【Ⅰ－15】

6 自由度飛行軌道シミュレーションによる平板の飛散速度の評価

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

近年は竜巻など強風による被害が増加している傾向にあり，マスコミにも多々取り挙げられている．風に対し脆弱であった日本の建築物も風に対する対策がなされ，強靭なものとなっているが，飛散物に対するより具体的な対策はあまりなされていない状況にある．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．この飛散物のリスクを評価し，危険性を低減させるためには，飛散物の動的な情報を得る必要がある．強風中の飛散物の運動については立川らが行った研究[1)]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，水平・鉛直・回転の 3 自由度で検討されており，実際の飛散物の運動に近い (x, y, z) 軸の並進運動と x, y, z 軸周りの回転運動が同時に起こる 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，6 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．

2. 解析概要

飛散物の運動を解析するため以下の 6 自由度運動方程式を解くことで行った．

$$\begin{aligned}\ddot{\boldsymbol{x}} &= \frac{1}{m}\boldsymbol{F} + \boldsymbol{G} = \frac{1}{2m}\rho|\boldsymbol{v}|^2 A \cdot \boldsymbol{R}_1^{-1}\boldsymbol{R}_2\boldsymbol{C}''_F(\phi,\psi) + \boldsymbol{G} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}} &= \boldsymbol{J}^{-1}\boldsymbol{M} = \frac{1}{2}\rho|\boldsymbol{v}|^2 Al \cdot \boldsymbol{R}_1^{-1}\boldsymbol{J}'^{-1}\boldsymbol{R}_2\boldsymbol{C}''_M(\phi,\psi)\end{aligned} \tag{1}$$

ここで $\boldsymbol{x}$，$\boldsymbol{\theta}$ 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．m は飛散物の質量．$\boldsymbol{J}$，$\boldsymbol{F}$，$\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{G}$ 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．また，ρ は空気密度，$\boldsymbol{v}$ 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，$\boldsymbol{C}''_F(\phi,\psi)$，$\boldsymbol{C}''_M(\phi,\psi)$ 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．さらに ϕ，ψ は構造座標系における水平角，迎角，$\boldsymbol{R}_1$ および $\boldsymbol{R}_2$ 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．

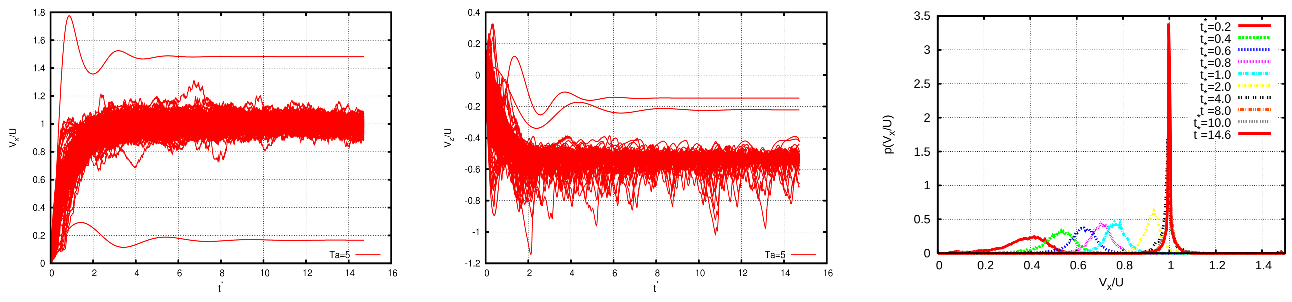
$$Ta = \frac{\rho_a U^2 A}{2mg} = \frac{\rho_a U^2 BH}{2\rho_d BHtg} = \frac{\rho_a U^2}{2\rho_d tg} \tag{2}$$

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面積 (BH) 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 $t = 2mm$，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 $\theta_x = 0°$ 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

