

# 解説 記事

## 原子力発電所における竜巻影響評価

東北電力株式会社 火力原子力本部 原子力部

佐藤 大輔 Daisuke SATO

### 1. はじめに

原子力発電所に対する竜巻の影響評価を行うにあたり、原子力規制委員会が定める「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、ガイドという。）に従うが、この際、観測結果に基づいた設計上考慮する竜巻の最大風速の設定および飛来物評価モデルの設定が重要となる。ガイドにおいては、米国の評価手法を参照しているものの、その妥当性について検証された例は少ない。また、我が国の竜巻発生数は米国と比較しても少なく、観測の歴史も浅い。

このため、保全学会において、設計竜巻の設定を行う上での考え方及び飛来物評価モデルの検証を行い、その結果を取り纏めたため、ここで紹介する。

### 2. 設計竜巻の設定について

#### 2.1 設計竜巻の設定の妥当性に対する検討 [1]

ガイドでは、過去に発生した竜巻による最大風速 ( $V_{B1}$ ) と竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) のうち、大きな風速を基準竜巻として設定し、地形影響による増幅可能性を評価して設計竜巻を設定することとされている。

$V_{B1}$  について、ガイドでは「日本」で過去に発生した竜巻の最大風速を設定することを原則としているが、十分な信頼性のあるデータに基づいて評価できる場合は、評価対象地域を限定できるとしている。

そこで、竜巻の発生要因を総観場的に確認することに加え、気象庁の竜巻注意情報にも活用されている突風関連指数による分析を実施した。

#### 2.2 総観場の分析

過去に国内で発生した竜巻をフジタスケール別、かつ、総観場別に分析した結果を図1に示す。総観場の分析を行うことにより、竜巻を発生させる環境場には、地域により特徴があることが確認出来る。

例えば、図1からも分かるが、日本海側では台風起因した竜巻の発生は確認されていない。また、寒候期と暖候期では、F3 竜巻の発生数には季節的な顕著な差は見られ

ないこと並びに東北地方の太平洋側では暖候期に竜巻が発生する傾向が見られる。

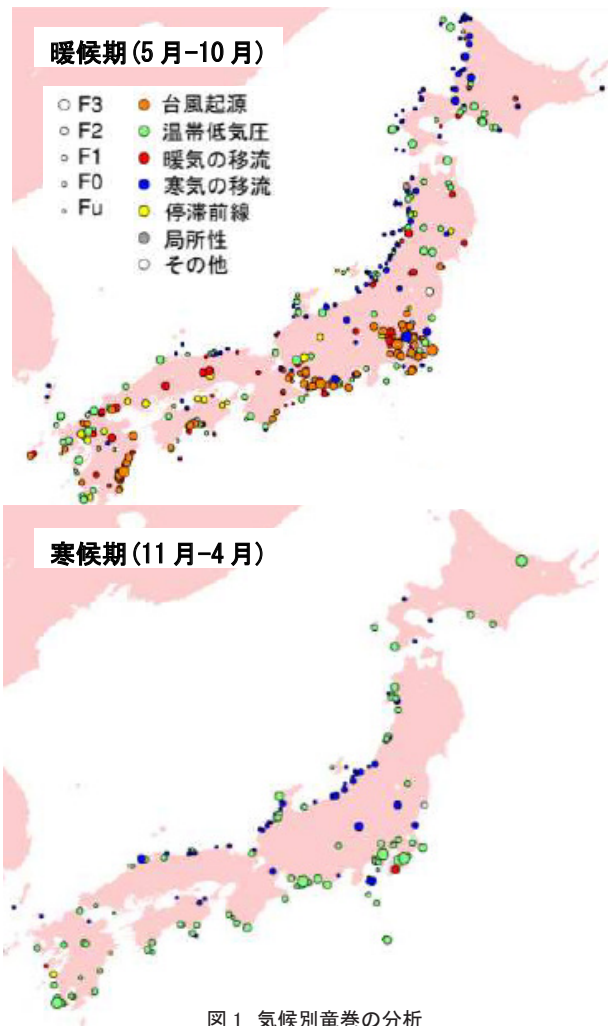


図1 気候別竜巻の分析

#### 2.2 竜巻検討地域の設定

総観場や突風関連指数 (CAPE、SReH、EHI) の分析により、既往最大規模 (F3) の竜巻が発生する可能性がある環境場になりやすいか否かの観点から地域性を議論することが可能である。

