

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-70-1 改6
提出年月日	平成30年8月24日

工事計画に係る補足説明資料

補足-70-1 【竜巻への配慮に関する説明書】

平成30年8月

日本原子力発電株式会社

補足説明資料目次

I. はじめに

1. 竜巻の影響を考慮する施設について
 - 1.1 防護対象施設の抽出について
 - 1.2 防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の選定について
 - 1.3 建屋開口部の調査結果について
 - 1.4 飛来物の選定について
 - 1.5 砂利等の極小飛来物による防護対象施設への影響について
 - 1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について
 - 1.7 隣接事業所からの飛来物が想定される施設の設計方針について
 - 1.8 東海第二発電所の竜巻影響評価の風速場モデルの適用について

1.4 : 今回ご説明分

I. はじめに

1. 概要

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を捕捉するものである。

本補足説明資料と添付書類との関連を表-1に示す。

- ・ V-1-1-2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち、
V-1-1-2-3「竜巻への配慮に関する説明書」

表-1 補足説明資料と添付資料との関連

工事計画添付書類に係わる補足説明資料（竜巻）	該当添付資料
1. 竜巻の影響を考慮する施設について	
1.1 防護対象施設の抽出について	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.2 防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設の選定について	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.3 建屋開口部の調査結果について	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.4 飛来物の選定について	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.5 砂利等の極小飛来物による防護対象施設への影響について	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について	V-1-1-2-3-3 竜巻防護に関する施設の設計方針
1.7 隣接事業者からの飛来物が想定される施設の設計方針について	V-1-1-2-3-3 竜巻防護に関する施設の設計方針
1.8 東海第二発電所の竜巻影響評価の風速場モデルの適用について	V-1-1-2-3-3 竜巻防護に関する施設の設計方針

1.4 飛来物の選定について

1. 飛来物の選定について

発電所構内において屋外に保管している資機材及び駐車している車両については、外部事象防護対策施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋（以下「外部事象防護対象施設等」という。）への影響の有無を確認し、影響を及ぼすおそれがあるものについては、飛来物として選定し、固定、固縛又は外部事象防護対象施設等から離隔するなどの飛来物発生防止対策を講じる必要がある。

飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否を判定する手順について説明する。

1.1 飛散評価

飛来物源である資機材及び車両が、設計竜巻により飛来物化し、飛散した評価を行う。

飛散評価は、寸法、質量、形状並びにこれらの値より算出する空力パラメータ、並びに初期高さにより、解析コード「TONBOS」によって最大飛来速度、飛散高さ、水平飛散距離を算出される。以下に飛散評価に用いる数値を説明する。

なお、「TONBOS」で用いる設計竜巻の風速場モデルはフジタモデルとし、竜巻影響評価へのフジタモデルの適用については、別紙-1に示す。

(1) 空力パラメータの算出 ($C_D A / m$ (m^2 / kg))

空力パラメータは飛来物の各寸法（長さ×幅×奥行き(高さ)）より受圧面積を算出し、飛来物の質量及び抗力係数より算出する。a. 項に算出式、b. 項に計算例を示す。

a. 算出式

空力パラメータの算出は (1.1) 式により算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c (C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m} \dots (1.1)$$

m : 質量 (kg)

c : 0.33

C_{D1} , C_{D2} , C_{D3} : 抗力係数 (表-1, 図-1)

A_1 , A_2 , A_3 : 受圧面積 (m^2) (図-1)

表 1-1 飛来物の抗力係数

飛来物形状	C	C_{D1}	C_{D2}	C_{D3}
①塊状物体	0.33	2.0	2.0	2.0
②板状物体	0.33	1.2	1.2	2.0
③棒状物体	0.33	2.0	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)

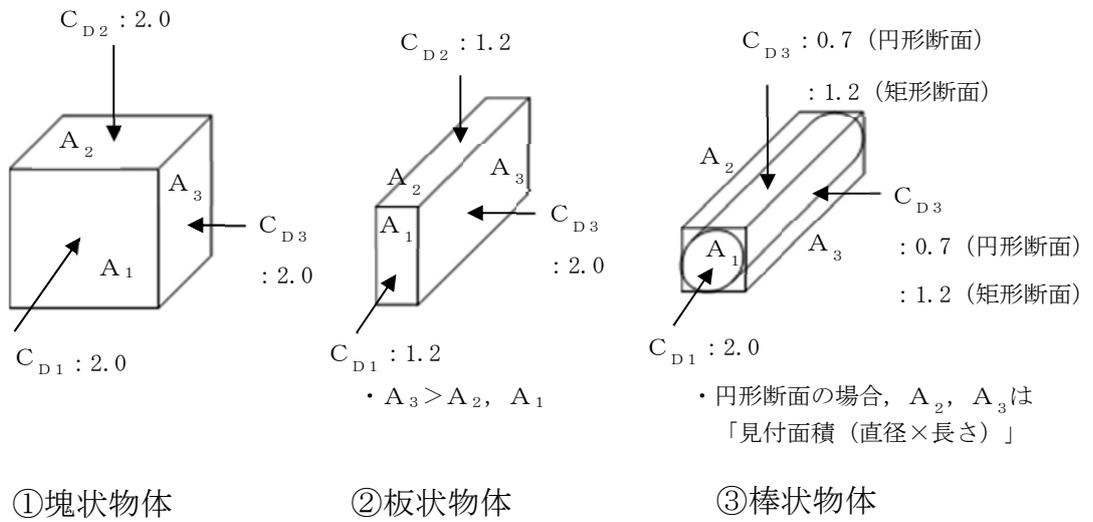


図 1-1 飛来物の形状と抗力係数の関係

b. 計算例

(a) 鋼製パイプ (棒状物体) (図-2)

長さ : 4.00 m 幅 : 0.15 m 厚さ : 0.15 m 質量 : 86 kg

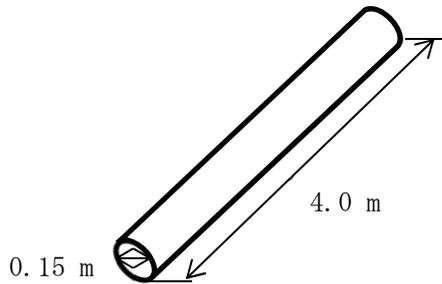


図 1-2 鋼製パイプ

円形断面であるので、

抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=2.0$ 、 $C_{D2}=0.7$ 、 $C_{D3}=0.7$ である。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c \left(C_{D1} A_1^{*\ 1} + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3 \right)}{m} \quad \text{より,}$$

※1 : 0.15 m の正方形断面として算出

空力パラメータは、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{0.33 \times (2.0 \times 0.15 \times 0.15 + 0.7 \times 0.15 \times 4.0 + 0.7 \times 4.0 \times 0.15)}{86} = 0.0034 \quad [\text{m}^2/\text{kg}]$$

(b) 鋼製材 (棒状物体) (図-3)

長さ : 4.20 m 幅 : 0.30 m 厚さ : 0.20 m 質量 : 135 kg

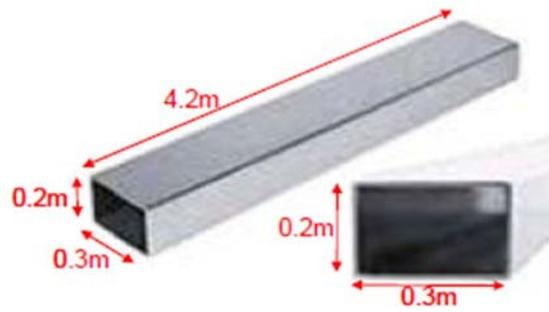


図 1-3 鋼製材

矩形断面であるので、

抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=2.0$ 、 $C_{D2}=1.2$ 、 $C_{D3}=1.2$ である。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c (C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m} \quad \text{より,}$$

空力パラメータは、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{0.33 \times (2.0 \times 0.2 \times 0.3 + 1.2 \times 0.3 \times 4.2 + 1.2 \times 0.2 \times 4.2)}{135} = 0.0065 \quad [\text{m}^2/\text{kg}]$$

(c) 車両 (塊状物体) (図-4)

長さ: 4.5 m 幅: 2.0 m 高さ: 1.6 m 質量: 2500 kg

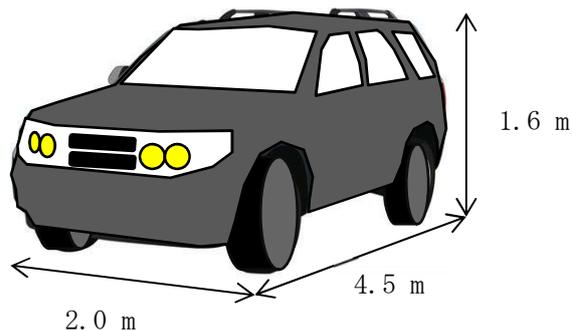


図 1-4 車両

塊状物体であるので、

抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=2.0$ 、 $C_{D2}=2.0$ 、 $C_{D3}=2.0$ である。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c (C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m} \quad \text{より,}$$

空力パラメータは、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{0.33 \times (2.0 \times 4.5 \times 2.0 + 2.0 \times 2.0 \times 1.6 + 2.0 \times 1.6 \times 4.5)}{2500} = 0.0052 \text{ [m}^2/\text{kg]}$$

(2) 初期高さ

飛散評価に必要な初期高さは、図-5 に示すとおり評価対象の飛来物と地表面との高低差であり、現地調査結果を踏まえて設定するか、配置位置が特定できず、高所にも配置される可能性のある評価対象は、発電所の配置等を考慮し適切に設定する。

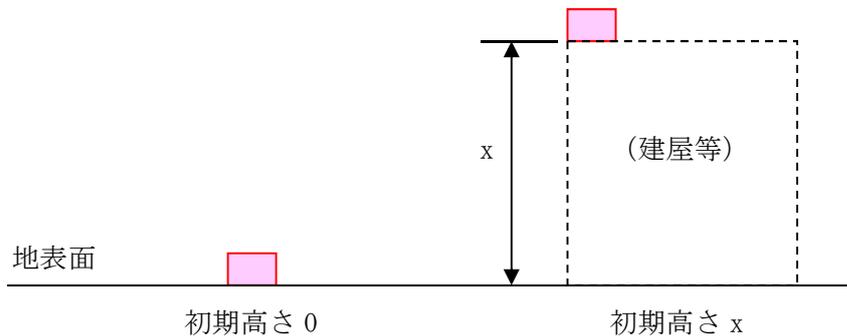


図 1-5 初期高さのイメージ図

(3) 飛来物の最大水平速度、飛散高さ及び飛散距離の算出

飛来物の仕様による入力条件をもとに、解析コード「TONBOS」を用いて、飛来物の最大速度、飛散高さ及び飛散距離を求める。図-6 に飛散距離及び飛散高さの飛跡のイメージを示す。

解析コード「TONBOS」の詳細については、添付書類「V-5-9 計算機プログラム(解析コード)の概要・TONBOS」に示す。

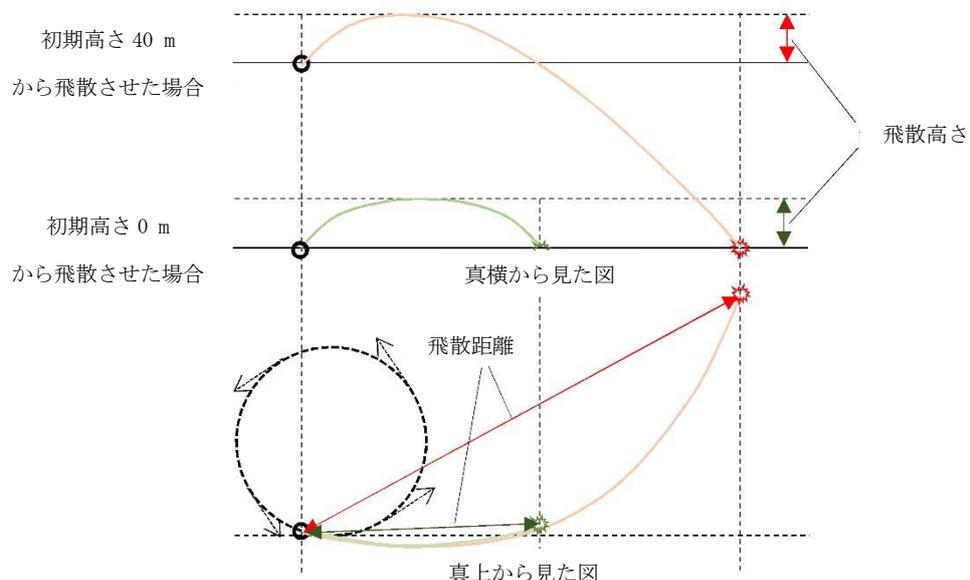


図 1-6 飛散評価における飛跡イメージ

表-2 に、(1) b. 項の計算例に示した、鋼製パイプ、鋼製材及び車両の飛散評価による各数値の算出結果を示す。

表 1-2 飛来物の最大速度等

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	棒状物体 (矩形断面)	塊状物体
	鋼製パイプ	鋼製材	乗用車
寸法 (m)	長さ×直径 4.0×0.15	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×高さ 4.5×2.0×1.6
質量 (kg)	86	135	2500
空力パラメータ (m ² /kg)	0.0034	0.0065	0.0052
初期高さ (m)	40	—*	0
飛来物の最大水平速度 (m/s)	38	51*	33
飛散高さ (m)	0	—*	2.3
飛散距離 (m)	115	—*	45

