

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

竜巻影響評価における
フジタモデルの適用について

平成27年9月

東京電力株式会社

目次

1. はじめに	1
2. 各風速場モデルの概要	3
2.1 フジタモデル	3
2.2 ランキン渦モデル	5
2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)	6
3. 各風速場モデルの比較	8
4. 米国におけるフジタモデルの取扱い	9
4.1 フジタモデルの利用実績	9
4.2 NRC ガイドでの取扱い	9
5. 飛来物評価における不確定性の考慮	11
5.1 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮	11
5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮	22
5.3 飛来物評価法まとめ	25
6. 実際の飛散状況に対する検証	27
6.1 フジタスケールとの比較	27
6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例	28
6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例	30
7. 飛散以外の挙動に対する考慮	36
8. まとめ	37
9. 参考文献	38

1. はじめに

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」⁽¹⁾（以下、「評価ガイド」と略す）に従い竜巻影響評価を行う上で、設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとして、米国 NRC の基準類に記載されている「ランキン渦モデル⁽²⁾⁽³⁾」、原子力安全基盤機構の調査研究報告書に記載されている「LES(Large-eddy simulation)」の数値解析⁽⁴⁾があるが、当社の竜巻影響評価においては、**地面に置かれた物体への影響をよく表現できている風速場モデルにより、評価対象施設の影響評価・防護対策を実施するため、竜巻風速場モデルとしてフジタの竜巻工学モデル DBT-77(DBT: Design Basis Tornado)**⁽⁵⁾を選定した。

図 1 に風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フローを示す。また、図 2 に竜巻影響評価の基本フローと、フジタモデルを適用する箇所を示す。

次節以降にてフジタモデルの詳細や、フジタモデルを適用した理由等を説明する。

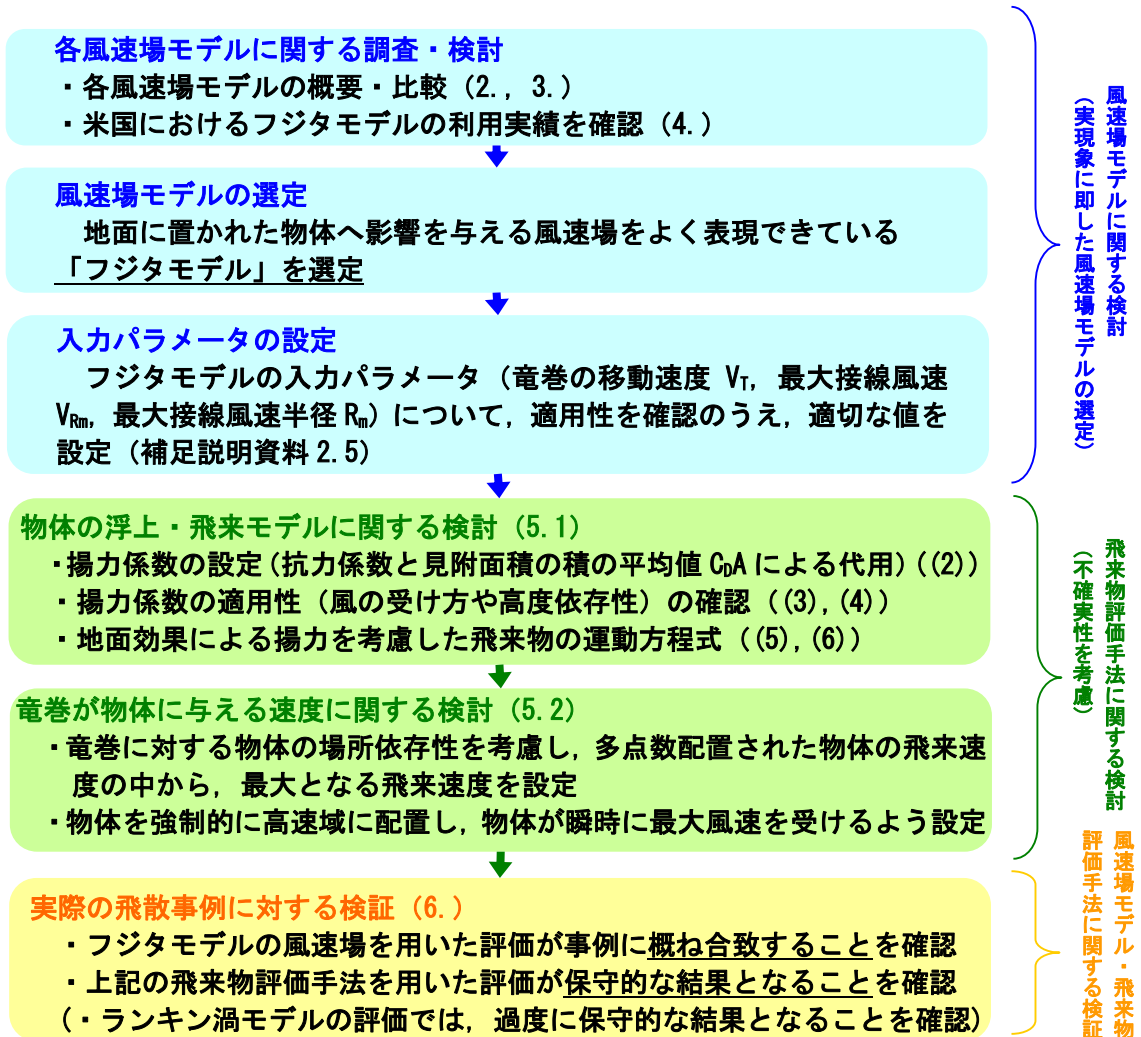


図 1 風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フロー
(括弧内の数字は、本資料の節番号もしくは補足説明資料番号)

フジタモデル関連箇所

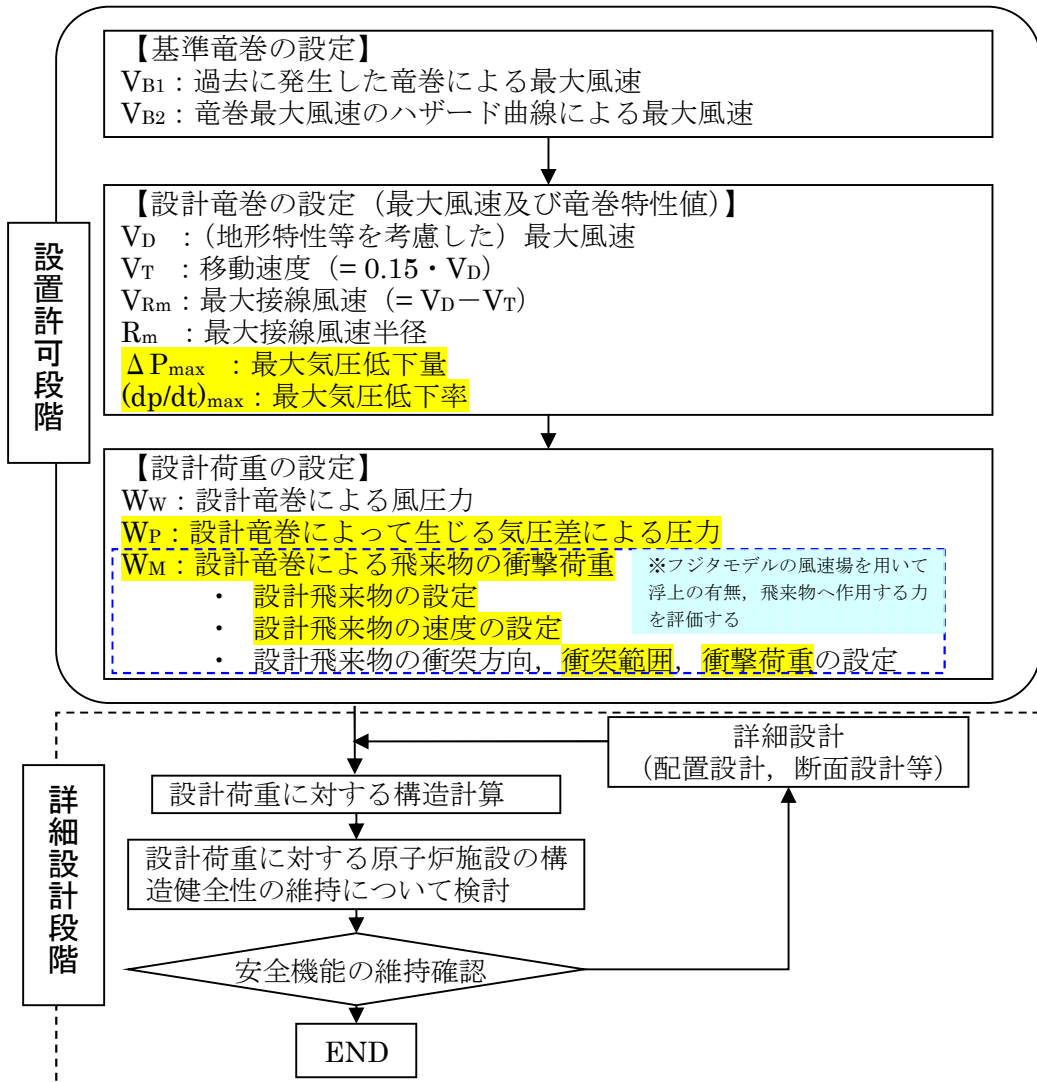


図2 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

2. 各風速場モデルの概要

2.1 フジタモデル

フジタモデルは、米国 NRC が実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田博士が 1978 年に竜巻観測記録を基に考案した工学モデルである。モデル作成に当たっては、1974 年 8 月に米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻（図 2）の記録ビデオ画像の写真図化分析を行い、竜巻の地上痕跡調査、被災状況調査結果と照合することで風速ベクトルを作成し、そのベクトル図を基に作成した流線モデルから、竜巻風速場を代数式で表現している。（図 3）

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ、および外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を良く表現している点にある。



図 2 Ash Valley 竜巻 (1974. 8. 30) のビデオ画像

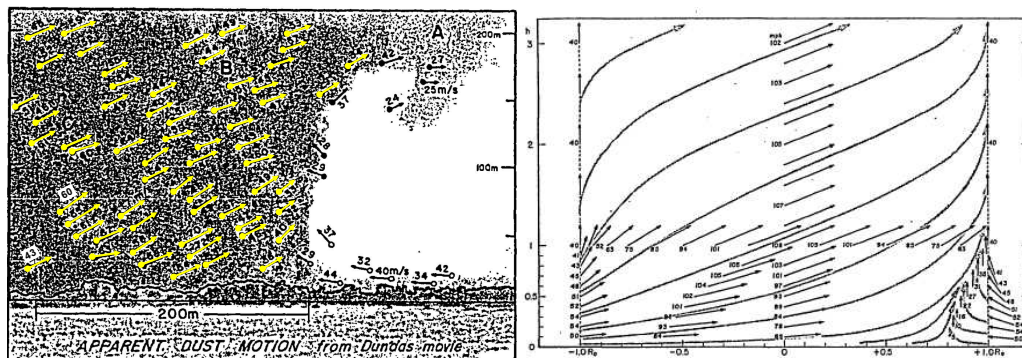


図 3 分析によって作成した風速ベクトル(左)、ベクトル図より作成したフジタモデル流線(右)

