

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 21 R0
提出年月日	令和 3 年 4 月 21 日

設工認に係る補足説明資料

竜巻防護設計の基本方針に関する
竜巻影響評価の風速場モデルについて

目 次

1. 概要	1
2. 竜巻影響評価における風速場モデル	1
3. フジタモデルについて	1
3.1 フジタモデルによる竜巻風速場	3
3.2 飛来物の運動	5
4. フジタモデルの適用の可能性について	7
4.1 実際の飛散状況による検証	7
4.2 フジタモデルの適用についてのまとめ	12
5. 参考文献	13

1. 概要

本資料は、再処理施設、廃棄物管理施設、MOX燃料加工施設の設計基準対象施設に対する後次回申請を含めた竜巻影響評価の風速場モデルについて補足説明するものである。

ここでは、竜巻影響評価の風速場モデル及び風速場モデルの適用について示す。

また、本資料は、第1回申請（令和2年12月24日申請）のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-2-2 固縛対象物の選定」
- ・MOX燃料加工施設 添付書類「V-1-1-1-2-3 固縛対象物の選定」

2. 竜巻影響評価における風速場モデル

竜巻影響評価における風速場モデルである、ランキン渦モデル及びフジタモデルについて説明する。

ランキン渦モデルは米国原子力規制委員会の基準類で採用されており、利用実績が高く、非常に簡単な式で風速場を記述することができる。しかし、風速場が高さに依存しないため、地表面付近では非現実的な風速場となることがデメリットとしてあげられる。

フジタモデルはランキン渦モデルと比較して、解析プログラムが複雑であるが、観測に基づき考案され、実際に近い竜巻風速場をモデル化している。1978年のGrand Gulf原子力発電所の竜巻被災や、平成18年の佐呂間町での竜巻被災における地上物の転倒または移動状況は、フジタモデルを用いると実際に確認された状況をよく再現することがわかっている。

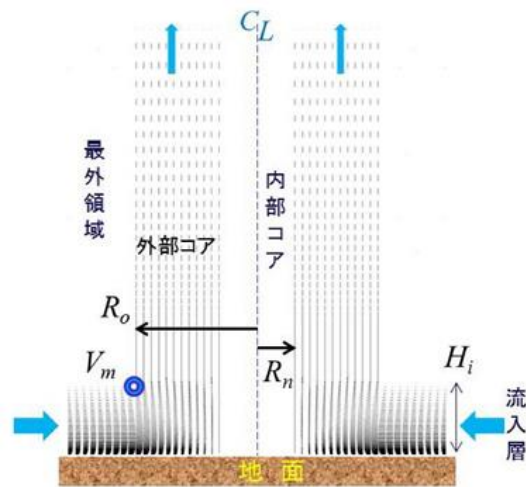
(4. にて説明)

竜巻影響評価では基本的に竜巻影響評価ガイドを参考にランキン渦モデルを採用する。ただし、車両の固縛又は退避の運用において考慮する離隔距離の設定においては、車両が全て地表面にあることから、地表面の風速場をよく再現しているフジタモデルを採用する。

3. フジタモデルについて

フジタモデルは、米国NRCの要望により藤田博士が開発した竜巻風速場の工学モデルであり、竜巻動画の写真図化分析、竜巻の地上痕跡調査及び被災状況調査に基づき提案されたものである。ランキン渦と同様に代数式で風速場が表現されるが、ランキン渦モデルに比べ、解析プログラムがやや複雑である。

フジタモデルは、半径方向に3つの領域（内部コア・外部コア・最外領域）、高さ方向に2つの領域（流入層、非流入層）に分割して風速場をモデル化している。上昇流(V_z)は外部コアのみに存在し、地表面付近で竜巻中心に向かう強い流れ(V_r)があるほか、接線風速 V_θ は高さ依存性がある。



