

女川原子力発電所 2 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 2 7 年 4 月 9 日

東北電力株式会社

## 目次

1. フジタモデルの概要.....	1
2. 竜巻風速場モデル.....	2
(1) フジタモデル, ランキン渦モデル, LES モデルの比較.....	2
(2) ランキン渦モデルとフジタモデルの詳細比較.....	4
a. フジタモデル.....	4
b. ランキン渦モデル.....	5
3. フジタモデルを用いた飛散解析について.....	6
(1) フジタモデルの利用実績.....	6
(2) フジタモデルの検証実績.....	6
(3) 米国 NRC ガイドでのフジタモデルの取扱い.....	8
(4) 飛来物評価法.....	8
a. 飛来物の浮上・運動モデル.....	8
b. 物体の初期位置が飛来物速度に与える影響について.....	11
c. 発生竜巻と物体との位置関係について.....	13
(5) 実際の被災状況に対する検証.....	14
a. フジタモデルを用いた飛散解析結果とフジタスケールとの比較.....	14
b. 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例.....	14
c. 佐呂間竜巻での車輛の飛散事例.....	16
(a) 被災状況.....	16
(b) 再現解析.....	16
i. 4tトラックの飛散解析.....	20
ii. 乗用車(白)の飛散解析.....	21
(c) 多点配置等を考慮した竜巻評価による検証.....	23
i. 4tトラックの飛散解析.....	23
ii. 乗用車(白)の飛散解析.....	25
4. 竜巻評価に用いる特性値等へのフジタモデルの適用.....	27
5. まとめ.....	34

## 1. フジタモデルの概要

フジタモデルは、米国 NRC からの依頼の下、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<sup>(1)</sup>。

このフジタモデルの作成に当たっては、1974 年 8 月の米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻のビデオ画像を写真図化分析し、竜巻の地上痕跡調査および被災状況調査結果と照合することで、図 1-1 (左) に示すような風速ベクトルを作成している。このベクトル図を基に作成された流線モデル (図 1-1 (右)) から、竜巻風速場を代数式で表わすようにしている。

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の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。

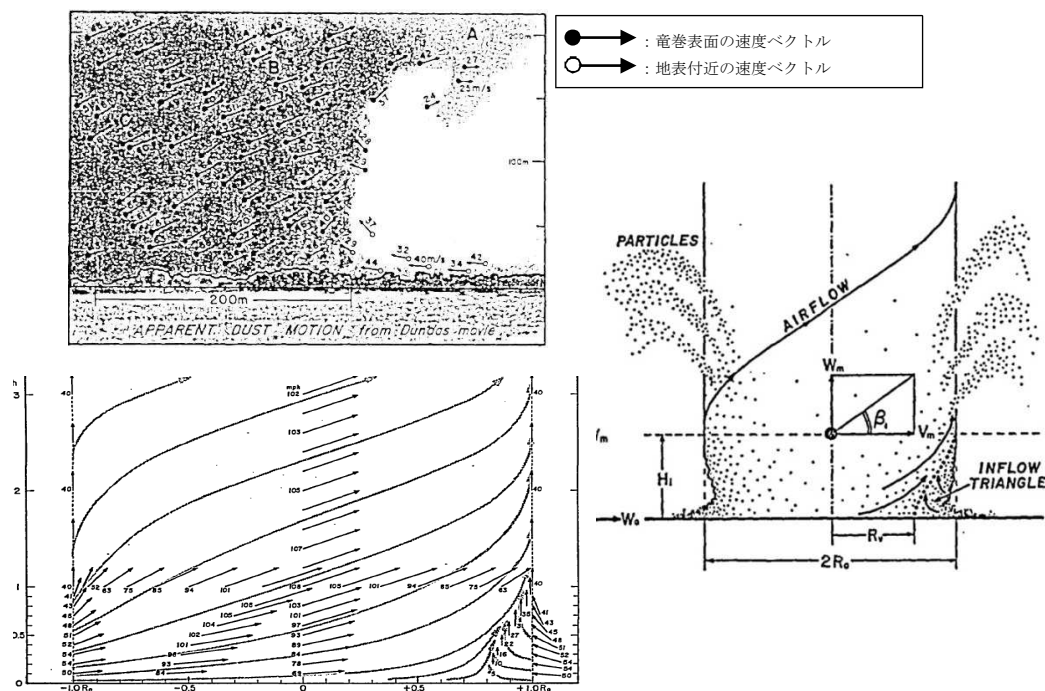


図 1-1 Ash Valley 竜巻 (1974.8.30) のビデオ画像から得られた風速ベクトル (左) とそれに対応するフジタモデルの流線 (右) (文献(1)より引用)

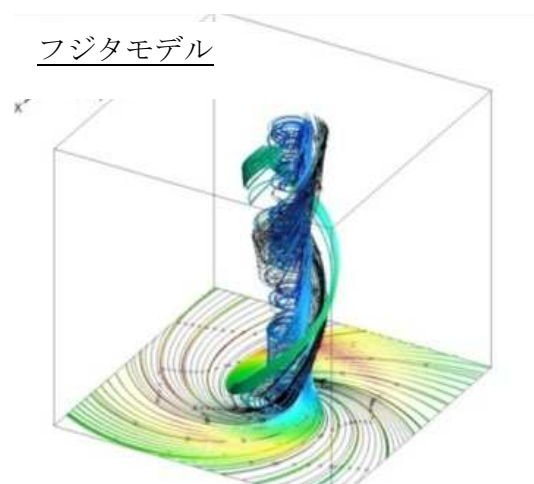


図 1-2 Ash Valley 竜巻の状況 (参考)

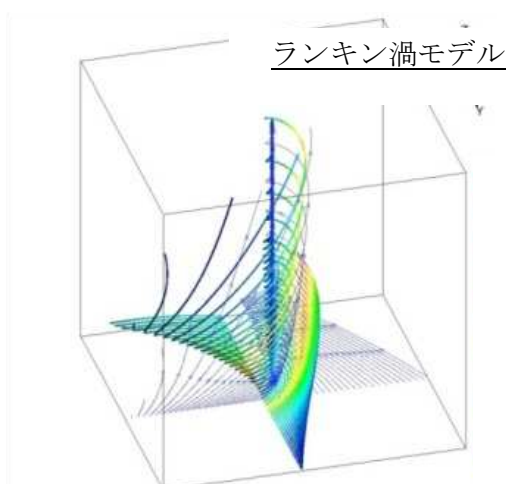
## 2. 竜巻風速場モデル

### (1) フジタモデル, ランキン渦モデル, LESモデルの比較

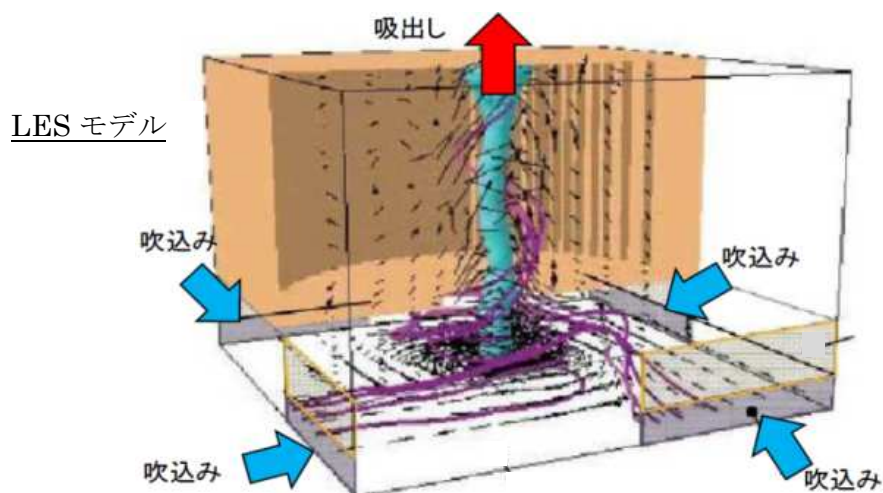
フジタモデル以外の竜巻風速場モデルとしては、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」<sup>(2)</sup> (以下、「評価ガイド」と言う。) で例示されているランキン渦モデル<sup>(3)(4)</sup>と LES(Large-eddy simulation)モデル<sup>(5)</sup>が挙げられる。モデルの風況イメージを図2に、特徴および問題点の比較を表1に示す。



- ・地表面で渦の中心に向かう水平方向の流れがモデル化されており、実現象をよく再現。



- ・地面からも上昇流が発生するモデルであり、実現象と乖離。



- ・実験系 (半径 60cm 程度の円筒モデル) で下部の4ヶ所から強制的に空気の流れを作り、上部からは吸引により上昇流を模擬したモデルである (地面や境界近傍で実現象との乖離あり)。

図2 各モデルの風況イメージ

表1 各風速場モデルの比較

風速場モデル	特 徴	問 題 点
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実観測に基づき考案されたモデルであり，実際の風速場に近い</li> <li>・地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる</li> <li>・比較的簡単な代数式で風速場を表現している</li> <li>・流体の連続の式を満たしている</li> <li>・米国エネルギー局(DOE)<sup>※1</sup>基準のエネルギー施設等<sup>※2</sup>重要施設に対する耐風設計基準・耐飛来物基準のための，飛来物の速度，飛散高さ導出過程で使用されている<sup>(6)(7)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ランキン渦モデルと比較して，解析プログラムが複雑になる（近年における計算機能力の向上により，現在では全く問題ではない）</li> </ul>
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・簡易な式により風速場を表現できる</li> <li>・米国 NRC Regulatory Guide 1.76<sup>(8)</sup>に，フジタモデルと比較してランキン渦モデルがより単純なモデルであるため採用されている旨記載されている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風速場に高さ依存性がなく，上昇流が全領域に存在する（地面からも吹出がある）ため，実現象から乖離する</li> <li>・流体の連続の式を満たしていない</li> <li>・地表面の風速場が非現実的なため，地上からの飛散挙動を解析できない</li> </ul>
LESモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風速の時間的な変動，乱れをある程度模擬できる</li> <li>・評価ガイド（解説表 4.1）において，飛来物および最大速度の計算の際に使用されている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人為的な計算条件を用いるため，実際の竜巻を必ずしも再現していない</li> <li>・実スケールの竜巻を模擬する場合，膨大な計算機資源が必要であり，実務での評価には不向きである</li> </ul>

※1 : DOE : Department of Energy

※2 : DOE 基準の具体的施設例として以下の施設を挙げている。（性能カテゴリ PC3, 4 Tornado の例）

- ・ Pantex Plant (テキサス州)
- ・ Oak Ridge, X-10, K-25, and Y-12 (テネシー州)
- ・ Savannah River Site (サウスカロライナ州)

