物の拡散範囲の推定方法 台風時の飛散物の軌跡と速度に関する研究 その5, 日本建築学会論文報告集, 第363号, pp.23-31, 1986
- 2) 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