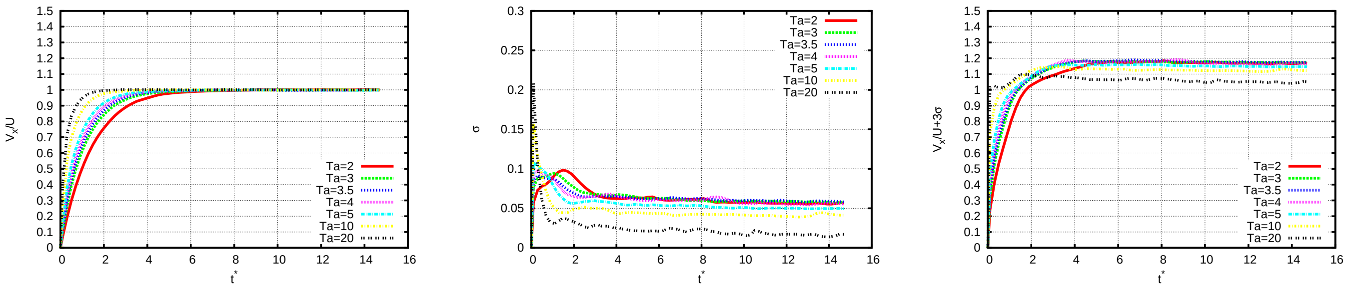
x, z 方向の飛散速度分布の解析結果の一例を図–1 の (a)，(b) に示す．ここで各方向の一般化座標における速度 $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{V}_n$ とし，風速 U で無次元化している．また，時間は $t^* = tg/U$ により無次元化している．この結果より求めた無次元時間 0.2 間隔ごとの速度の発現確率密度分布を図–1(c) に示す．飛散速度がこの様な正規分布に従うことから，これより無次元時間 0.2 間隔ごとの平均飛散速度及び飛散速度の標準偏差を求めた．各方向の結果の一例を図–2，図–3 に示す．図–2 の (a) に示す x 方向では，平均飛散速度の収束値は立川数 Ta の値に関係なく $V_x/U = 1$，すなわち風速と同じとなるまで収束している．図–3 の (a) に示す z 方向では，平均飛散速度は x 方向の飛散速度を下回り，ある値に収束する変化を示す．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．図–2，図–3 の (b) に

示す標準偏差は両方向とも立川数 Ta が大きくなると標準偏差は小さくなる傾向を示した．また，標準偏差の値が最大となるピークが発生した．これを 3 倍の標準偏差と平均値の和で評価した 0.3%超過確率飛散速度を検討する．その一例を図–2，図–3 の (c) に示す．0.3%超過確率飛散速度で評価すると，標準偏差のピークは 0.3%超過確率飛散速度へあまり強い影響を示さないことが分かる．これは標準偏差が最大になる無次元時間において平均飛散速度が小さいためである．0.3%超過確率飛散速度が最大となるのは時間が経過し収束した値であるので，飛散速度の標準偏差のモデル式を検討する上でこの収束した値を用ればよいことが分かった．



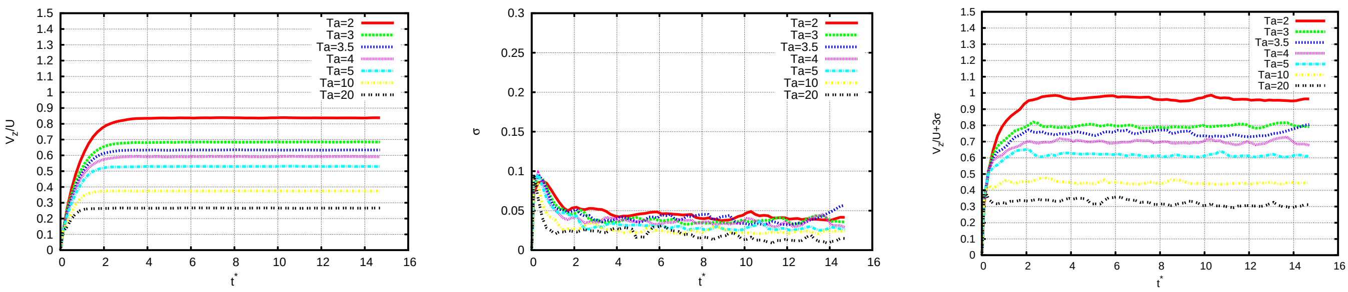
(a)x 方向の速度 V_x/U　(b)z 方向の速度 V_z/U　(c)x 方向飛散速度の確率密度分布

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 ($H/B = 0.5$，$Ta = 5$，$U = 20m/s$)



(a) 平均飛散速度 V_x/U　(b)V_x/U の標準偏差　(c)0.3%超過確率飛散速度

図–2 x 方向の解析結果 ($H/B = 0.5$，$U = 20m/s$)



(a) 平均飛散速度 V_z/U　(b)V_z/U の標準偏差　(c)0.3%超過確率飛散速度

図–3 z 方向の解析結果 ($H/B = 0.5$，$U = 20m/s$)

4. 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，立川数，辺長比，風速などパラメータの変化によるの飛散物の飛行性状の変化を検討した．今後は飛散速度の標準偏差も評価の対象とし，各パラメータとの関係性を検討していくとともに，飛散速度分布の暫定的なモデル式を検討する予定である．

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