フジタモデルの風速場は図 4 に示すように半径方向に 3 つの領域（内部コア、外部コア、最外領域）で構成され、内部コアと外部コアの接線（周）方向風速 V_{θ} は半径に比例し、その外側の最外領域では周方向風速は半径に反比例するモデルとなっている。内部コアには上昇風速 V_z や半径方向風速 V_r は存在しないが、外部コアには存在する。高さ方向には地面から高さ H_i までを流入層としてモデル化しており、竜巻中心方向に向かう半径方向風速 V_r があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流となる。流入

層より上部では外向きの半径方向風速が存在し、各風速成分は高さとともに減衰する流れとなっている。フジタモデルは、流体の連続式を満たす形で定式化されており、力学的に根拠のある風速場となっている。

フジタモデル DBT-77 における接線風速等の関係式については、Fujita Work Book の Chapter6 に下記の通り記載されている。(Chapter6 では、フジタモデル DBT-78 (詳細は補足説明資料 2.5 参照) は引用されていない。)

無次元座標 $r = R/R_m, \quad z = Z/H_i$

接線風速 $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq \nu) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1-\nu^2} \left(1 - \frac{\nu^2}{r^2}\right) & (\nu < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

上昇風速

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1-\nu^2} A(16z^{\frac{7}{2}} - 7z^{\frac{8}{3}}) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-\nu^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

k_0, k, ν, η, A, B は定数

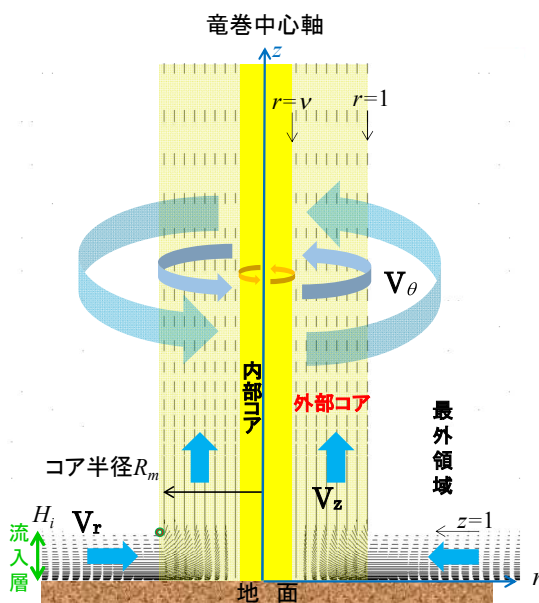


図4 フジタモデルの概要

連続の式: $c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$
 フジタモデルでは $c = 0$ となり連続の式を満たす。

V_θ	接線(周)方向風速
V_r	半径方向風速(中心方向が正)
V_z	上昇風速
V_m	最大接線風速
R_m	外部コア半径

内部コアの半径 R_ν と外部コアの半径 R_m の比 $\nu = R_\nu/R_m$ については、Fujita⁽⁵⁾ が以下の経験式を提案しているため、これを用いた。

$$\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \tag{1}$$

2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは、米国 NRC ガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデル⁽³⁾は、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を特別に付加している(図5)。そのため、流れの連続の式(質量保存式)を満たしておらず、図6に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。

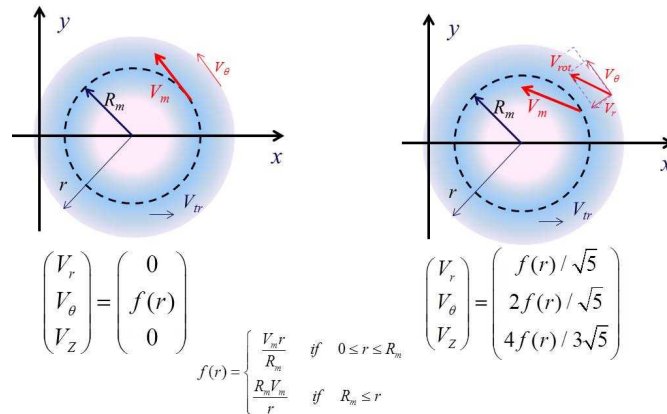


図5 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル(左)と飛来物速度評価用のランキン渦モデル(右)

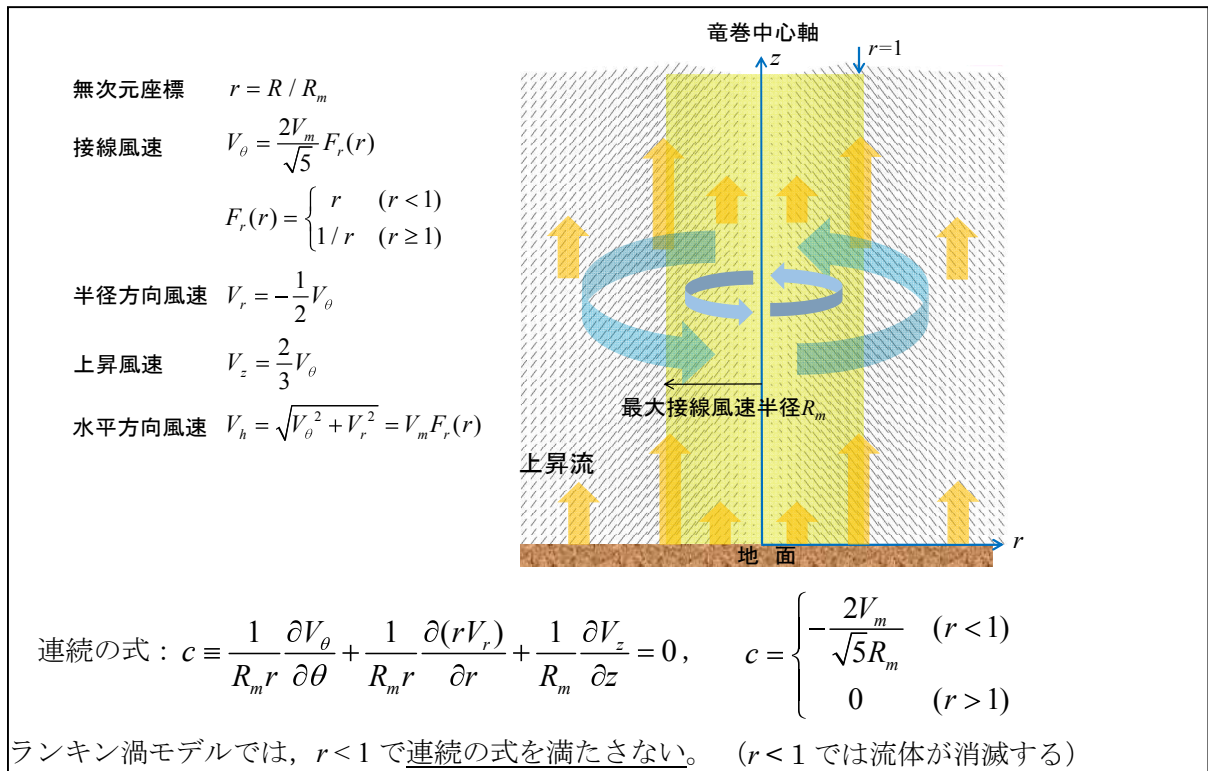


図6 飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)

LES は、非定常な乱流場を数値的に計算する手法として、評価ガイドにおける飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。図 7 に LES による渦の発生状況を示す。

古典的な Smagorinsky モデルに基づく LES の基礎方程式 (運動量保存式および質量保存式) は、流体が非圧縮性であると仮定する場合、以下ようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_i}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_i}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_i}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_s) \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \right) - f_i \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad (3)$$

ここで、 U_i および P は、 i 方向の流速ベクトルおよび圧力を表し、 ν は動粘性係数を、 f_i は i 方向の外力加速度を表す。また、 x_i は i 方向の座標を表す。

一方、Smagorinsky モデルの渦粘性係数 ν_s は以下のように定義される。

$$\nu_s = (C_s h)^2 \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 2S_{ij}^2} \quad (4)$$

ここで、 h は解像スケール (メッシュ幅相当)、 C_s は Smagorinsky 定数を表し、ひずみ速度テンソル S_{ij} は $S_{ij} = 0.5(\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$ で定義される。

以上の通り、LES は風速の時間的な変動 (乱流) を考慮できる点が特長となっている。

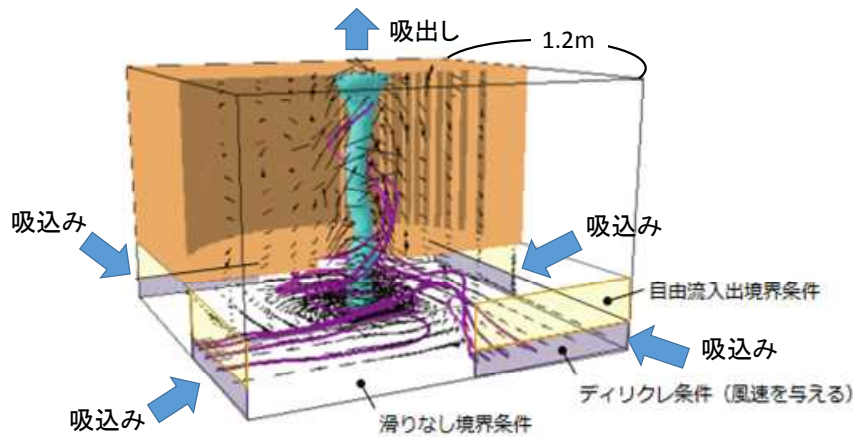


図 7 LES 計算領域内での竜巻状の渦の発生状況

以上が一般的な LES の説明となる。LES の手法自体は、広く活用されているものがあるが、実スケールでの精緻な評価を行うためには、必要なメッシュ解像度の確保に膨大な計算機資源が必要となる。

また、竜巻影響評価ガイドで例示されている LES による数値解析については、条件設定等に関して下記のような問題点がある。

評価ガイドで例示されている LES による解析では、境界条件（側面からの流入風速の分布等）や解析領域の形状（流入箇所を局所的に配置等）を調整して人為的な乱れを与え、竜巻状の渦を生成している。渦の生成にあたって、以下のような条件を仮定していることから、実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

- ・人為的な流入境界条件（流入風速分布や流入箇所の局所的配置等）を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の実際の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- ・小規模な計算領域によるシミュレーションであり、実スケールへの適用（飛来物評価）の際には単純に速度を規格化して飛来物評価に適用している。
 - ⇒風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100m/s（風速＋移動速度）に設定している。Maruyama⁽⁶⁾によれば、瞬間的な周方向風速は 1.7 倍程度まで大きくなる場合があり、移動速度と合わせると最大 160m/s 程度まで達するため、飛来物評価の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。
 - ⇒流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが、その影響については考慮していないことから、特に地表面付近については実際の風速場の再現はできていないものと考えられる。