(2) ランキン渦モデルとフジタモデルの詳細比較

LES モデルは実スケール模擬は不向きであることから、ランキン渦モデルとフジタモデルについて詳細比較した。

a. フジタモデル

フジタモデルの風速場は図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、最外領域）で構成され、鉛直方向は流入層と非流入層とで構成される。流入層では圧力勾配が遠心力よりも卓越するため、竜巻中心方向に向かう強い水平方向の流れ  $V_r$  があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流  $V_z$  となる。また、接線風速や鉛直風速は高さ方向に変化し、特に、地表面付近では水平風速に境界層型の分布がある。また、流体の連続式（質量保存式）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。

フジタモデルの代数式による記載を以下に示す。

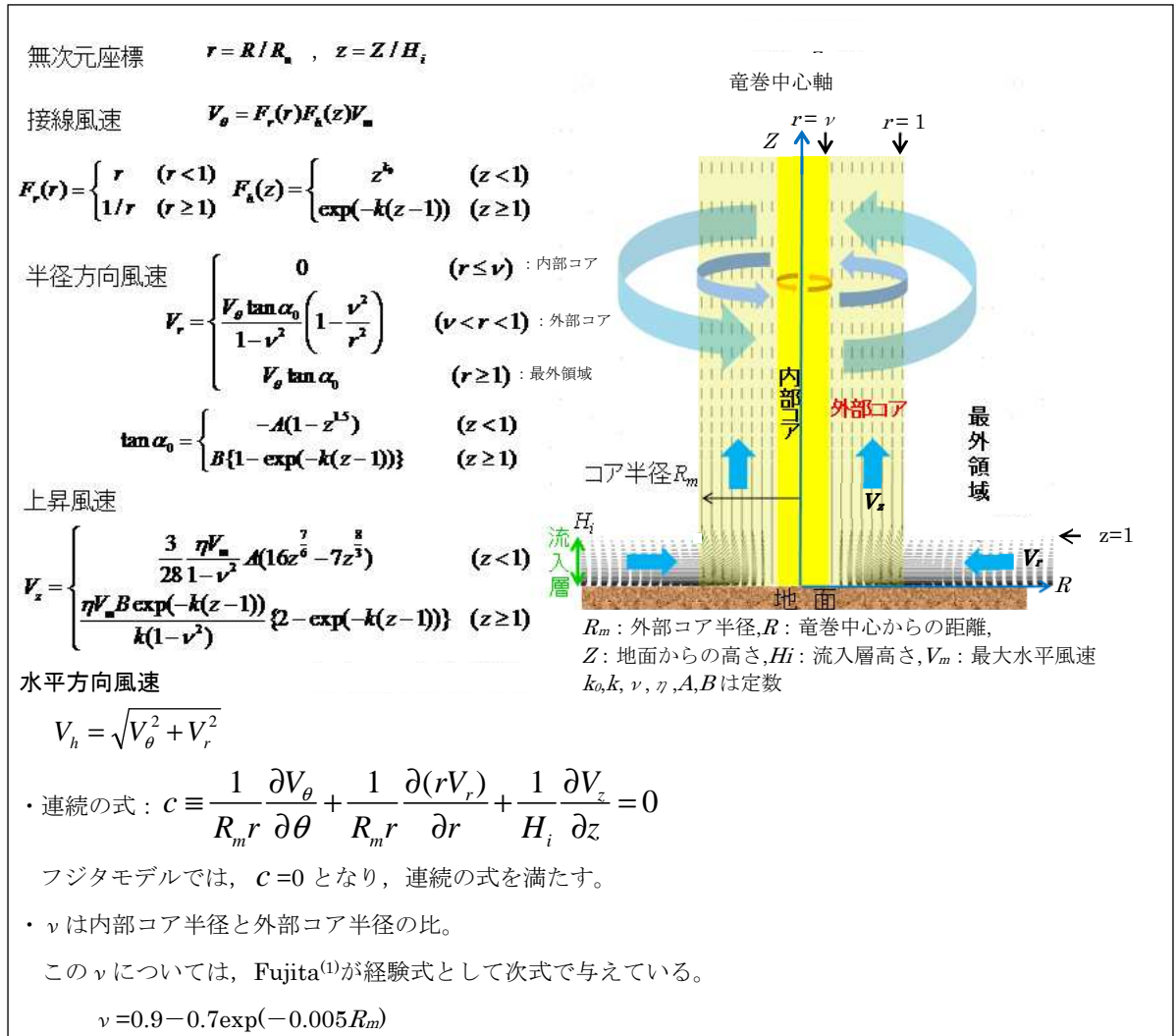


図3 フジタモデルの詳細



b. 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、上空の周方向風速分布  $V_\theta$  を良く再現することができることから、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、飛来物速度評価用のランキン渦モデルは、竜巻中心に向かう半径方向風速  $V_r$  および上昇風速  $V_z$  を特別に付与しているため、図4に示すように地面から吹き出しが生じるような非現実的な流れとなる。このため、フジタモデルと異なり、流れの連続の式（質量保存式）を満たしておらず、地上にある物体の浮上・飛散も現実的に模擬できない。

また、ランキン渦モデルによる飛散評価では、地上にある物体に対して、初期条件として高所（高さ 40m）にあることを仮定するため、保守性が大きくなる。

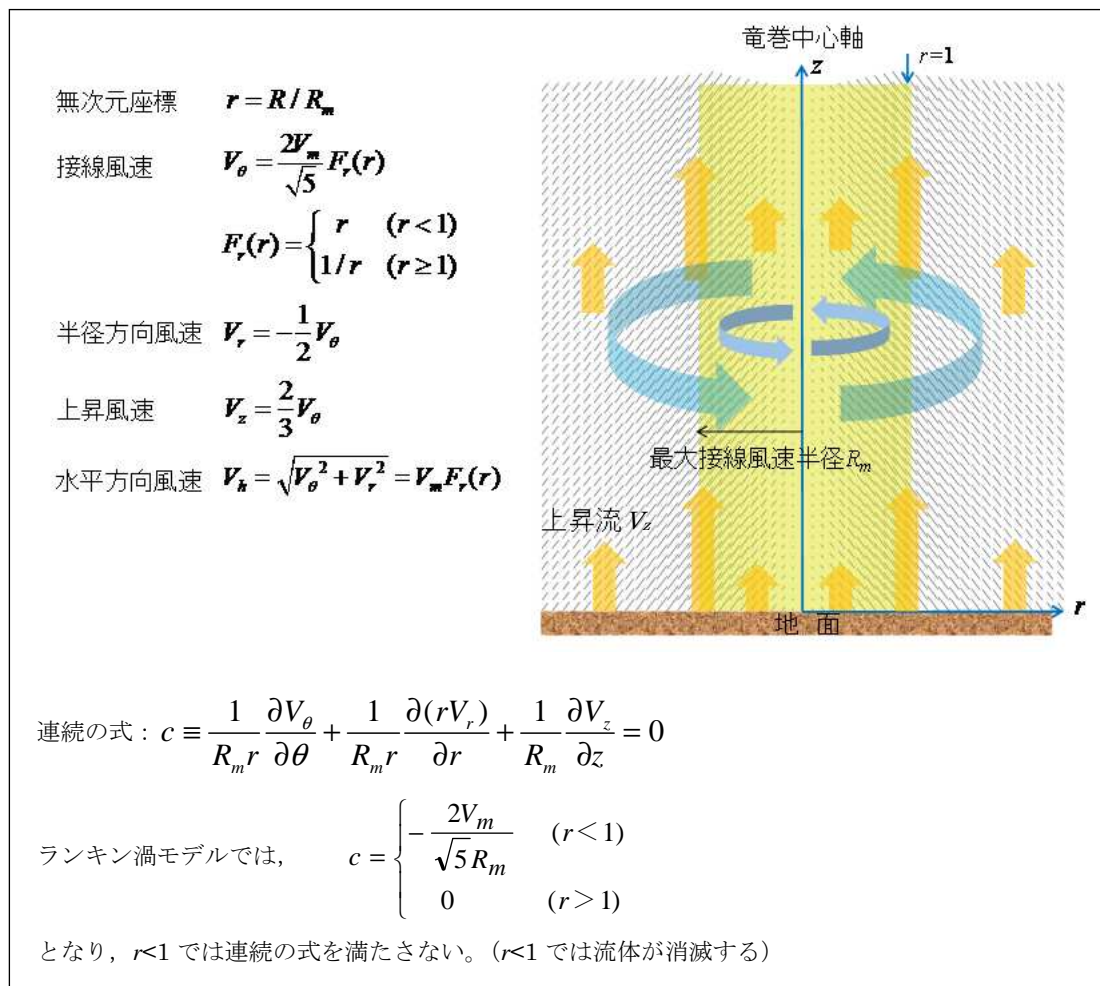


図4 ランキン渦モデルの詳細

### 3. フジタモデルを用いた飛散解析について

#### (1) フジタモデルの利用実績

フジタモデルの利用実績を調査し、以下の基準への利用実績を確認した。

DOE の基準では、エネルギー施設等の重要施設に対する耐風設計基準・耐飛来物基準が示されており、この飛来物基準における飛来物の速度、飛散高さの導出過程で、フジタモデルが使用されている<sup>(6)(7)</sup>。

この基準では表2のように、施設に要求される性能別カテゴリをカテゴリ0から4まで分類し、強風を対象とした性能カテゴリ別の耐風設計基準を定義している。

そのうち性能カテゴリ0から2は通常の建築物に適用され、特に性能カテゴリ3の核燃料施設および性能カテゴリ4の原子炉には、強風に加えて竜巻（飛来物基準）が適用される<sup>(7)</sup>。具体的な性能カテゴリ3、4に該当する施設として「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」が挙げられている。

表2 DOE の耐風設計基準・耐飛来物基準の概要

性能カテゴリ		考慮するハザード (風) の年超過確率		要求基準 (年許容超過確率)
0	通常の建築物 (対自然現象の設計考慮不要)	—	—	なし
1	通常の建築物	強風	$2 \times 10^{-2}$	居住者が危険にさらされる可能性 ( $1 \times 10^{-3}$ )
2	病院, 警察署等の建築物	強風	$1 \times 10^{-2}$	構築物, 系統, 機器の機能喪失頻度 ( $5 \times 10^{-4}$ )
3	核燃料施設	強風	$1 \times 10^{-3}$	同上 ( $1 \times 10^{-4}$ )
		竜巻	$2 \times 10^{-5}$	
4	原子炉	強風	$1 \times 10^{-4}$	同上 ( $1 \times 10^{-5}$ )
		竜巻	$2 \times 10^{-6}$	