大気下層に鉛直シアが存在すると水平軸周りの渦が発生し、その渦が上昇気流に沿って親雲に取り込まれる。これに

より、親雲内の渦度が上昇し、メソサイクロンと呼ばれる大きな鉛直軸周りの渦ができる。全容は解明されていないが、親雲の発達や、親雲－地表面間の急激な気圧低下等のメカニズムにより竜巻漏斗雲が発生する（概念図は図2）。SReHは親雲への水平渦度の取り込まれやすさを表しており、以下により算定される。

$$SReH = \int_{\text{地上}}^{\text{高度3km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

ここで、 $\mathbf{V}$  は水平風速ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$  は鉛直シアに伴う水平渦度であり、 $\mathbf{C}$  はストームの移動速度である。また、 $dz$  は鉛直方向の層厚を表す。

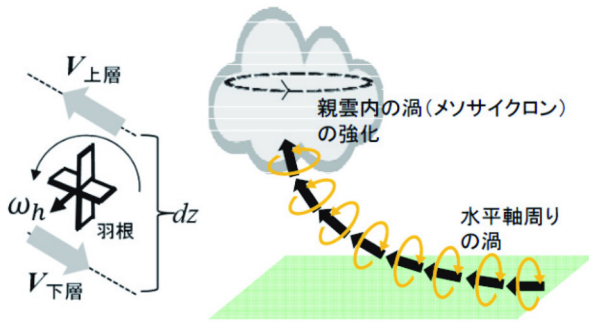


図2 SReHの算出概念

一方、図3に示すように、空気塊が何らかの外力（太陽による地面の加熱、前線での風の収束等）により上昇すると、最初は乾燥断熱線により気温が下降するが、持ち上げ凝結高度（LCL）にまで達すると水蒸気が飽和して雲ができ、その凝結熱（潜熱）により乾燥時と比較して気温が下がりにくなり、湿潤断熱線に沿って気温が低下する。積乱雲がたちあがり、周囲の大気の気温よりも高くなると（LFC高度以降）、空気塊は暖かいほど軽く上昇するため、外力なしで上昇し、積乱雲が急激に発達する。積乱雲が高く発達し、周囲の大気の気温に等しくなる（EL高度）と、雲の高度方向への成長は止まる。CAPEは湿潤断熱線と大気の気温プロファイルで囲まれる部分の面積に当たり、CAPEが大きいほど大気が不安定で背の高い積乱雲に発達しうる。実際にCAPEを算出する際には、以下の式を用いる。

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{\theta'_e(z) - \theta_e(z)}{\theta_e(z)} dz$$

ここで、 $z$ は高度、 $g$ は重力加速度、 $\theta_e$ はストーム周囲の相当温位、 $\theta'_e$ は持ち上げ空気塊の相当温位である。温位は、次の式に示すように気温 $T$ と気圧 $p$ に関する量であり、ある空気塊を断熱的に基準圧力1000 hPaに戻したときの絶対温度である。相当温位は潜熱の影響を考慮した温位にあたる。

$$\theta = T \left( \frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R: \text{気体定数}, C_p: \text{定圧比熱})$$

持ち上げる空気塊の性質に応じてCAPE値は変わるが、ここでは、地表から500 m上空までで最も不安定な空気塊を持ち上げることとし、その時のCAPEはMUCAPE (Most Unstable CAPE) と呼ばれる。以下において特段断らない限り、CAPEはMUCAPEのことを指すものとする。