3. 各風速場モデルの比較

各風速場モデルの特徴の比較を表1に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を図8に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、地面付近を含め、より実際の竜巻風速場に即した形で表現されており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能となっていることがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し、ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的よく表現できると言えるものの、地上付近では実現象と乖離しており、地上からの飛散挙動は解析できない。LESも同様に地上付近での風速場が実現象と乖離しているため、地上からの飛散挙動を解析できない。また、他のモデルと比較して、フジタモデルは特に問題となるような点も無いことから、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

表1 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特長	問題点
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> 竜巻飛来物設計速度、飛散高さに関する米国DOE重要施設の設計基準作成に利用されている 【対象施設の例】 Pantex Plant(テキサス州), Oak Ridge(X-10, K-25, Y-12)(テネシー州), Savannah River Site(サウスカロライナ州) 	<ul style="list-style-type: none"> 実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現している 比較的簡易な代数式により風速場を表現できる 流体の連続式を満たす定式化 <p>地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる</p>	<ul style="list-style-type: none"> 特になし <p>(ランキン渦モデルと比較すると、解析プログラムが複雑になるが、計算機能力の向上、および評価ツールの高度化により問題とならない)</p>
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> 米国NRC Regulatory Guide 1.76で採用されている NRA評価ガイド(設計竜巻の特性値の設定)で例示されている 	<ul style="list-style-type: none"> 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現できる 	<ul style="list-style-type: none"> 風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する(地面からも吹き出しがある)ため、実現象から乖離 流体の連続式を満たしていない <p>地上からの飛散挙動を解析できない</p>
非定常乱流渦モデル(LES)	<ul style="list-style-type: none"> NRA評価ガイドにおいて、飛来物および最大速度の設定例に使用されている 	<ul style="list-style-type: none"> 風速の時間的な変動、乱れをある程度模擬できる 	<ul style="list-style-type: none"> 小規模領域での計算結果を、実スケールサイズに規格化するため、粘性の影響が実現象と乖離(特に地表面付近) 人為的な境界条件を設定しており、地面や境界近傍で実現象と乖離 実スケールに規格化した場合の平均風速が100m/sとなるため、飛来物評価が非常に保守的な場合がある(瞬間的な最大値は160m/s程度) <p>地上からの飛散挙動を解析できない</p> <p>・実スケールでの解析は、膨大な計算機資源が必要になるため、現実的ではない</p>

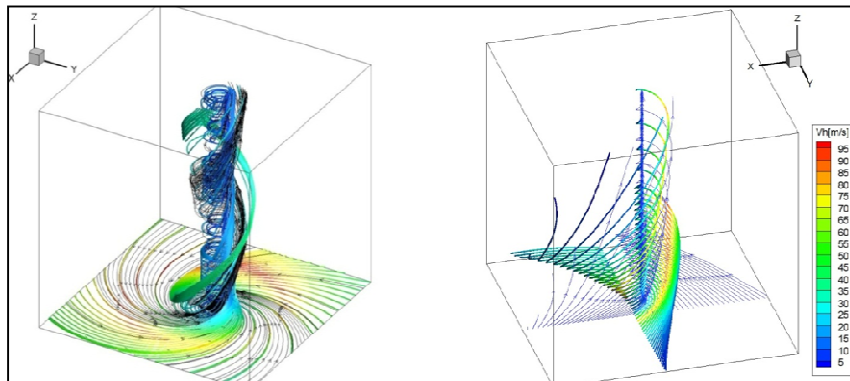


図8 フジタモデル(左)とランキン渦モデル(右)の風速場構造の比較

4. 米国におけるフジタモデルの取扱い

4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省 (DOE : Department of Energy) が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準⁽⁷⁾において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾ (文献(10)の D.4 節 : Windborne missile criteria specified herein are based on windstorm damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. . . . Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University.)。

この基準では、施設に要求される性能ごとにカテゴリ 0 から 4 まで分類し、カテゴリ 0 ~ 2 は一般的な建築物、カテゴリ 3, 4 は核物質や危険物質を取り扱う施設に適用される。カテゴリ 3, 4 に該当する施設として、Pantex Plant, Oak Ridge (X-10, K-25, Y-12), Savannah River Site が挙げられている。

フジタモデルの技術的な妥当性の検証については、米国 DOE 管轄のローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹⁰⁾にてまとめられている。この報告書では、フジタモデル DBT-77 を他の風速場モデルと比較検討しており、「流体力学の連続の式を満足する (Fluid mechanics equations of continuity are satisfied)」こと、「モデル流況は、竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する (Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies)」こと等を利点として挙げている。

また、実際の事例に対するフジタモデルの検証としては、1978 年 12 月 3 日に米国ルイジアナ州 Bossier 市で発生した F4 竜巻による鋼製材の飛来について、フジタモデル DBT-77 で再現した事例⁽⁸⁾ がローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹⁰⁾及び米国気象学会論文集⁽¹¹⁾に掲載されている。

なお、米国 LES (Louisiana Energy Services) の濃縮施設 (NEF : National Enrichment Facility) では、上記の DOE 施設の基準に基づき竜巻飛来物 (鋼鉄パイプや木材の板等) を設定しており、米国 NRC は当該施設に対する安全評価報告書 (NUREG-1827) ⁽¹²⁾の中で竜巻飛来物に対する LES の竜巻設計を是認している。

(“Based on the review of the information concerning tornados and tornado-generated missiles,NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii)the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.”)

4.2 NRC ガイドでの取扱い

2.1 節でも述べた通り、フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国 NRC の要請を受けて考案されたものであるが、米国 NRC Regulatory Guide 1.76⁽²⁾で

は、フジタモデルについて “The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita (Ref. 7).” と述べられており、単に数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また、NRC スタッフ自身で水平方向の飛来物速度 (Simiu らの運動方程式⁽³⁾) を計算するプログラムを開発している (“The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.”) ことが明記されている。

したがって、米国 NRC ガイドでランキン渦モデルが採用されているのは、フジタモデルより簡易であるという理由が主であり、竜巻風速場としての優劣を指摘されたものではない。

(参考) 米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

米国 NRC では、竜巻防護対策の追加を検討しているプラントに対し、確率論的竜巻飛来物評価手法 TORMIS の利用を承認している。

TORMIS は、米国の EPRI で開発され、原子力発電所の構造物・機器への竜巻飛来物の衝突・損傷確率を予測する計算コードであり、同コードでは、ランキン渦モデル以外の風速場モデル (統合風速場モデル) が利用されている。(米国 NRC においても、ランキン渦モデル以外の風速場モデルが認められていないわけではない)

5. 飛来物評価における不確定性の考慮

前節まででは、フジタモデルの風速場を適用することの妥当性について述べてきた。フジタモデルの風速場を適用することで、より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが、一方で、実際の竜巻による物体の飛散挙動の不確定性についても考慮する必要がある。

本節では、フジタモデルの特長である地上からの飛散挙動に関する不確定性や、竜巻が物体と衝突する際の竜巻風速に関する不確定性等について、飛来物評価の中でどのように考慮しているかという点について説明する。

5.1 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮

本評価における物体の浮上・飛来モデルの考え方と、その中で保守性の観点から評価上考慮している点について説明する。

(1) 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、評価ガイドの飛来物運動モデル⁽³⁾⁽⁴⁾と同様に、飛来物は図9(a)のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力(流れの速度方向に平行な力) F_D と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力(次頁参照)を考慮している⁽¹³⁾。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、図9(b)に示すように地面の存在により流れが非対称になり、物体上部の圧力が低くなることで物体を浮上させる駆動力が生じることから、これを揚力 F_L として考慮する。

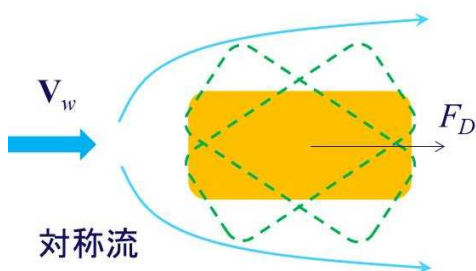


図9(a) 空中で飛来物へ作用する力

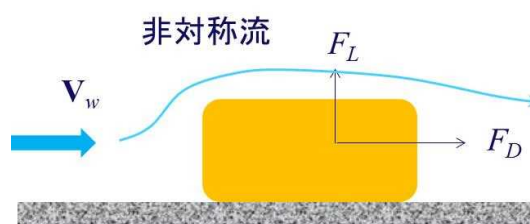


図9(b) 地面付近で飛来物へ作用する力

このような揚力 F_L は地面での揚力係数 C_L 、地上での物体の見附面積(風向方向から見た投影面積) a を用いて、以下のように表される⁽¹⁴⁾。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 \quad (5)$$

ただし、 ρ は空気密度、 \mathbf{V}_M は飛来物の速度ベクトル、 \mathbf{V}_w は風速ベクトル、 $|*|_{x,y}$ は*の x, y 成分(水平成分)の大きさを表す。

(参考) 地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく、凹凸を有しているため、完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を A とし、物体と地面の完全接触面積を s とした場合、無風時 (図 10 の左) は物体が流体に接する全表面で圧力は一定 (p_0) とみなせるため、鉛直方向 (上向き) に作用する揚力 F_{L0} は、以下で与えられる。

$$F_{L0} = -p_0 A + p_0 (A - s) = -p_0 s \quad (6)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s=A$ となるため、大気圧 p_0 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用し、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、大気圧 p_0 に完全接触面積 s を乗じた力が下向きに作用することになるため、いずれの場合においても揚力は発生しないことが分かる。

一方、竜巻通過時 (図 10 の右) の物体に圧力差に伴う流体力が作用 (簡単のため上面での圧力 p_1 、下面での圧力 p_2 と仮定) する場合、鉛直方向の流体力 F_L は、以下で与えられる (圧力分布がある任意形状の物体についても圧力の表面積分を用いれば同様に計算は可能)。

$$F_L = -p_1 A + p_2 (A - s) \quad (7)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s=A$ となるため、上面の圧力 p_1 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用するが、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、地面と物体の接触状態によっては上向きの力が発生することがある。実際には、地面と物体の接触状態を確認することは難しいことから、本評価においては、保守的に地上における物体に揚力が作用することとしている。

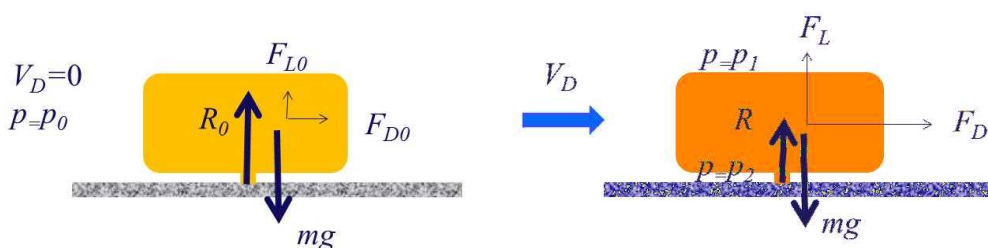


図 10 部分的に地面に接する物体に作用する力 (左: 無風時, 右: 強風時)