#### (2) フジタモデルの検証実績

上記(1)で示したDOEの基準は、1980年にTexas Tech大学にて行われたフジタモデルの風況場の検証<sup>(17)</sup>および1987年に同大学で行われたフジタモデルを用いた飛来物挙動の再現解析結果<sup>(18)</sup>に基づき、1994年に作成された。

その後、1999年にローレンス・リバモア国立研究所において、DOE基準の検証が行われており、その妥当性について報告されている<sup>(6)</sup>。本検証内容については、2001年に米国気象学会論文集<sup>(16)</sup>においても報告されている。



なお、DOE 基準の作成において参照されている、1987 年の Texas Tech 大学の再現解析<sup>(18)</sup>では、1978 年 12 月 3 日に米国ルイジアナ州ボージャー(Bossier)市で発生した F4 竜巻の被害事例のうち、6 本の鋼製材の飛散実績を対象とした再現解析<sup>(17)</sup>が行われている。この結果、図 5 に示すとおり、実際の観測結果を再現できたことが報告されている。

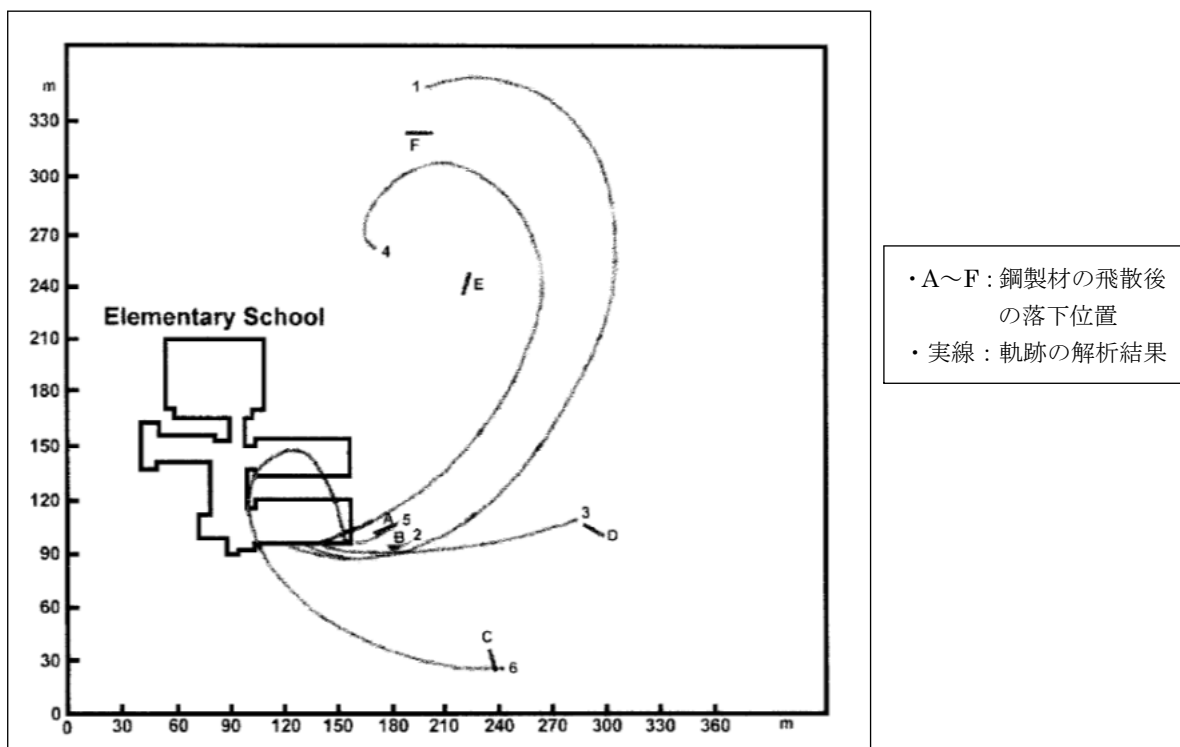


図 5 鋼製材の飛散解析結果<sup>(16)</sup>

また、米国 LES (Louisiana Energy Services) の濃縮施設 (NEF: National Enrichment Facility) に対する竜巻設計では、上記 DOE 施設の基準に基づき竜巻飛来物を設定しており、米国 NRC は当該施設に対する安全評価報告書<sup>(20)</sup>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。

### (3) 米国 NRC ガイドでのフジタモデルの取扱い

米国 NRC Regulatory Guide 1.76<sup>(3)</sup>では、フジタモデルについて、次のとおり記載されており、これについて東京工芸大学の報告書<sup>(5)</sup>においても、同趣旨の報告がなされている。(以下の「 」内の記載は報告書からの抜粋。)

“The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita (Ref. 7).” 「Fujita によるモデルと比較してランキン渦を用いたモデルがより単純なモデルであるため、本ガイドではランキン渦モデルを採用している。」

“The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.” 「米国原子力規制委員会 (NRC) では、この式の解を求めることで、飛来物の水平方向の最大速度を計算するプログラムを開発している。」

以上のように、ランキン渦モデルはフジタモデルよりも数式が簡易なことを理由に選定され、NRC 職員によってプログラム化された。

### (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 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、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（総合風速場モデル）が利用されている。

### (4) 飛来物評価法

#### a. 飛来物の浮上・運動モデル

飛来物へ作用する力は、空中にある場合、評価ガイドの飛来物運動モデル<sup>(4)(5)</sup>でもフジタモデルでも、図 6 (a)のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

また、フジタモデルでは、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<sup>(8)</sup>。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に対して対称であっても、図 6 (b)に示すように地面の存在により流れが非対称となり、物体下部より物体上部の圧力が低くなり、物体を浮上させる駆動力が生じることから、これを揚力として考慮する。

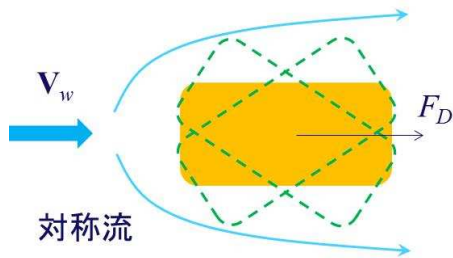


図 6 (a) 空中で飛来物へ作用する力

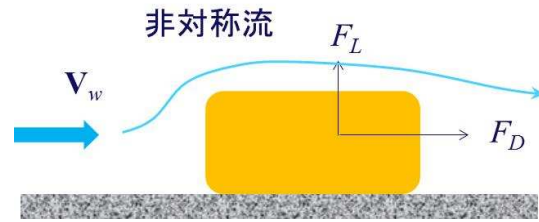


図 6 (b) 地面付近で飛来物へ作用する力

この揚力  $F_L$  は地面での揚力係数  $C_L$ 、地上での物体の見附面積  $a$  を用いて、以下のように表される。

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

$\rho$  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、 $|\mathbf{V}_M - \mathbf{V}_w|_{x,y}$  は  $(\mathbf{V}_M - \mathbf{V}_w)$  の  $x, y$  成分（水平成分）の大きさを表す。

特に、物体浮上・飛散解析においては、物体に対する風向きの不確定性を考慮し、 $C_L a$  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  $C_D A$  を用いている。

$$C_D A = \frac{1}{3} (C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z) \quad (2)$$

$C_{Dx}$  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。

$C_D A$  は空中飛行物体に作用する流体抗力に関連するパラメータであるが<sup>(4)(5)</sup>、地面に置かれた物体の  $C_L a$  の値（風洞実験で得られた実測値）と式(2)で計算される空中での  $C_D A$  の値の比較を表 3 に示す。

この結果から、 $C_D A > C_L a$  の関係があることが確認でき、式(1)において  $C_L a$  の代わりに  $C_D A$  を用いることが保守的である。

表3  $C_D A$  と  $C_L a$  の値の比較

物体	平板	円柱	自動車 Dodge Dart	自動車 セダン	自動車 ミニバン	立方体	角柱	
参考文献	電中研の 風洞実験結果*1		EPRI, 1978 <sup>(9)</sup>		Schmidlin <i>et al.</i> , 2002 <sup>(8)</sup>		林ら, 2011 <sup>(19)</sup>	
$C_D A/C_L a$	16.5*2	>1.88	>2.53	>2.65	>1.26*3	>1.48*3	10 程度	>1.14

\*1 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）に角柱（幅 80mm×高さ 60mm×長さ 1000mm），円柱（直径 100mm×長さ 1000mm）および平板（幅 B:200mm×高さ 5mm×長さ λ:1000mm）を設置して，揚力係数を測定。（2015 年 3 月）

\*2 地上から 50mm 程度離れた位置に平板を設置して測定したデータから算出

\*3 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  $U$  から計算した  $C_L a$  値( $C_L a=2mg/\rho U^2$ )を使用

フジタモデルにおける飛来物評価においては，前述のとおり揚力を考慮することとしており，地面効果による揚力は高さとともに減衰するので，既往実験結果<sup>(11)(12)</sup>に基づき，物体高さ  $d$  の物体の揚力は，地面から  $3d$  の高度で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。

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (3)$$

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\} & Z = z - d/2 \quad (Z \leq 3d) \\ Z = 0 & (Z > 3d) \end{cases} \quad (4)$$

従って，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。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - (g - L)\mathbf{k} \quad (5)$$