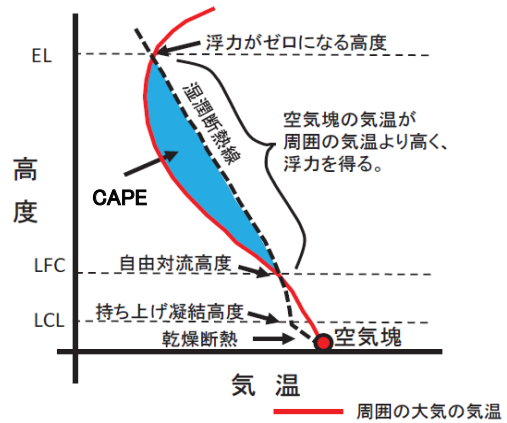


図3 CAPEの算出概念

また、SReHとCAPEの複合的な突風関連指数としてEHIと呼ばれる指数がある。

$$EHI = \frac{SReH \times CAPE}{160000}$$

これまでに発生したF3竜巻、および日本海側で発生したF2竜巻に対する突風関連指数の分析結果を図3に示す。図4における実線は、過去のF3竜巻を包絡するEHIに相当するもので、EHIとしては3.3となる。これを閾値として、EHIが3.3を超過する頻度分布を評価した結果、図6のとおりとなり、日本海側および東北地方太平洋側は、太平洋側の茨城県以西に比べ、1～2オーダー超過頻度が低く、異なる傾向があることが分かる。この傾向は、図5に示すCAPEおよびSReHの評価でも同様の傾向を示している。

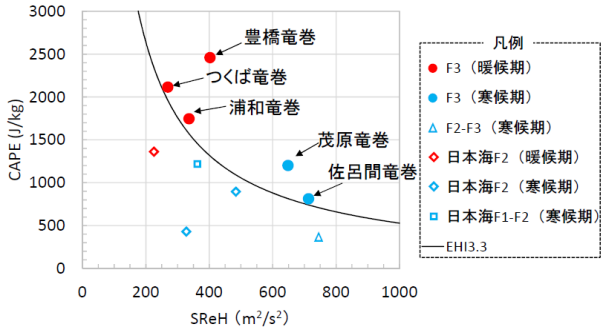


図4 突風関連係数分析結果

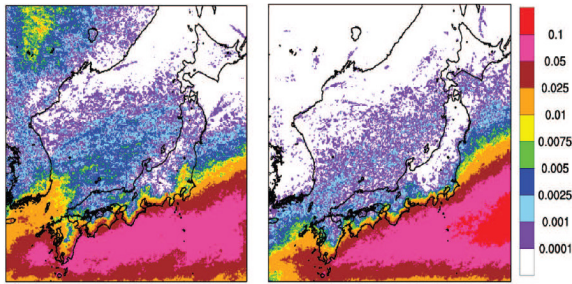
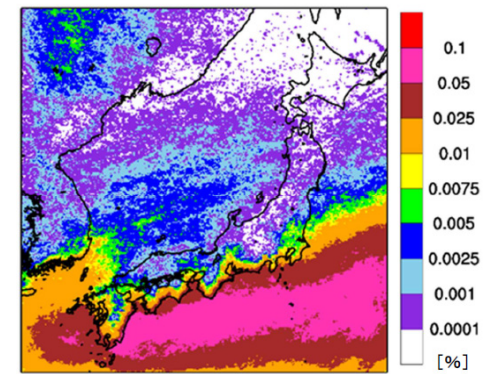


図5 同時超過頻度分布  
 単位：％、F3規模以上を対象；左：暖候期、右：寒候期  
 【実績ベース閾値】  
 SReH：250 m2/s2、CAPE：1600 J/kg（暖）、600 J/kg（寒）



閾値（EHI 3.3、最大降水量 2 mm/hr）を同時に超過する頻度（通年）

図6 EHI分析結果

### 2.3 設計竜巻の設定

2.1 及び 2.2 に記した分析並びに評価により、竜巻の発生要因に関する類似性、ある規模の竜巻が発生し得る環境場になりやすい地域か否かが区別できると考えられる。

こうした評価に加え、施設・設備の設計上、考慮すべき、設計竜巻を設定する上では、評価対象施設（発電所）が立地する地点における地形状況を確認することが必要である。これは、地形により、襲来した竜巻が増幅することも想定されるためであり、一般的には図7に示すとおり、上り勾配を移動する過程において竜巻は減衰し、下り勾配を移動する際には増幅することになる。また、竜巻は地表面を移動する際には地表面の粗度効果（摩擦）により減衰されるため、

