

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-094 改1
提出年月日	平成30年7月20日

V-5-9 計算機プログラム（解析コード）の概要・TONBOS

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
3. 解析手法	4
3.1 基礎方程式	4
3.2 飛来物運動方程式の時間積分法	6
3.3 評価条件	7
3.4 適用範囲	8
4. 解析フローチャート	9
5. 解析コードの検証	10
5.1 フジタスケールとの比較	10
5.2 米国Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例	11
5.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例	13
6. 妥当性確認	19
7. 参考文献	19

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）TONBOSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
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	Ver. 3

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	TONBOS
使用目的	竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価
開発機関	一般財団法人 電力中央研究所
開発時期	2013年
使用したバージョン	Ver. 3
コードの概要	<p>TONBOS（以下、「本解析コード」という。）は、一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。</p> <p>空気中の物体が受ける抗力、揚力による運動を計算することで、竜巻による風速場の中での飛来物の軌跡を解析することができる解析コードであり、飛来物の飛散距離等の算出が実施できる。</p> <p>仮定する風速場は、地面付近の風速場をよく表現できているフジタモデルDBT-77（DBT:Design Basis Tornado）とする。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・自動車飛散解析において、フジタスケールの各スケールに対応する被災状況とおおむね合致した結果が得られた。</li> <li>・パイプ飛散解析において、Grand Gulf 原子力発電所への竜巻襲来事例とおおむね合致した結果が得られた。</li> <li>・自動車やトラックの飛散解析において、佐呂間竜巻での車両飛散事例とおおむね一致した結果を得られた。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>TONBOSを竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価に使用することは次のとおり妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。</li> <li>・評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。</li> </ul>

### 2.1 TONBOS Ver. 3の特徴

「TONBOS」は、竜巻による風速場は地面付近の風速場をよく表現できているフジタモデル DBT-77 (DBT:Design Basis Tornado) が移動するものとして定め、飛来物を質点系モデルとして、飛来物が(流体)抗力、揚力及び重力を受けて運動する軌跡に対する運動方程式を解くことにより、飛来物の飛散距離、飛散高さ及び飛散速度(以下、「飛散距離等」という。)を算定する解析コードである。

## 3. 解析手法

### 3.1 基礎方程式

#### (1) 竜巻の風速場

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<sup>(1)</sup>と同様に以下の式で定義する。

無次元座標  $r = R/R_m$      $z = Z/H_i$

接線風速  $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

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

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

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

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1-v^2} A (16z^{7/6} - 7z^{8/3}) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-v^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

$k_0, k, v, \eta, A, B$ は定数

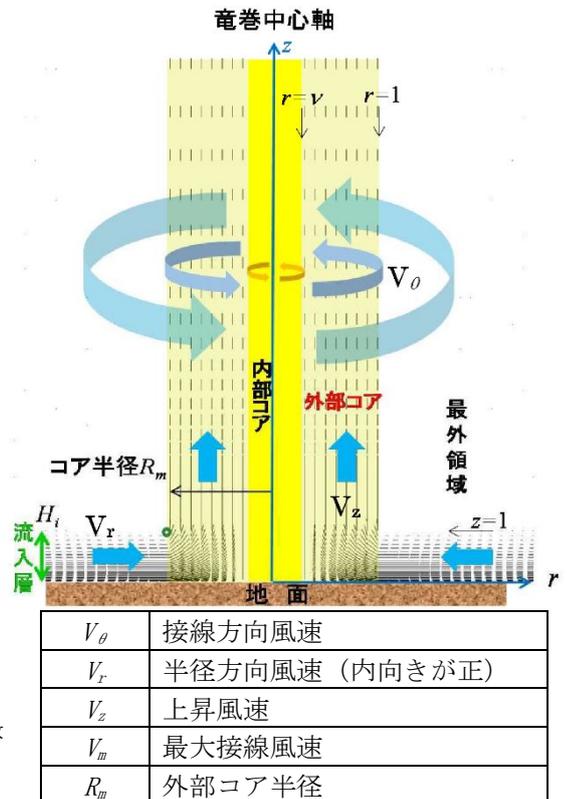


図3-1 フジタモデルの概要

また、上記以外の定数として、内部コアの半径 $R_v$ と外部コアの半径 $R_m$ の比 $v = R_v / R_m$ 、流入層高さ $H_i$ 、その他定数 $k_0, k, A, B$ についても、Fujita Work Book<sup>(1)</sup>に基づく以下の式及び値を用いる。