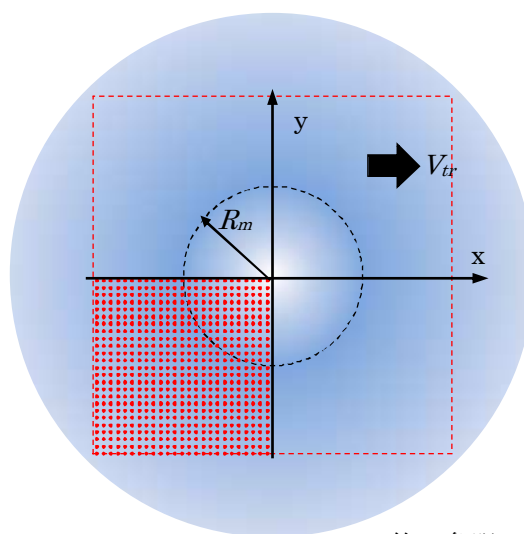
飛来物の位置  $\mathbf{X}_M(t)$  と速度  $\mathbf{V}_M(t)$  の時刻歴の計算には一定加速度法を用いる。具体的には，時刻  $t=\tau$  における飛来物の位置  $\mathbf{X}_M(\tau)$  と速度  $\mathbf{V}_M(\tau)$  を既知として，時刻  $t=\tau+\Delta\tau$  における飛来物の速度と位置を以下の式で求め，任意の時刻での風速場を求めることができる。なお， $\mathbf{A}(\tau)$  は時刻  $t=\tau$  における加速度ベクトルである。

$$\text{速度ベクトル： } \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau)\Delta\tau \quad (6)$$

$$\text{位置ベクトル： } \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau)\Delta\tau + \frac{\mathbf{A}(\tau)\Delta\tau^2}{2} \quad (7)$$

b. 物体の初期位置が飛来物速度に与える影響について

フジタモデルを用いた飛来物評価における物体の初期位置は、図7に示すように竜巻半径の4倍の正方形領域に51×51個の物体を配置する条件としている。これは、竜巻風速場内における物体位置の不確定性を考慮するためであり、初期位置を51×51個の多点に配置した方が、1点配置と比較し飛来物速度は大きくなる。



・ 第3象限のみ ・ で物体を表示

図7 飛来物の初期位置の配置例

初期位置が設計飛来物の飛来物速度に与える影響について確認するため、同様に1個の物体を地上（高さ0m）の位置に配置した条件と、高さを同条件とし、竜巻半径の4倍の正方形領域に51×51個の物体を初期配置した条件で、飛来物速度を比較した。

竜巻風速場としては、最大風速を69m/sとし、移動速度  $V_{tr}$  を10m/s、竜巻コア半径  $R_m$  を30mのフジタモデルを用いた。また、物体の飛行定数としては、東京工芸大報告書<sup>(5)</sup>に掲載されている物体の飛行定数を用いた。ここでの飛来物の諸元を表4に示す。図8に示す飛来物位置の差による比較から分かるように、51×51個を配置した方が、1点配置と比較し飛来物速度は大きくなる。

表4 飛来物の諸元

物体名称	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	$C_D A/m$ ( $m^2/kg$ )
物置	1.80	0.90	1.50	120	0.0315
室外機	0.80	0.25	0.30	10	0.0343
コンテナ	2.40	2.60	6.00	2300	0.0105
プレハブ小屋	5.00	5.00	3.00	4400	0.0083
電話BOX	0.30	0.30	0.40	13	0.0169
太陽光パネル	1.20	1.00	0.05	14.5	0.0582
鉄板	2.00	0.25	0.04	7.6	0.0486
鉄製蓋	0.70	0.50	0.03	6.8	0.0364

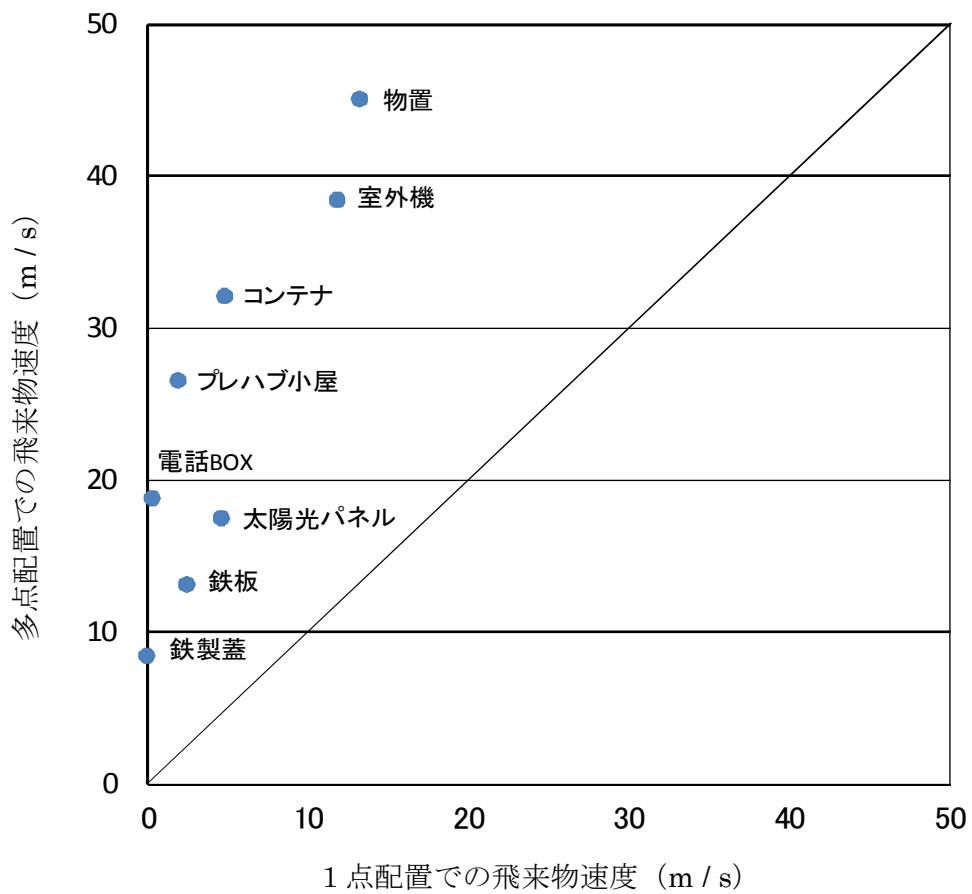


図8 1点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較

c. 発生竜巻と物体との位置関係について

飛来速度設定では、物体がどのように竜巻に曝されるかで、受ける最大風速が変化する。実際の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る。

しかし、フジタモデルを用いた飛散解析においては、物体がすぐに最大風速を受けるように、物体の直上に竜巻を発生させ飛散計算し、飛散した物体の中から、最大飛散速度および最大飛散距離を抽出し選定するため、厳しい結果を与えることになる。

図9に実際の竜巻（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の比較イメージを示す。

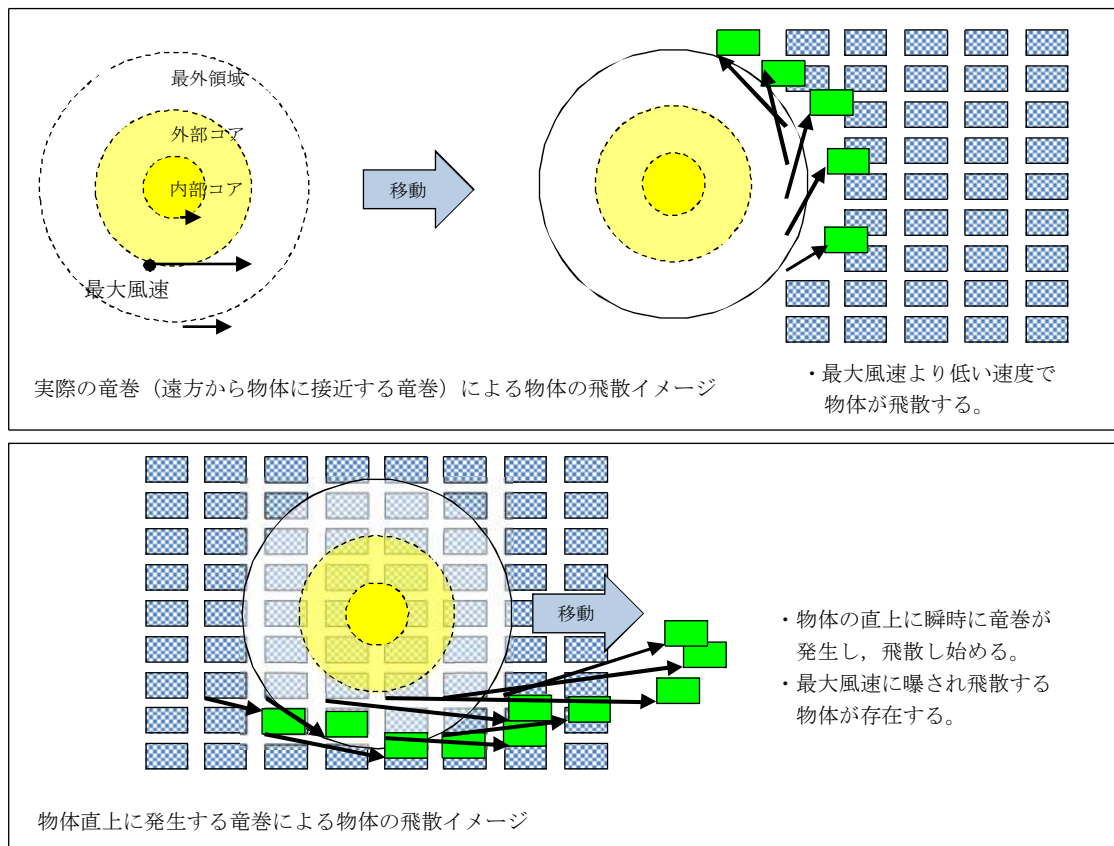


図9 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻による飛散比較イメージ



(5) 実際の被災状況に対する検証

a. フジタモデルを用いた飛散解析結果とフジタスケールとの比較

フジタスケールで示されている自動車の被災状況と、フジタモデルを用いた飛来物（自動車）の飛散解析結果を比較した。

表5にフジタスケールで示されている自動車の飛散状況を、表6にフジタモデルを用いた自動車の飛散解析結果を示す。フジタモデルを用いた飛散解析結果は、フジタスケールの自動車被災状況とよく一致しており、フジタモデルを用いた飛散解析は実現象をよく再現できている。

表5 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6 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]	解析結果		
				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

b. 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 竜巻が来襲した<sup>(13)</sup>。図10は、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものであり、通過時の竜巻規模は F2 であったと考えられている。

パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上しなかったが、転倒した木箱から、パイプが散乱したものの、7m~9m の範囲内に留まったことが報告されている。このパイプは Transit パイプと呼ばれるコンクリート・石綿製で、長さは 8ft. (約 2.5m)、直径（外径）は 9in. (約 0.2 m) であった。



図 10 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

このパイプの飛散状況について、フジタモデルおよびランキン渦モデルを用いた飛散解析による検証を行った。その解析条件は表 7 の通りとした。

表 7 Grand Gulf 原子力発電所の竜巻による飛散パイプの解析条件

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 in. (約 0.2m)
	密度	1700kg/m <sup>3</sup>
	飛行定数 $C_D A/m$	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に等間隔配置</li> <li>・フジタモデル：初期高さ 1 m（実際の設置状況を考慮）</li> <li>・ランキン渦モデル：初期高さ 40m</li> </ul>	