(備考) 鋼製材は東海第二発電所の設計飛来物であり、最大水平速度は竜巻影響評価ガイドの値を用いることとし、TONBOSでの飛散評価では決定しない。

(4) 運動エネルギーの算出

飛散評価によって算出された飛来物の最大水平速度により、運動エネルギーを算出する。

a. 運動エネルギーの算出式

飛来物の運動エネルギーEは下式によって算出する。

$$E = \frac{1}{2} M \cdot V^2$$

M：飛来物の重量(kg)

V：飛来物の最大水平速度(m/s)

b. 計算例

(a) 鋼製パイプ (棒状物体)

質量：86 kg 最大速度：38 m/s

$$\begin{aligned} \text{・運動エネルギー (水平)} &= m V_{\text{max}}^2 / 2 [\text{kJ}] \\ &= (86 \times 38^2) / 2 = 63 [\text{kJ}] \end{aligned}$$

(b) 鋼製材（棒状物体）

質量：135 kg 最大速度：51 m/s

$$\begin{aligned} \bullet \text{運動エネルギー（水平）} &= m V_{\max}^2 / 2 [\text{kJ}] \\ &= (135 \times 51^2) / 2 = 176 [\text{kJ}] \end{aligned}$$

(c) 車両（塊状物体）

質量：2500 kg 最大速度：33 m/s

$$\begin{aligned} \bullet \text{運動エネルギー（水平）} &= m V_{\max}^2 / 2 [\text{kJ}] \\ &= (2500 \times 33^2) / 2 = 1362 [\text{kJ}] \end{aligned}$$

(5) 貫通力の算出

飛来物の貫通力を、以下のコンクリートに対する貫通厚さの算出式に使用されている修正 NDRC 式 (①) 及び Degen 式 (②) 及び鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用されている BRL 式から算出する。

<修正 NDRC 式及び Degen 式>

$$\begin{aligned} \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 2 \quad \text{の場合} \quad \frac{x_c}{d} &= 2 \left\{ \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} \right\}^{0.5} \\ \frac{x_c}{\alpha_c d} \geq 2 \quad \text{の場合} \quad \frac{x_c}{d} &= \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} + 1 \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\frac{x_c}{\alpha_c d}} \right\} \text{①}$$

$$\begin{aligned} \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 1.52 \quad \text{の場合} \quad t_p &= \alpha_p d \left\{ 2.2 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right) - 0.3 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right)^2 \right\} \\ 1.52 \leq \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 13.42 \quad \text{の場合} \quad t_p &= \alpha_p d \left\{ 0.69 + 1.29 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right) \right\} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\frac{x_c}{\alpha_c d}} \right\} \text{②}$$

t_p : 貫通限界厚さ (cm)

x_c : 貫入深さ (cm)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)※

※ : コンクリート強度は、被衝突物毎に設定する。

D : 飛来物の直径 (cm)

(飛来物の衝突面の外形の最小投影面積に等しい円の直径)

M : 飛来物の重量 (kg)

V : 飛来物の最大水平速度 (m/s)

N : 飛来物の先端形状係数 (=1.14)

α_c : 飛来物の低減係数 (=1.0)

α_p : 飛来物の低減係数 (=1.0)

<BRL 式>

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5mv^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

T : 貫通限界厚さ(m)

d : 飛来物が衝突する衝突断面の等価直径(m)

(最も投影面積が小さくなる衝突断面の等価直径)

K : 鋼板の材質に関する係数(=1.0)

m : 飛来物の質量(kg)

v : 飛来物の飛来速度(m/s)

1.2 対策要否の判定

1.1 項にて算出した運動エネルギーが、以下に示す観点より設計飛来物に包含されていない物品については飛来物発生防止対策（固縛，固定又は外部事象防護対象施設等から離隔）を行う。飛来物源である資機材及び車両に対して，飛来物として選定し，飛来物発生防止対策の要否の判定をするフローを，図-7 に示す。

[飛来物発生防止対策要否の観点]

- ・ 鋼製材の運動エネルギー 176 kJ より大きいもの。
- ・ 鋼板の貫通力として貫通限界厚さが 32 mm よりも大きいもの。
- ・ コンクリートの貫通力として貫通限界厚さが 25.9 cm^{*} よりも大きいもの。

^{*} : コンクリート基準強度 250 kgf/cm² の場合の例

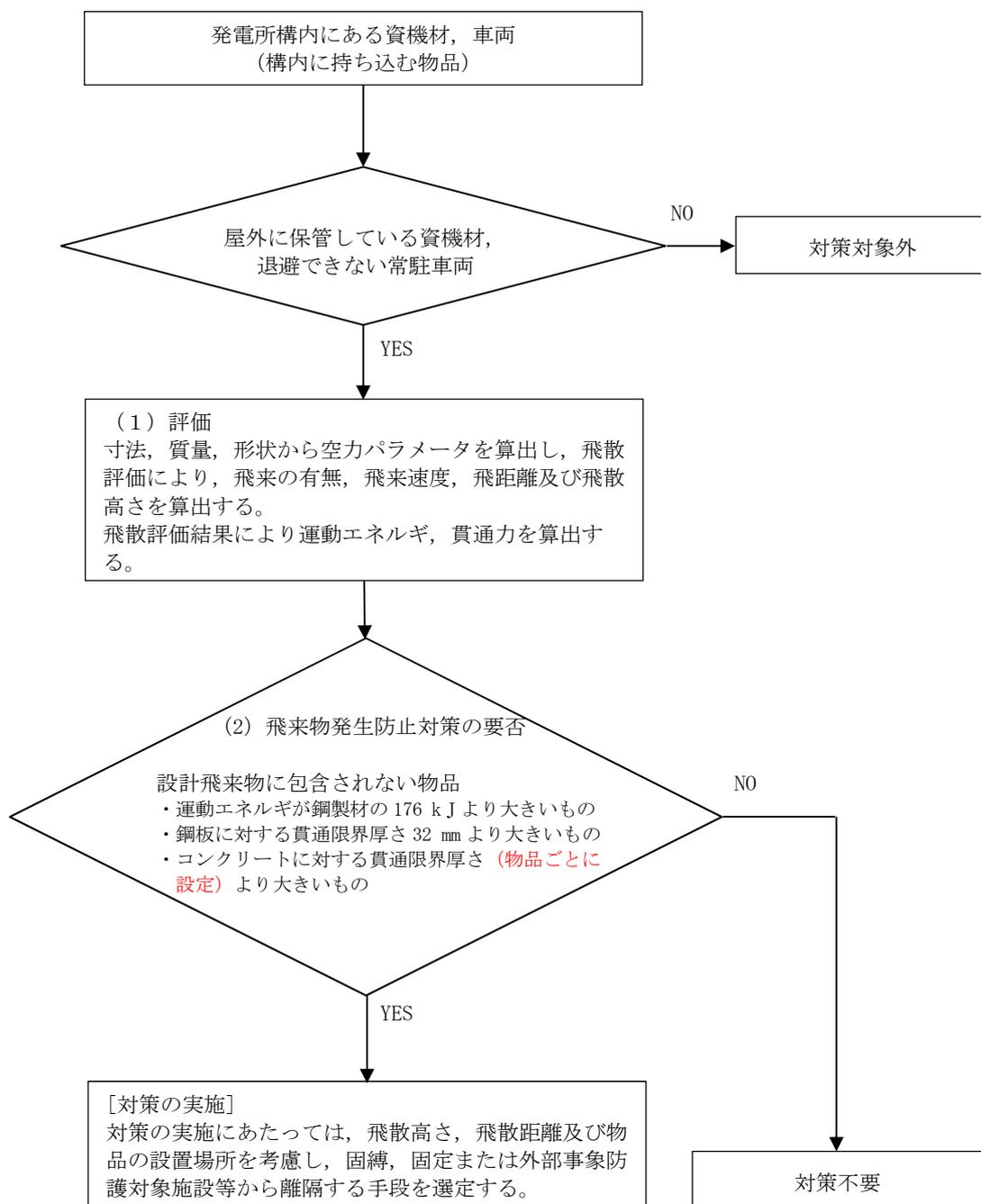


図 1-7 飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否の判定フロー

竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について

1. はじめに

「竜巻影響評価ガイド」に従い竜巻影響評価を行う上で、飛来物の挙動（飛散速度，飛散距離等）を評価するための竜巻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は，米国NRCの基準類に記載されている「ランキン渦モデル⁽¹⁾⁽²⁾」及び原子力安全基盤機構の「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」の報告書に記載されている「非定常乱流渦モデル（LES:Large Eddy Simulation）」の数値解析⁽³⁾があるが，今回の評価においては，**多数の飛来物源が想定される地上付近で竜巻の中心に向かう流れを考慮した3次元の風速場を持つ**，藤田哲也シカゴ大学名誉教授が考案した竜巻工学モデルDBT-77(DBT: Design Basis Tornado)⁽⁴⁾（以下「フジタモデル」という。）を選定した。

図 1-1 に，風速場モデルの選定及び飛散解析手法に関する検討フローを示す。また，図 1-2 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。