内部コア半径と外部コア半径の比  $v = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005R_m)$  (1)

流入層高さ  $H_i = \eta R_m$     ここで  $\eta = 0.55(1-v^2)$  (2)

その他定数

$$k_0 = 1/6, k = 0.03, A = 0.75, B = 0.0217 \quad (3)$$

時刻 $t=0$ で竜巻中心は原点に位置するものとし、竜巻の風速場は飛来物の影響を受けないと仮定すると、時刻 $t$ における竜巻の風速場 $V_w$ の各風速成分 $(u, v, w)$ は以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_r \cos \theta - V_{\theta} \sin \theta \\ V_r \sin \theta + V_{\theta} \cos \theta \\ V_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{tr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $V_{tr}$ は $x$ 軸方向の竜巻の移動速度、 $\theta$ 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。

$$r = \sqrt{(x - V_{tr} t)^2 + y^2} \quad (5)$$

なお、静止する観測者からみた最大水平風速 $V_D$ は、 $x$ 軸方向の竜巻の移動速度 $V_{tr}$ を $V_m$ に加えた以下で計算される。

$$V_D = V_m + V_{tr} \quad (6)$$

## (2) 飛来物の運動

飛来物の運動は、既往研究<sup>(2)~(6)</sup>と同様に方向性がない平均的な抗力（抗力係数一定）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地面の損座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。この場合、物体飛行の空中での運動方程式は以下ようになる。

$$\frac{dV_M}{dt} = \frac{\rho}{2} \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M| (V_w - V_M) - (g - L)k \quad (7)$$

ここで、各変数は以下で定義する。

$V_M$ ：飛来物の速度ベクトル

$V_w$ ：風速ベクトル（フジタモデルでの風速場と移動速度の和）

$\rho$ ：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

また、揚力加速度 $l$ は、既往の風洞実験の結果<sup>(7) (8)</sup>を考慮して、物体高さ $d$ の物体にかかる揚力が、物体底面が地面から $3d$ の高度であるときに消滅するものとした。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する。（ $Z$ ：物体底面の高度（ $=z-d/2$ ））

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (8)$$

ここで $f(Z/d)$ は、既往の風洞実験の結果<sup>(7)</sup>を参考に、以下で定義する。

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1 - (z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\} & 0 \leq Z \leq 3d \\ 0 & 3d < Z \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2 飛来物運動方程式の時間積分法

時刻 $t$ における竜巻の風速場 $V_w = (u, v, w)$ は、式(4)で与えられるため、式(7)を時間積分することによって、飛来物の速度と位置の時刻歴を求めることができる。一定加速度法では、時刻 $\tau$ から時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度が一定と仮定する。つまり、

$$\frac{dV_M(t)}{dt} = A(\tau) \quad (10)$$

ここで、加速度ベクトル $A(\tau)$ は、以下を表す。

$$A(\tau) = \frac{\rho}{2} \frac{C_D A}{m} |V_w(\tau) - V_M(\tau)| \{V_w(\tau) - V_M(\tau)\} - (g - L)k \quad (11)$$

式(11)を時間積分すると、以下を得る。

$$V_M(t) = V_M(\tau) + A(\tau)(t - \tau) \quad (12)$$

さらに式(12)を時間積分すると、以下の飛来物位置 $X_M(t)$ を得る。

$$X_M(t) = X_M(\tau) + V_M(\tau)(t - \tau) + \frac{A(\tau)}{2}(t - \tau)^2 \quad (13)$$