各サイトにおいて、竜巻の進行方向を過去の竜巻事例から分析し検討することが必要となる。

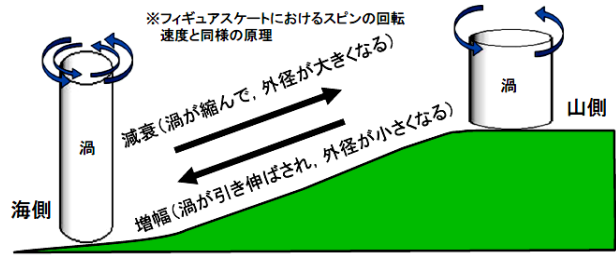


図7 地形影響による竜巻の増幅・減衰効果

さらに、地形と総観場の相互作用により発生した特異的な竜巻である佐呂間型の竜巻については、サイト毎に検討することも地形の増幅効果の有無を判断する上では重要となる。佐呂間では図8に示すとおり、太平洋側からの暖気流が丘陵地を乗り越え、冷気の流れ込みのある平野部に流れ込んだことによって、上層と下層の間に強い風向差が生じ、不安定度が増したと考えられている。

なお、太平洋沿岸部のサイトでは、暖気が丘陵地を越えて流れ込む様子がなく、こうした佐呂間型の竜巻が発生する立地状態にはないということになる。

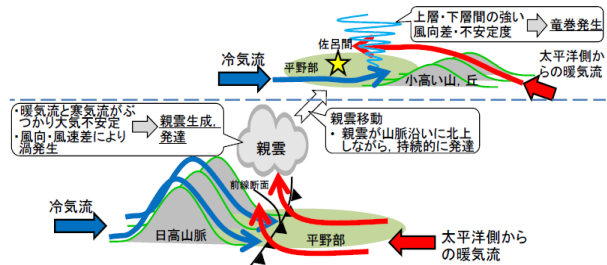


図8 佐呂間竜巻の地形的な影響

## 3. 飛来物評価モデルについて

### 3.1 飛来物評価モデルの比較 [2]

飛来物の評価を行うモデルとして、米国 NRC の基準ではランキン渦モデルが例示され、ガイド上ではこのモデルに加え、他のモデルについても技術的な妥当性を示すことで評価に用いることができるとされている。

飛来物評価モデルにはランキン渦モデルの他にフジタモデルが存在し、フジタモデルは、NRC およびアルゴンヌ国立研究所からの要望により 1978 年にシカゴ大学の藤田博士によって考案された工学モデルである。このフジタモデルは、1974 年 8 月の米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻の記録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により作成された風

速ベクトル図を基にした流線モデルから、竜巻風速場を代数式で表し作成されたものである。

なお、LES モデルも存在するが、これは、流体の運動方程式（偏微分方程式）に対する数値解析結果を利用して竜巻状の渦を計算し、竜巻の風速場を模擬するが、半径60cm 程度の円筒容器内の強制対流の LES 解析結果にスケール係数を乗じるというものであり、実スケールへの適用は難しいと考えられる。各モデルの比較を表 1 に示す。

表 1 飛来物評価モデルの比較

モデル名	風速場モデルの概要
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風速場の接線風速<math>V_\theta</math>をランキン渦で模擬する。  <math>V_\theta = (r/R_m)V_{\theta, \max}</math> (<math>r &lt; \text{コア半径 } R_m</math>), <math>V_\theta = (R_m/r)V_{\theta, \max}</math> (<math>r &gt; \text{コア半径 } R_m</math>)</li> <li>・飛来物評価の場合に限り、半径方向風速<math>V_r</math>と上昇風速<math>V_z</math>を付加する。  <math>V_r = -(1/2)V_\theta</math>, <math>V_z = (2/3)V_\theta</math></li> <li>・風速分布は高さに依存しない。</li> </ul>
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・ランキン渦と同様に代数式で風速場が表現されるが、やや複雑。</li> <li>・半径方向に3つの領域(内部コア・外部コア・最外領域)に分割して風速場をモデル化する。</li> <li>・接線風速<math>V_\theta</math>はランキン渦モデルと同様であるが、高さ依存性がある。</li> <li>・上昇流(<math>V_z</math>)は外部コアのみに存在する。</li> <li>・地面付近で竜巻中心に向かう強い流れ(<math>V_r</math>)がある。</li> </ul>
非定常乱流渦モデル(LES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・流体の運動方程式(偏微分方程式)に対する数値解析結果を利用して、竜巻状の渦を計算し、竜巻の風速場を模擬する。(例、直径60cm程度の円筒容器内の強制対流のLES解析結果にスケール係数を乗じる。)</li> </ul>