その結果は表 8 のとおりであり、フジタモデルでは実際の状況と整合しているが、ランキン渦モデルの場合は飛散距離および最大水平速度に相違があり、過大な結果を与えることが確認された。

表 8 Grand Gulf 原子力発電所のパイプの飛散解析結果

風速場モデル	初期高さ	解析結果		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	1 m	1.2m	0.0 m	4.9 m/s
ランキン渦モデル	40m	227m	0.34 m	40.9 m/s

### c. 佐呂間竜巻での車輛の飛散事例

#### (a) 被災状況

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」と言う。）では、被災状況等が報告されている<sup>(14)</sup>。この中で工事事務所敷地内における車輛（図11の車輛②）の被災状況については、以下のとおり報告されている。

- ・運転席に乗車していた乗員2名は、工事事務所（図11の建物A）が瞬く間に粉々になったのを目撃して、座席の下にもぐりこんだところで気絶した。
- ・車輛はほぼ原形を留めている。
- ・荷台の左右および後ろの「あおり」の止金がすべてはずれて外側に開いていること等から、転がったのではなく、上から落ちたのではないかと思われる。
- ・乗員2名は存命のまま救出され、搬送先の病院で聞き取り調査に応じている。

以上より、被災したトラックはそれほど高所から落下したものではないと推定できる。また、工事事務所の被災状況について図11～13に示す。

#### (b) 再現解析

図11で示したとおり、被災前後の位置が明確な物体として4tトラック（図11の車輛②）、乗用車（赤）（図11の車輛③）および乗用車（白）（図11の車輛⑥）がある。このうち、4tトラックおよび乗用車（白）についてフジタモデルを用いた飛散解析を行った。竜巻条件については、表9のように設定し竜巻との距離を合理的な範囲で変化させた。

なお、乗用車（赤）については、図13に示すプレハブ造のA棟（図11のA）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移動したものと考えられることから、今回の検証の対象としていない。

表9 飛散解析の条件（竜巻）

設計竜巻風速	92m/s（気象庁被害認定より）
最大接線風速	70m/s
移動速度	22m/s
コア半径	20m



図1 1 佐呂間竜巻 (H18.11.7) による被災状況 (工事事務所敷地内の車両被災) <sup>(14)</sup>





図1 2 佐呂間竜巻 (H18.11.7) による被災状況 (4tトラックの損傷状況) <sup>(14)</sup>



図 1 3 佐呂間竜巻被災前後の状況<sup>(10)</sup>



i. 4tトラックの飛散解析

4tトラックの飛来物条件を表10のとおり設定し、フジタモデルを用いた飛散解析を行った。

表10 飛散解析の条件 (4tトラック)

飛来物	4tトラック 〔三菱ふそう PA-FK71Dを仮定〕	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
	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個</li> <li>・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</li> <li>・フジタモデル：初期高さ 0 m</li> <li>・ランキン渦モデル：初期高さ 40m</li> </ul>		

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図14に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に影響されるが、各ケースとも飛散方向が実際の飛散方向と良く一致しており、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により、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。

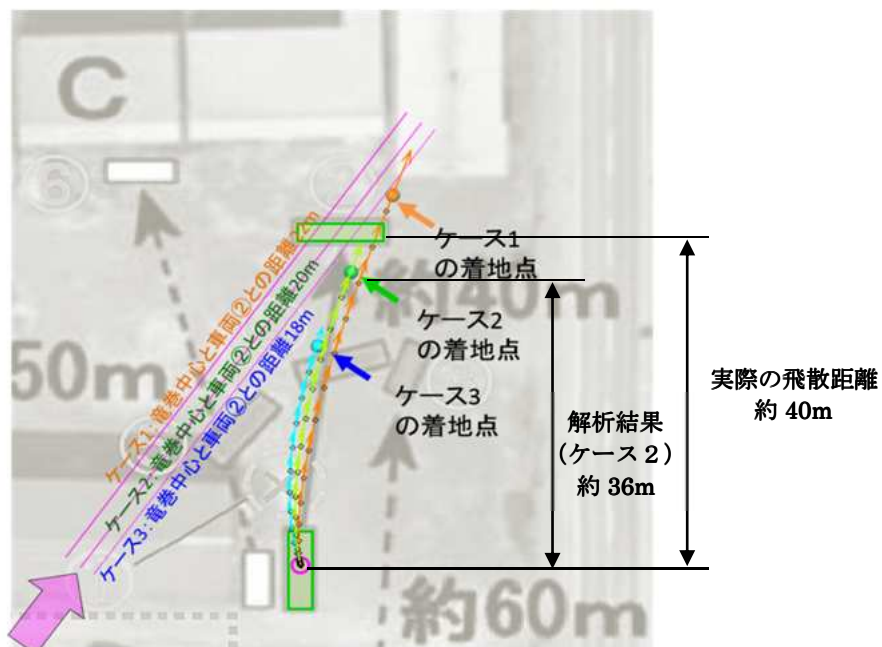


図14 佐呂間竜巻の被害状況の再現結果 (4tトラック)



また、フジタモデルとランキン渦モデルの比較の観点から、ケース 2 を対象として解析を行った。解析の結果は表 1 1 に示すとおり、ランキン渦モデルの場合は過大な結果を与えることが確認された。

表 1 1 飛散解析の結果 (4t トラック)

風速場モデル	初期高さ	解析結果		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	0 m	35.5 m	2.3m	22.2 m/s
ランキン渦モデル	40m	70.5 m	0.0 m	22.1 m/s

ii. 乗用車 (白) の飛散解析

乗用車 (白) の飛来物条件を表 1 2 のとおり設定し、フジタモデルを用いた飛散解析を行った。

表 1 2 飛散解析の条件 (乗用車 (白))

飛来物	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 <sup>2</sup> /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物体個数 1 個</li> <li>・ 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</li> <li>・ フジタモデル：初期高さ 0 m</li> <li>・ ランキン渦モデル：初期高さ 40m</li> </ul>		

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は図 1 5 のとおりであり、ケース 1 では飛散距離が概ね合致している。

ただし、飛散方向については乗用車 (白) を建物 (倉庫) 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ずれたものと推定される。

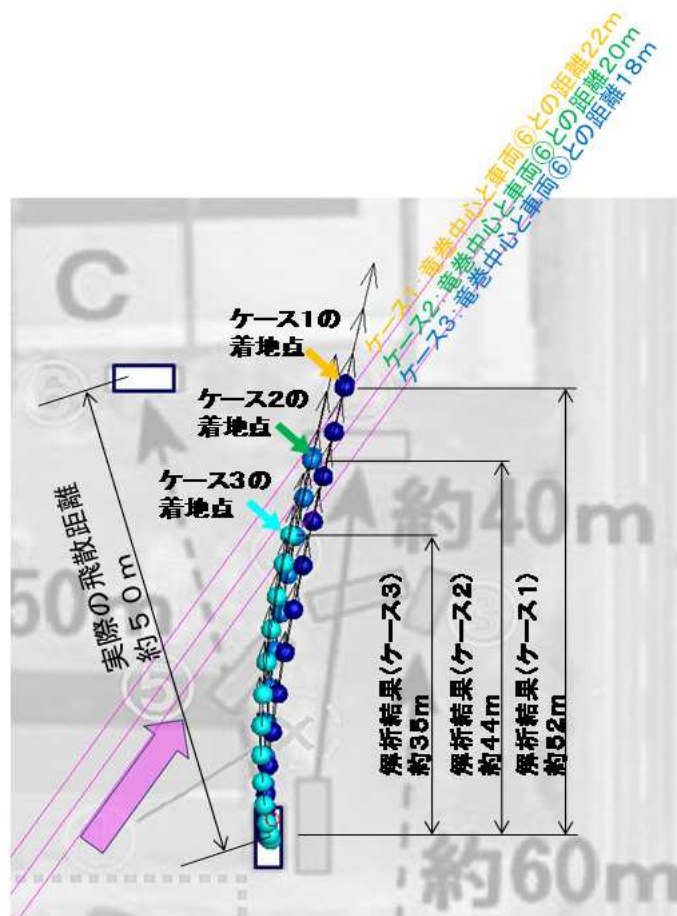


図 1 5 佐呂間竜巻の被害状況の再現結果（乗用車（白））

また、フジタモデルとランキン渦モデルの比較の観点から、ケース 1 を対象として解析を行った。解析の結果は表 1 3 に示すとおり、ランキン渦モデルの場合は過大な結果を与えることが確認された。

表 1 3 飛散解析の結果（乗用車（白））

風速場モデル	初期高さ	解析結果		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	0 m	51.9 m	3.6 m	28.9 m/s
ランキン渦モデル	40 m	105.8 m	3.3 m	27.7 m/s

(c) 多点配置等を考慮した竜巻評価による検証

i. 4tトラックの飛散解析

フジタモデルを用いた飛散解析結果を検証<sup>(15)</sup>するため、被災実例である佐呂間竜巻における4tトラックにフジタモデルを用いた多点配置の飛散解析により、物体の最大水平速度、最大飛散距離と実際の被災状況（飛散距離等）を比較した。

竜巻条件と飛来物条件を表14のとおり設定した。

表14 飛散解析の条件（4tトラック）

飛来物条件	4tトラック 三菱ふそう PA-FK71Dを仮定	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0056 m <sup>2</sup> /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に等間隔配置 ・フジタモデル：初期高さ 0 m ・ランキン渦モデル：初期高さ 40m		

フジタモデルにおける0.1s毎の物体の軌跡（水平飛散距離と飛散高さの関係）を図16(a)に、水平飛散距離と物体の水平速度の関係を図16(b)に示す。これらの図から、物体の最大水平速度は39.9m/s、最大飛散高さは5.3m、最大飛散距離は86.5mであり、実際の被災状況を包絡するものとなっている。

同様の検証をランキン渦モデルでも実施し、その結果として0.1s毎の物体の軌跡を図16(c)に、水平飛散距離と物体の水平速度の関係を図16(d)に示す。これらの図から、物体の最大水平速度は45.2m/s、最大飛散高さは3.1m、最大飛散距離は240.5mとなることが分かる。