(2) 揚力係数の設定

C_{La} は風洞実験から求められる値であるが、実験条件 (風を受ける方向等) により様々な値を取り得るため、それを包含するような係数を設定することが望ましい。そこで本評価では、地上からの物体浮上・飛散評価における実用性と保守性確保の観点から、 C_{La} に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値 $C_D A$ を用いることとする。

$$C_{DA} = \frac{1}{3}(C_{Dx}A_x + C_{Dy}A_y + C_{Dz}A_z) \quad (8)$$

ここで、 C_{Dx} は空中での x 軸方向流れに対する抗力係数、 A_x は x 軸方向流れに対する見附面積であり、その他も同様である。

物体の飛散解析におけるモデル化の基本的な考え方は、地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 C_La をより大きな値で置き換えて、浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり、この保守的な代用値として飛行定数 C_{DA}/m と同類の C_{DA} の利用が適切であることを以下で説明する。

物体が風速 U を受ける場合の揚力係数 C_L は、一般にその定義により揚力 F_L と以下の関係にある。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L a \quad (9)$$

これを変形すると、 $C_La = 2F_L/\rho U^2$ となり、風速、風向及び物体の向きが一定であれば、揚力 F_L および速度圧 $q = \frac{1}{2} \rho U^2$ は見附面積 a の取り方には無関係の物理量であるので、

C_La も見附面積 a の取り方（風向投影面積や揚力方向投影面積）に依存しないことが分かる。一方、同じ風速 U が同じ物体に作用する場合であっても、地面に置かれた物体の向きと風向の関係によって積 C_La は変化する。（例えば、円柱の長手方向と風向が平行な場合の揚力は小さいが、直角の場合には最大となる）

そこで、典型的な塊状物体・柱状物体・板状物体が地面に置かれた場合の C_La の最大値（または、それに近い値）の実測結果と物体の幾何学形状のみで決定される C_{DA} の値を比較した。（表 2）

表 2 より、 $C_{DA} > C_La$ の関係が成立しており、 C_La の代用として C_{DA} の利用が適切であることが確認できる。なお、 C_{DA} は各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値であり、例えば、一辺 d の立方体では $C_{DA} = 2d^2$ 、一辺 d の平板では $C_{DA} = 0.66d^2$ となる。両者には約 3 倍の違いがあるが、いずれの場合も実際の C_La 値よりも大きな値であり、揚力の評価モデルとして C_La 値の代わりに C_{DA} を用いることで保守性は確保できる。

また、以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（図 17 の状態 A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの 3 倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、図 17 の状態 A, B, C の全領域で揚力の連続性が確保されている。

表 2 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の大小関係(1/2)

形状	物体	仕様	C_{DA}^{*1}	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart (長さ 16.7ft. , 幅 5.8ft. , 高さ 4.3 ft.)	129ft. ²	48.7ft. ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁵⁾ (風速 22~31m/s, $Re=2.8 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (セダン:長さ 4.85m, 幅 1.79m, 高さ 1.42m, 質量 1633kg)	12.07m ²	7.76m ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁷⁾(風速 0~150m/s, $Re=0 \sim 3 \times 10^6$) 4つのタイヤに作用する地面からの反力のうち, 少なくとも一つがゼロとなった時点の風速 U から C_{La} 値を計算 ($C_{La}=2mg/\rho U^2$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (ミニバン:長さ 5.12m, 幅 1.94m, 高さ 1.69m, 質 量 2086kg)	14.58m ²	7.89m ²	
	立方体	一辺の長さ D	$2D^2$	$0.2D^2$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁶⁾($Re=8000 \sim 28000$) 流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値を C_{La} (実測値) として記載
柱状	円柱	長さ λ , 直径 D	$0.47D\lambda$	$0.2D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁵⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置 (円柱の軸方向は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
				$0.05D\lambda \sim 0.23D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験($Re=3.5 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置 (円柱の軸方向は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
	角柱	長さ λ , 断面が一辺 D の正方形	$0.8D\lambda$ ($1.3D\lambda$) ^{*2}	$0.5D\lambda \sim 0.7D\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁶⁾ ($Re=8000 \sim 28000$) 長方形断面 (アスペクト比 4:3) の角柱は地面から $0.167D$ 以上離れると揚力は負となる (電中研風洞実験) 流入方向と角柱の軸方向が垂直となる配置 (角柱の軸方向は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
				$0.4(D+B)\lambda$	負値(地面との隙間が $0.167D$ 以上の場合)

表 2 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の大小関係 (2/2)

形状	物体	仕様	C_{DA}^{*1}	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
平板	薄い平板	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=200\text{mm}$, $D=5\text{mm}$, $\lambda=1000\text{mm}$ の場合)	$0.66B\lambda$	0 に近い値 (地面から $0.25B$ 離れた位 置で $C_{La}=0.04B\lambda$)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁷⁾(幅 B に基づく $Re=2 \times 10^5$) 流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置 (平板は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
	薄い翼	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=100\text{mm}$, $D=15\text{mm}$, λ $=300\text{mm}$) (参考文献(20)で は B の代わりに c で表記)		$0.2B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽²⁰⁾(幅 B(参考文献(20)では c)に基づく $Re=2.2 \times 10^5$) 流入方向と翼の長さ方向が垂直になる配置 (翼面は地面と平行)
	平板状 ブロック	長さ λ , 幅 B , 厚さ D	$0.66B\lambda$ $0.66(B\lambda+D(B+\lambda))^{*2}$	$0.1B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁸⁾($Re=5 \times 10^4$ 程度) 流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置 (平板状ブロックは地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載

※1: 柱状及び平板では微少項を無視して記載

※2: 塊状をみなせる場合

(3) 設定した揚力係数の適用性の確認

地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ が、飛行定数 $C_D A/m$ と同類の $C_D A$ で代用できることについて、表 2 における $C_L a$ (実測値) が竜巻における飛来物の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行った。

表 2 の各文献中の実験でのレイノルズ数 Re は同表の備考欄に示す通り、 10^4 から 10^6 の範囲にある。

ここで、実物の自動車 (Dodge Dart : 長さ 16.7 ft. , 幅 5.8 ft. , 高さ 4.3 ft.) では風速を 30 mph (13m/s) から 120 mph (54m/s) まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果、風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている⁽¹⁵⁾。これは、剥離点が物体角部等に固定されてレイノルズ数にほとんど依存しないためであり、このような特性を有する立方体等についてもレイノルズ数依存性はないものと考えられる。

一方、円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については、図 11 に示すようにレイノルズ数 Re が変化すると、剥離点が移動し、抗力係数等が変化することが知られている。表 2 の EPRI の円柱の風洞試験結果⁽¹⁵⁾は $Re=1.3 \times 10^6$ の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる (例えば、相対風速 69m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は $Re=5 \times 10^5$ 程度)。また、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5m × 幅 1.6m, 風速 : 3.0~16.5m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100mm × 模型長 1000mm) を対象として、 $Re=3 \times 10^4$ から 1×10^5 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

EPRI の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には、レイノルズ数条件に大きな違いがあるが、図 12 に示す通り風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ はレイノルズ数にほとんど依存せず、表 2 に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。

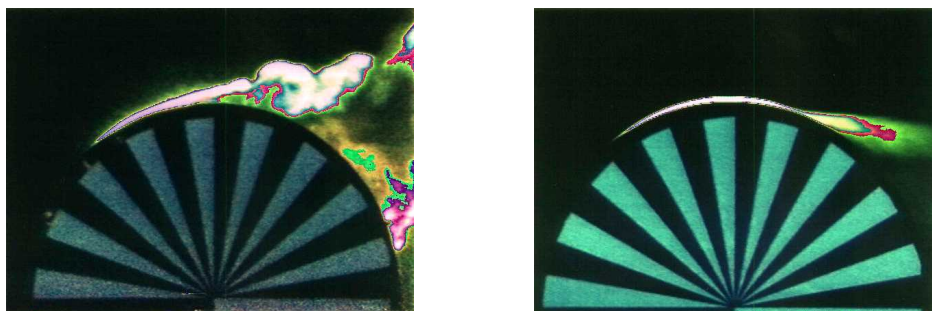


図 11 可視化した円柱周りの流れ (左 : $Re \approx 4 \times 10^4$, 右 : $Re \approx 2 \times 10^5$)

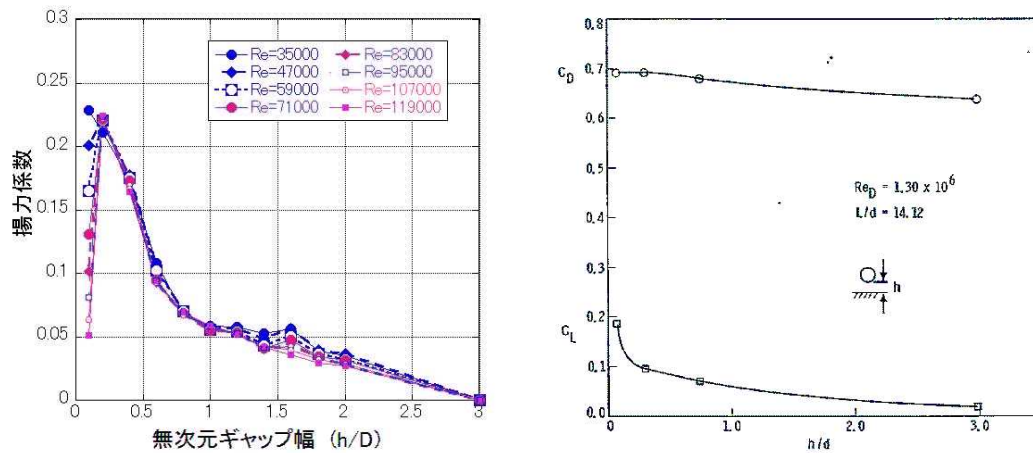


図 12 (左) 電力中央研究所の風洞試験⁽¹⁹⁾ ($Re=3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$) と
(右) EPRI の風洞試験⁽¹⁵⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) で得られた円柱揚力係数

(4) 揚力の高さ依存性

この地面効果による揚力は高さとともに減衰するので、既往の風洞実験の結果⁽¹⁵⁾⁽²²⁾を考慮して、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度であるとき消滅すると仮定した。

具体的には、地面から z の距離 (高度) にある物体に作用する揚力加速度 L を以下の関数形でモデル化した。(Z: 物体底面の高度)

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (10)$$

ただし、 $f(Z/d)$ は、EPRI の風洞実験結果⁽¹⁵⁾ を参考に、以下の反比例式とした。

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\}, & Z = z - d/2 \quad (Z \leq 3d) \\ Z = 0 & (Z > 3d) \end{cases} \quad (11)$$

また、以下において、塊状物体 (自動車)、柱状物体 (角柱、円柱)、板状物体 (平板) の風洞試験結果を踏まえ、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度で消滅するとした仮定が適切であることを確認する。