従って、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度と位置は以下で与えられる。

$$V_M(t + \Delta\tau) = V_M(\tau) + A(\tau) \Delta\tau \quad (14)$$

$$X_M(t + \Delta\tau) = X_M(\tau) + V_M(\tau) \Delta\tau + \frac{A(\tau) \Delta\tau^2}{2} \quad (15)$$

式(14)、(15)の右辺は時刻 $t = \tau$ における既知の速度・位置の関数であるため、陽解法として時間積分を実施する。

### 3.3 評価条件

以下の初期条件を設定する。

- 竜巻の風速場（図3-2）
- 竜巻の最大水平風速 ( $V_m$ ) が85 m/sとなる風速場を設定する。
- 竜巻の移動速度 ( $V_{tr}$ ) は15 m/sとする。
- 竜巻風速半径（外部コア半径： $R_m$ ）は30 mとする。

初期高さ（物体の設置高さ。地面設置の場合は初期高さ0 m）に51×51 個の物体を配置する。

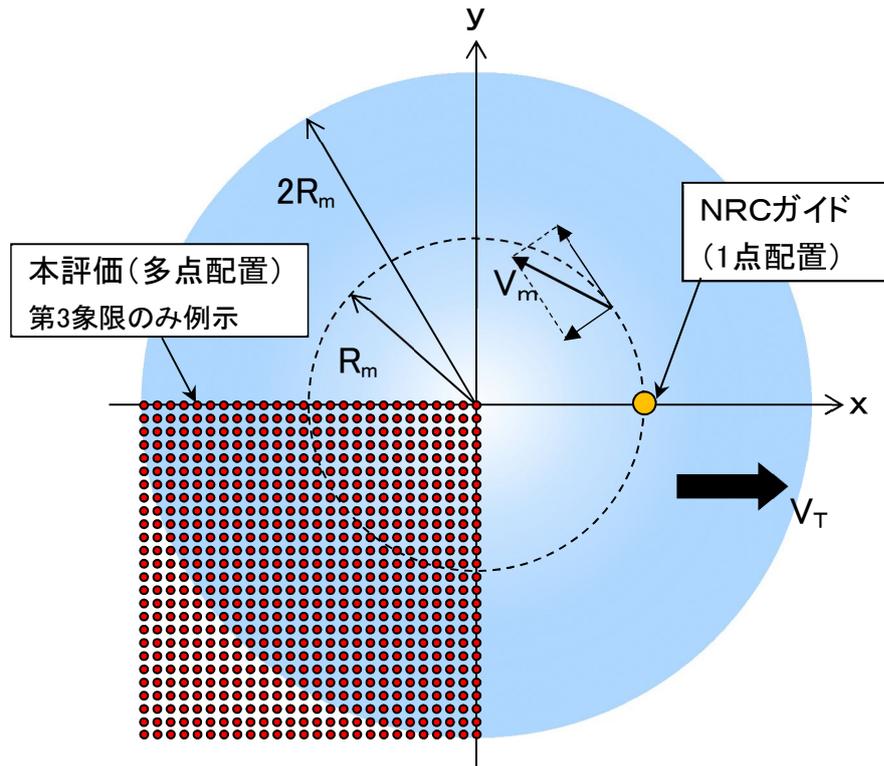


図3-2 竜巻の風速場及び初期物体配置

・飛散距離等

図3-3に示すとおり，飛散距離は初期位置からの距離とし，飛来物が地表面に落ちた場合は，それ以上移動しないものとする。飛散高さは，初期高さからの相対高さとする。