表15に示すとおり、実際の被災状況に対し、特にランキン渦モデルは被災状況に対して過度に保守性があることが分かる。

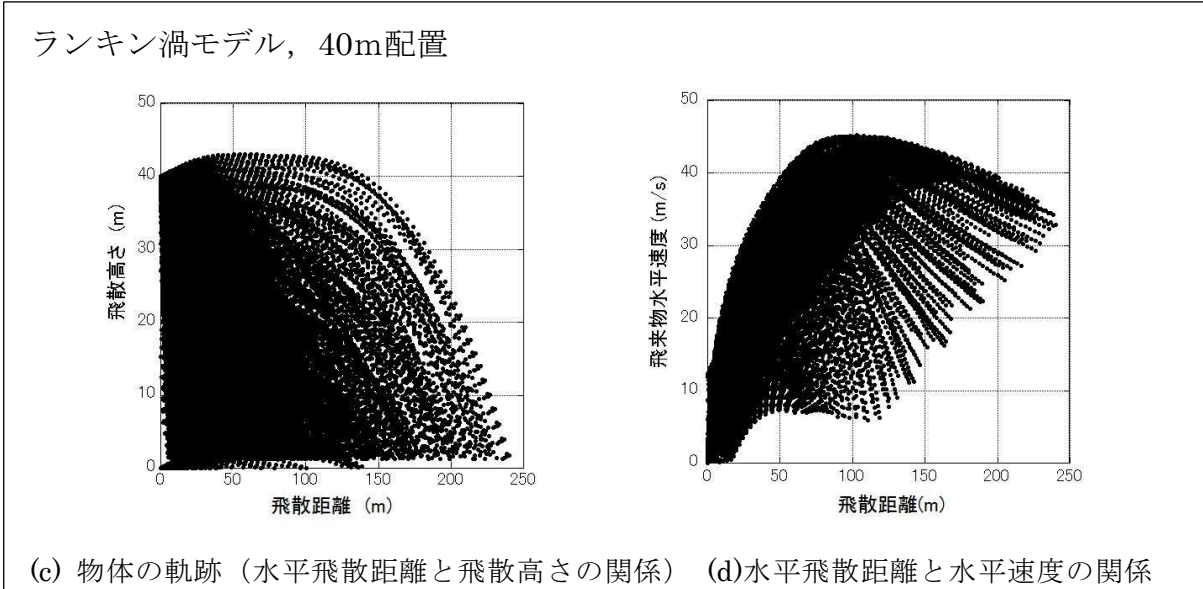
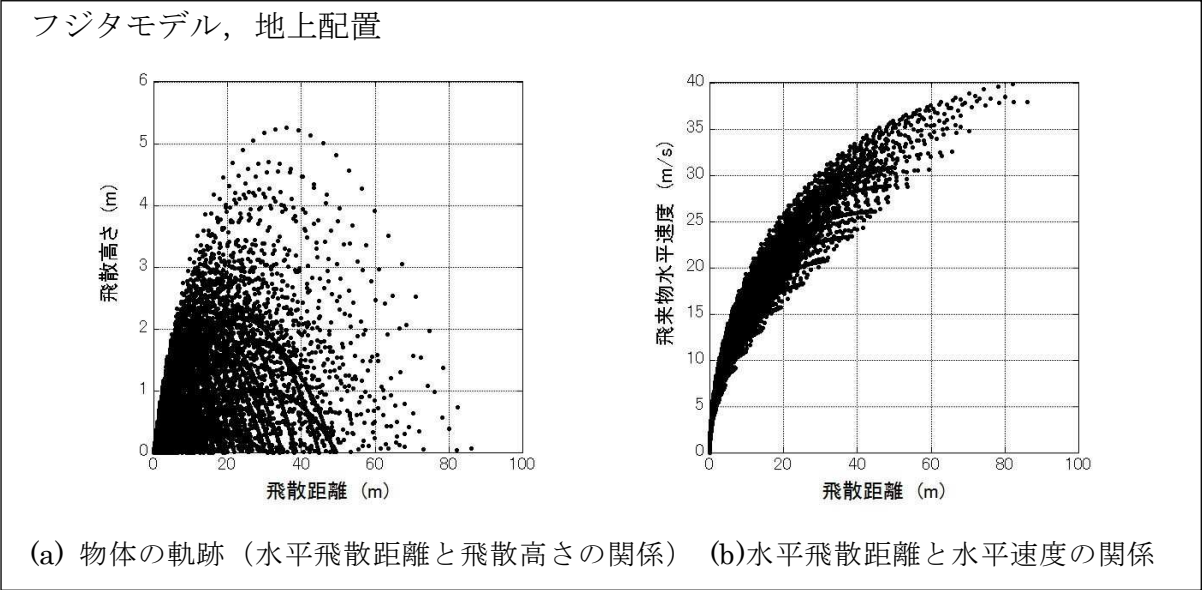


図 1 6 多点配置を考慮した竜巻評価による解析結果

表 1 5 実際の被災状況と感度解析の結果の比較

	最大飛散距離	最大飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	86.5m	5.3m	39.9m/s
ランキン渦モデル (40m)	240.5m	3.1m (初期高さ 40m から)	45.2m/s
実際の被災状況	約 40m	トラックの乗員 2 名が救出され、搬送先の病院で聞き取り調査に応じており、 <sup>(14)</sup> 被災トラックが 5.3m 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 <sup>(14)</sup> 、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 144km/hr) を遙かに下回ると推察できる。

ii. 乗用車（白）の飛散解析

フジタモデルを用いた飛散解析結果を検証<sup>(15)</sup>するため、乗用車（白）についてフジタモデルを用いた多点配置の飛散解析を実施した。ここでの飛散解析の条件を表 1 6 に示す。

表 1 6 飛散解析の条件（乗用車（白））

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 <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に等間隔配置</li> <li>・ フジタモデル：初期高さ 0 m</li> <li>・ ランキン渦モデル：初期高さ 40m</li> </ul>		

フジタモデルにおける 0.1s 毎の物体の軌跡（水平飛散距離と飛散高さの関係）を図 1 7 (a)に，水平飛散距離と物体の水平速度の関係を図 1 7 (b) に示す。これらの図から，物体の最大水平速度は 47.6m/s，最大飛散高さは 6.0m，最大飛散距離は 116.9m であり，実際の被災状況を包絡するものとなっている。

同様の検証をランキン渦モデルでも実施し，その結果として 0.1s 毎の物体の軌跡を図 1 7 (c)に，水平飛散距離と物体の水平速度の関係を図 1 7 (d) に示す。これらの図から，物体の最大水平速度は 49.3m/s，最大飛散高さは 24.4m，最大飛散距離は 293.0m となることが分かる。

表 1 7 に示すとおり，4t トラックの解析結果と同様に，ランキン渦モデルは過度に保守性があることが分かる。

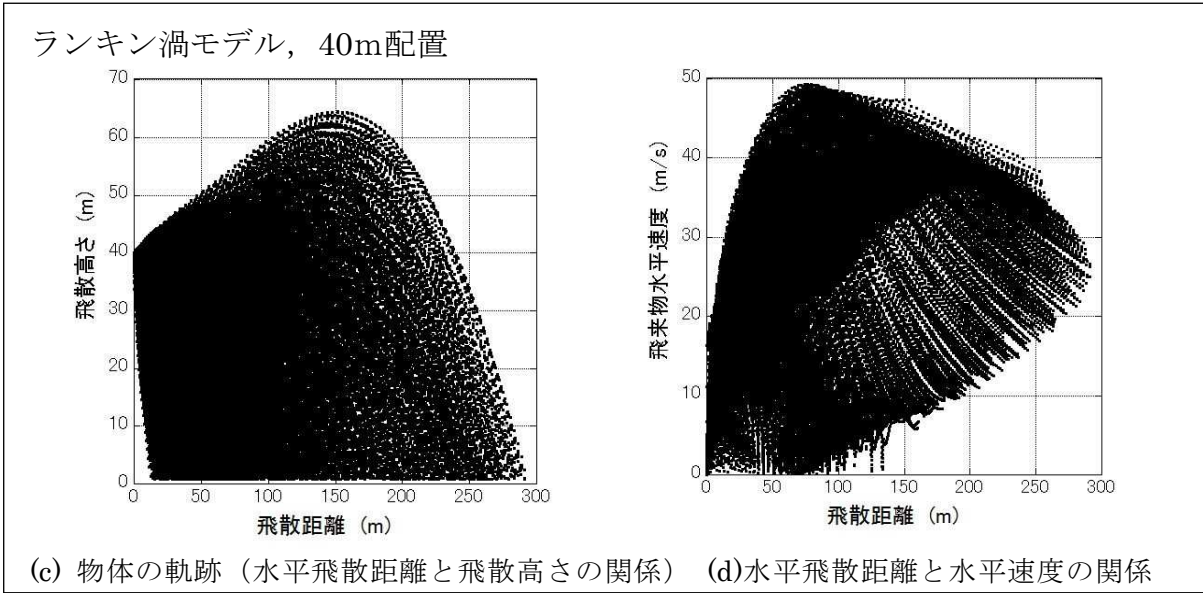
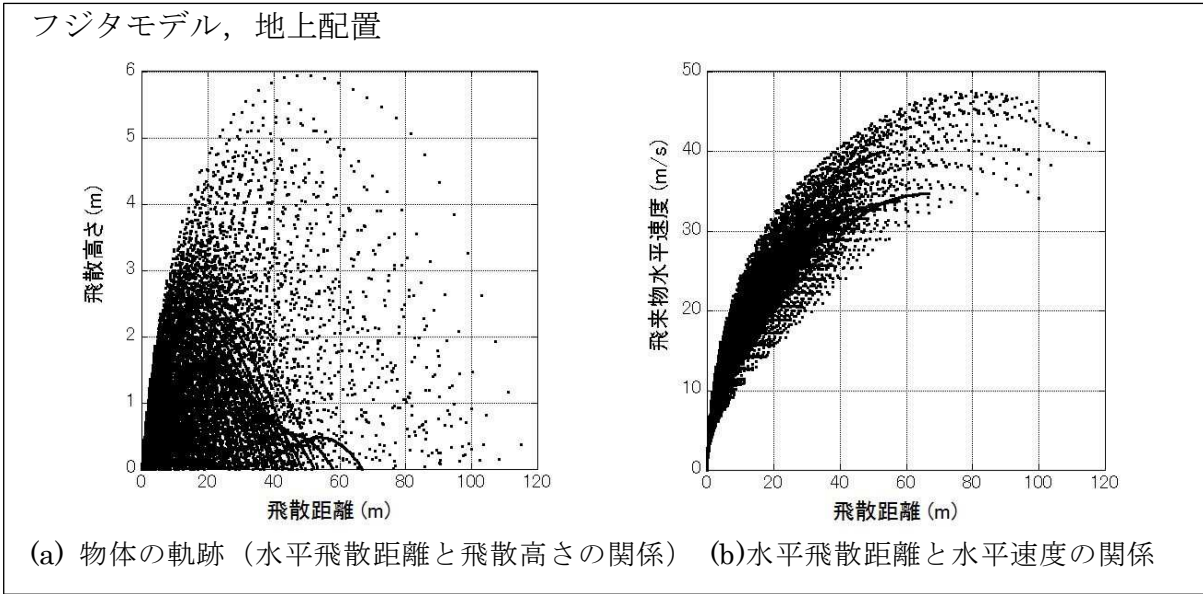