① 塊状物体 (自動車) の揚力の高さ依存性

自動車の揚力係数は、EPRI の風洞試験⁽¹⁵⁾にて、地面及び風洞中央 ($h/d \approx 3.5$) に設置した場合にて計測されており、図 13(a)に示すように流入角 (0° は正面、 90° は側面に風を受ける角度) に依存した揚力係数が得られている。

また、図 13(b)にて、EPRI の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。EPRI の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と

同じ姿勢に保たれているため、空中においても揚力係数がゼロとはならないが、実際に飛来する自動車の姿勢はランダムに変化することから、平均的な揚力係数は本モデルでの代用揚力係数に近い物と考えられる。

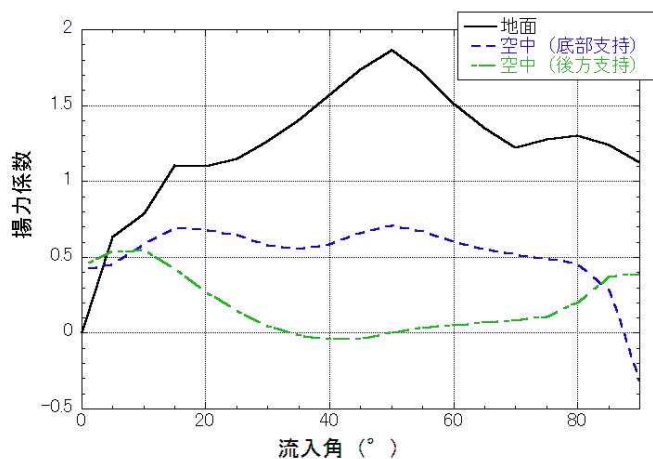


図 13(a) 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

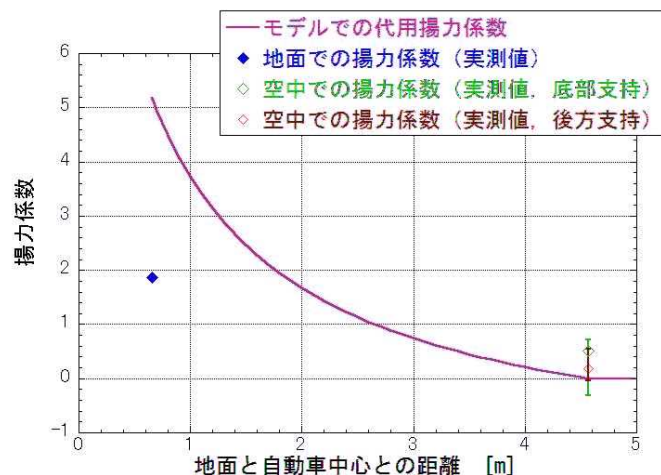


図 13(b) 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

②柱状物体（角柱・円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6m，風速：3.0～16.5m/s）にて測定しており、図 14 にその結果を示す。角柱の場合、地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となるので、正の揚力を与える本モデルの代用揚力式（図 14 の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は、EPRI の風洞試験⁽¹⁵⁾にて測定しており、図 15 に示すように本モデルの代用揚力係数（図 15 の赤線）は実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため、保守的な結果となっていることが分かる。

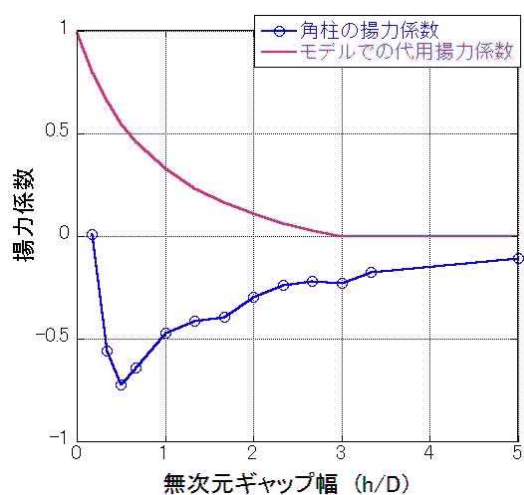
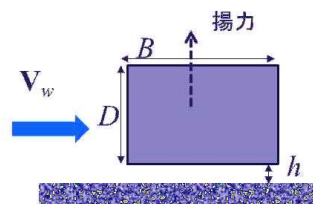


図 14 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係
(幅 B=80mm×高さ D=60mm×模型長 1000mm)



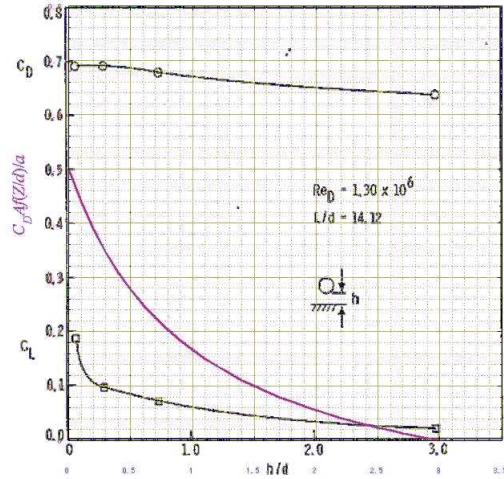


図 15 円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

③板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は、平面的な形状を有する翼（迎角 0° ）の試験結果⁽²⁰⁾に基づき考察すると、本モデルで代用した揚力係数（図 16 の赤線）は実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりも概ね大きな値となっている。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数はさらに小さいものと考えられる。

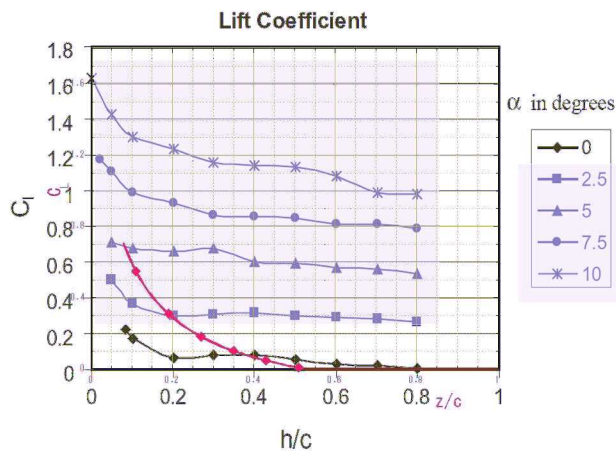


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

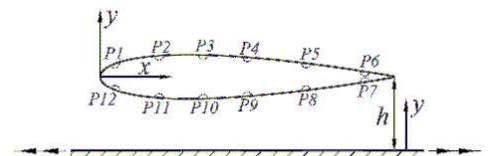


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

図 16 翼の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(5) 飛来物の運動方程式

上記(1)～(4)を踏まえ、重力加速度 g 、上向きの単位ベクトル \mathbf{k} を用いて、飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - (g - L) \mathbf{k} \quad (12)$$

飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(t)$ と速度 $\mathbf{V}_M(t)$ の時刻歴の計算には陽解法(一定加速度法)を用いた。具体的には、時刻 $t = \tau$ における飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(\tau)$ と速度 $\mathbf{V}_M(\tau)$ を既知として、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度と位置を以下の式で求めた。ただし、 $\mathbf{A}(\tau)$ は上記運動方程式の右辺に対応する時刻 $t = \tau$ における加速度ベクトルである。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \Delta\tau \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau) \Delta\tau + \frac{\mathbf{A}(\tau) \Delta\tau^2}{2} \quad (14)$$

$\mathbf{A}(\tau)$ の計算には、時刻 $t = \tau$ における風速場も必要であるが、初期に原点に位置する竜巻の中心が x 軸上を移動速度 V_{tr} で移動することを仮定しており、任意の時刻での風速場を陽的に求められるため、飛来物速度・位置を算出することができる。

(6) 飛来物の運動方程式 ((12)式) に関する考察

飛来物運動の物理モデルの模式図を図 17 に示す。地上面の物体(図 17 の状態 A) が浮上するには、地面からの反力が消滅 ($R < 0$, つまり $mg < F_L$) する条件で浮上し、浮上後は、(12)式を成分表示した以下の飛来物の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,x} - V_{M,x}) \quad (15)$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,y} - V_{M,y}) \quad (16)$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,z} - V_{M,z}) - g + L \quad (17)$$

ここで、飛来物速度 $\mathbf{V}_M = (V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ 、竜巻風速 $\mathbf{V}_w = (V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$ であり、右辺第 1 項が流体抗力 F_D の加速度を表しており、(14)式の右辺第 3 項が地面効果による揚力 F_L の加速度を表している。上記の式で、物体が静止している状態(上記の式(15)～(17)で飛来物速度 \mathbf{V}_M を 0) を仮定すると、以下の式となる。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,x} \quad (15')$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,y} \quad (16')$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad (17')$$

フジタモデルでは、物体が地面上にある場合（図 17 の状態 A）では上昇速度はゼロに近く、地面で静止している飛来物が受ける上昇速度はほぼゼロであるため、式(17')の右辺第 1 項は右辺第 2、第 3 項に比べてはるかに小さな量となり、以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} \approx -g + L \quad (18)$$

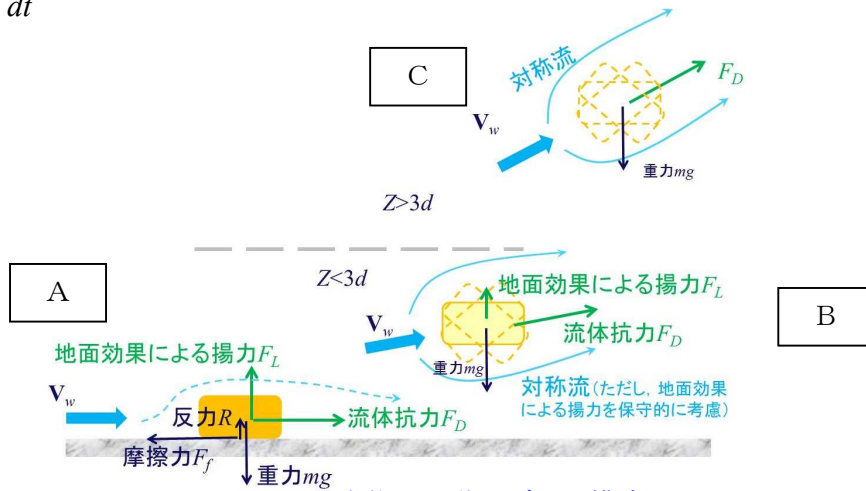


図 17 飛来物の運動モデルの模式図

(A : 地面上, B : $Z < 3d$ の高度範囲, C : $Z > 3d$ の高度範囲)

例として、竜巻コア半径 30m, 最大風速 69m/s の竜巻が原点に位置し x 方向に 10m/s で移動する場合、点(0, -30m)における式(17')の右辺第 1 項の値 (z 方向抗力 (流体抗力) による加速度) と第 3 項の値 (地面効果による揚力加速度) を図 18 に示す。

図 18 より、地面上 ($z=0$) においては、z 方向抗力による加速度は十分小さく、地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。

