東海第二発電所	一工事計画審査資料
資料番号	工認-094 改3
提出年月日	平成30年8月3日

V-5-9 計算機プログラム(解析コード)の概要・TONBOS

1.	は	じめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1	. 1	使用状況一覧 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.	解	析コードの概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2	. 1	TONBOS Ver.3の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.	解	析手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3	. 1	基礎方程式 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
3	. 2	物体の運動方程式の時間積分法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3	. 3	評価条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3	. 4	解析条件 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4.	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・・・・・・10
5	. 2	米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5	. 3	佐呂間竜巻での車両飛散事例・・・・・・12
6.	妥	当性確認・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
7.	参	考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

目次

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	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	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。 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飛散軌跡を評価することができる解 析コードであり,物体の飛散距離等の算出が可能である。 仮定する風速場は,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フジタモデルDBT-77 (DBT:Design Basis Tornado)とする。
	【
	木解析コードの検証の内容け次のとおりである
	・白動車の飛動解析において フジタスケールの冬スケールに対応す
	る被災状況とおおむわ合致した結果が得られた
	・パイプの飛動解析において Grand Gulf 恒子力発電所への音券龍本
	事例とおおむね合致した結果が得られた。
(Verification)	・自動車及びトラックの飛散解析において、佐呂間竜巻での車両飛散
及び	事例とおおむね一致した結果を得られた。
妥当性確認	
(Validation)	【妥当性確認(Validation)】
	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。

2.1 TONBOS Ver.3の特徴

「TONBOS」は、竜巻の風速場としてフジタモデルDBT-77 (DBT:Design Basis Tornado)を用 い、その風速場が水平方向に移動するものとして定め、かつ物体を質点系モデルとして、物体 が流体中において抗力、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、物体の飛散距離、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⁽¹⁾と同様に以下の式で定義する。



図3-1 フジタモデルDBT-77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⁽¹⁾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	-0.7exp(-0.0	005R _m)	(1)
流入層高さ	$H_i = \eta R_i$	。 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, $B = 0.0217$	7 (3)

時刻t=0で竜巻中心は原点に位置するものとし、竜巻の風速場は物体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) は以下のようになる。

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

ここで、 V_{tr} はx軸方向の竜巻の移動速度、 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。

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

$$V_{\rm p} = V_{\rm m} + V_{\rm tr} \tag{6}$$

(2) 物体の運動

物体の運動は,既往研究^{(2)~(6)}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,地表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。この場合,物体の空中での運 動方程式は以下のようになる。

$$\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{M}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\rho}{2} \frac{C_{\mathrm{D}}A}{\mathrm{m}} |V_{\mathrm{W}} - V_{\mathrm{M}}| (V_{\mathrm{W}} - V_{\mathrm{M}}) - (g - L)k$$
(7)

ここで、各変数は以下で定義する。

- V_M:物体の速度ベクトル
- Vw: 風速ベクトル (フジタモデルでの風速場と移動速度の和)
- ρ :空気密度
- C_DA: 物体の各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値
- m:物体の質量
- 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0は, 既往の風洞実験の結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾を考慮して, 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))

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_{D} A}{m} |V_{W} - V_{M}|_{x,y}^{2} f(Z/d)$$
(8)

ここでf(Z/d)は、既往の風洞実験の結果⁽⁷⁾を参考に、以下で定義する。
f(Z/d) =
$$\begin{cases} \{1 - (z/3d) \} / \{1 + (Z/d) \} & 0 \le Z \le 3d \\ 0 & 3d < Z \end{cases}$$
(9)

3.2 物体の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、物体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 τ から時刻 $\tau + \varDelta \tau$ における加速度が一定と仮定する。つまり、

(11)

$$\frac{\mathrm{d}V_{M}(t)}{\mathrm{d}t} = A(\tau)$$
(10)

ここで、加速度ベクトルA(τ)は以下を表す。 A(τ) = $\frac{\rho}{2} \frac{C_{D}A}{m} | V_{W}(\tau) - V_{M}(\tau) | \{ V_{W}(\tau) - V_{M}(\tau) \} - (g - L)k$

式(11)を時間積分すると、以下を得る。 $V_{M}(t) = V_{M}(\tau) + A(\tau)(t - \tau)$ (12)

さらに式(12)を時間積分すると、以下の物体位置X_M(t)を得る。

$$X_{M}(t) = X_{M}(\tau) + V_{M}(\tau)(t - \tau) + \frac{A(\tau)}{2}(t - \tau)^{2}$$
(13)

従って、時刻t= $\tau + \Delta \tau$ における物体の速度と位置は以下で与えられる。 $V_{M}(t + \Delta \tau) = V_{M}(\tau) + A(\tau) \Delta \tau$ (14)

$$X_{M}(\tau + \Delta \tau) = X_{M}(\tau) + V_{M}(\tau) \Delta \tau + \frac{A(\tau) \Delta \tau^{2}}{2}$$
(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(Vm)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0m)に51×51 個の物体を配置する。 **v**