図 1 7 多点配置を考慮した竜巻評価による解析結果

表 1 7 実際の被災状況と感度解析の結果の比較

	最大飛散距離	最大飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	116.9m	6.0m	47.6m/s
ランキン渦モデル (40m)	293.0m	24.4m (初期高さ 40m から)	49.3m/s
実際の被災状況	約 50m	—	—

4. 竜巻評価に用いる特性値等へのフジタモデルの適用  
 竜巻評価に用いる特性値等について、フジタモデルの適用状況も含め、表18に設定の考え方を、また、図18にフジタモデルの適用状況を示す。

表18 竜巻特性値等の設定の考え方

No.	特性値等	設定の考え方	適用※2
1	設計竜巻の最大風速 $V_D$ (m/s)	発電所のサイト特性（地形効果や竜巻の移動方向）等を考慮して基準竜巻( $V_B$ )の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する	—
2	移動速度 $V_T$ (m/s)	$V_T=0.15 \cdot V_D$ (ガイドの3.1式) 日本の竜巻観測記録に基づいた竜巻移動速度と最大風速の関係から設定。	—
3	最大接線風速 $V_{Rm}$ (m/s)	$V_{Rm}=V_D-V_T$ (ガイドの3.2式) 被害調査から最大接線風速を見積もることは困難なため、最大風速から移動速度を減じたものを最大接線風速と定義（東京工芸大報告書） <sup>(5)</sup>	—
4	最大接線風速半径 $R_m$ (m)	$R_m=30$ (ガイドの3.3式) 日本における竜巻の観測記録をもとに設定（詳細は別紙1参照）	—
5	最大気圧低下量 $\Delta P_{max}$ (hPa)	数値解析による（詳細は別紙2参照）	○
6	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)	設計竜巻荷重の組み合わせ ( $W_{T2}=W_W+0.5 \cdot W_P+W_M$ ) は、風圧力、気圧差荷重、衝撃荷重の3荷重を加えることになる。設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) を算出するには、フジタモデルによる飛散解析をするため、気圧差による荷重 ( $W_P$ ) に関連する $\Delta P_{max}$ , $(dp/dt)_{max}$ ついても、荷重設定条件の一貫性の観点から数値解析により算出する	○
7	風圧力 $W_W$ (Pd)	$P_D=q \cdot G \cdot C \cdot A$ (ガイドの4.1式) 建築基準法における建物に作用する風荷重および荷重指針における構造骨組・屋根に作用する風荷重の算定方法を準用 ・ $q$ : 設計用速度圧(N/m <sup>2</sup> ) $q=(1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$ (ガイドの4.2式) ・ $\rho$ : 空気密度(kg/m <sup>3</sup> ) 1.22 「日本建築学会建築物荷重指針・同解説」による ・ $G$ : ガスト影響係数 1 最大瞬間風速 $V_D$ をベースとしたガスト影響係数 1 を使用 ・ $C$ : 風力係数 「建設省告示第1454号」「日本建築学会建築物荷重指針・同解説」により算定 ・ $A$ : 受圧面積 (m <sup>2</sup> ) 対象施設により定まる	—
8	気圧差による圧力 $W_P$	$W_P=\Delta P_{max} \cdot A$ ・ $A$ : 建屋・構築物等の受圧面積 (m <sup>2</sup> ) 対象施設により定まる 設計竜巻荷重の組み合わせ ( $W_{T2}=W_W+0.5 \cdot W_P+W_M$ ) において、フジタモデルによる飛散解析結果により設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) を算出することから、 $\Delta P_{max}$ は No.5 と同様、荷重設定条件の一貫性の観点から、フジタモデルによる数値解析により算出する	○
9	飛来物による衝撃荷重 $W_M$	$W_M=1/2 \cdot m \cdot v^2$ 一般的な力学式 ・ $m$ : 飛来物重量 (kg) 対象飛来物により定まる ・ $v$ : 飛来物最大速度 (m/s) フジタモデルにおける飛来物の浮上・運動モデルにより数値解析により算出する	○

※1 設計竜巻荷重は組み合わせ（複合荷重  $W_{T1}, W_{T2}$ ）を考慮する

$$W_{T1}=W_P$$

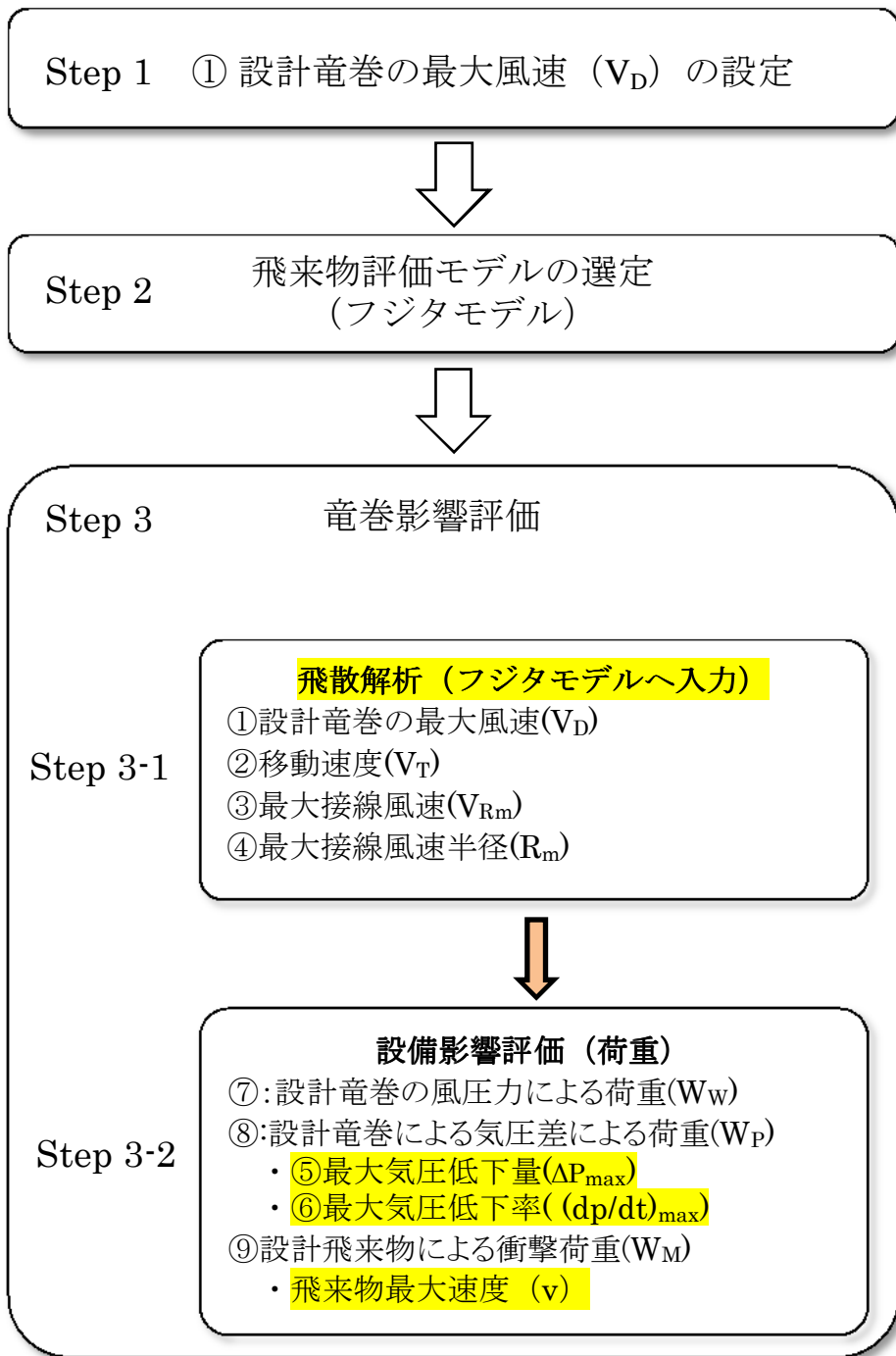
$$W_{T2}=W_W+0.5 \cdot W_P+W_M$$

$W_{T1}, W_{T2}$  : 設計竜巻による複合荷重,  $W_W$  : 設計竜巻の風圧力による荷重

$W_P$  : 設計竜巻による気圧差による荷重,  $W_M$  : 設計飛来物による衝撃荷重

※2 ○ : フジタモデルによる設定, — : 使用モデルに依存せず共通





○付きの数字は表 17 の No. とリンク

■ : フジタモデルの適用箇所

図 1 8 竜巻評価プロセスにおけるフジタモデルの適用状況

設計竜巻の最大接線風速半径 ( $R_m$ ) について

最大接線風速半径 ( $R_m$ ) については、実際の半径を観測的に求めるのは難しいため、観測された被害幅を用いて、最大接線風速半径を推定している。

ランキン渦モデルを仮定する場合、竜巻によって被害が生じる風速を  $V_0$  とした場合、 $R_m$  を超えた範囲では、風速  $V = V_{Rm} \cdot (R_m/r)$  と表せるため、被害が生じる風速  $V_0$  と、最大被害幅の 1/2 である  $r_0$ 、および最大接線風速  $V_{Rm}$  が分かれば最大接線風速半径  $R_m$  を得ることができる (図 1)。