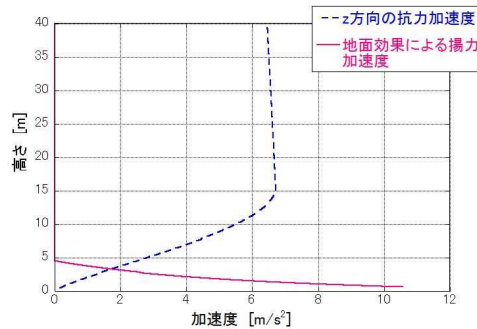


図 18 地面近傍の飛来物に作用する z 方向の加速度
(飛来物の特性 : $0.5 \rho C_D A / m = 0.004 \text{ [m}^{-1}\text{]}$, $d=1.31 \text{ [m]}$)

なお、高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦の場合は、上昇風速が水平風速の約 60%にも達するため、地面から非現実的な風の噴出が発生する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが、ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず、地面効果は物理的に発現しにくいいため、ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向による揚力 L を付加していない（図 19）。

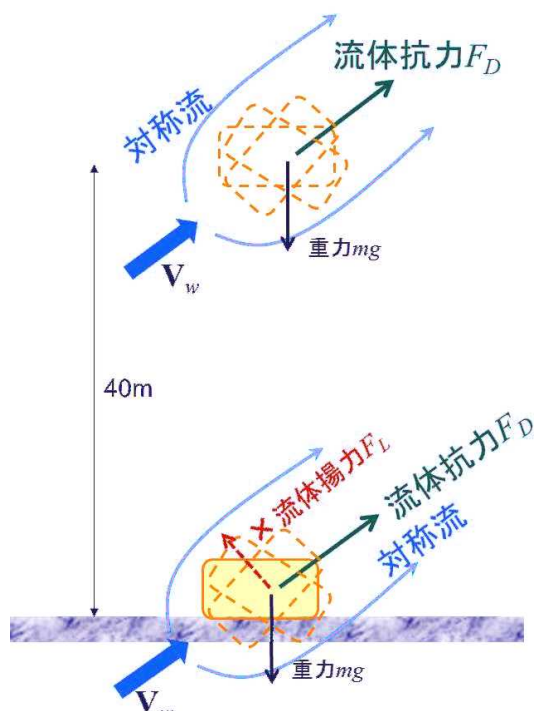


図 19 ランキン渦の場合の飛来物の運動モデルの模式図

5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛来速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体の受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため、米国 NRC ガイド⁽²⁾ に記載されている方法（物体の 1 点配置）と、物体を多点数配置した場合の飛来速度の違いを比較した。配置の違いについて、図 20 に示す。1 点配置の場合は、特定位置（竜巻進行方向の竜巻半径の位置 $(x, y) = (R_m, 0)$ ）に物体 1 個を設置する。また多点数配置の場合は、竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置する。その上で飛散させた物体の内、最も速度が大きくなったものをその物体の飛来速度とする。

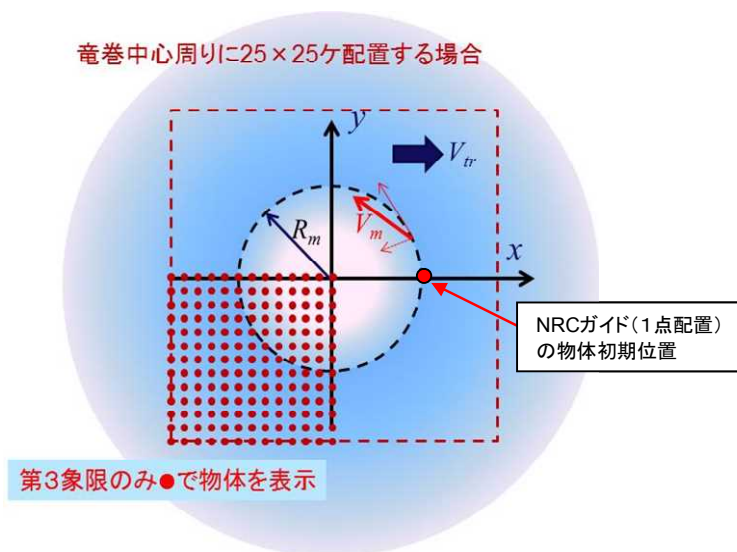
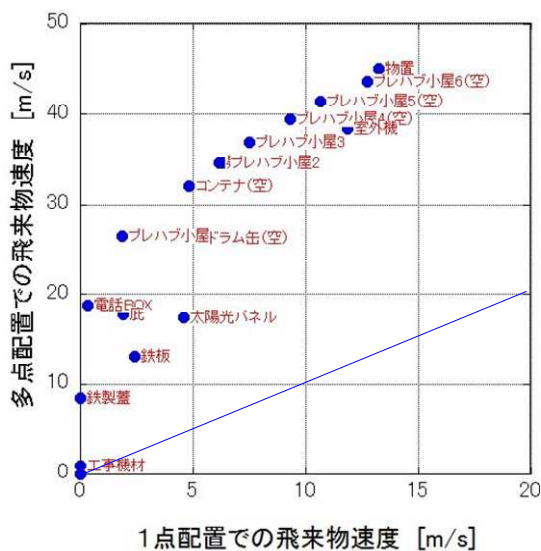


図 20 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

評価条件として、竜巻の最大風速を 69m/s とし、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、評価ガイドの記載より竜巻の移動速度 V_{tr} を 10m/s、竜巻コア半径 R_m を 30m とする。飛散させる物体のパラメータとして、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾に掲載されている物体の飛行定数 (5.1 節の C_{DA} を質量で割った値: $C_{DA}/m(\text{m}^2/\text{kg})$) を用いた。図 21 に比較結果を示す。

米国 NRC で用いられている 1 点配置の手法と比較し、多点数配置の手法では、飛行定数の大きい物体の多くが 1 点配置に比べて大きな飛来速度となった。多点数配置することで、その竜巻風速場における最大風速 (最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点) を受ける物体が出てくるため、このような結果となったと考えられる。

したがって、物体を多点数配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられるため、本検討における方法として適用することとする。



物体のパラメータ	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	$C_D A/m$ (m^2/kg)
フォークリフト	3.60	1.10	2.10	3600	0.0026
トラック	5.00	1.90	1.30	4750	0.0026
消火栓BOX	0.50	0.50	1.10	250	0.0036
乗用車	3.10	1.60	1.30	1430	0.0052
工事機材	2.44	0.65	1.20	610	0.0058
プレハブ小屋1	5.00	5.00	3.00	4400	0.0083
コンテナ(空)	2.40	2.60	6.00	2300	0.0105
昇降機かご	1.20	1.20	2.80	480	0.0113
プレハブ小屋2	1.85	1.85	2.60	730	0.0119
プレハブ小屋3	4.60	2.30	3.30	1850	0.012
プレハブ小屋4(空)	5.00	5.00	3.00	2400	0.0153
電話BOX	0.30	0.30	0.40	13	0.0169
プレハブ小屋5(空)	1.85	1.85	2.60	460	0.0189
プレハブ小屋6(空)	4.60	2.30	3.30	1000	0.0222
物置	1.80	0.90	1.50	120	0.0315
室外機	0.80	0.25	0.30	10	0.0343
コンクリート板	1.50	1.00	0.15	540	0.0021
底	11.00	2.10	0.20	680	0.0242
鉄製蓋	0.70	0.50	0.03	6.8	0.0364
鉄板	2.00	0.25	0.04	7.6	0.0486
太陽光パネル	1.20	1.00	0.05	14.5	0.0582
鉄骨部材	4.20	0.30	0.20	135	0.0065
鉄パイプ1	2.00	0.05	0.05	8.4	0.0057
鉄パイプ2	1.00	0.05	0.05	4.2	0.0059
ドラム缶(空)	0.90	0.60	0.60	24	0.0203

図 21 1点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較 (左) と物体のパラメータ (右)

前頁の図 20 に示す物体の多点多点配置 (竜巻半径の 4 倍の正形状の領域に 51×51 個の物体を配置) を初期状態として適用したが、この手法は、物体の直上に竜巻を発生させており、竜巻発生地点の不確定についても考慮した設定となる。

図 22 に遠方から物体に接近する竜巻と、物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。実際の竜巻に遭遇する状況 (海上で竜巻が発生して上陸する場合など) を考慮すると、竜巻は遠方から物体に近づくため、最大風速より低い風速に曝され、飛散することになる。しかし、物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで、実際の竜巻による飛散と比較して、より厳しい結果を与えることになる。

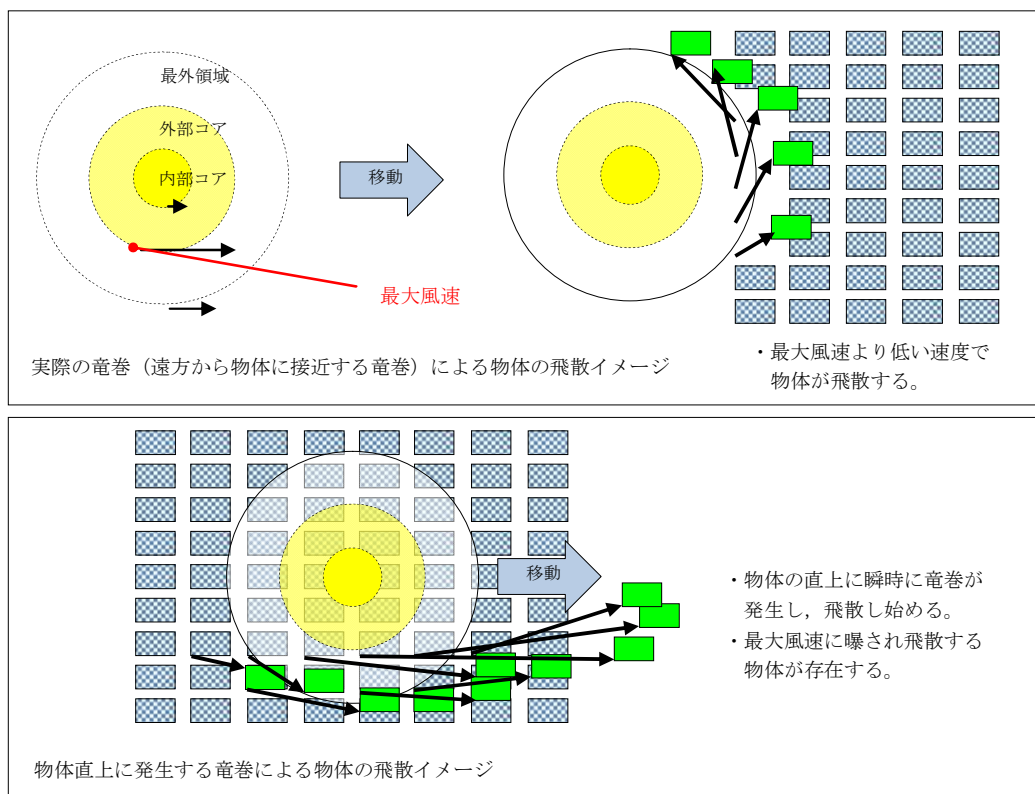


図 22 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

この物体を多点多数配置する方法と、竜巻を直上に発生させる方法を組み合わせることにより、必ずその竜巻による最大風速に曝される物体が発生するため、竜巻が物体に与える速度の不確定性を考慮することができると考えられる。