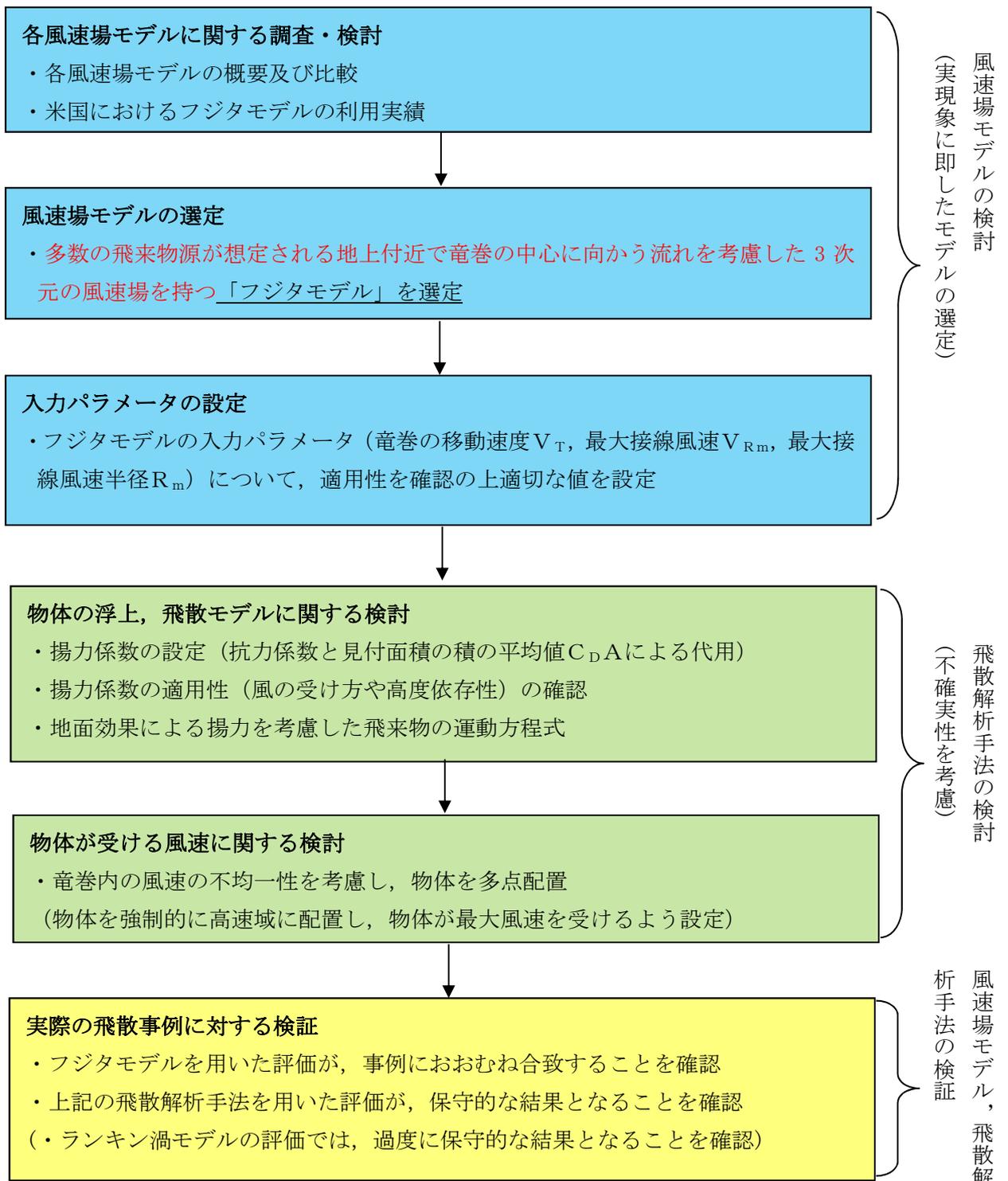


図 1-1 風速場モデルの選定及び飛散解析手法に関する検討フロー

: フジタモデル関連箇所

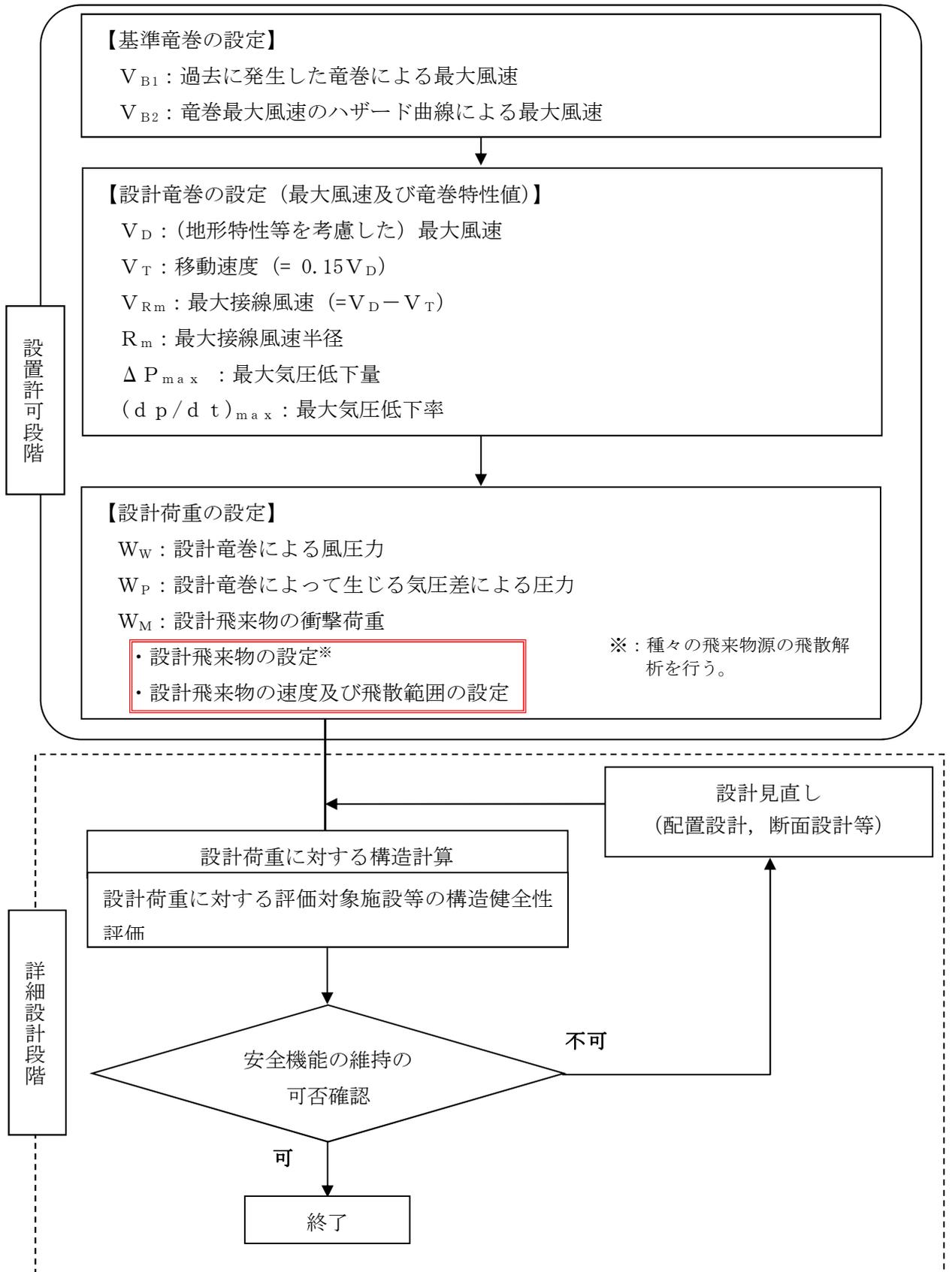


図 1-2 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

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の実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田名誉教授が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2-1)のビデオ画像の写真図化分析を行い、竜巻の地上痕跡調査及び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2-2)

フジタモデルの特徴は、多数の飛来物源が想定される地上付近で、竜巻の中心に向かう流れを考慮した3次元の風速場を持つ点にある。



図2-1 Ash Valley 竜巻(1974.8.30)のビデオ画像

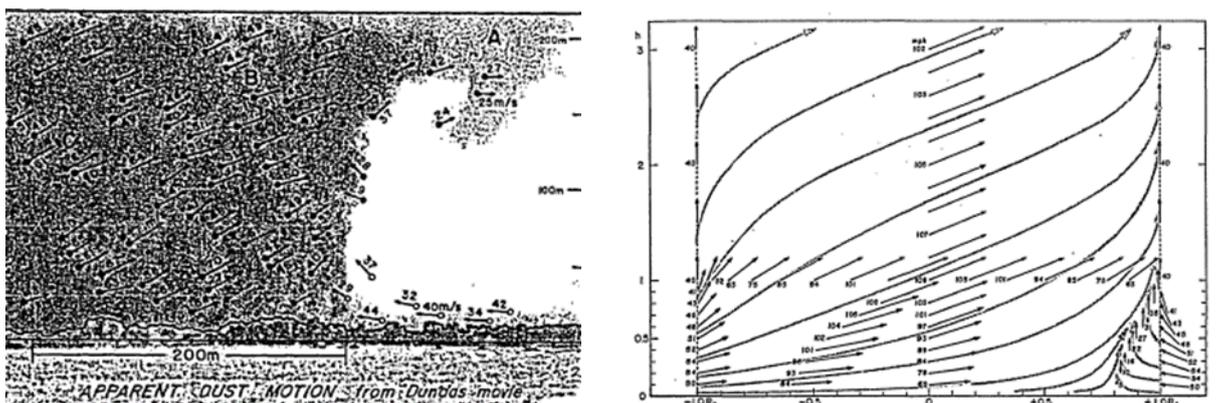
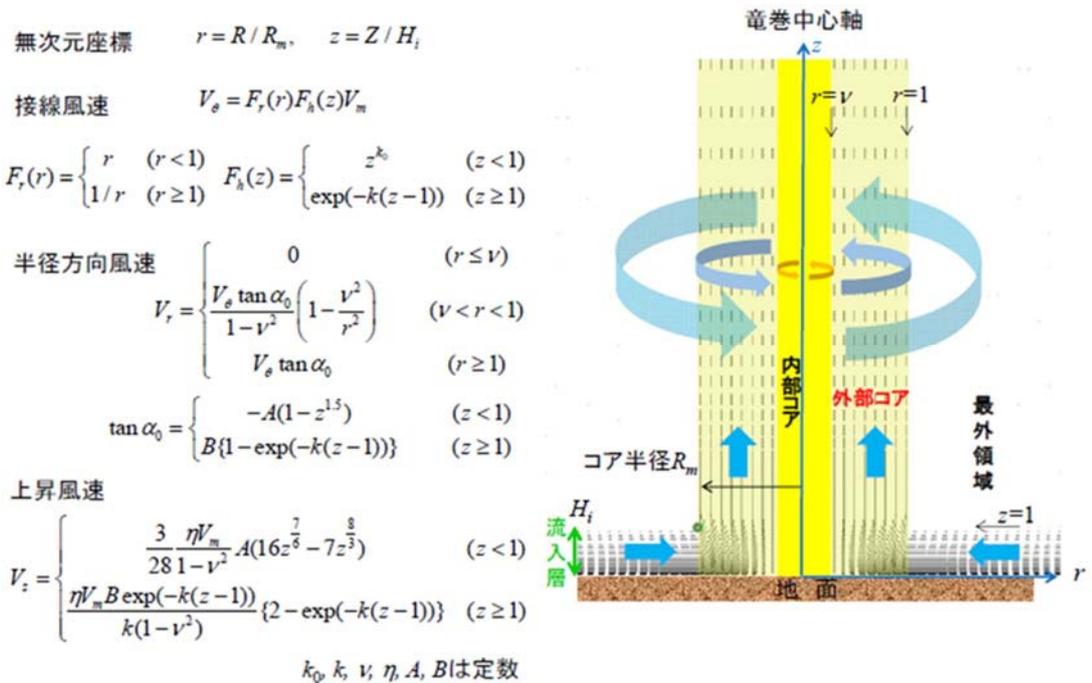


図2-2 風速ベクトルの分析図(左)とフジタモデルの流線(右)⁽⁴⁾

フジタモデルの風速場は、図 2-3 に示すように半径方向に 3 つの領域（内部コア、外部コア及び最外領域）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、各風速成分は上部に向かうにつれて減衰する。フジタモデルは、流体力学の連続の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⁽⁴⁾ の第 6 章に、図 2-3 のとおり記載されている。



また、以下の連続の式を満足する。

$$c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

V_θ	接線方向風速
V_r	半径方向風速（内向きが正）
V_z	上昇風速
V_m	最大接線風速
R_m	外部コア半径

図 2-3 フジタモデルの概要

ここで、内部コアの半径 R_v と外部コアの半径 R_m の比 $\nu (=R_v/R_m)$ については、Fujita⁽⁴⁾が以下の経験式を提案しているので、これを用いた。

$$\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.05 R_m)$$

また、流入層は、地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ、流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されることから、摩擦の影響が及ぶ範囲のみで形成される。Fujita⁽⁴⁾は、流入層高さ H_i を竜巻中心の低圧部の大きさ（外部コア半径） R_m に比例するものとして、以下の経験式を提案しており、これを用いた。

$$H_i = \eta R_m$$

ここで、 η は1以下の正の値であり、下式で定義される。

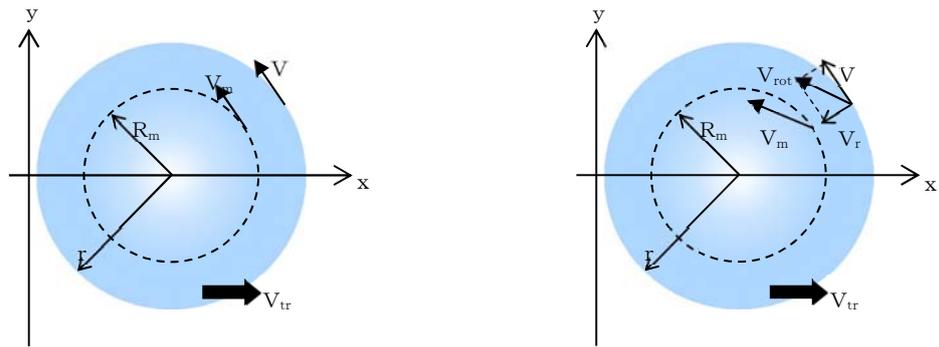
$$\eta = 0.55(1 - \nu^2)$$

上式において、外部コア半径 $R_m = 30$ mの場合、 $\eta = 0.50$ ($H_i = 15$ m) となり、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽³⁾の図2.2.3.10における流入層高さと竜巻半径の比($\eta = 0.4$ 程度)や、Kosiba⁽⁵⁾により示されている流入層高さ ($H_i = 10$ から 14m 以下) とおおむね同じである。

なお、その他の定数についても、Fujita⁽⁴⁾の提案している値として、 $K_0 = 1/6$ 、 $K = 0.03$ 、 $A = 0.75$ 、 $B = 0.0217$ を用いた。

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、図2-3(b)に示す飛散解析用のモデル⁽²⁾では、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ため、流体力学の連続の式を満たしておらず、図2-4のような地面から吹き出しが生じる流れとなっており、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解析を行う場合、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。



$$\begin{pmatrix} V_r \\ V_\theta \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ f(r) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$f(r) = \begin{cases} \frac{V_m r}{R_m} & (0 \leq r \leq R_m) \\ \frac{R_m V_m}{r} & (R_m < r) \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} V_r \\ V_\theta \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(r)/\sqrt{5} \\ 2f(r)/\sqrt{5} \\ 4f(r)/3\sqrt{5} \end{pmatrix}$$

(a) 圧力評価用

(b) 飛散解析用

図 2-3 ランキン渦モデル

無次元座標 $r = R/R_m$

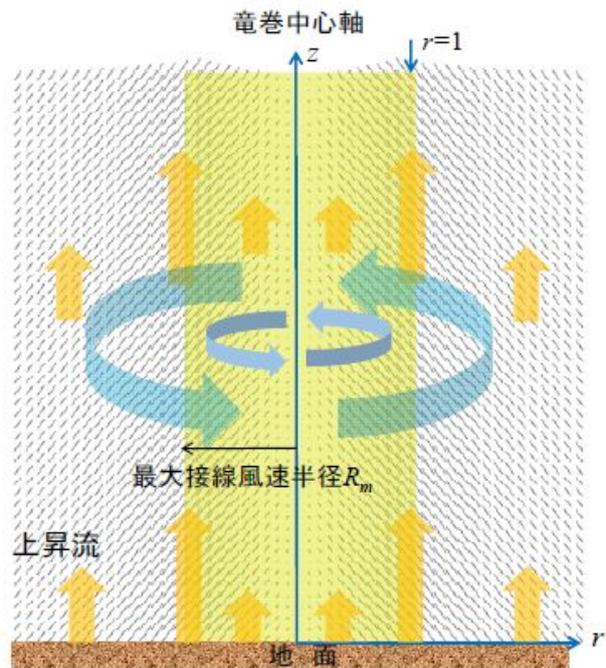
接線風速 $V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r)$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速 $V_r = -\frac{1}{2} V_\theta$

上昇風速 $V_z = \frac{2}{3} V_\theta$

水平方向風速 $V_h = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} = V_m F_r(r)$



$r < 1$ の領域では、(流体が消滅するため) 以下の連続の式を満足しない。

$$c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = \begin{cases} -\frac{2V_m}{\sqrt{5}R_m} \cdot (r < 1) \\ 0 & (r > 1) \end{cases}$$