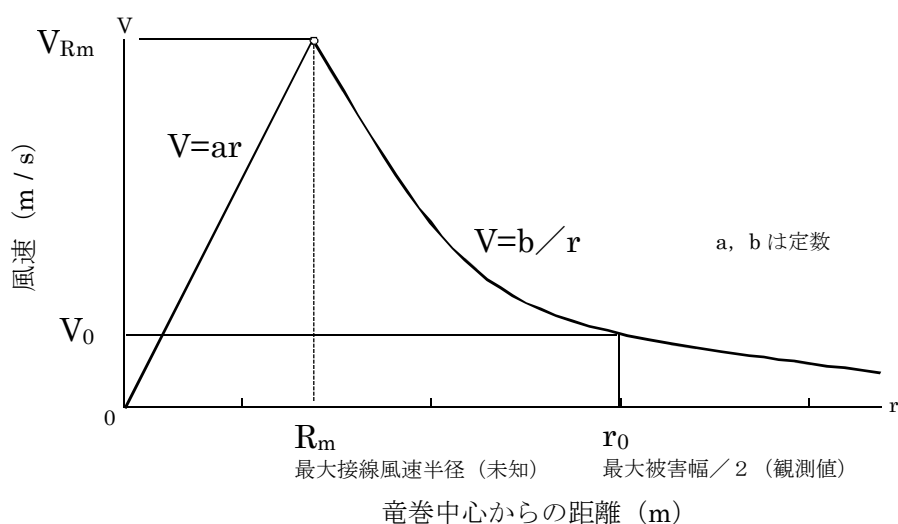


図 1 竜巻中心からの距離と風速との関係 (ランキン渦モデルの場合)

例えば、東京工芸大報告書<sup>(1)</sup>においては、最大風速  $V_{Rm}=70\text{m/s}$  (F3 あるいは F3 に近い F2 竜巻)、最大被害幅 250m の 1/2 である  $r_0 = 125\text{m}$ 、被害が生じる風速  $V_0 = 17\text{m/s}$  とすると、これを基に設定する最大接線風速半径 ( $R_m$ ) は、下記の通り。

$$R_m = r_0 \cdot V_0 / V_{Rm}$$

$$R_m = 125 \cdot 17 / 70$$

$$R_m \doteq 30(\text{m})$$

一方、フジタモデルの水平風速  $V$  は接線風速と径方向風速を合成したものであるので、外部コア半径の外側では水平風速  $V$  は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} \\ &= F_r(r)F_h(z)V_m\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_0} \end{aligned}$$

$$\text{ここで, } F_r(r) = \frac{R_m}{r}, \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

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

フジタモデルでは、高さによって風速が変化するが、接線風速  $V$  が最大となるのは、流入層の上端 ( $z=1$ ) である。このとき、 $F_h(z)=1$ ,  $\tan\alpha_0=0$  となるので、外部コア半径の外側ではランキン渦モデルと同様に  $V=V_m R_m/r$  が成立する。従って、最大接線風速半径を  $R_m = 30\text{m}$  とすることは妥当である。

#### 参考文献

- (1) 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.

フジタモデルにおける最大気圧低下量 ( $\Delta P_{\max}$ )  
および最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{\max}$ ) について

速度分布が既知である場合、流れの連続式と運動量保存式から導出される以下の圧力ポアソン方程式を解くことにより、圧力を求めることができる。

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_3^2} \right) = - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \quad (1)$$

ここで、 $x_i$ は座標( $x, y, z$ )を、 $U_i$ および $p$ は風速ベクトルおよび圧力を表す。また、 $\nu$ は動粘性係数を、 $\rho$ は空気密度を表す。

式(1)を解くために有限要素法<sup>(1)(2)</sup>を用い、第一象限を解析領域とし、この領域に一辺 300m( $10R_m$ )の立方体を想定し、1辺を 100 個の有限要素に分割した。竜巻(最大接線風速  $V_m=59\text{m/s}$ 、半径  $R_m=30\text{m}$ )の中心が解析領域の角部に位置するものとして、各節点にフジタモデルの風速値を与えた。移動速度  $V_{tr}$ は圧力分布には影響しないため、ここでの計算では  $V_{tr}=0$  とした。

図 1 にフジタモデルの圧力分布(空気密度で除したもの)を示す。空気密度で除した最大圧力差は  $2946.5\text{m}^2/\text{s}^2$  であり、これに空気密度  $1.22\text{kg}/\text{m}^3$  を乗じて最大気圧低下量を求めた。ただし、この結果は有限領域での数値解析結果であるので、さらに補正係数 1.0066 を乗じて無限領域での最大気圧低下量とした(表 1)。この補正係数 1.0066 は、ランキン渦に対する最大圧力差の数値解析結果とその理論値  $\rho V_m^2$ <sup>(3)</sup>の比から求めた。

図 2 にフジタモデルの圧力(空気密度で除したもの)の X - 方向空間微分値を示す。X - 方向空間微分値(絶対値)の最大値は  $137.4\text{m}/\text{s}^2$  であり、最大気圧低下率はこの値に移動速度と空気密度を乗じることにより、式(2)のように求められる。ただし、数値解析誤差を考慮するため、さらに補正係数 1.0096 を乗じて最大気圧低下率とした(表 2)。この補正係数 1.0096 は、ランキン渦に対する最大気圧低下率の数値解析結果と理論値  $\rho V_{tr} V_m^2 / R_m$ <sup>(3)</sup>の比から求めた。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = V_{tr} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

表 1 フジタモデルにおける最大気圧低下量

最大風速 ( $V_D$ )	最大接線風速 ( $V_{Rm}$ )	空気密度で除した 最大圧力差	最大気圧低下量 ( $\Delta P_{\max}$ )
69m/s	59m/s	$2946.5\text{m}^2/\text{s}^2$	3618Pa (37h Pa)

表 2 フジタモデルにおける最大気圧低下率

最大風速 ( $V_D$ )	最大接線風速 ( $V_{Rm}$ )	移動速度 ( $V_T$ )	空気密度で除した 最大圧力低下率	最大気圧低下率 ( $((dp/dt)_{max})$ )
69m/s	59m/s	10m/s	$137.4\text{m/s}^2$	1693Pa/s (17h Pa/s)

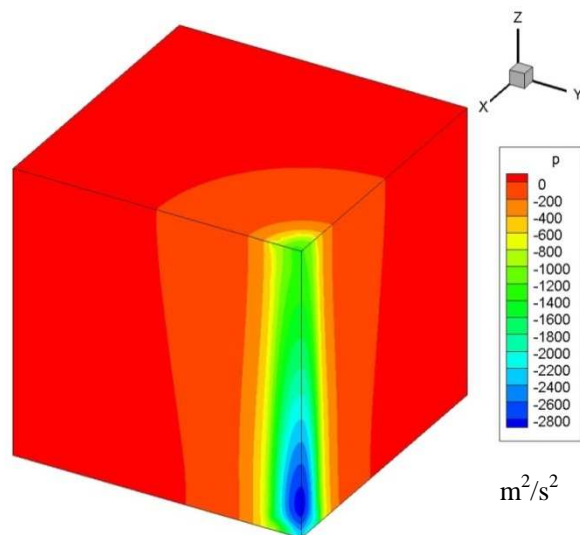


図 1 最大周方向風速  $V_m=59\text{m/s}$  におけるフジタモデルの圧力分布

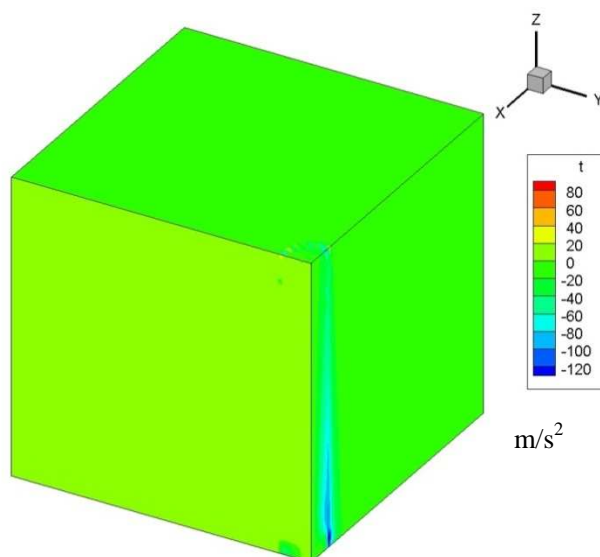


図 2 最大周方向風速  $V_m=59\text{m/s}$  におけるフジタモデルの圧力

参考文献

- (1) Y. Eguchi, S. Sugimoto, H. Hattori and H. Hirakuchi, "Tornado Pressure Retrieval from Fujita's Engineering Model, DBT-77", Proceedings of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models (ICVFM Nagoya 2014), November 17 - 20, 2014, Nagoya, Japan.
- (2) 江口 讓, 服部康男, 流速場情報に基づく圧力場計算法の提案, 第 72 回ターボ機械協会 大分講演会(2014.10.3)
- (3) 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)

## 5. 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モデルであり、米国 DOE においても、設計基準の飛来物速度、飛散高さの導出過程に使用されているモデルである。

米国 Grand Gulf 発電所で確認された竜巻および佐呂間竜巻の被害状況の検証結果（1点配置飛来物評価）からも、フジタモデルは実現象を模擬できることが確認できた。また、ランキン渦モデルに関しては、過度に保守的なモデルであることが確認できた。

竜巻影響評価の目的は、当該サイトにおいて、襲来が想定される規模の竜巻に対し、竜巻防護施設が健全な状態を維持することができ、原子炉施設の安全性が確保されるかについて評価し、必要に応じて適切な対策を必要な範囲に対し確実に行うことにある。このため、保守的な結果を与えるモデルを適用することは、現実的なモデルを適用することと同様に有効な対策を抽出するものの、一方で過剰な対応を取ることに繋がる。

過剰な竜巻防護対策は、通常時の保守性・補修性の妨げとなるだけでなく、例えば重大事故対処設備である可搬型設備を漏れなく固縛するような対策は、非常時に可搬設備を迅速に配置するための機動性を妨げる可能性もあり、全体的なリスクを増大させることも考えられる。

このように、保守的に評価を行い対策範囲を広げることが、かえって他の対策の実効性を妨げることもあるため、評価全体として一定の保守性を確保しつつ、現実と大きく乖離しないことも重要と考え、飛来物評価では、地上付近からの現実的な風速場を再現しているフジタモデルを適用することとした。

以上



## 参考文献

- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978.  
(<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0526/ML052650410.pdf>)
- (2) 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.
- (3) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (4) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (5) 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.
- (6) 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>)
- (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) T. Schmidlin et al., UNSAFE AT ANY (WIND) SPEED? Testing the Stability of Motor Vehicles in Serve Winds, pp. 1821-1830, vol.83, no.12, Bulletin of the American Meteorological
- (9) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898 , 1978.
- (10) 社団法人 土木学会 北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査団:平成18年11月 北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査 報告書 ([http://www.jsce.or.jp/report/40/files/saroma\\_report.pdf](http://www.jsce.or.jp/report/40/files/saroma_report.pdf)にて閲覧可能)
- (11) 江口讓, 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.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 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)
- (15) 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.

- (16) 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.
- (17) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980.
- (18) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987.
- (19) 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.
- (20) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico,(Docket No. 70-3103)