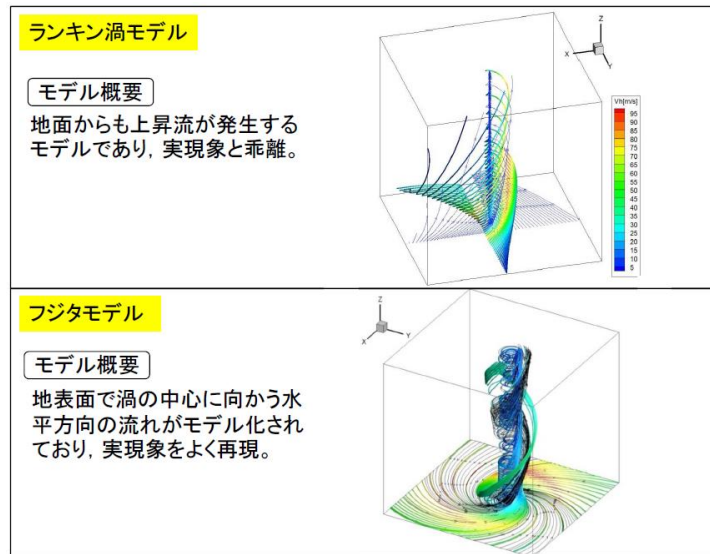
第 1 図 フジタモデルの風況イメージ

フジタモデルには以下の特徴がある。

- －観測に基づき考案され，実際に近い竜巻風速場をモデル化している。
- －比較的簡単な代数式で風速場を表現しうる。
- －米国 N R C の基準類でもランキン渦モデルと並列に参照されている。
- －ランキン渦モデルと比較して，風況をモデル化する上で解析プログラムが複雑（近年の計算機能力向上と竜巻評価コードの高度化により，問題は解決された）。

具体的な工学モデルは 3.1⁽³⁾及び 3.2⁽³⁾に示す。

竜巻の風速場モデルとして利用されている「ランキン渦モデル」，「フジタモデル」の風況イメージを第 2 図に示す。



出典：原子力発電所の竜巻影響評価について — 設計風速および飛来物速度の評価 — 改定4

2014年9月9日 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会

第2図 「ランキン渦モデル」, 「フジタモデル」の風況イメージ

3.1 フジタモデルによる竜巻風速場

a. フジタモデルの概要

フジタモデルでは、竜巻を半径方向に3つの領域(内部コア, 外部コア, 最外領域)に分割してモデル化している。

内部コアでは、中心周りに剛体回転運動するのみであり、上昇流はない。

外部コアでは、剛体回転運動と強い上昇流がある。

最外領域では、自由渦(ランキン渦モデルとほぼ同じ)として回転運動するが、地面付近で竜巻中心に向かう強い流れ(流入層)がある。

内部コア半径 R_n は外部コア半径 R_o に比例する。

$$R_n = nR_o \quad (1)$$

n は1以下の正の値であり、以下の経験式が与えられる。

$$n = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005R_o) \quad (2)$$

流入層の高さ H_i も外部コア半径 R_o に比例する。

$$H_i = iR_o \quad (3)$$

i は1以下の正の値であり、以下の経験式で与えられる。

$$i = 0.55(1 - n^2) \quad (4)$$

b. 周方向風速

周方向風速 V_θ は以下のようにモデル化している。

$$V_\theta = F_r(r')F_h(z')V_m \quad (5)$$

$$\text{ただし, } r' = r/R_0, \quad z' = z/H_i \quad (6) \text{ a, b}$$

$F_r(r')$ 及び $F_h(z')$ は以下のとおり定義される。

$$F_r(r') = \begin{cases} r' & (r' < 1) \\ 1/r' & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (7)$$

$$F_h(z') = \begin{cases} z'^{k_0} & (z' < 1) \\ \exp(-k(z'-1)) & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (8)$$

定数 k_0 , k の値は, $k_0 = 1/6$, $k = 0.03$ としている。

c. 半径方向風速

半径方向風速 V_r は, 以下のように周方向風速 V_θ に比例する。

$$V_r = V_\theta \tan \alpha$$

$\tan \alpha$ は以下の関数にて与えられる。

$$\tan \alpha = \begin{cases} 0 & (r' \leq n) \\ \frac{\tan \alpha_0}{1-n^2} \left(1 - \frac{n^2}{r'^2}\right) & (n < r' < 1) \\ \tan \alpha_0 & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{ただし, } \tan \alpha_0 = \begin{cases} -A_m(1-z'^{1.5}) & (z' < 1) \\ B_m \{1 - \exp(-k(z'-1))\} & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (10)$$

$$B_m = \frac{3}{(k_0+1)(k_0+2.5)} k A_m, \quad A_m = 0.75 \quad (11)$$

d. 上昇風速

上昇風速 V_z は以下のようにモデル化している。

$$V_z = \begin{cases} 0 & (r' \leq n) \\ V_m w_0 & (n < r' < 1) \\ 0 & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (12)$$