図 2-4 飛来物速度評価用ランキン渦モデル

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、「竜巻評価ガイド」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2-5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（運動量保存式及び質量保存式）は、流体を非圧縮性と仮定する場合、以下のようになる。

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

($i=1, 2, 3$)

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0$$

ここで、 U_i 及び P は、 i 方向の流速ベクトル及び圧力を表し、 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。

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

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。

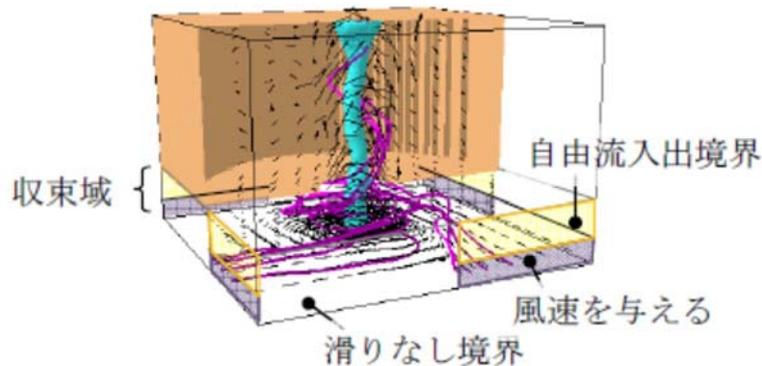


図2-5 LES計算領域内での竜巻状の渦の作成状況⁰

LESの手法自体は広く活用されているものであるが、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。

・「竜巻影響評価ガイド」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（流入箇所を局部的に配置等）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が、渦の生成に当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（飛散解析）の際には単純に速度を規格化して適用している。
- ⇒ 風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100 m/s（風速+移動速度）に設定している。Maruyama⁽⁷⁾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 160 m/s 程度まで達するため、飛散解析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

上述の各風速場モデルの特徴の比較を表 3-1 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 3-1 に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、他のモデルに比べ実際の風速場に近い形で表現されている。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いる。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。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 3-1 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特徴
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻飛来物設計速度及び飛散高さに関する、米国 DOE 重要施設の設計基準作成に利用されている。（「4 米国におけるフジタモデルの取扱い」参照） 	<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、多数の飛来物源が想定される地上付近で竜巻の中心に向かう流れを考慮した 3 次元の風速場を持つ。 ・比較的簡易な代数式により風速場を表現できる。（ランキン渦モデルよりは複雑だが、計算機能力の向上及び評価ツールの高度化により実用可能となった） ・流体の連続式を満足する
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・米国 NRC の R.G 1.76 に採用されている。 ・「竜巻影響評価ガイド」（竜巻の特性値の設定）において例示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易な式により風速場を表現できる。 ・風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在し、地表近傍の風速場を模擬していない。 ・流体の連続式を満足しない。
非定常乱流渦モデル (LES)	<ul style="list-style-type: none"> ・「竜巻影響評価ガイド」において、飛来物の飛散速度等の評価例が示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・風速の時間的な変動や乱れを、ある程度模擬できる。 ・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している。 ・小規模領域での計算結果を実スケールに規格化した場合、最大瞬間風速が相当に保守的となる場合がある。 ・実スケールでの解析には膨大な計算機資源が必要であり、実用に供しにくい。

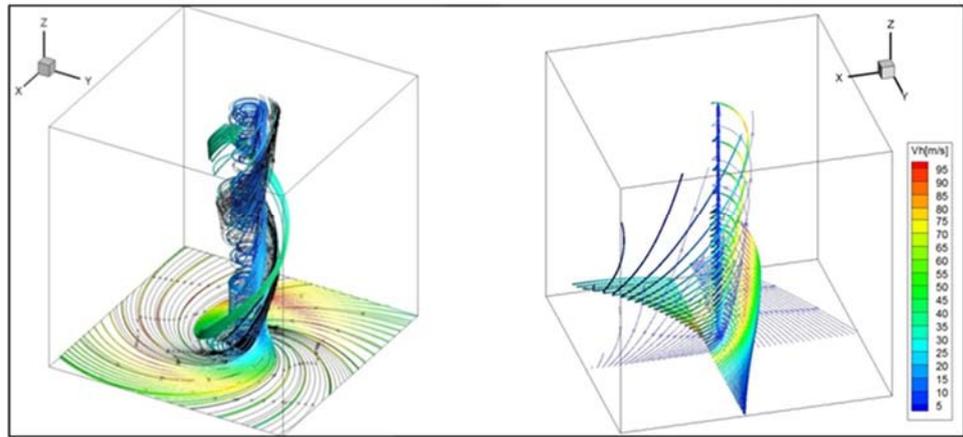


図 3-1 フジタモデル（左）とランキン渦モデル（右）の風速場の構造

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⁽⁸⁾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⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾（文献⁽⁸⁾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から2は一般的な建築物、カテゴリ3及び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及び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⁽¹¹⁾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散について、フジタモデルDBT-77で再現した事例⁽⁹⁾がローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾及び米国気象学会論文集⁽¹²⁾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（鋼製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）⁽¹³⁾の中で竜巻飛来物に対するLESの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のRegulatory Guide 1.76⁽¹⁾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.”と述べられており、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散速度(Simiuらの運動方程式⁽²⁾)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EPR Iで開発された原子力発電所の構造物、機器への竜巻飛来物の衝突及び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. 飛散解析における保守性の考慮

前節までに述べてきたとおり、フジタモデルの風速場を適用した竜巻影響評価を行うことは可能と考えられるが、実際の竜巻による物体の飛散挙動の保守性についても考慮する必要がある。

本節では、フジタモデルを用いた地上からの飛散挙動解析に関する保守性や、物体が竜巻に晒される際の風速に関する不確定性等について、飛散解析の中でどのように考慮しているかについて説明する。

5.1 物体の浮上、飛散モデルにおける保守性の考慮

本評価における物体の浮上・飛散モデルの考え方と、その中で保守性の観点から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、「竜巻影響評価ガイド」の飛来物運動モデル⁽²⁾⁽³⁾と同様に、飛来物は第図 5-1(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を考慮している⁽¹⁴⁾。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 5-1 (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。

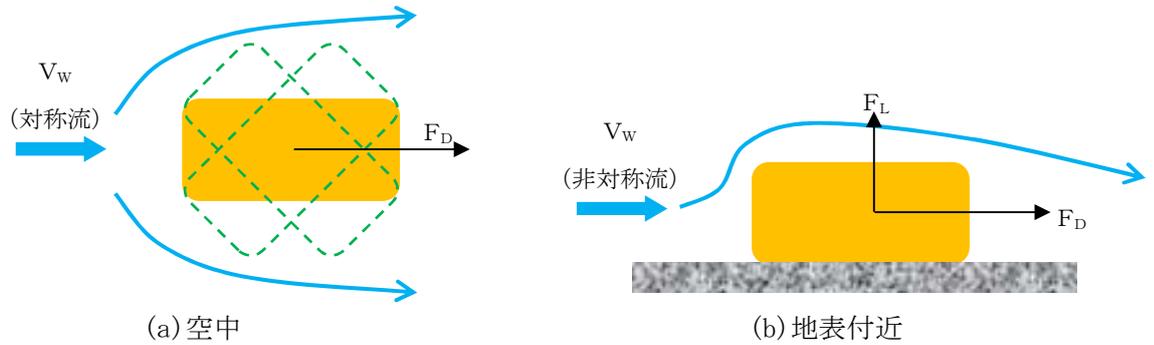


図 5-1 物体へ作用する力

このような揚力 F_L は、地表付近での揚力係数 C_L 及び物体の見付面積 (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。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a \left| V_w - V_M \right|_{x,y}^2 \quad \dots (5.1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 V_M は飛来物の速度ベクトル、 V_w は風速ベクトル、 $|a|_{x,y}$ はベクトル a 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 5-2(a)) は物体が流体に接する全表面で圧力は一定 (p_0) と見なせるため、鉛直方向 (上向きを正とする) に作用する揚力 F_{L0} は以下で与えられる。

$$F_{L0} = -P_0 A + P_0 (A - s) = -P_0 s \quad \dots (5.2)$$

ここで、 $0 < s \leq A$ であることから、 F_{L0} は負の値となり、揚力は発生しないことが分かる。

一方、竜巻通過時 (図 5-2(b)) 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を p_1 、下面での圧力を 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可能)。

$$F_L = -P_1 A + P_2 (A - s) \quad \dots (5.3)$$

吸盤の様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。

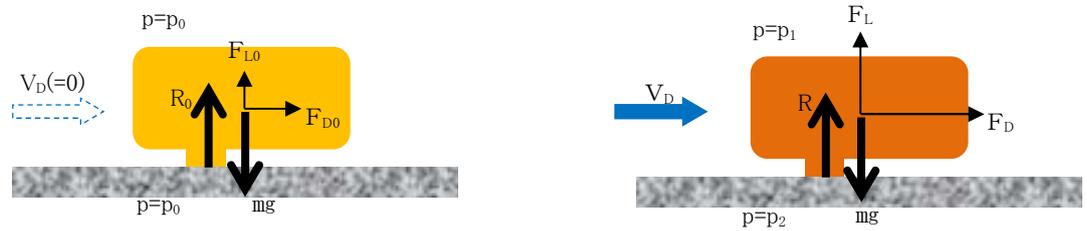


図 5-2 部分的に地面に接する物体に作用する力

(2) 揚力係数の設定

(7)式の $C_L a$ 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。本評価では、条件によらず保守性を確保できるよう、 $C_L a$ に代わり、以下で定義される抗力係数と見付面積の積の平均値 $C_D A$ を用いることとする。

$$C_D A = \frac{1}{3} (C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z) \quad \dots (5.4)$$

ここで、 C_{Di} は空中での i 軸方向流れに対する抗力係数、 A_i は i 軸方向流れに対する見付面積を示す。

物体の運動モデルを図 5-3 に示す。上述の、 $C_L a$ を $C_D A$ で代用する考え方を本図に基づき整理すると、以下の通りとなる。

- ・物体がある程度浮き上がった後の状態(B)であれば、物体はランダムに回転し、物体各面に均等に風を受けるものと考えられる。
- ・物体が地面に置かれた状態(A)から浮き上がる場合、実際には物体の上面や下面での圧力が均一ではなく、傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが、このような挙動を理論的に評価することは難しい。

そのため、これに準ずる方法として、地面から浮かせた状態で実測された $C_L a$ のうち、物体が地面に置かれた状態(A)にできる限り近い場合の値よりも大きな係数 $C_D A$ を用いることで、保守性は確保できると考えられる（「 $C_D A > C_L a$ 」となることの説明は後述）。

- ・物体が地面に置かれた状態(A)と物体がある程度浮き上がった状態(B)での評価にて共通の係数を用いることは、地上からの物体浮上及び飛散解析における実用性の観点からも望ましい。

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 見付面積 a の積 $C_L a$ 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 $C_D A$ の利用が適切であることを以下に説明する。

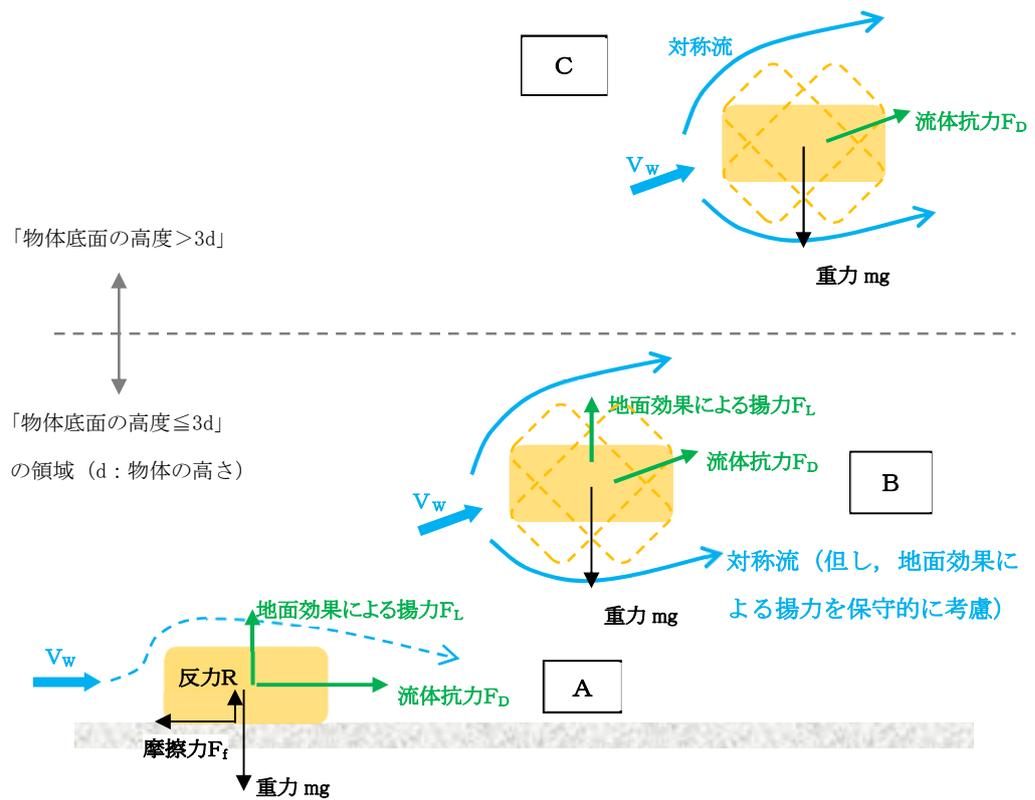


図 5-3 物体の運動モデルの模式図

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。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L a \quad \dots (5.5)$$