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、物体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。 2601(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 解析条件

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/s², 1.22 kg/m³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の飛散解析を行った結果を表5-2に示す。

TONBOSによる自動車の飛散解析結果は、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。

フジタ	風速	白動市の枕巛座辺	
スケール	[m/s]	日動車の放火状況	
F2 50-69		cars blown off highway	
		(自動車が道路からそれる)	
D 0 Z 0 00		cars lifted off the ground	
F3	70-92	(自動車が地面から浮上する)	
		cars thrown some distances or rolled considerable	
F4	93-116	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5-1 フジタスケールで示されている自動車の被災状況

表5-2 TONBOSによる自動車の飛散解析結果(C_DA/m=0.0052 m²/kg)⁽⁹⁾

コミジロ	最大	竜巻	竜巻		計算結果	
777	水平風速	接線風速	移動速度	飛散速度	飛散距離	飛散高さ
スクール	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m]	[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、米国のミシシッピー州にて建設中の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、竜巻による物体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、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 を用いた再現解析を行った。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原子力発電所の資材置場におけるパイプの散乱状況⁽¹⁰⁾

被害状況	・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7 m~9 mに散乱
	(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. $^{(24)})$

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解析の計算条件⁽⁹⁾

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)		
	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	・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			
	・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5-4に示す。TONBOSによるパイプの飛散解析の結果は、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。

国注册工艺》	初期物体	計算	算結果(フジタモデノ	レ)
風迷場モナル	高さ	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

表5-4 Grand Gulf原子力発電所のパイプの再現解析結果⁽⁹⁾

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⁽¹¹⁾。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 つか筆)

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トラック及び乗用車)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トラックの再現解析

再現解析の条件として,入手可能なデータ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾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,物体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。

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 車両長さ		8.1 m		
	ふそうPA-FK71Dの仕様 車両幅		2.24 m		
	を採用 車両高さ		2.5 m		
		車両質量	4000 kg		
	飛行定数C _D A/	m	$0.0056 \text{ m}^2/\text{kg}$		
初期配置	・物体個数:1台				
	・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				
	 設置高さ0 m 				

表5-5 佐呂間竜巻の4tトラックの再現解析の計算条件⁽⁹⁾

表5-6 佐呂間竜巻での4tトラックの再現解析結果⁽⁹⁾

解析	車両と竜巻中心と	計算結果 (フジタモデル)		
ケース	の距離	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⁽⁹⁾

(ii) 乗用車の再現解析

乗用車(白) (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。

乗用車(白)の計算条件について、表5-7に示す。

竜巻条件				
	乗用車 (白)	車両長さ	4.4 m	
飛来物条件	(トヨタカローラ)	車両幅	1.7 m	
	し を仮定 し	車両高さ	1.5 m	
	飛行定数C _D A/	m	$0.0097 \text{ m}^2/\text{kg}$	
	 ・物体個数:1台 			
初期配置	・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			
	・設置高さ0 m			

表5-7 佐呂間竜巻の乗用車(白)の再現解析の計算条件

乗用車(白)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。

解析	乗 用車(白)と竜	計算結果 (フジタモデル)		
ケース	巻中心との距離	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

表5-8 佐呂間竜巻での乗用車(白)の再現解析結果



図5-4 TONBOSによる乗用車(白)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⁽¹³⁾

ここでは、東海第二発電所に適用する飛散解析手法の竜巻条件・物体初期配置条件で前述 の佐呂間竜巻における4tトラック及び乗用車(白)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Rm を30 m とする。

衣55 米博尔—光电角C题用,分形取牌例于近0万时异末件				
	設計竜巻風速	92 m/s		
竜巻条件	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			
・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				
初期配置	+2Rm]) に等間隔配置			
	・設置高さOm			

表5-9 東海第二発電所に適用する飛散解析手法の計算条件

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散解析手法の結果の比較 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散解析手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<mark>飛散解析手法</mark>」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*1	最大水平速度
フジタモデル	60.4		36.0 m/s
(地上)	63.4 m	3.0 m	(毎時130 km)
	被害状況 約40 m		被災後もほぼ元の外形をと
		乗員2名が幸いにも存命で救出	どめていることが示されて
		され,搬送先の病院で聞き取	おり
宇欧の地宇山辺		り調査に応じており ⁽¹¹⁾ , トラ	⁽¹¹⁾ ,実際の <mark>飛散</mark> 速度は本解
美院の彼書状況		ックが地面から3.6 m以上の高	析で得られた最大速度(約
		所から落下したとは考えにく	130 km/h)を超える飛散速
		<i>v</i> ₀	度であったとは考えにく
			<i>د</i> ر کې

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⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾

(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散解析手法で乗用車

(白)の飛散解析を行った場合の結果を表5-11に示す。

乗用車(白)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散解析手法」との結果の比較

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ*1	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	_	_		

(白い乗用車の場合)

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
 - 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 tornadolike 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.
 - (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