ただし,

$$w_0 = \begin{cases} \frac{3}{28} \cdot \frac{i}{1-n^2} A_m \left(16z'^{\frac{7}{6}} - 7z'^{\frac{8}{3}}\right) & (z' < 1) \\ \frac{iB_m \exp(-k(z'-1))}{k(1-n^2)} \{2 - \exp(-k(z'-1))\} & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (13)$$

e. 風速ベクトル

時刻 $t = 0$ で竜巻中心が原点に位置するものとし、竜巻が x 軸方向に移動速度 V_{tr} で移動すると仮定すると、時刻 t 、座標 (x, y, z) における風速場 V_w の各風速成分は以下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_r \cos \theta - V_\theta \sin \theta \\ V_r \sin \theta + V_\theta \cos \theta \\ V_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{tr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

ただし、 θ は竜巻中心と各点を結ぶ線分が x 軸となす角であり、竜巻中心からの距離 r は以下で定義されるものである。

$$r = \sqrt{(x - V_{tr}t)^2 + y^2} \quad (15)$$

3.2 飛来物の運動

a. 空中での運動

空中では平均抗力と重力のみが外力として作用するものとした。

ただし、地面付近では地面の存在により流れが非対称になること(地面効果)による揚力加速度 L を考慮した。

物体の空中での運動方程式は以下ようになる。

$$\frac{dV_M}{dt} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M| (V_w - V_M) - (g - L)K \quad (16)$$

V_M : 飛来物の速度ベクトル

ρ : 空気密度

$C_D A$: 飛来物の各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値

m : 飛来物の質量

g : 重力加速度

K : 鉛直上向きの単位ベクトル

地面効果による揚力加速度 L は、 $x-y$ 平面内の相対速度の 2 乗に比例し、さらに揚力は物体高さ d の 3 倍までの高さで減衰・消滅するものとし、揚力による加速度 L を以下のようにモデル化した。

$$L = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{C_L a}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right) \quad (17)$$

ただし、 $f\left(\frac{Z}{d}\right) = \frac{1 - (Z/3d)}{1 + (Z/d)}$, $Z = z - \frac{d}{2}$

C_L : 地上での揚力係数

a : 地上での物体の見附面積

$|_{x,y}$: x, y 成分のみの大きさ

$C_L a$ は風洞実験や数値シミュレーションで定められるが、本モデルで

は $C_D A$ で代用することとした。

$$L = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right) \quad (18)$$

b. 地面での運動

地面効果による揚力加速度 L と重力が鉛直方向の外力として作用するものとし、揚力加速度 L が重力よりも大きい場合 ($L > g$) に物体が浮上し、空中運動に移行するとした。

c. 時間積分法

時刻 t における竜巻の風速場は式(14)で与えられるので、式(16)を時間積分することによって飛来物の速度 $V_M(t)$ と位置 $X_M(t)$ の時刻歴を求めることができる。

時刻 τ から $\tau + \Delta\tau$ における加速度が一定と仮定すると、

$$\frac{dV_M(t)}{dt} = A(\tau) \quad (19)$$

$A(\tau)$: 加速度ベクトル

となり、式(16)は以下のようなになる。

$$A(\tau) = k |V_w(\tau) - V_M(\tau)| (V_w(\tau) - V_M(\tau)) - (g - L)K \quad (20)$$

ここで、 $k = \rho C_D A / 2m$ とした。

式(19)を時間積分すると以下の速度式 $V_M(t)$ 及び物体の位置 $X_M(t)$ を得る。

$$V_M(t) = V_M(\tau) + A(\tau)(t - \tau) \quad (21)$$

$$X_M(t) = X_M(\tau) + V_M(\tau)(t - \tau) + \frac{A(\tau)}{2}(t - \tau)^2 \quad (22)$$

(21), (22)より、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度 $V_M(t)$ と位置 $X_M(t)$ は以下で与えられる。

$$V_M(\tau + \Delta\tau) = V_M(\tau) + A(\tau)\Delta\tau \quad (23)$$

$$X_M(\tau + \Delta\tau) = X_M(\tau) + V_M(\tau)\Delta\tau + \frac{A(\tau)\Delta\tau^2}{2} \quad (24)$$

(23), (24)の右辺は時刻 $t = \tau$ における既知の速度・位置の関数なので、時間積分を行うことができる。

4. フジタモデルの適用の可能性について

4.1 実際の飛散状況による検証

(1) 自動車飛散実績との比較

藤田スケール（以下、「Fスケール」という。）の風速条件で自動車の浮上・飛散をフジタモデルで計算した結果と、各Fスケールにおける実際の被災状況を比較すると、第1表及び第2表に示すとおりよく一致しており、フジタモデルは実際に近い竜巻風速場をモデル化していると言える。