ここで、典型的な塊状物体、柱状物体及び板状物体が地面に置かれた場合の $C_L a$ 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 $C_D A$ の値を比較した。（表 5-1）

同表より、「 $C_D A > C_L a$ 」の関係が成立しており、揚力の評価モデルとして $C_L a$ の代わりに $C_D A$ 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 5-3 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 5-3 の状態 A、B 及び C の全領域で揚力の連続性が確保されている。

第5.1-1表 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) (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 16.7 ft., 幅 5.8 ft., 高さ 4.3 ft.)	129 ft. ²	48.7 ft. ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁵⁾ (風速 22~31 m/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)	12.07 m ²	7.76 m ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ (風速 0~150 m/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1つが0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 5.12 m, 幅 1.94m, 高さ 1.69 m, 質量 2086kg)	14.58 m ²	7.89 m ²	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8,000 \sim 28,000$) 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
	立方体	一辺の長さD	2D ²	0.2D ² 程度	<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
柱状	円柱	長さ λ , 直径D	0.47D λ	0.2D λ	<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
				0.05D $\lambda \sim 0.23D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8,000 \sim 28,000$) 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
	角柱	長さ λ , 断面が一辺Dの正方形	0.8D λ (1.3D λ)※2	0.5D $\lambda \sim 0.7D\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.8 \times 10^4$) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置 (角柱の軸方向は地面と平行)
		長さ λ , 高さD, 幅Bの長方形断面	0.4(D+B) λ	負値 (地面との隙間が 0.167D 以上の場合)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.8 \times 10^4$) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置 (角柱の軸方向は地面と平行)

※1:柱状及び板状では微小項を無視して記載

※2:塊状と見なせる場合

第5.1-1表 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) (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
板状	薄い平板	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=200$ mm, $D=5$ mm, $\lambda=1000$ mmの場合)	0.66 $B\lambda$	0 に近い値 (地面から0.25 B 離れた 位置で $C_{La}=0.04B\lambda$)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁸⁾ (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
		長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=100$ mm, $D=15$ mm, $\lambda=300$ mm)			
	平板状 ブロック	長さ λ , 幅 B , 厚さ D	0.66 $B\lambda$ 0.66($B\lambda+D$ ($B+\lambda$)) ^{*2}	0.1 $B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽²⁰⁾ ($Re=5\times 10^4$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:柱状及び板状では微小項を無視して記載

※2:塊状と見なせる場合

(3) 設定した揚力係数の適用性の確認

表 5-1 における $C_L a$ (実測値) が竜巻における物体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 5-1 の各文献中の実験におけるレイノルズ数は、同表の備考欄に示す通り、 $10^4 \sim 10^6$ 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 (13 m/s) \sim 120 mph (54 m/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 5-4 に示すように、レイノルズ数が増加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 5-1 の E P R I 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 92 m/s の直径 0.1 m のパイプのレイノルズ数は 6×10^5 程度)。また、電力中央研究所の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5 m \times 幅 1.6 m, 風速 : 3.0 \sim 16.5 m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100 mm \times 模型長 1000 mm) を対象として、 $Re=3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

E P R I 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 5-5 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 と見付面積 a の積 $C_L a$ はレイノルズ数にほとんど依存せず、表 5-1 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。

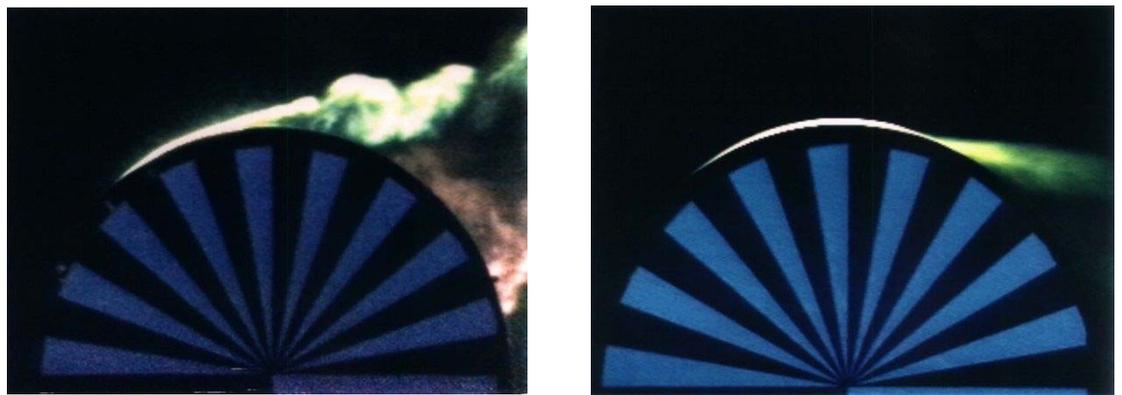


図 5-4 可視化した円柱まわりの流れ⁽²¹⁾

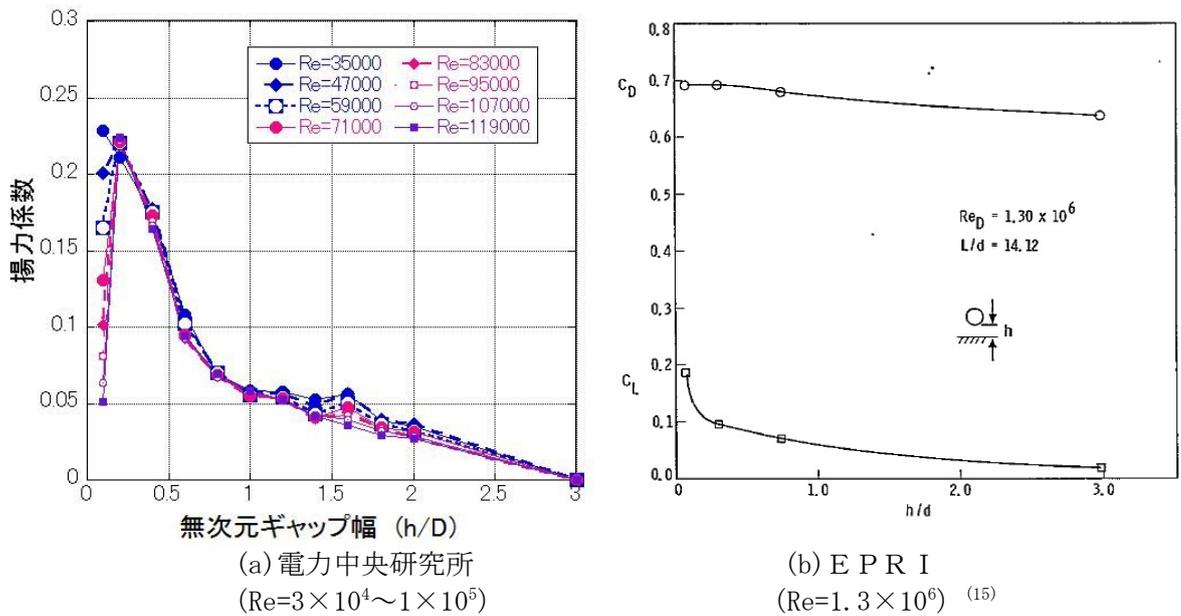


図 5-5 風洞実験による円柱の揚力係数

(4) 揚力の高さ依存症

地面効果による揚力は物体の上昇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、高さ寸法 d の物体に働く揚力は、物体底面の高度が地面から $3d$ となった時に消滅すると設定した。

具体的には、底面が地から 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。

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \left| V_W - V_M \right|_{x,y}^2 f(Z/d) \dots (5.6)$$

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

$$f(Z/d) = \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\} \dots (5.7)$$

ここで、 Z は下式により定義される（ z : 物体中心の高度）

$$Z = \begin{cases} z - (d/2) & (d/2 \leq z \leq 7d/2) \\ 0 & (7d/2 \leq z) \end{cases} \dots (5.8)$$

また、以下において、塊状物体（自動車）、柱状物体（角柱及び円柱）及び板状物体（平板）の風洞試験結果を踏まえ、「高さ寸法 d の物体に働く揚力は、物体底面の高度が地面から $3d$ となった時に消滅する」とした設定が適切であることを確認する。

a. 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、E P R I 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 5-6 に、E P R I 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。E P R I 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 0 とはならないが、実際に飛散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ものと考えられる。

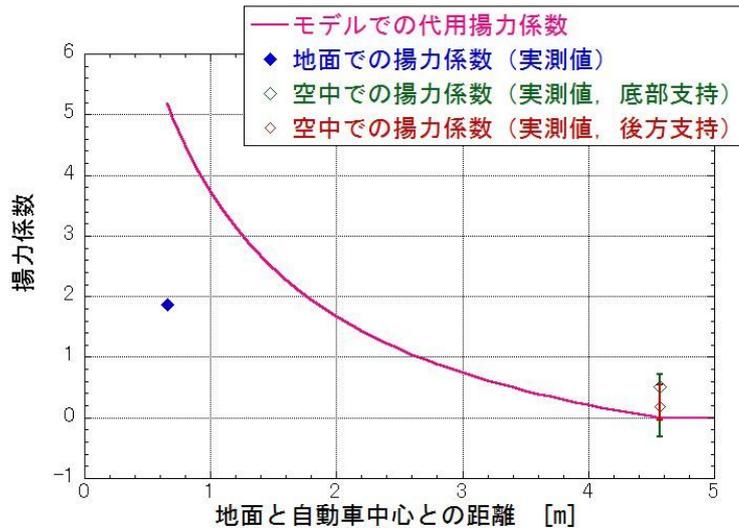


図 5-6 自動車の風洞実験による揚力係数と代用揚力係数
(文献⁽¹⁵⁾を基に作成及び代用揚力係数を加筆)

b. 柱状物体（角柱及び円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5 m×幅 1.6 m，風速：3.0～16.5 m/s）にて測定しており，図 5-7 に示すように，地面から 0.167 D 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係数（図 5-7 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，E P R I の風洞試験⁽¹⁵⁾にて測定しており，図 5-8 に示すように，本モデルの代用揚力係数（図 5-8 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。

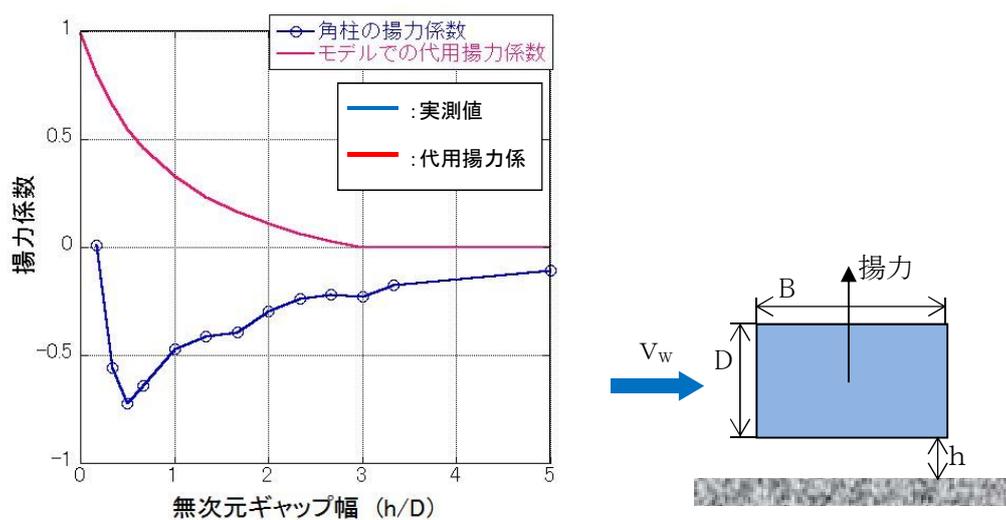


図 5-7 角柱の風洞試験による揚力係数と代用揚力係数

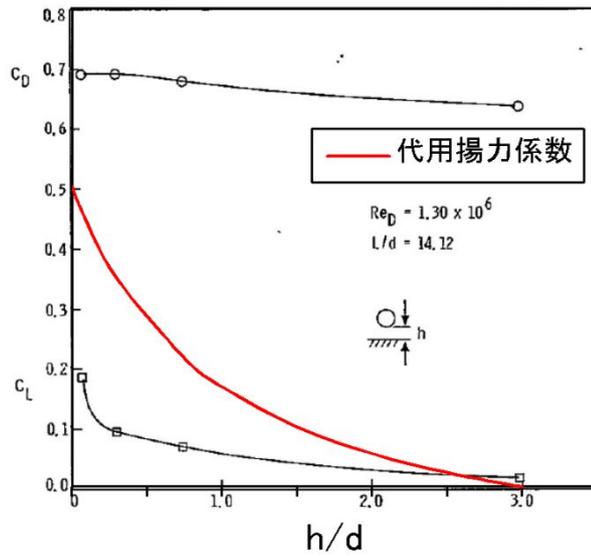


図 5-8 円柱の風洞試験による揚力係数と代用揚力係数
(文献⁽¹⁵⁾に代用揚力係数を加筆)

c. 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⁽¹⁹⁾に基づき考察すると、本モデルの代用揚力係数 (図 5-9 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おおむ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。

