

竜巻状流れ場における飛散物の飛行軌道シミュレーション

徳島大学大学院 学生会員 ○鹿島 貴侑 徳島大学 正会員 野田 稔
 徳島大学大学院 学生会員 政井 一仁 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

近年は台風や竜巻といった突風による被害の報告が増加している傾向にあり、飛散物による被害もマスコミに多々取り上げられている。技術の進歩により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、強靱なものとなっているが、飛散物に対する具体的な対策は十分に整備されていない状況にある。飛散物の危険性を低減し、対策を明確にするためには、飛散物の動的な情報を得る必要があるが、飛散物の軌道は、強風の発生原因や地物の影響で決まる流れ場や飛散物の形状、質量等によって変化する。

飛散物の軌道を予測するには現実性の高い三次元飛散軌道シミュレーションを行う必要がある。そこで本研究では平板状モデルの飛散物を想定した6自由度運動シミュレーション¹⁾を行う。平板状モデルを用いる理由は、建築物が強風などにより被害を受けた際、発生する飛散物は屋根瓦やガラスなど平板状であるものが多いとされるからである。本来、物体が回転を伴う運動をする際にはマグヌス揚力とよばれる力が働き、計算に考慮するべきだが、3次元物体のマグヌス揚力を決定することは困難であるため本研究のシミュレーションでは検討はしていない。飛散物の軌道は吹く風の方向や強さ、地形などさまざまな要因によって変化するが、本研究では建物の倒壊や窓ガラスの破壊される可能性が高い竜巻状流れ場を想定する。そして竜巻によって発生した飛散物が竜巻による旋回流に対してどのような軌道をとるのかLES解析により求めた竜巻状流れ場のデータ²⁾を使って検討する。

2. 解析手法

飛散物の飛行軌道を求める上で重要となるのが運動方程式である。これは飛散物に作用する空気力、重力を外力として用いて求められる6自由度の運動方程式である。各方向に対応する運動方程式はそれぞれ常微分方程式になっており、適当な解法を用いて解くことにより、飛散物の運動を表現する。本研究では竜巻状流れ場を想定しており、LES解析で得られた竜巻状流れ場のデータを用いている。この竜巻状流れ場は地面からの高さごと、中心からの距離ごとにアンサンブル平均して求めた平均場である。

今回の解析で用いるパラメータは、平板状のモデルを想定し、立川数³⁾、LES解析により求めたスワール比 $Sw=0.36$ の竜巻状流れの風速データ等を用いている。立川数は次式(1)で定義される飛散物の飛びやすさを表すパラメータである。

$$Ta = \frac{\rho U^2 A}{2mg} \quad (1)$$

ここで ρ は空気密度、 A は飛散物の代表面積、 m は飛散物の質量、 g は重力加速度であり、風速 U には、高さ $z=10\text{m}$ の水平面内の接線方向の最大風速を用いている。

平板状モデルを風軸鉛直方向の迎角 ϕ 、水平方向の迎角 ψ を -90° から 90° まで 10° ピッチで変化させ、ルンゲ・クッタ法で算出する。解析時間は20秒とし、1/1000秒刻みの位置、速度を算出している。

3. 竜巻状流れ場における飛散物の挙動

解析結果の一例として、辺長比 $H/B=0.1$ 、風速 $U=30.3\text{m/s}$ 、立川数 $Ta=10$ の場合の飛行軌道を図-1に示す。飛散開始位置を $(x, y, z)=(15.5, 0, 10)(\text{m})$ としている。なお $x=15.5\text{m}$ は高さ $z=10\text{m}$ における風速が最大となる位置である。上記の条件下で立川数 Ta を 2.5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 と変化させた場合の飛行軌道を図-2に示す。図-2の $x-y$ 面では立川数が多いものほど、旋回しながら長い距離を飛んでいることがわかる。図-2の $x-z$ 面では立川数が多いほど高く巻き上げられ、立川数が小さいものはすぐに落ちていることがわかる。

立川数 Ta が小さいと飛散物の質量が大きくなり、立川数 Ta が大きいと飛散物の質量が小さいということになるので、立川数の変化で滞空時間が変わってくる原因は、飛散開始時は鉛直上向きの揚力が飛散物にかかる重力を上回るため上昇するが、竜巻中心よりも離れることで鉛直上向きの揚力が小さくなり重力の方が大きくなることが考えられる。

キーワード 立川数、飛散開始位置、辺長比

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

次に飛散開始位置を変化させた場合について検討する．初期パラメータを辺長比 $H/B = 0.1$ ，風速 $U=30.3\text{m/s}$ ，立川数 $Ta=60,100$ とし，風速が最大になる位置 $(x,y,z)=(15.5, 0, 10)\text{m}$ より竜巻の中心方向に $5\text{m}, 10\text{m}$ 近づけた中心からの距離 $r=5.5\text{m}, 10.5\text{m}$ から飛散開始させた場合と逆に $5\text{m}, 10\text{m}$ 遠ざけた中心からの距離 $r=20.5\text{m}, 25.5\text{m}$ から飛散開始させた場合の結果を図-3, 図-4 に示す．