### 3.2 飛来物評価モデルの特徴

前項で記したとおり、LES モデルは実スケールでの取り扱いに課題もあるため、ここでは、ランキン渦モデル及びフジタモデルを対処として、モデルの特徴の比較を行う。

はじめに、ランキン渦モデルの特徴についてであるが、図 9 に示すとおり、地面から一様に吹き出しが発生しており、風速分布に高さ依存性はなく、全域に上昇流があることにより飛来物が落下しにくいモデルとなっている。このため、飛来物の飛散評価においては飛散高さが相当に保守的なものとなる。

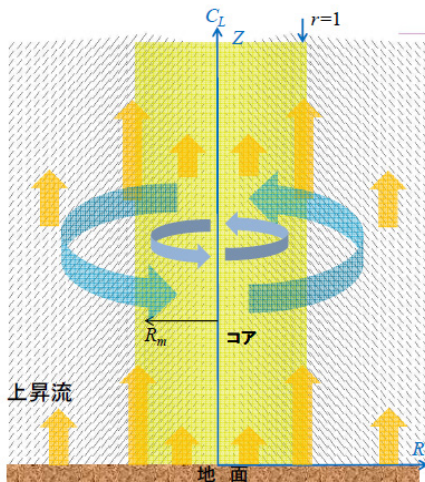


図 9 ランキン渦モデルの風況イメージ

一方、フジタモデルは、図 10 に示すとおり、地表面で渦

の中心に向かう水平方向の流れが最外領域にモデル化されており、風速分布は高さ方向に依存性をもち、上昇流は外部コアのみに存在する。また、内部コアには上昇流は存在しないという実際の竜巻の風況場をよく再現したモデルとなっている。

このように、地表面の風況場をよりの確にモデル化しており、過去の竜巻被害実績の再現性も検証されている（検証例については 3.3 項）。

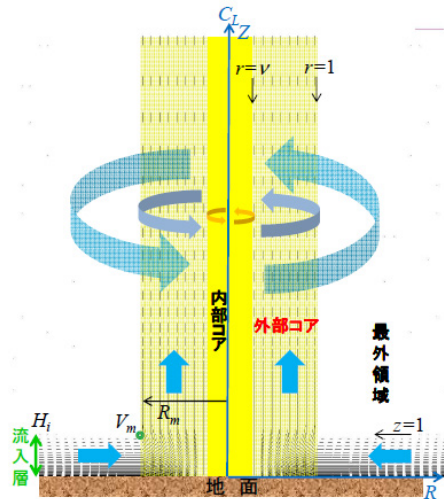


図 10 フジタモデルの風況イメージ

### 3.3 実際の竜巻被害状況の検証結果

実際の竜巻の被害状況について、ランキン渦モデル及びフジタモデルを用いた再現性について検証した結果を以下に示す。

#### (1) Grand Gulf 発電所における被害事例の検証

1978 年 4 月 17 日に、米国ミシシッピ州で建設中の Grand Gulf 原子力発電所に襲来した竜巻によって、資材置き場にコンクリート・石綿製のパイプを収納し段積みしていた木箱が、浮上はせず転倒し数mの範囲で散乱したとする被害が報告されている。この被害状況を両モデルで再現した結果は表 2 に示すとおり、フジタモデルは実際の被害をよく再現していることがわかる。これに対し、ランキン渦モデルでは、実際の被害を相当に保守的な結果となっていることが分かる。

表 2 Grand Gulf 原子力発電所再現解析結果

	初期高さ	飛散距離	飛散高さ
フジタモデル	0m	1.2m	浮上なし
ランキン渦モデル	40m	227m	0.34m
	0m	42.6m	0.34m

(2) 佐呂間竜巻における被害事例の検証 [3]

2006年11月7日に北海道佐呂間町で発生した竜巻による、佐呂間町内の工事事務所敷地内での車両の飛散等が報告されている。図11は工事事務所敷地内において確認された車両被害の状況及び竜巻の進行方向を図示したものであり、この図11における緑色の4tトラックを代表として、フジタモデル及びランキン渦モデルを用いて再現解析を行った。