第1表 竜巻による自動車飛散実績（Fスケール別）

Fスケール	風速 [m/s]	自動車の被災状況
F2	50～69	cars blown off highway ⁽¹⁾ (自動車が道から吹き飛ばされる) ⁽²⁾
F3	70～92	cars lifted off the ground ⁽¹⁾ (自動車はもち上げられて飛ばされる) ⁽²⁾
F4	93～116	Cars thrown some distances or rolled considerable distances ⁽¹⁾ (自動車は何十メートルも空中飛行する) ⁽²⁾

第2表 フジタモデルによる自動車の飛散評価結果（江口ら）⁽³⁾

Fスケール との対応	最大水平 風速 V_D [m/s]	竜巻接線 速度 V_m [m/s]	竜巻移動 速度 V_{tr} [m/s]	計算結果		
				最大水 平速度 [m/s]	飛散 距離 [m]	飛散 高さ [m]
F2(静止)	69	59	10	1.0	1.4	0
F2(走行)	89*	59	30*	23	25	0.9
F3(静止)	92	79	13	23	34	1.1
F4(静止)	116	99	17	42	59	3.1

※ 竜巻移動速度に対する自動車の相対走行速度を 20m/s (72km/h) と仮定し、竜巻の移動速度に加えた場合

(2) 1978年4月17日、Grand Gulf 原子力発電所の竜巻被災事例

過去に発生した竜巻による被害状況とフジタモデルによる再現計算との比較を文献調査した。

1978年4月17日、ミシシッピ州で建設中の Grand Gulf 原子力発電所に来襲した竜巻の規模は、風速はF 2相当の $56\sim 67\text{ m/s}$ と推定⁽⁵⁾されるが、変電設備でF3 竜巻相当の被害が見られた⁽⁴⁾。

冷却塔の耐風設計風速は 40 m/s であり、これを $40\sim 70\%$ 超える風速にも耐えた⁽⁵⁾が、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、建設中の冷却塔(高さ 138 m)に衝突し、一部が破損した。

Grand Gulf 原子力発電所資材置き場のパイプ飛散状況は、次のように報告されている。

パイプを収納した木箱(一部2段重ね)は浮上せず転倒しパイプが散乱するが、その範囲は $7\sim 9\text{ m}$ にとどまる。(Pieces of pipe were scattered over a large area, but none travelled more than $25\sim 30\text{ ft.}$)⁽⁵⁾

上に掲げる実際の Grand Gulf 原子力発電所資材置き場のパイプ飛散被害状況に対して、工学モデルを用いた再現計算をして比較する。

計算条件は第3表のとおりとする。

第3表 Grand Gulf 原子力発電所パイプ飛散の計算条件

パイプ仕様	名称：Transite パイプ，材質：コンクリート・石綿製，長さ： 8 ft. ，直径(内径)： 8 in.
計算での仮定	外径 9 in. ，密度 1700 kg/m^3 ， →飛行定数 $C_dA/m = 0.008\text{ m}^2/\text{kg}$ ，物体高さ $d = 0.229\text{ m}$
竜巻の条件	最大風速 $V_d = 67\text{ m/s}$ ，最大接線風速 $V_m = 53.6\text{ m/s}$ ， 移動速度 13.4 m/s ，竜巻半径 $R_m = 45.7\text{ m}$

計算結果は第4表のとおりであった。

第4表 Grand Gulf 原子力発電所パイプ飛散の計算結果

モデル	初期高さ [m]	飛散距離 [m]	飛散高さ (初期高さから の浮上高さ)	最大水平速度 [m/s]
フジタモデル	1 ※	1.2	浮上なし	4.9
ランキン渦モデル	40	227	0.34 m	40.9
ランキン渦モデル	1	42.6	0.34 m	30.7

※2段重ねで配置されていた状況を踏まえ設定

再現計算結果と実際の被災状況の記録を比較すると、フジタモデルでは、初期高さから浮上しないとの結果が得られ、実際に確認された状況（浮上せずに転倒した木箱からパイプが散乱）を再現していると評価できる。

一方、ランキン渦モデルでは、飛散高さが初期高さを1mとした場合においても実際に確認された状況とパイプの飛散状況に大きな差があり、地表面での風況場は過大な結果を与えることがわかった。