2,601 (51×51) 個の算出結果のうち，飛散距離，飛散高さ及び飛散速度の最大値を，解析結果として採用する。

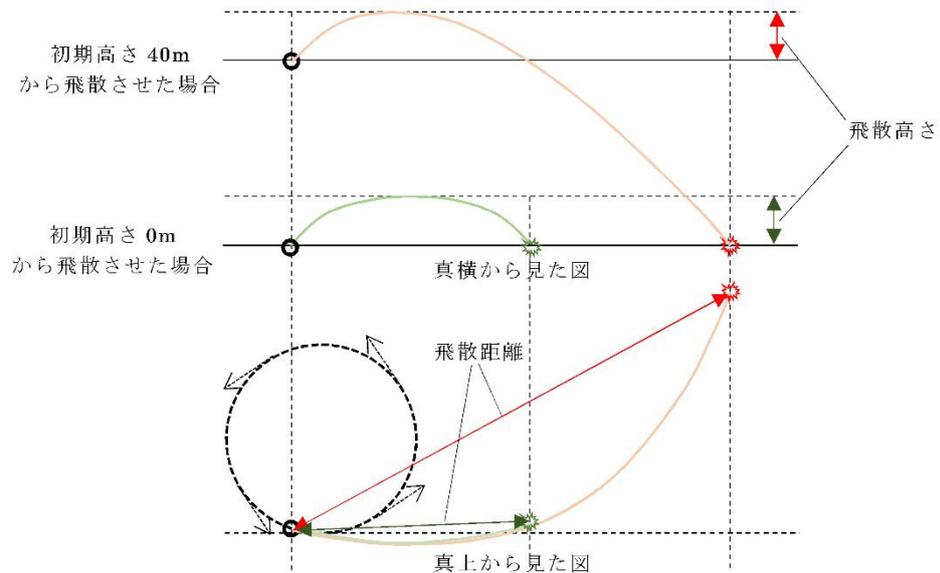


図3-3 飛散距離及び飛散高さ

### 3.4 適用範囲

解析は以下の条件で実施することとする。

- ・竜巻の最大風速：100 m/sとする。
- ・竜巻の最大接線風速：最大風速との比が0.85となる85 m/sとする。
- ・竜巻中心の移動速度：最大風速との比が0.15となる15 m/sとする。
- ・竜巻の最大接線風速半径：30mとする。
- ・空力パラメータ：制限なし。
- ・解析時間刻み：0.01 秒以下。
- ・重力加速度，空気密度：それぞれ9.80665 m/s<sup>2</sup>，1.22 kg/m<sup>3</sup>とする。

4. 解析フローチャート

図4-1に解析フローチャートを示す。

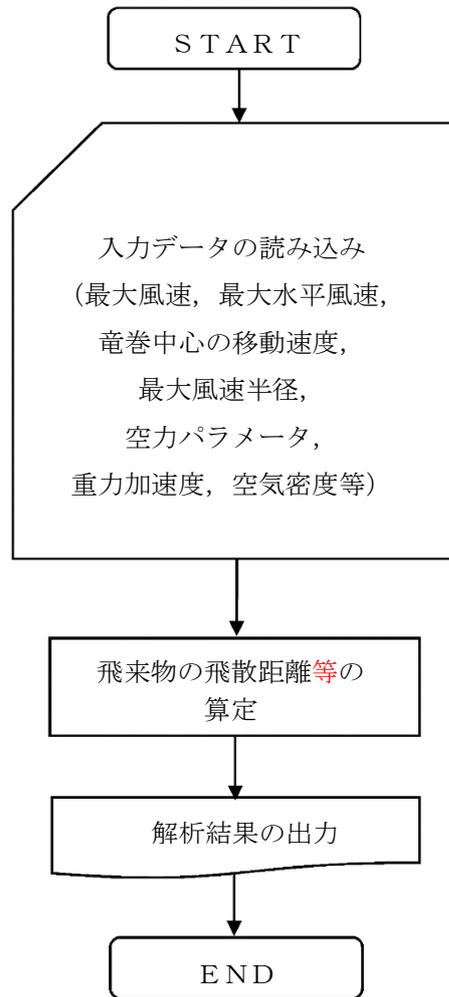


図4-1 解析フローチャート

## 5. 解析コードの検証

### 5.1 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5-1に示す。

ここで、TONBOSによって、各スケールに対応する最大風速(69 m/s, 92 m/s, 116 m/s)におけるフジタモデルによる自動車飛散解析を行う。その結果を表5-2に示す。