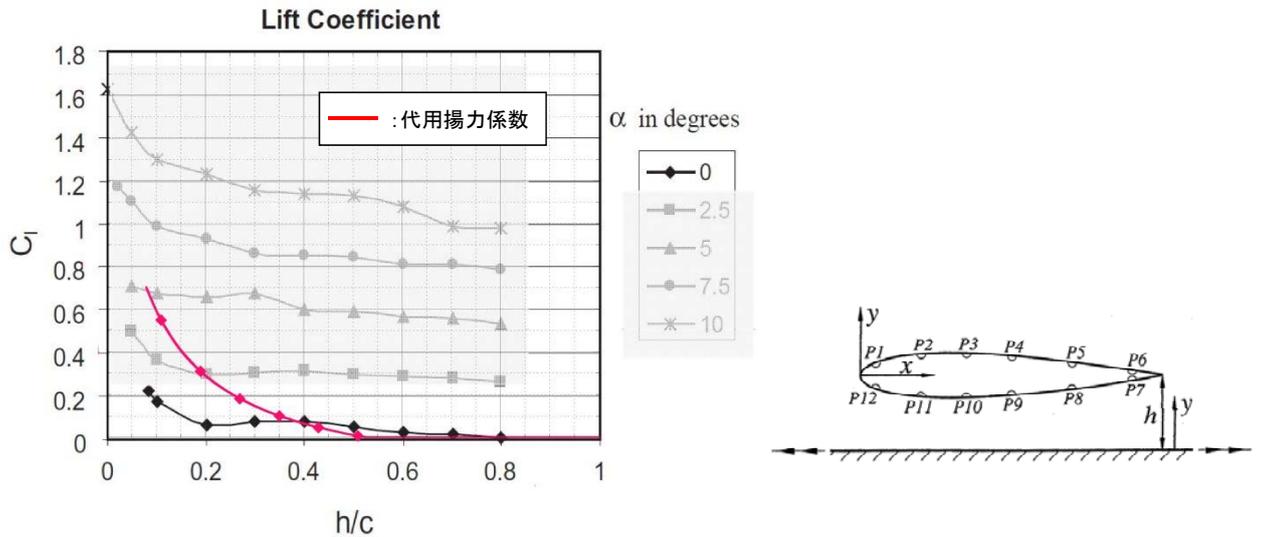


図 5-9 翼の風洞試験による揚力係数と平板の代用揚力係数
(文献⁽¹⁹⁾に代用揚力係数を加筆)

(5) 物体の運動方程式

上記(1)から(4)を踏まえ、重力加速度 g ，上向きの単位ベクトル 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。

$$\frac{dV_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \left| V_w - V_m \right| (V_w - V_m) - (g - L)k \quad \dots (5.9)$$

物体の位置 $X_{M(t)}$ と速度 $V_{M(t)}$ 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 $t = \tau$ における物体の位置 $X_{M(\tau)}$ と速度 $V_{M(\tau)}$ を既知として、時刻 $t = \tau + \Delta \tau$ における物体の速度と位置を以下の式で求めた。ただし、 $A(\tau)$ 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。

$$V_M(\tau + \Delta \tau) = V_M(\tau) + A(\tau) \Delta \tau \quad \dots (5.10)$$

$$X_M(\tau + \Delta \tau) = X_M(\tau) + V_M(\tau) \Delta \tau + \frac{A(\tau) \Delta \tau^2}{2} \quad \dots (5.11)$$

$A(\tau)$ 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、物体の速度及び位置を算出することができる。

(6) 物体の運動方程式（(5.9)式）に関する考察

地上面の物体（図 5-3(A)）が浮上するには、地面からの反力が消滅する（ $R < 0$ ，つまり $mg < F_L$ ）条件で浮上し、浮上後は(5.9)式を成分表示した以下の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{Mx}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,x} - V_{M,x}) \quad \dots (5.12)$$

$$\frac{dV_{My}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,y} - V_{M,y}) \quad \dots (5.13)$$

$$\frac{dV_{Mz}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,z} - V_{M,z}) - g + L \quad \dots (5.14)$$

ここで、物体速度 $V_M=(V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ 、竜巻風速 $V_w=(V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$ であり、右辺第1項が流体抗力 F_D による加速度を、(5.14)式の右辺第3項が地面効果による揚力 F_L による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 ((5.12)式~(5.14)式で物体速度 $V_M=0$) を仮定すると、以下の式となる。

$$\frac{dV_{Mx}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,x} \quad \dots (5.12')$$

$$\frac{dV_{My}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,y} \quad \dots (5.13')$$

$$\frac{dV_{Mz}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad \dots (5.14')$$

フジタモデルでは、物体が地面近傍にある場合 (図 5-3(A)) では鉛直方向の風速 $V_{w,z}$ はゼロに近いため、式(5.14')の右辺第1項は右辺第2項及び第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。

$$\frac{dV_{Mz}}{dt} \approx -g + L \quad \dots (5.15)$$

例として、竜巻コア半径 30 m、最大風速 100 m/s の竜巻が原点に位置し、x 方向に 15 m/s で移動する場合、点 (0, -30 m) における式(19')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 5-10 に示す。

同図より、地面上 (z=0) 近傍においては、z 方向の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。

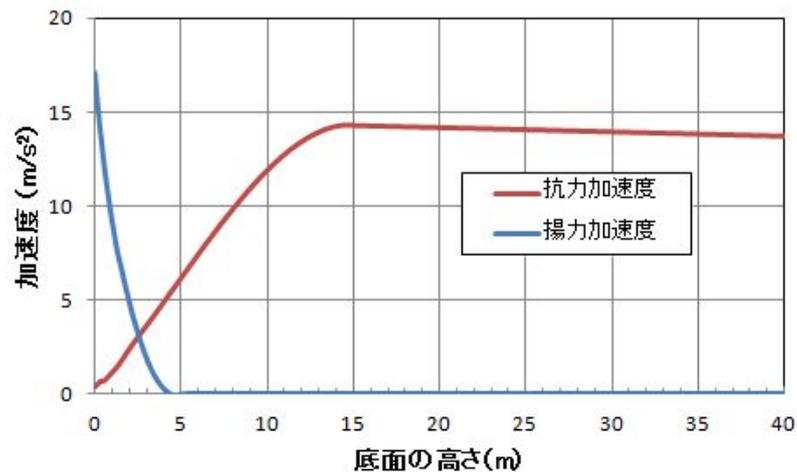


図 5-10 地面近傍の物体に作用する z 方向の加速度
 $((1/2) \rho C_D A/m=0.004m^{-1}, d=1.31m)$

なお、高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦（飛散解析用）の場合は、地面から水平風速の約 60%にも達する上昇流の噴出を設定する。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の揚力 L を付加していない。(図 5-11)

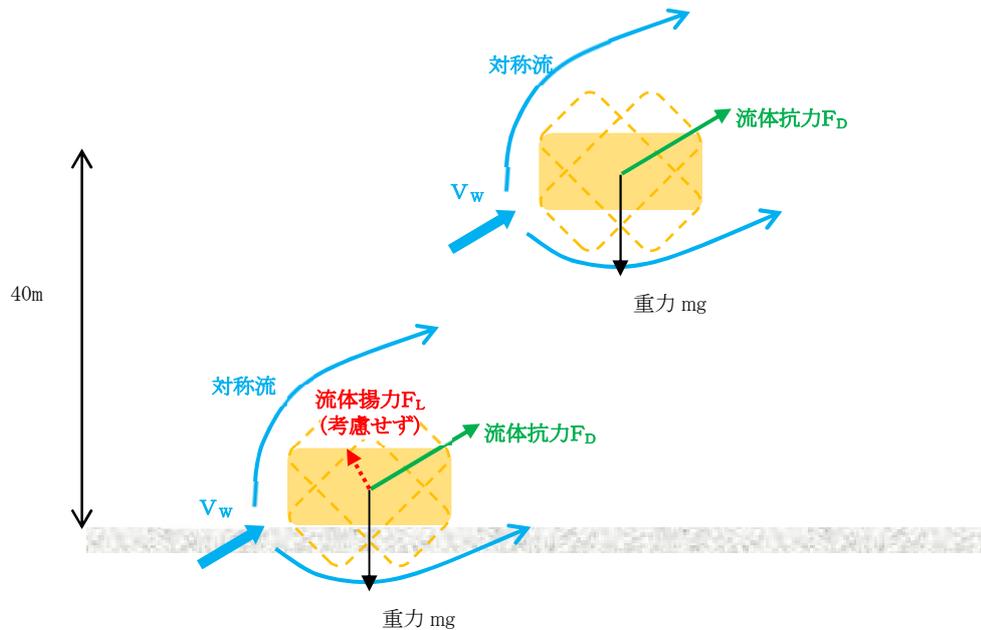


図 5-11 ランキン渦の場合の物体の運動モデルの模式図

5.2 物体が受ける風速における保守性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛散速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体が受ける風速（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⁽¹⁾に記載されている方法（物体の1点配置）と、物体を多点配置した場合の飛散速度の違いを比較した。配置の違いについて、図 5-12 に示す。1点配置の場合は、特定の位置（竜巻進行方向の最大接線風速半径の位置 $(x, y) = (R_m, 0)$ ）に物体1個を設置する。また多点配置の場合は、竜巻半径の4倍の辺長の正方形領域に 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散速度とする。

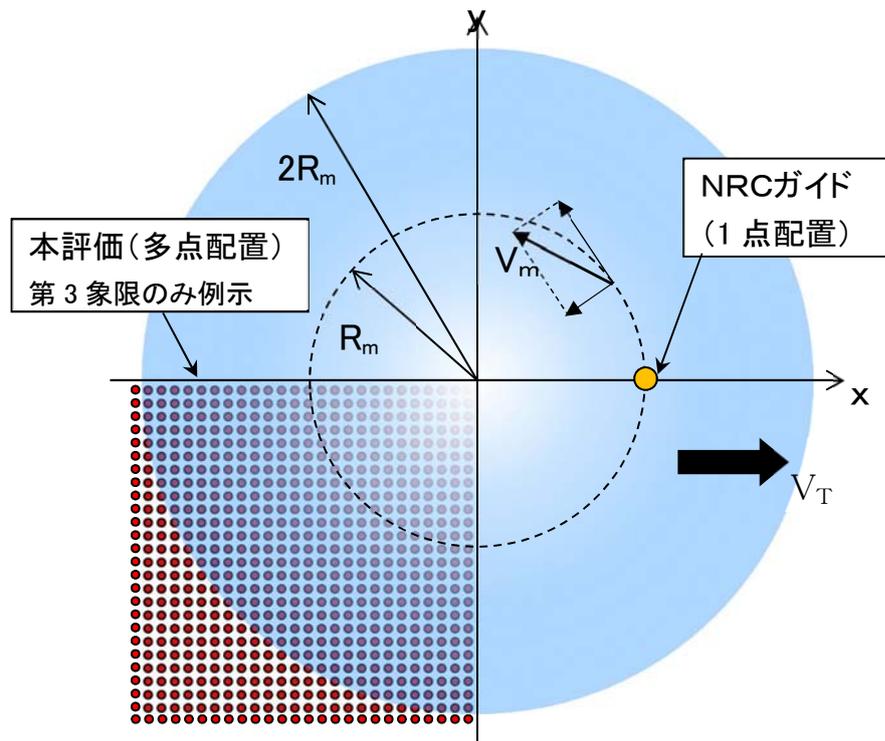


図 5-12 飛散解析における竜巻と物体の位置関係

評価条件として、竜巻の最大風速を 100 m/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、「竜巻影響評価ガイド」の記載より竜巻の移動速度 V_{tr} を 15 m/s、竜巻コア半径 R_m を 30 m とする。飛散させる物体としては、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽³⁾ に掲載されている物体を用いた。図 5-13 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、多点配置の手法では 1 点配置に比べて大きな飛散速度となった。多点配置することで、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、このような結果になったと考えられる。

したがって、物体を多点配置することは、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。

物品	高さ (m)	他の寸法		C ₀ A/m (m ² /kg)
		(m)	(m)	
フォークリフト	1.10	1.10	3.60	0.0026
トラック	1.30	1.90	5.00	0.0026
消火栓BOX	0.50	0.50	0.50	0.0036
乗用車	1.30	1.60	3.10	0.0052
工事機材	0.65	0.65	2.44	0.0058
プレハブ小屋1	3.00	5.00	5.00	0.0083
コンテナ(空)	2.40	2.40	2.60	0.0105
昇降機のカゴ	1.20	1.20	1.20	0.0113
プレハブ小屋2	1.85	1.85	1.85	0.0119
プレハブ小屋3	2.30	2.30	4.60	0.0120
プレハブ小屋4(空)	3.00	5.00	5.00	0.0153
電話BOX	0.30	0.30	0.30	0.0169
プレハブ小屋5(空)	1.85	1.85	1.85	0.0189
プレハブ小屋6(空)	2.30	2.30	4.60	0.0222
物置	0.90	0.90	1.80	0.0315
室外機	0.25	0.25	0.80	0.0343
コンクリート板	0.15	1.00	1.50	0.0021
庇	0.20	2.10	11.00	0.0242
鉄製蓋	0.03	0.50	0.70	0.0364
鉄板	0.04	0.25	2.00	0.0486
太陽光パネル	0.05	1.00	1.20	0.0582
鉄骨部材	0.20	0.30	4.20	0.0065
鉄パイプ1	0.05	0.05	2.00	0.0057
鉄パイプ2	0.05	0.05	1.00	0.0059
ドラム缶(空)	0.60	0.60	0.90	0.0400