5.3 飛来物評価法まとめ

飛来物の浮上・飛散モデルにおいて、実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで、浮上に関する不確定性を考慮できるような設定とした。

また、物体を多点多数配置し、その物体直上での竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより、竜巻風速場内での物体が受ける風速の不確定性を考慮し、その竜巻において最大となる飛来速度が評価できるような設定とした。

以上により、フジタモデルを用いて飛来物の飛散速度評価を行う場合でも、竜巻による物体飛散の不確定性を考慮した評価結果が得られるものと考えられる。

なお、参考として図 23 に本検討の条件設定による、物体の飛散イメージを示す。同じ物体でも、受ける風速によって大きく飛散状況が変わる様子が分かる。

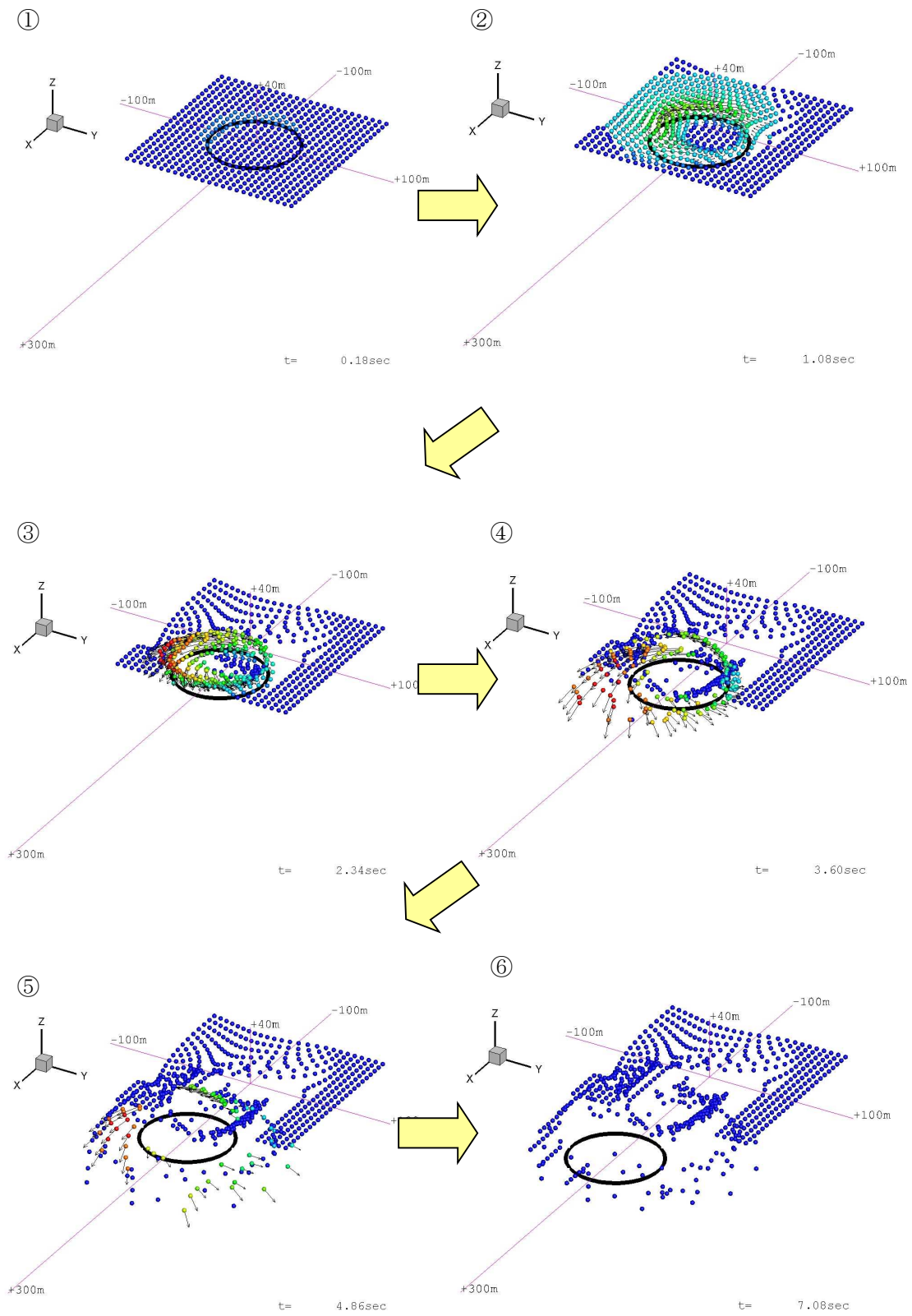


図 23 竜巻による物体の飛散イメージ

6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までで、フジタモデルの風速場を用いる優位性や、飛来物評価を行う上で考慮している事項等について説明した。

本節では、フジタモデルの風速場や、前節の飛来物評価法を適用した場合、実際の事例等に比べて妥当な結果となるかどうかの検証を行った。

6.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタスケールで示されている自動車の被災状況を表3に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速(69m/s, 92m/s, 116m/s)を用いて、フジタモデルによる自動車飛散解析を行った。その結果を表4に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況と概ね合致していると考えられる。なお、ランキン渦モデルを用いた場合は、F2相当の風速(69m/s)で評価しても大きく飛散することになり、フジタスケールの定義の観点からは過度に保守的な結果となる。

表3 フジタスケールで示されている自動車の飛散状況

フジタスケール	風速 [m/s]	自動車の被災状況
F2	50-69	cars blown off highway (自動車が道路からそれる)
F3	70-92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)
F4	93-116	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる, または, かなりの距離を転がる)

表4 フジタモデルによる自動車の飛散解析結果

フジタスケールとの対応	最大水平風速 [m/s]	竜巻接線速度 [m/s]	竜巻飛散速度 [m/s]	計算結果		
				速度[m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2	69	59	10	1	1.4	0
F3	92	79	13	23	34	1.1
F4	116	99	17	42	59	3.1

6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978年4月17日に米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F3 の竜巻が来襲した⁽²³⁾。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径8~10インチの木が折れた事例等も確認されており、図24は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、通過時の竜巻規模はF2であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは8フィート、直径(内径)は8インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデルあるいはランキン渦モデルを風速場として用いた飛来解析を行った。その計算条件は過去の記録に基づき表5の通りとした。



"Courtesy of HathiTrust" <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=1up;seq=65> ⁽¹⁹⁾

図24 Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

被害状況	<ul style="list-style-type: none">パイプを収納した木箱(一部は二段重ね)は浮上せずに転倒し、パイプが周辺7m~9mに散乱。 <p>(Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8 ft long.⁽¹⁹⁾)</p>
------	--

表5 Grand Gulf 原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現をする上での計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	67m/s
	最大接線風速	53.6m/s
	移動速度	13.4m/s
	コア半径	45.7m
飛来物条件	直径（外径）	9 inch (0.2286m)
	物体高さ	0.229m
	密度	1700kg/m ³
	飛行定数 C _D A/m	0.0080 m ² /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数 51×51 個，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内（x, y=[-2R_m, +2R_m]) に等間隔配置。 ・設置高さ 1 m（パイプが収納されていた木箱が 2 段重ねで配置されていた状況を想定。） 	

計算結果を表 6 に示す。フジタモデルを風速場とした場合は、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況と概ね合致している。

なお、参考としてランキン渦モデルで評価した場合、飛散距離や最大水平速度に大きな違いがあり、実際の報告と比較して過度に保守的な評価結果となる。

表6 Grand Gulf 原子力発電所のパイプの飛散計算結果

風速場モデル	初期物体高さ	計算結果(TONBOS)		
		飛散距離	飛散高さ※2	最大水平速度
フジタモデル	1 m	1.2 m	0.0 m	4.9 m/s
ランキン渦モデル	1 m※1	42.6 m	0.34 m	30.7 m/s
ランキン渦モデル	40 m	227 m	0.34 m	40.9 m/s

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

※2：初期物体高さからの飛散高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下、佐呂間竜巻と呼ぶ。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている⁽²⁴⁾。被災状況を図25に示す。この事例では被災時に4tトラックに乗員2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている（図25左上画像の②）。また、4tトラックの他に2台の自動車（図25左上画像の③と⑥）について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお、竜巻飛来物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。



図25 佐呂間竜巻（2006.11.7）による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）⁽²⁴⁾
 文献(23)で示されている竜巻被害の方向を ➡ で加筆

ここでは、フジタモデルを風速場として用いた車両（4tトラック、乗用車）の飛散評価を行い、実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行った。方法としては、下記の2通りとした。

- (a) 竜巻特性や飛来物（4tトラック、乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- (b) 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証

(a) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(i) 4tトラックの飛散解析

再現解析の条件として、入手可能なデータ⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を表7のように設定した。初期配置の条件として、配置個数は1個とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速60m/s以下では浮上しない設定となっている。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認した。

車両と竜巻中心との距離を18m、20m、22mとした場合の解析結果を表8及び図25に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向と概ね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できた。

表7 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s	
	最大接線風速	70m/s	
	移動速度	22m/s	
	コア半径	20m	
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D の仕様を採用。	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
		車両重量	4000kg
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0056 m ² /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数1個。 竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60m/s以下では浮上しない。 設置高さ0m 		

表8 佐呂間竜巻での4tトラックの飛散計算結果

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	45.4 m	2.8m	25.8 m/s
2	20m	35.5 m	2.3m	22.2 m/s
3	18m	25.9 m	1.7m	18.8 m/s

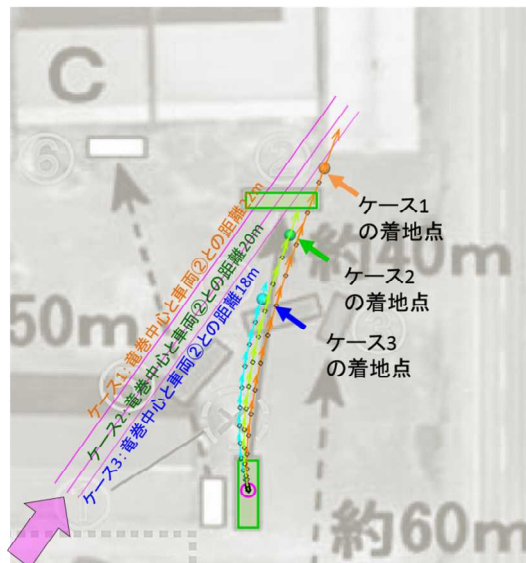


図 25 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

(ii) 乗用車の飛散解析

白い乗用車 (図 25 の⑥) の被災事例を対象として、物体を 1 点初期配置した条件で最大水平速度等を計算した。

乗用車の計算条件について、表 9 に示す。

表 9 佐呂間竜巻の乗用車の計算条件

竜巻条件	表 7 と同様		
飛来物条件	乗用車 〔 トヨタカローラ を仮定 〕	車両長さ	4.40m
		車両幅	1.70m
		車両高さ	1.50m
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0097 m^2/kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数 1 個 竜巻は遠方から物体に近づくが、風速 60m/s 以下では浮上しない 設置高さ 0 m 		