TONBOS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。

表5-1 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, 又は, かなりの距離を転がる)

表5-2 TONBOSによる自動車の飛散解析結果 ( $C_D A/m=0.0052 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) <sup>(9)</sup>

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 移動速度 [m/s]	計算結果		
				速度 [m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2	69	59	10	1.0	1.4	0
F3	92	79	13	23	34	1.1
F4	116	99	17	42	59	3.1

## 5.2 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。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5-1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、TONBOSを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5-3のとおりとする。

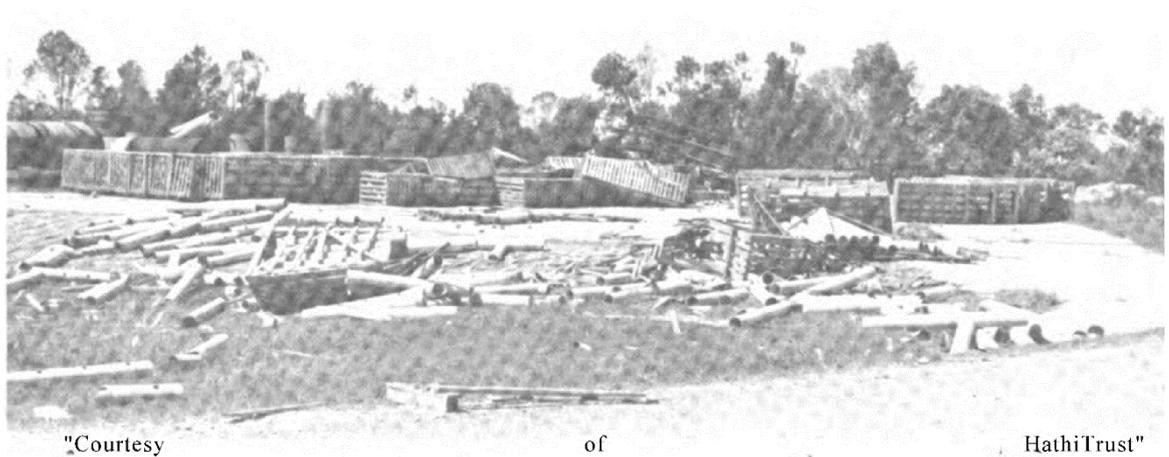


図5-1 Grand Gulf原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況<sup>(10)</sup>

被害状況	<p>・パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上せず転倒し、パイプが周辺7 m～9 mに散乱。</p> <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.<sup>(24)</sup>)</p>
------	---

表5-3 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<sup>(9)</sup>

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/s
飛来物条件	直径（外径）	9 inch (0.2286 m)
	物体高さ	0.229 m
	密度	1700 kg/m <sup>3</sup>
	飛行定数C <sub>D</sub> A/m	0.0080 m <sup>2</sup> /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>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=[-2Rm, +2Rm ]）に等間隔配置</li> <li>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。）</li> </ul>	

計算結果を表5-4に示す。TONBOSによるパイプ飛散解析の結果は、パイプがほとんど飛散せず、木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。

表5-4 Grand Gulf原子力発電所のパイプの飛散計算結果<sup>(9)</sup>

風速場モデル	初期物体高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ*1	最大水平速度
フジタモデル	1 m	1.2 m	0.0 m	4.9 m/s

注記 \*1：初期物体高さからの飛散高さ。

### 5.3 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」という。）により、4tトラックが約40 m移動したことが報告されている<sup>(11)</sup>。被災状況を図5-2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（図5-2左上画像の②）。また、4tトラックの他に2 台の自動車（図5-2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。