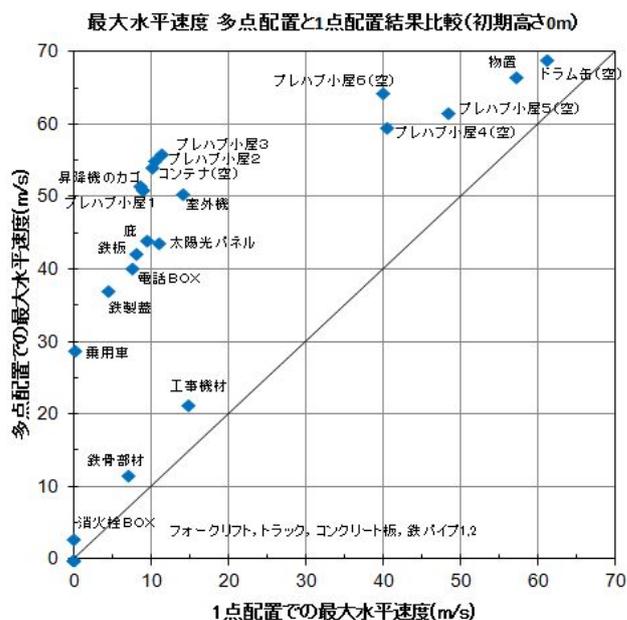


図 5-13 1点配置時と多点配置時における物体の最大速度の比較

図 5-14 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た時点で飛散する可能性がある。しかし、物体の直上に竜巻を発生させることで、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。

また、この多点配置を初期状態として適用する手法は、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性についても考慮した設定となっている。この物体を多点配置する方法と、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、必ずその竜巻の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した上で包絡できると考えられる。

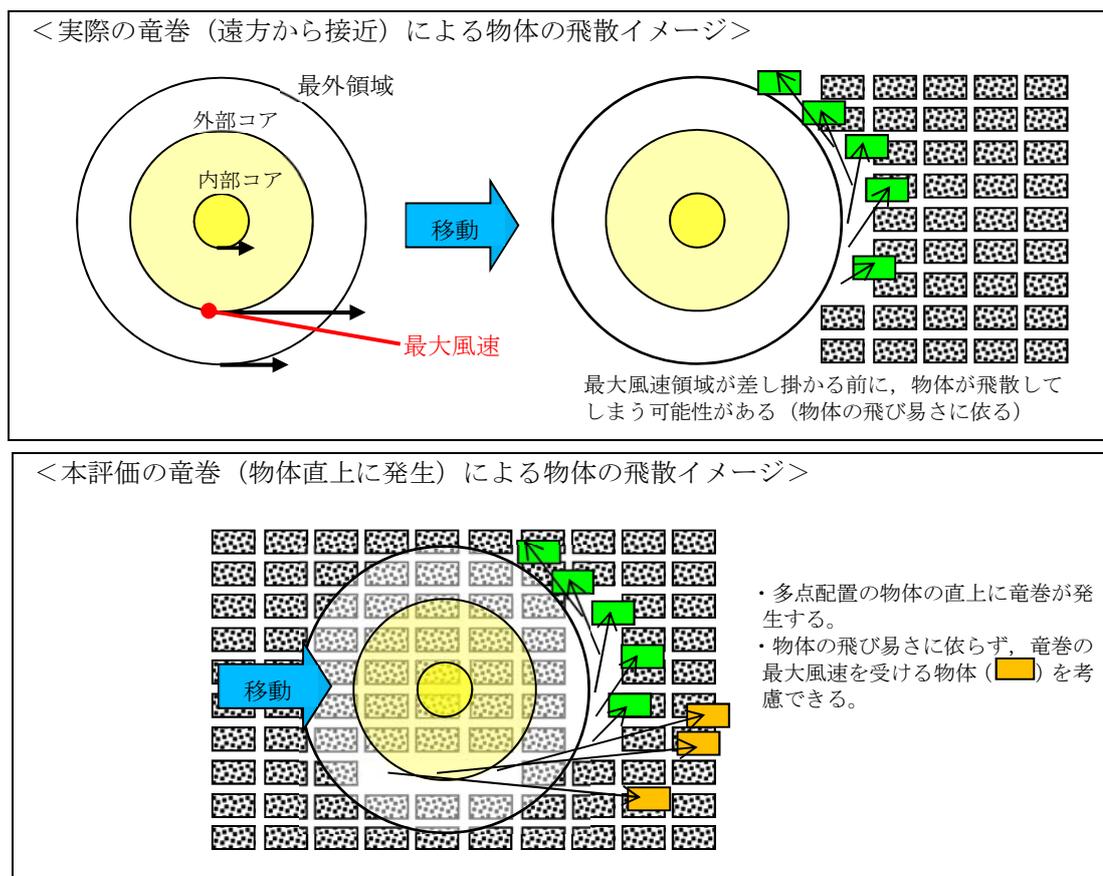


図 5-14 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻のイメージ

また図 5-14 の結果から、多点配置は 1 点配置より全体的に大きな保守性を与えると考えられ、よってフジタモデルの風速場に関する不確実性についても、その保守性で包絡出来ていると考えられる。

フジタモデルの風速場に関する不確実性として、フジタモデルの特徴的なパラメータである流入層高さ H_i の影響を検証した。外部コア半径 $R_m=30$ m の場合モデルでは $H_i=15$ m となり、これは 2.1 に記載のとおり他の文献⁽³⁾⁽⁵⁾ともおおむね整合しているが、不確実性を考慮し、流入層高さ H_i を $\pm 10\%$ 変化させた場合にコンテナ(長さ 6 m \times 幅 2.4 m \times 高さ 2.6 m, 質量 2,300 kg, $C_D A/m=0.0105$)の最大飛散距離、最大飛散距離及び飛散高さがどのように変化するかを確認した。

コンテナの 1 点配置及び多点配置時の飛散距離等も含めた評価結果を表 5-2 に示す。流入層高さ H_i に対するこれらの感度は小さく、多点評価の保守性に包絡されることが分かる。

表 5-2 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡

パラメータ 及び変化率		飛散特性の変化率			備考
		最大 水平速度	最大 飛散距離	最大 浮上高さ	
流入層高さ Hi	-10%	0.4%	-3.2%	-4.9%	
	+10%	-0.6%	2.8%	5.1%	
多点配置 (1点配置からの変化率)		420%	1411%	957%	

5.3 飛散解析手法まとめ

物体の浮上及び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、浮上に関する保守性を考慮できるような設定とした。

また、物体を多点配置し、その物体直上で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散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物体の飛散解析を行う場合でも、保守性や不確定性を考慮した評価結果が得られると考えられる。

なお、参考として、図 5-15 に本条件設定によるトラック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。

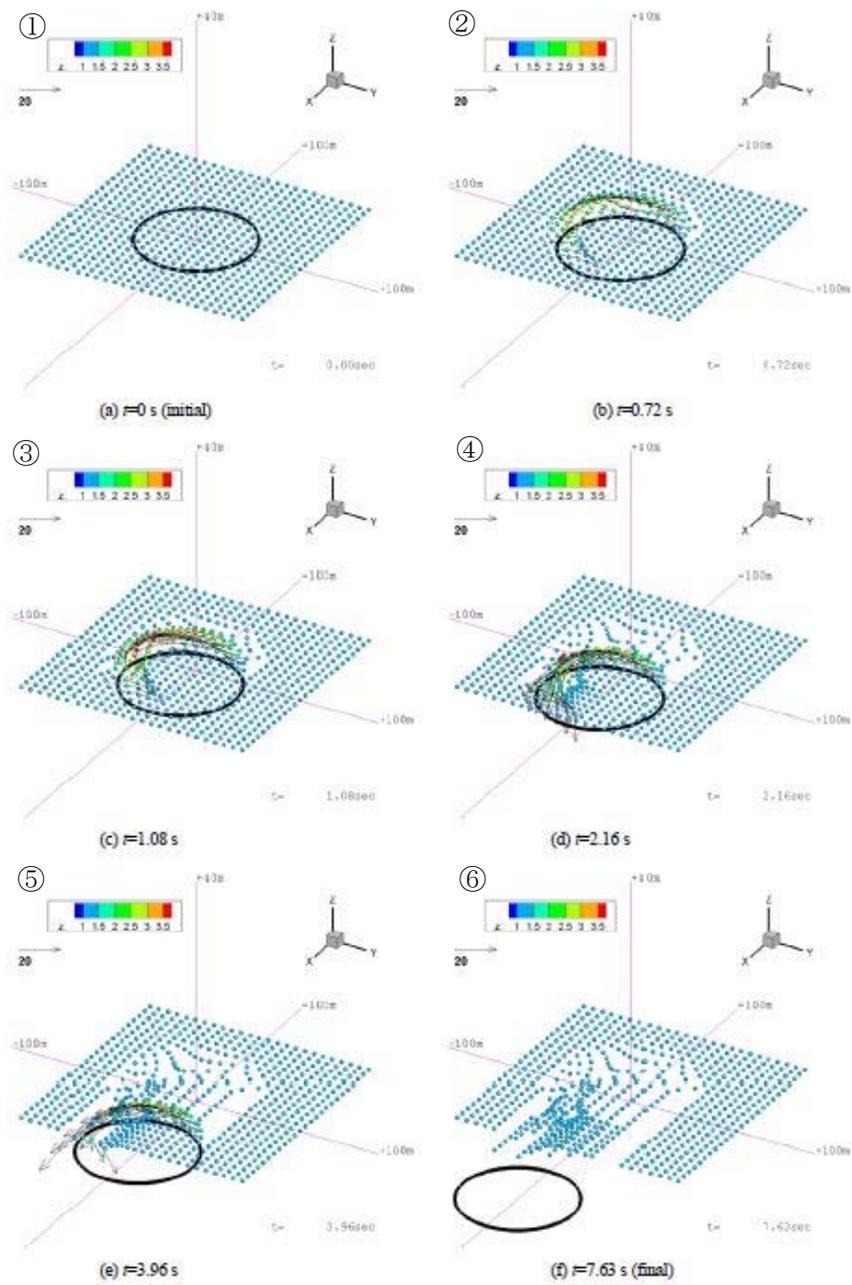


図 5-15 竜巻によるトラックの飛散イメージ⁽²³⁾
 (表 6-5 (後述) の条件による)

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利点や、飛散解析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散解析手法を適用した場合、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竜巻風速を推定するために考案された指標である。フジタスケールで示されている自動車の被災状況を第表 6-1 に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速 (69 m/s, 92 m/s, 116 m/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結果を表 6-2 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おおむ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、F 2 相当の風速 (69 m/s) でも大きく飛散することになり、フジタスケールの定義との比較からは過度に保守的な結果となる。

表 6-1 フジタスケールによる自動車の被災分類⁽²⁴⁾

フジタスケール	風速 (m/s)	自動車の被災状況
F 2	50~69	cars blown off highway (自動車が道路から逸れる。)
F 3	70~92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する。)
F 4	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 6-2 フジタモデルによる自動車 ($C_D A/m=0.0052\text{m}^2/\text{kg}$) の飛散評価結果⁽²⁵⁾

フジタスケール	竜巻の最大水平風速 (m/s)	竜巻の接線風速 (m/s)	竜巻の移動速度 (m/s)	計算結果		
				最大水平速度 (m/s)	飛散距離 (m)	飛散高さ (m)
F 2	69	59	10	1.0	1, 4	0
F 3	92	79	13	23	34	1.1
F 4	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との比較

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 F 3 の竜巻が来襲した。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたクレーンが倒壊し、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ハウスが荷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いる。

図 6-1 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、資材置場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、資材置場通過時の竜巻規模は F 2 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、フジタモデル及びランキン渦モデルを風速場として用いた飛散解析を行った⁽²⁵⁾。解析条件は、過去の記録に基づき表 6-3 のとおりとした。



パイプを収納した木箱（一部 2 段重ね）は浮上せずに転倒し、パイプが周囲 7m~9m に散乱
 (Pieces of pipe were scattered over the area, but none travelled more than 25-30ft. The pipe joints are 8in. dia. x 8ft. long.)