乗用車と竜巻中心との距離を、18m、20m、22m とした場合の解析結果を表 10 及び図 27 に示す。飛散距離についてはケース 1 で概ね合致している。

飛散方向については、飛び出し方向は概ね合致しているものの、最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車 (白) が建物 (A 棟) に近接して駐車していたため、この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお、赤い乗用車 (図 25 の③) について評価した場合は、竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となった。ただし、実際には、赤い乗用車は全壊・飛散した

プレハブ建物（軽量鉄骨造2階建て、図25のA）の直ぐ下流側に駐車しており、その瓦礫の影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

表10 佐呂間竜巻での乗用車の飛散計算結果

解析 ケース	乗用車と竜巻中心 との距離	計算結果(フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	51.9 m	3.6m	28.9 m/s
2	20m	43.5 m	3.4m	24.7 m/s
3	18m	34.7 m	2.9m	21.1 m/s

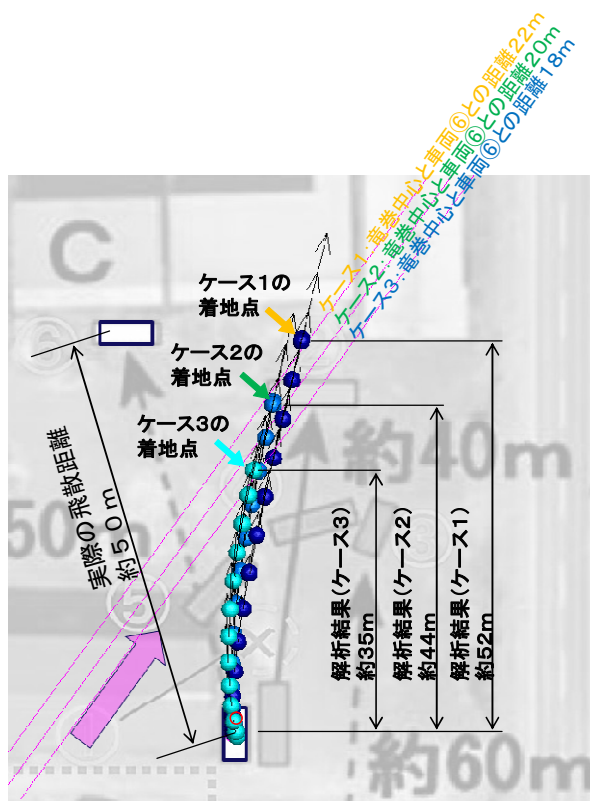


図27 フジタモデルによる乗用車飛散の再現解析結果

(b)原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証⁽²⁶⁾

ここでは、原子力発電所に適用する飛来物評価法の竜巻条件・物体初期配置条件で前述の佐呂間竜巻における4tトラックおよび乗用車の被災事例を評価し、佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）との結果を比較する。

(i) 4tトラックの飛散解析

計算条件について表11に示す。竜巻条件としては、最大風速を92 m/sとし、その他の特性量については、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（原子力規制委員会、2013）に例示されている方法に従い、移動速度 V_{tr} を14 m/s（最大風速の15%）、竜巻コア半径 R_m を30 mとした。

表11 原子力発電所に適用する飛来物評価法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	表7と同様	
初期配置	・物体個数 51×51 個，竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内（ $x, y=[-2R_m, +2R_m]$ ）に等間隔配置。 ・設置高さ0m	

表12に実際の被災状況と、原子力発電所に適用する飛来物評価法の結果の比較を示す。また、図28に被災後の4tトラックの状況を示す。

フジタモデルによる飛散評価結果として、4tトラックの最大飛来物速度は36 m/s、最大飛散高さは4.9 m、最大飛散距離は63.4 mとなった。

実際の4tトラック飛散距離は約40mであり、フジタモデルによる飛散距離の評価結果はこれを上回った。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較は出来ないものの、4tトラックの乗員2名が存命であったこと、被災後の4tトラックがほぼ元の外形を留めていることなどから、原子力発電所に適用する飛来物評価法で飛散解析をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお、参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施した。ランキン渦モデルによる評価では、最大飛散高さ、最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して非常に保守性が大きい結果となっていることが分かる。

表 12 実際の被災状況と「原子力発電所の飛来物評価法」の結果の比較

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ※2	最大水平速度
フジタモデル (地上)	63.4m	4.9m	36.0m/s (毎時 130 km)
ランキン渦モデル (地上※1)	193.7m	11.7m	43.9m/s
ランキン渦モデル (40m)	254.9m	11.7m	43.9m/s
実際の被災状況	約 40 m	4t トラックの運転席に 乗車していた乗員 2 名 が幸いも存命で救出さ れ、搬送先の病院で聞き 取り調査に応じており (24) , 被災した 4t トラ ックが地面からは 4.9 m 以上の高所から落下し たとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外 形を留めていること が示されており(20) , 実際の飛来物速度は 本解析で得られた最 大飛来物速度(約 130 km/h) を遙かに下回 るものと推察でき る。

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

※2：初期物体高さからの飛散高さ。



図 28 竜巻による被災後の 4 t トラックの様子(24) (25)

(ii) 乗用車（白）の飛散解析

4t トラックの場合と同様に、原子力発電所に適用する飛来物評価条件で乗用車の飛散解析を行った場合の結果を表 13 に示す。

乗用車の場合も、フジタモデルによる評価が実際の被災状況を包含する結果となっている。

表 13 「原子力発電所の飛来物評価法」の評価結果の比較（乗用車の場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ ^{※2}	最大水平速度
フジタモデル (地上)	82.3m	4.2m	44.1m/s
ランキン渦モデル (地上 ^{※1})	269.6m	39.4m	49.6m/s
ランキン渦モデル (40m)	305.80m	39.4m	49.6m/s
実際の被災状況	約 50m	—	—

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

※2：初期物体高さからの飛散高さ。

7. 飛散以外の挙動に対する考慮

前節までで、飛来物の竜巻による挙動のうち、飛散に関する評価手法について説明をした。実際の竜巻による飛来物の挙動としては、飛散だけではなく、横滑りや転がりによる挙動が発生することも考えられるため、本節では、これらの飛来物の挙動について、下記の2点に分けて考察する。

- (a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響
- (b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

(a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮」に記載の通り、本検討においては、竜巻を直上に発生させる方法を採用していることから、実際には横滑りや転がりを伴い移動する物体も強制的に高速域に配置され、浮上をして飛散することになる。この場合、空中では地面の摩擦力を受けないため、実際に比べて大きな水平速度が得られることになる。

また、浮上後に地面に衝突する場合は、運動エネルギーの大部分は物体や地面の変形・破損等で消費されることから、落下後の横滑りや転がりによる移動距離は実際には小さいものと考えられる。

「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」における飛散した4tトラックや乗用車は、実際には飛散だけではなく、横滑りや転がりを伴ったものと考えられるが、飛散解析より得られた飛散距離や最大水平速度は、実際の被災状況よりも保守的な評価となっていることから、飛散過程における不確実性を裕度として包含している。

(b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体が、竜巻により横滑りや転がる場合、地面での摩擦力の影響を受けながら移動することから、移動距離や水平速度は十分に小さいものと考えられる。

また、物体と竜巻防護施設の間に、障害物となるフェンス等がある場合には、横滑りや転がった物体が竜巻防護施設に到達することは阻止される。

以上より、飛散しない物体が横滑りや転がりにより、障害物の影響を受けず、竜巻防護施設と衝突することが想定される場合については、横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し、包含されない場合には固縛等の措置を実施する。

8. まとめ

フジタモデルは、米国 NRC による要望で実際の竜巻観測記録を基に考案された風速場モデルであり、米国 DOE の重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。フジタモデルは、他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を現実的に評価することができる点が大きなメリットである。

これは、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(a) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析」において、フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が実際の飛散状況と概ね合致していることから、確認することができる。

また、フジタモデルにより算出される風速 (V_w) は、飛来物の飛散評価のインプットとして用いるものであり、設計竜巻の最大風速の算出にあたっては保守性を確保したうえで、「5. 飛来物評価における不確定性の考慮」の通り、竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により、不確実性も含めて飛来物速度等を保守的に評価できるようにしている。

これにより、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(b) 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証」では、本評価手法を用いることでフジタモデルにおいても実際の飛散状況に対して、保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上・飛散評価を行うことのメリットは、発電所敷地内に数多く存在する物の中から、竜巻による飛来物化の影響度合いを、浮上の有無の観点を含め、より正確に把握できることである。竜巻飛来物の影響（浮上の有無，飛散高さ，飛散距離，最大速度等）を正確に捉えることにより，飛来物発生防止対策や評価対象施設の防護対策の範囲や強度について，適切な保守性を確保した上で実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。

評価全体として一定の保守性を確保しつつ，適切な竜巻対策によりプラント全体の安全性を向上させるため，当社の竜巻影響評価については，フジタモデルを適用することとする。

9. 参考文献

- (1) 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 2013.
- (2) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (3) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (4) 東京工芸大学, 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書, 2011.
- (5) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978.
- (6) Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99(4), pp.249-256, 2011.
- (7) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-2002, 2002.
(<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0302/ML030220224.pdf>)
- (8) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980
- (9) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987.
- (10) J. R. McDonald, Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
(<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (11) McDonald, J. R., T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp.63-72, 2001
- (12) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico (Docket No. 70-3103)
- (13) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014.
- (14) 日本鋼構造協会, 構造物の耐風工学, p82
- (15) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.
- (16) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良, 開水路中に水没設置された立方体および棧粗度の流体力, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.67, No.4, I_1141-I_1146, 2011.

- (17) 松宮央登, 中岡宏一, 西原 崇, 木村吉郎:太陽光発電パネルに作用する空気力の地面効果に関する風洞実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 446-454, 2014.
- (18) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎, 護岸ブロックの抗力・揚力係数、および相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第44巻, pp1053~1058, 2000.
- (19) 江口 讓, 西原 崇, 水流動試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明, 電力中央研究所 研究報告 U96050, 1997.
- (20) M. R. Ahmed, S. D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, pp. 633-647, 2005.
- (21) Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G., Unsafe at any (wind) speed? -Testing the stability of motor vehicles in severe winds-, Vol. 83, No. 12, pp. 1821-1830, 2002.
- (22) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 80, pp. 263-286, 1999.
- (23) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
- (24) 札幌管区气象台:平成18年11月7日から9日に北海道(佐呂間町他)で発生した竜巻等の突風. 災害時気象調査報告, 災害時自然現象報告書, 2006年第1号, 2006.
(<http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/yohou/saigai/saroma/saroma.html>にて閲覧可能。)
- (25) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006年佐呂間町竜巻被害調査報告. 建築研究所災害調査, 46, 2006.
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>)
- (26) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 (Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認), 日本機械学会論文集, vol. 81, No. 823, 2015.