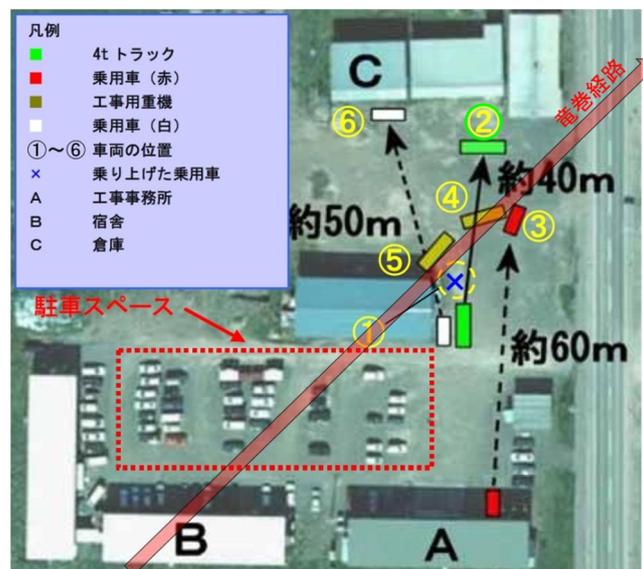


図5-2 佐呂間竜巻(2006. 11. 7)による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）  
（文献(11)の写真に竜巻被害の方向を  で加筆）

ここでは、TONBOSによる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う。

方法としては、下記の2通りとする。

- (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) 東海第二発電所に適用する飛散解析手法による検証

(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<sup>(11)(12)</sup>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5-5のように設定する。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60 m/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する。

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5-6及び図5-3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。このように、TONBOSによる4tトラックの飛散解析の結果で、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る。

表5-5 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件<sup>(9)</sup>

竜巻条件	竜巻の最大風速		92 m/s
	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	車種不明のため、三菱ふそうPA-FK71Dの仕様を採用	車両長さ	8.1 m
		車両幅	2.24 m
		車両高さ	2.5 m
		車両質量	4000 kg
	飛行定数 $C_D A/m$		0.0056 m <sup>2</sup> /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物体個数：1台</li> <li>・ 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</li> <li>・ 設置高さ0 m</li> </ul>		

表5-6 佐呂間竜巻での4tトラックの飛散計算結果<sup>(9)</sup>

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	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

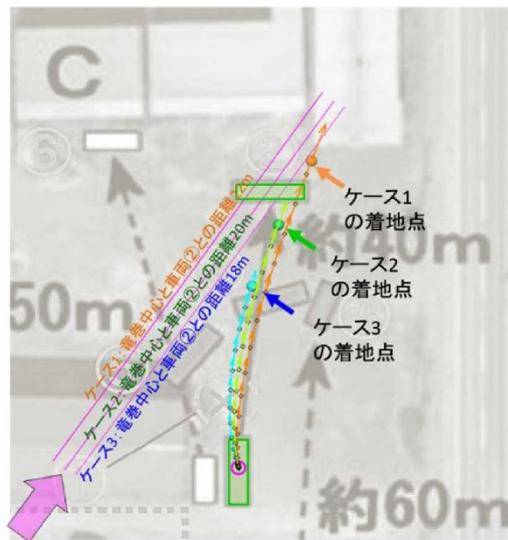


図5-3 TONBOSによるトラック飛散の再現解析結果<sup>(9)</sup>

(ii) 乗用車の飛散解析

白い乗用車（図5-2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する。

白い乗用車の計算条件について、表5-7に示す。

表5-7 佐呂間竜巻の白い乗用車の計算条件

竜巻条件	表5-5と同様		
飛来物条件	白い自動車 〔トヨタカローラ〕 を仮定	車両長さ	4.4 m
		車両幅	1.7 m
		車両高さ	1.5 m
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0097 m <sup>2</sup> /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物体個数：1台</li> <li>・ 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</li> <li>・ 設置高さ0 m</li> </ul>		

白い乗用車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5-8及び図5-4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5-2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る。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5-2のA）のすぐ下流側に駐車しており、そのがれきの影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

表5-8 佐呂間竜巻での白い乗用車の飛散計算結果

解析 ケース	白い乗用車と竜巻 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	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