よって、竜巻対策を実施する上で、ランキン渦モデルを用いた場合は非常に過大な対策となるが、フジタモデルを用いた場合は実現象に即した現実的な対策が可能といえる。

(3) 佐呂間竜巻(平成18年11月7日)による被災事例

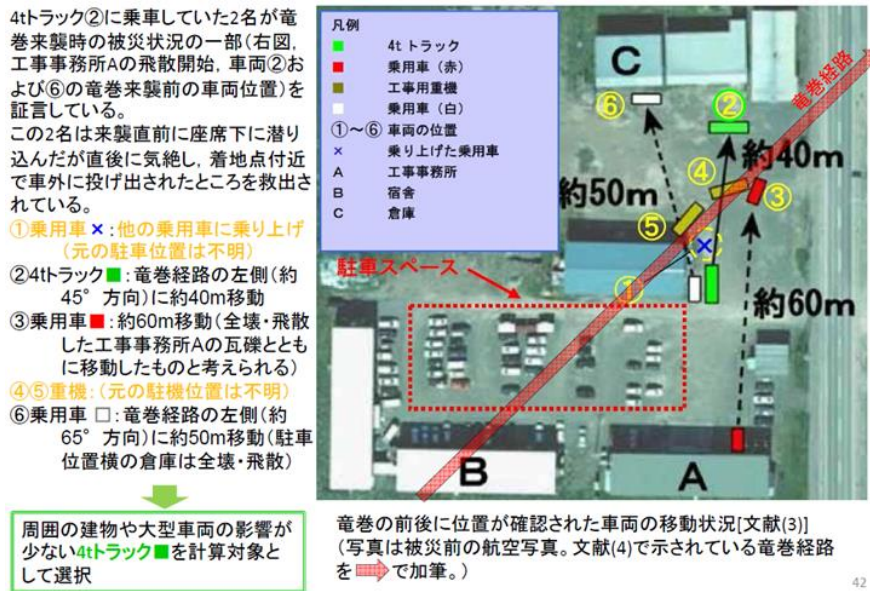
a. 佐呂間竜巻の被害状況から確認されたパラメータを用いた飛来距離計算

平成18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。)により工事事務所敷地内の車両が被災した事例について、実際の被災状況と、工学モデルによる飛来距離の計算結果を比較した。

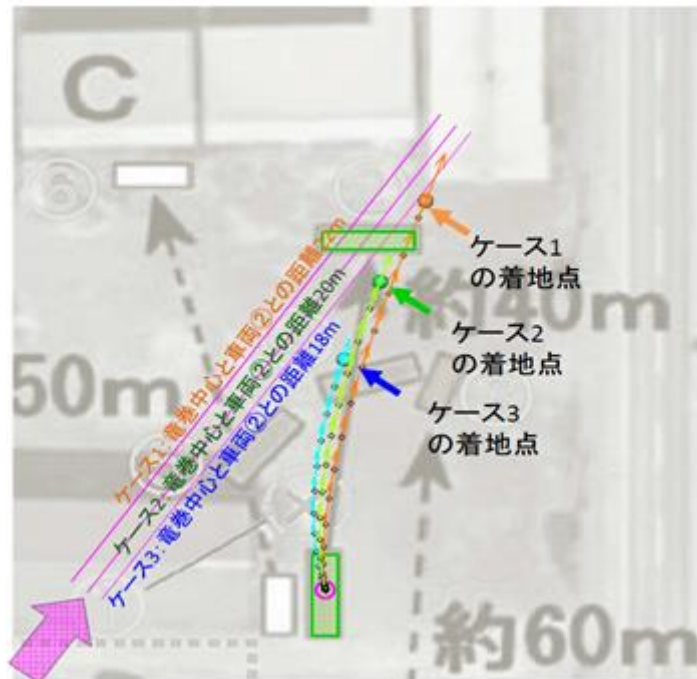
この被災事例では、工事事務所近傍に停車していた4トントラック(第3図の②)に乗車していた2名が竜巻来襲時の被災状況の一部(竜巻来襲前の車両位置等)を証言している。この2名は来襲直前に座席下に潜り込んだが直後に気絶し、着地点付近で車外に投げ出されたところを救出されている。

佐呂間竜巻による被害状況から確認されたパラメータを用い、解析コードにより飛来距離算定を行った結果、竜巻の移動経路と車両の位

置関係に依存するが,確認された被害状況(4トントラック②の移動距離 40m)と概ね合致した。(第4図)