図 6-1 Grand Gulf 原子力発電所資材置場におけるパイプの散乱状況⁽²⁵⁾

表 6-3 Gland Gulf 原子力発電所のパイプ飛散解析条件⁽²⁵⁾

竜巻条件	竜巻の最大風速	67 m/s
	最大接線風速	53.6 m/s
	移動速度	13.4 m/s
	コア半径	45.7 m
飛来物条件	直径（外径）	0.2286 m (=9 in.)
	物体高さ	0.229 m
	密度	1700 kg/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 本を、最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内 (x, v = [-2R_m, +2R_m]) に等間隔配置。 ・ 設置高さ : 1 m (パイプ収納箱が 2 段重ねされた状況を想定) 	

解析結果を表 6-4 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、収納箱が倒れた影響で散乱したと思われる状況とおおむね合致している。

なお、ランキン渦モデルで評価した場合は、飛散距離や最大水平速度に実際の報告と大きな違いがあり、過度に保守的な評価結果となる。

表 6-4 Gland Gulf 原子力発電所のパイプ飛散解析結果⁽²⁵⁾

風速場モデル	初期 物体高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ ^{※2}	最大水平速度
フジタモデル	1 m (地上)	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
	40 m	227 m		40.9 m/s

※1：比較のため、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（浮上）高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較

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」という。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告⁽²⁷⁾されている。被災状況を図6-2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(②)。また、4tトラックの他に、2台の自動車(③と⑥)の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稀である。なお、竜巻による飛散物の再現計算は、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良く計測、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。

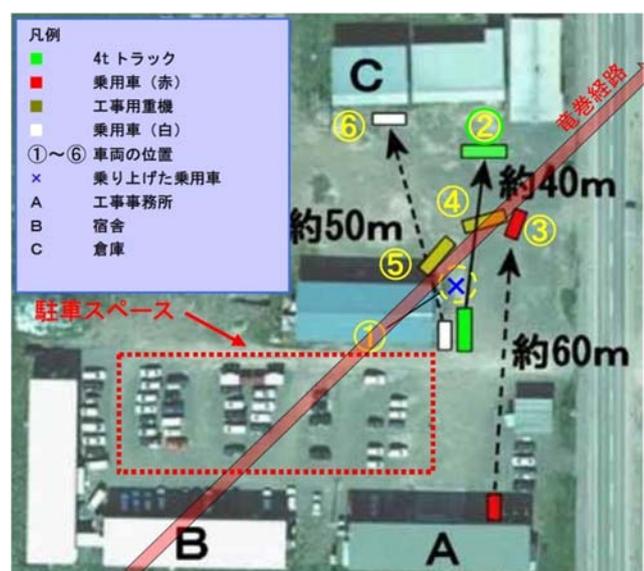


図 6-2 佐呂間竜巻による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）
（文献⁽²⁷⁾の写真に竜巻被害の方向を加筆）

ここでは、フジタモデルを風速場として用いた車両（4tトラック及び乗用車）の飛散解析を行い、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。

- ・竜巻特性や飛来物（4tトラック及び乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- ・今回の飛散解析手法による検証

(1) 竜巻特性や飛来物（4tトラック及び乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析

a. 4tトラックの飛散解析

解析条件として、入手可能なデータ⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾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6-5のとおり設定した。初期配置の条件として、配置数は1台とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速60 m/s以下では浮上しない設定⁽¹⁶⁾とした。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18 m、20 m、22 mとした場合の解析結果を表6-6及び図6-3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おおむね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20 m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。

表6-5 佐呂間竜巻による4tトラックの飛散解析条件⁽²⁵⁾

竜巻条件	竜巻の最大風速	92 m/s ^{※1}
	最大接線風速	70 m/s
	移動速度	22 m/s
	コア半径	20 m
飛来物条件	車両長さ ^{※2}	8.1 m
	車両幅 [※]	2.24 m
	車両高さ [※]	2.5 m
	車両重量	4000 kg
	飛行定数 (C _D A/m)	0.0056 m ² /kg
初期配置等	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数：1台 ・設置高さ：0 m（地上） ・「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」ことを条件として付加 	

※1：佐呂間竜巻のフジタスケール（F3）に基づく。

※2：車種不明のため、三菱ふそうPA-FK71Dを仮定。

表 6-6 佐呂間竜巻による 4t トラックの飛散解析結果

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

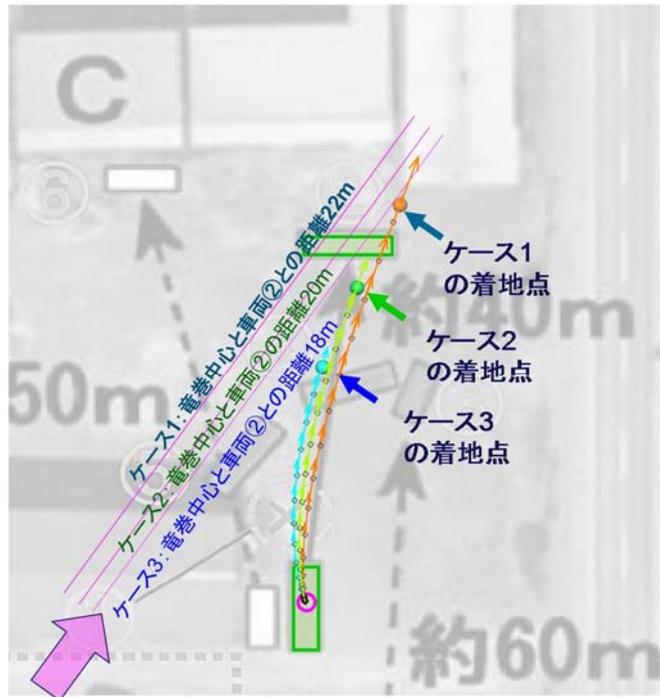


図 6-3 フジタモデルによる 4 t トラックの飛散解析結果
(文献⁽²⁷⁾の写真に軌跡を加筆)

b. 乗用車の飛散解析

白い乗用車（図 6-2⑥）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 6-7 に示す。

表 6-7 佐呂間竜巻による乗用車の飛散解析条件

竜巻条件	トラック（表 6-5）に同じ	
飛来物条件	車両長さ ^{※2}	4.4 m
	車両幅 ^{※1}	1.7 m
	車両高さ ^{※1}	1.5 m
	飛行定数（ $C_D A/m$ ）	0.0097 m ² /kg
初期配置等	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数：1 台 ・設置高さ：0 m（地上） ・「竜巻は遠方から物体に近づくが、風速 60 m/s 以下では浮上しない」ことを条件として付加 	

※1：佐呂間竜巻のフジタスケール（F 3）に基づく。

※2：車種不明のため、トヨタカローラを仮定。

乗用車と竜巻中心との距離を 18 m、20 m 及び 22 m とした場合の解析結果を、表 6-8 及び図 6-4 に示す。飛散距離については、ケース 1 でおおむね合致している。

飛散方向については、飛び出し方向はおおむ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 6-2③）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、図 6-2A）のす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 6-8 佐呂間竜巻による乗用車の飛散解析結果

ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22 m	51.9 m	3.6 m	28.9 m/s
2	20 m	43.5 m	3.4 m	24.7 m/s
3	18 m	34.7 m	2.9 m	21.1 m/s

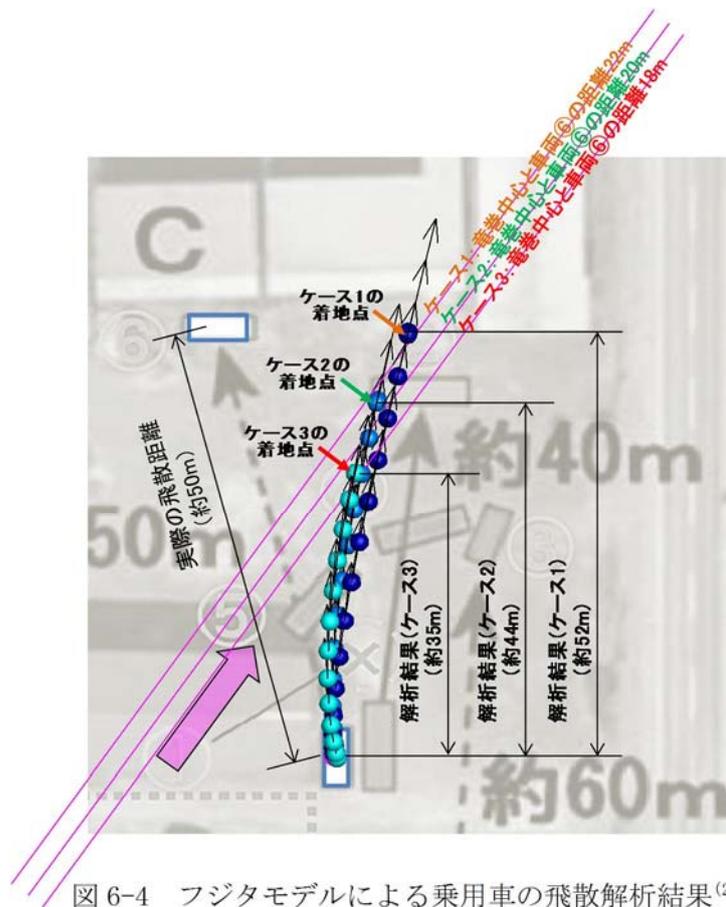


図 6-4 フジタモデルによる乗用車の飛散解析結果⁽²³⁾
(別文献⁽²⁸⁾の写真に軌跡を加筆)

(2) 今回の飛散解析手法による検証

ここでは、今回の飛散解析手法で、前述の佐呂間竜巻における 4t トラック及び乗用車の被災事例を評価し、実際の被災状況（飛散距離等）と比較する。

a. 4t トラックの飛散解析

解析条件について表 6-9 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、竜巻影響評価ガイド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 6-9 今回の飛散解析手法に基づく計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92 m/s
	最大接線風速	78 m/s
	移動速度	14 m/s
	コア半径	30 m
飛来物条件	トラック（第 6.3-1 表）と同じ	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数：51×51 台を、最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内 ($x, y = [-2R_m, +2R_m]$) に等間隔配置。 設置高さ：0 m（地上） 	

表 6-10 に実際の被災状況と、今回の飛散解析手法による結果との比較を示す。また、図 6-5 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評価結果として、4t トラックの最大飛散速度は 36 m/s、最大飛散高さは 3.6 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 40 m であり、フジタモデルによる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とどめていることなどから、今回の飛散解析手法で評価をした場合でも、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的な結果となっていることが分かる。

表 6-10 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果 (4 t トラック)

風速場モデル	初期 物体高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ※ ²	最大水平速度
フジタモデル	0 m (地上)	63.4 m	3.6 m	36.0 m/s
ランキン渦モデル 【参考】	0 m (地上※ ¹)	193.7 m	11.7 m	43.9 m/s
	40 m	254.9 m		
実際の被災状況	0 m (地上)	約 40 m	乗員 2 名が存命で、病院にて聞き取り調査が可能であったことから ⁽²⁷⁾ 、3.6 m を超える高さからトラックが落下したとは考え難い	トラックはおおむね外形をとどめていることから、36 m/s (約 130 km/h) を超える飛散速度であったとは考え難い。

※1：比較のため、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（浮上）高さ。



図 6-5 竜巻による被災後の 4 t トラックの様子^{(28) (29)}

b. 乗用車（白）の飛散解析

4t トラックの場合と同様に，今回の飛散解析手法で乗用車の評価を行った結果を表 6-11 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 6-11 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果（乗用車）

風速場モデル	初期 物体高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ ^{※2}	最大水平速度
フジタモデル	0 m (地上)	82.3 m	4.2 m	44.1 m/s
ランキン渦モデル 【参考】	0 m (地上 ^{※1})	269.6 m	39.4 m	49.6 m/s
	40 m	305.8 m		
実際の被災状況	0 m (地上)	約 50 m	—	—

※1：比較のため，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（浮上）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が、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が発生することも考えられる。

本節では、横滑りや転がりの影響について、以下2点に分けて考察する。

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

(1) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.2 物体が受ける風速における保守性の考慮」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との比較」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。

(2) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体においても、竜巻による風荷重が静止摩擦力より大きい場合には、横滑りをする。また、横滑りをしない場合でも、風荷重によるモーメントが自重のモーメントより大きい場合には転がることになる。このように、竜巻により横滑りや転がりが生じる場合には、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、物体と評価対象施設等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評価対象施設等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、障害物の影響を受けずに、横滑りや転がりによって評価対象施設等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。固縛等の措置に当たっては、フジタモデルの風速場より求まる風荷重や地面での摩擦力を適切に考慮した上で、設計用荷重を設定する。

8. まとめ

フジタモデルは、米国NRCの要望により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との比較」の「(1)竜巻特性や飛来物（4tトラック及び乗用車）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おおむね合致していることから確認できる。

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当たっては保守性を確保したうえで、「5. 飛散解析における保守性の考慮」のとおり、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との比較」の「(2)今回の飛散解析手法による検証」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品の中から、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等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になると考えられる。

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、竜巻影響評価における物体の浮上、飛散評価については、フジタモデルを適用することとする。

9. 参考文献

- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (2) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (3) 東京工芸大学 (2011) : 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
- (4) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978.
- (5) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. *Wea. Forecasting*, 28, 1552-1561.
- (6) 数値的に生成された竜巻状の渦の性質, 平成 21 年度京都大学防災研究所研究発表要
- (7) 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.
- (8) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, OE-STD-1020-2002, 2002.
(<http://pbdupws.nrc.gov/docs/ML0302/ML030220224.pdf>)
- (9) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980
- (10) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987.
- (11) 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>)
- (12) 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
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico(Docket No.70-3103)
- (14) 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.
- (15) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.
- (16) Schmidlin, T., B. Hammer, P. King, Y. Ono, L. S. Miller, and G. Thumann, 2002: Unsafe at any (wind) speed? Testing the stability of motor vehicles in severe winds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1821-1830.
- (17) 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及び棧粗度の流体力, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol.67, No.4, I_1141-I_1146, 2011.

- (18) 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.
- (19) 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.
- (20) 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, 及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.
- (21) 江口 讓, 西原 崇, 水流动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.
- (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) 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),
- (24) Fujita, T. T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper 91, University of Chicago, Chicago, IL, 42 pp
- (25) 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会, 2015: 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン(JSM-NRE-009)
- (26) 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.
- (27) 札幌管区気象台: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.
- (28) 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.
- (29) 土木学会 平成18年11月北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査報告書