飛散開始位置を変化させた場合には飛散開始位置が竜巻中心に近いほど滞空時間が長く，竜巻中心より遠いほど滞空時間が短くなった．竜巻中心に近いほど滞空時間や飛散高さが大きくなったのは，竜巻中心に近いものほど風速が大きい区間を長く飛んでいることが原因であると考えられる．

次に辺長比を変化させた場合について検討する，風速 $U=30.3\text{m/s}$ ，立川数 $Ta=2,5,10,20,40,60,80,100$ とし，飛散開始位置を風速が最大になる位置 $(x,y,z)=(15.5, 0, 10)\text{m}$ とし，辺長比 H/B の違いで飛行軌道が変化するか検討する．辺長比 $H/B=0.5, 1.0$ にそれぞれ変えたときの飛行軌道を図-5, 図-6 に示す． $x-y$ 面において辺長比 $H/B=0.1$ のときの軌道はばらつきは少なかったが，辺長比 $H/B=0.5, 1.0$ の場合は 0.1 の場合に比べ，大きな軌道のばらつきがみられた．このような軌道にばらつきがみられたのは，辺長比の変化によって空気力の大きさが変わったためであると考えられる．

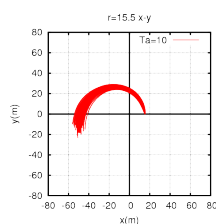
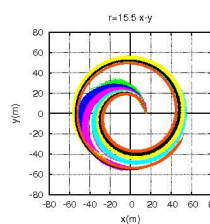
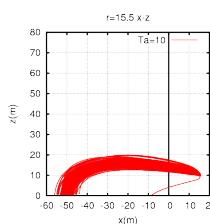


図-1 飛行軌道の一例

($H/B = 0.1$, $Ta = 10$, $U=30.3\text{m/s}$)

図-2 立川数 Ta を変化させた場合の飛行軌道

($H/B = 0.1$, $U=30.3\text{m/s}$, $(x,y,z)=(15.5, 0, 10)\text{m}$)

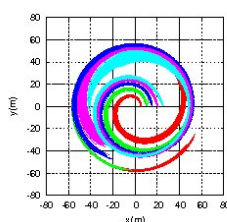
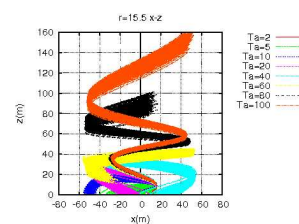


図-3 飛散開始位置を変化させた場合の飛行軌道

(立川数 $Ta=60$ における飛行軌道)

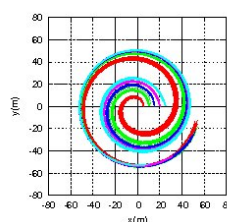
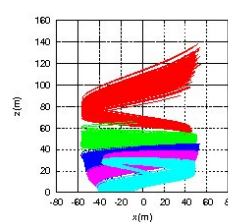


図-4 飛散開始位置を変化させた場合の飛行軌道

(立川数 $Ta=100$ における飛行軌道)

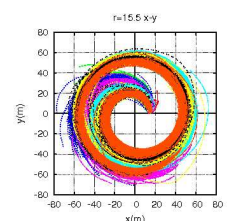
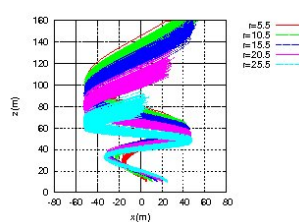


図-5 辺長比を変化させた場合の飛行軌道

($H/B = 0.5$, $U=30.3\text{m/s}$, $(x,y,z)=(15.5, 0, 10)\text{m}$)

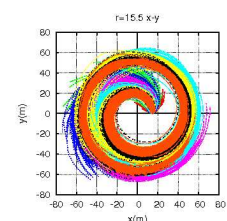
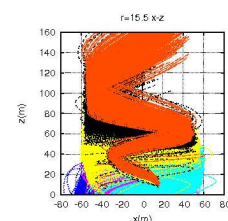


図-6 辺長比を変化させた場合の飛行軌道

($H/B = 1.0$, $U=30.3\text{m/s}$, $(x,y,z)=(15.5, 0, 10)\text{m}$)

4. おわりに

以上の立川数 Ta ，飛散開始位置 (x,y,z) ，をそれぞれ変えた結果に共通してみられたものは，竜巻の流れ場を上から見た場合の $x-y$ 面において半径約 60m の円付近に収束するような軌道を描いたことである．この半径約 60m の円に収束する軌道を描いたのは竜巻の風速や最大風速半径，スワール比等の竜巻のパラメータによるものであると考えられる．以上のことより竜巻のパラメータで飛散物の飛散域が推定できると考えられ，今後飛散物の危険性を評価する際には，飛散物による被害が発生する可能性がある危険域を評価できるのではないかと考えられる．

参考文献

- 1) 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，第 21 回 風工学シンポジウム，pp. 167-172，2010.
- 2) 二宮めぐみ，野田稔，山下翔平，長尾文明：LES 解析による竜巻状流れの再現に関する研究，徳島大学，土木学会四国支部 第 17 回技術研究発表会講演概要集，2011.
- 3) 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.