第3図 佐呂間竜巻による被災状況⁽⁶⁾⁽⁷⁾



第4図 佐呂間竜巻のパラメータを用いた飛来距離計算結果

第5表 佐呂間竜巻による4トントラックの飛来距離の算定条件と結果

条件	算定条件・結果	備考
空力パラメータ	$C_{La} / m = 0.0044$ $C_{DA} / m = 0.0056$	被災した4トントラックは車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D(8.1 m × 2.24 m × 高さ 2.5 m, 質量 4,000 kg)の仕様を採用した。物体が空中にある場合の抗力の算定には C_{DA} / m の値を用い、揚力の算定には $C_{La} / m = 0.0044$ に相当する条件を設定*。物体高さ $d = 2.5$ m とする。
竜巻と車両の位置関係	竜巻の進行方向の右側，中心移動経路から 18～22m の位置	被害状況から推定される位置関係を入力条件として設定。現場の詳細が不明のため，18, 20, 22m の3パターンについて評価を実施した。
竜巻最大風速	92 m/s	被害状況から推定される風速(F3)を設定。
竜巻移動速度	22 m/s	被害記録から算定される移動速度を設定。
最大接線風速半径	20 m	被害状況から推定される最大接線風速半径を設定。
飛来距離	26～45 m	実際に確認された車両の移動距離(約 40m)と概ね合致。

※竜巻は遠方から接近するため，参考文献(8)の風洞試験結果を参考として，「風速 60m/s 以下では浮上・移動しない条件」を設定する。 $C_{La} / m = 0.0044$ は，風速 60m/s 以下では浮上/移動しない条件に相当する。

b. 佐呂間竜巻の条件を用いた場合の最大飛来距離の算定

佐呂間竜巻における被害状況から確認された各種パラメータを用いて、解析コードによる最大飛来距離の算定を行った。

最大飛来距離の算定においては、空力パラメータ(揚力の算定)に保守性を考慮した。

最大飛来距離の算定結果は82mとなり、実際に確認された車両の移動距離(約40m)に比べて大きい算定結果が得られた。

第6表 佐呂間竜巻のパラメータを用いた場合の最大飛来距離の算定条件と結果

条件	算定条件・結果	備考
空力パラメータ	$C_{La} / m = 0.0056$ $C_{DA} / m = 0.0056$	揚力の算定においても C_{DA} / m の値を設定。
車両の位置関係	竜巻の進行方向に対して右側 90° , 最大接線風速半径の真下付近	車両が竜巻の最大風速を受ける位置関係を設定。
最大風速	92 m/s	被害状況から推定される風速(F3)を設定。
移動速度	22 m/s	被害記録から算定される移動速度を設定。
最大接線風速半径	20 m	被害状況から推定される最大接線風速半径を設定。
最大飛来距離	82 m	

出典: 原子力発電所の竜巻影響評価について－設計風速および飛来物速度の評価－改定4, 2014年9月4日 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会

4.2 フジタモデルの適用についてのまとめ

フジタモデルは観測に基づき考案された竜巻風速場の工学モデルであり、実際に近い竜巻風速場をモデル化している。1978年のGrand Gulf原子力発電所の竜巻被災や、平成18年の佐呂間町での竜巻被災における地上物の転倒または移動状況は、フジタモデルを用いると実際に確認された状況をよく再現することがわかっている。

5. 参考文献

- (1) Fujita, T. T., Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity, SMRP Research Paper 91 (1971), University of Chicago, Chicago, IL, p.42.
- (2) 気象庁 HP
- (3) 江口 譲, 杉本聡一郎, 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
- (4) J. R. McDonald, T. Theodore Fujita : His Contribution to Tornado Knowledge through Damage Documentation and the Fujita Scale, pp.63-72, vol.82, no.1, Bull. of Amer. Meteor. Soc., 2001
- (5) T. Fujita and J. R. McDonald : Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi, nuclear power plantsite: Aerial and ground surveys. NNUREG/CR-0383, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1978.
- (6) 札幌管区気象台: 災害時気象調査報告, 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, 災害時自然現象報告書 2006 年第 1 号, 2006
- (7) 建築研究所 構造研究グループ 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, 2006 年 11 月 21 日
- (8) T. Schmidlin *et al.*, UNSAFE AT ANY (WIND) SPEED? Testing the Stability of Motor Vehicles in Severe Winds, pp.1821-1830, vol.83, no.12, Bull. of Amer. Meteor. Soc., 2002

以 上