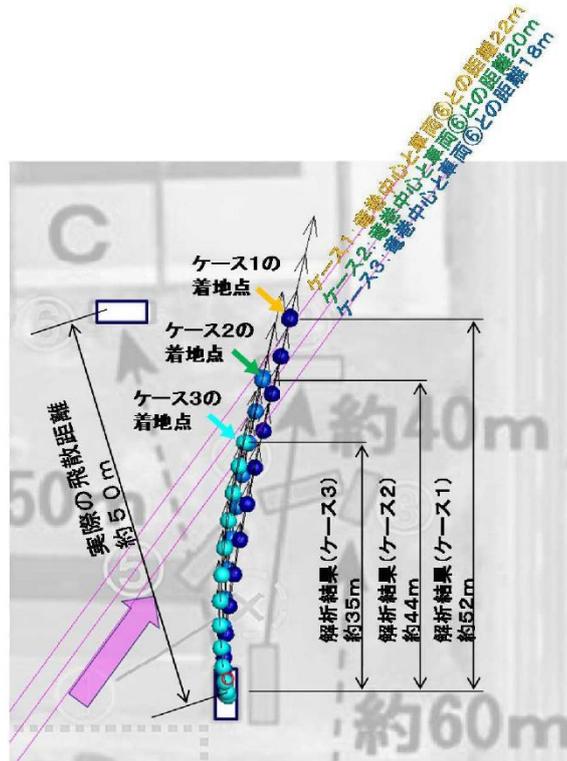


図5-4 TONBOSによる白い乗用車飛散の再現解析結果

(b) 東海第二発電所に適用する飛散解析手法による検証<sup>(13)</sup>

ここでは、東海第二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トラック及び白い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5-9に示す。竜巻条件としては、設計竜巻の最大風速を92 m/sとし、その他の特性量については、ガイドに例示されている方法に従い、移動速度 $V_t$ を14 m/s（最大風速の15%）、竜巻コア半径 $R_m$ を30 mとする。

表5-9 東海第二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	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	表5-5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5-10に実際の被災状況と、東海第二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5-5に被災後の4tトラックの状況を示す。

TONBOS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3.6 m、最大飛散距離は63.4 mとなる。

実際の4tトラック飛散距離は約40 mであり、TONBOSによる飛散距離の評価結果はこれを上回る。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較はできないものの、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等から、東海第二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。

表5-10 実際の被災状況と「東海第二発電所の飛来物評価法」との結果の比較（4tトラックの場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ* <sup>1</sup>	最大水平速度
フジタモデル (地上)	63.4 m	3.6 m	36.0 m/s (毎時130 km)
実際の被害状況	約40 m	乗員2名が幸いにも存命で救出され、搬送先の病院で聞き取り調査に応じており <sup>(11)</sup> 、トラックが地面から3.6 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とどめていることが示されており <sup>(11)</sup> 、実際の飛来物速度は本解析で得られた最大速度（約130 km/h）を超える飛散速度であったとは考えにくい。

注記 \*1: 初期物体高さからの飛散（浮上）高さ



図5-5 竜巻による被災後の4tトラックの様子<sup>(12)(14)</sup>

(ii) 乗用車（白）の飛散解析

4tトラックの場合と同様に、東海第二発電所に適用する飛来物評価条件で白い乗用車の飛散解析を行った場合の結果を表5-11に示す。

白い乗用車の場合も、TONBOS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5-11 実際の被災状況と「東海第二発電所の飛来物評価法」との結果の比較（白い乗用車の場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ* <sup>1</sup>	最大水平速度
フジタモデル (地上)	82.3 m	4.2 m	44.1 m/s
実際の被災状況	約50 m	—	—

注記 \*1：初期物体高さからの飛散高さ。

## 6. 妥当性確認

TONBOSを竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価に使用することは次のとおり妥当である。

- ・本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。
- ・評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。

## 7. 参考文献

- (1) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978
- (2) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (3) 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.
- (4) 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
- (5) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (6) 丸山敬, 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旨
- (7) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.
- (8) 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.
- (9) 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)
- (10) 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.

- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 江口譲, 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.
- (14) 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