再現解析の結果は表3及び図12に示すとおりであり、前述の(1) Grand Gulf 原子力発電所の再現解析結果と同様に、フジタモデルは実際の被害をよく再現しているが、ランキン渦モデルでは、相当に保守的な結果を与えることが確認できた。

表3 佐呂間竜巻被害の再現解析結果

	初期高さ	飛散距離	飛散高さ
フジタモデル	0m	86.5m	5.3m
ランキン渦モデル	40m	240.5m	3.1m
	0m	140.2m	3.1m

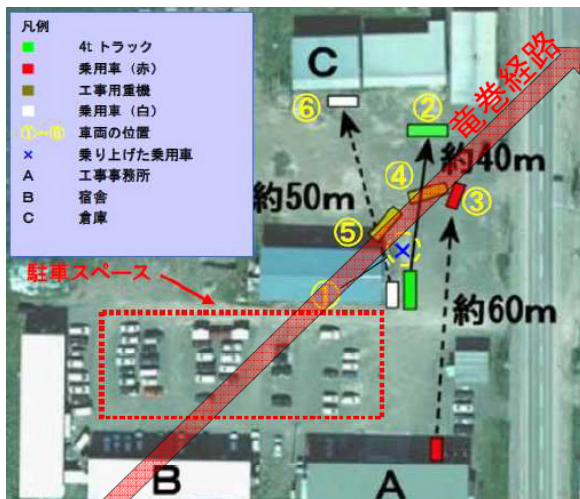


図11 佐呂間竜巻の被害状況

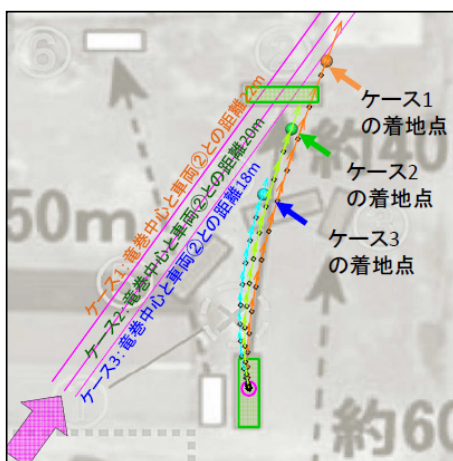


図12 佐呂間竜巻の被害状況の再現解析結果 [4]

以上の結果から、フジタモデルは実際の竜巻被害状況をよく再現することが確認できた。こうした、検証例は少ないものの、国内外の竜巻被害記録とフジタモデルの解析結果を比較し、実際の飛散状況との整合性について確認することができた。

これに対して、ランキン渦モデルは実際の被害状況を包絡する一方で、その結果は相当に保守側になることも確認できた。

こうした再現解析により、原子力発電所において、竜巻による飛来物の飛散解析を行うにあたっては、フジタモデル並びにランキン渦モデルいずれも適用が可能であり、事業者が選択して適用すべきものとする。

4. まとめ

竜巻検討地域の設定における気候条件が類似する地域の見極めができるかという点においては、総観場及び突風関連指数 (CAPE, SReH, MHI) の分析により、竜巻が発生しやすい環境場になりやすい地域か否か等、日本全体でみればその地域性が考慮できるという結果が、今回の分析の中では整理ができたものと考えている。今回の分析では、特に、突風関連指数の分析から、太平洋側の茨城より西側に比べ、日本海側および東北地方の太平洋側の地域は、竜巻が発生しやすい環境場という観点では、明らかに差があるということが確認できた。

また、米国 NRC 等による要望で実際の竜巻観測記録を基に考案されたフジタモデルは、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り、今回の検討で、米国 Grand Gulf 発電所で確認された竜巻及び佐呂間竜巻の被害状況の検証結果からも、実現象を模擬できることが確認できた。フジタモデルと比較して、ランキン渦モデルは、相当に保守的なモデルであることが確認できたが、これらはいずれも原子力発電所の飛来物影響評価には適用できると考えられるとの結論も得た。

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ランキン渦モデルを適用することは、現実的なフジタモデルを適用することと同様、竜巻防護施設の健全性を維持するため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可能性もある。

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はなく、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懸念される。

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る。いずれにせよ、評価の目的または用途に応じて事業者が適切に評価モデルを選択することは重要である。

最後に今回の、原子力発電所における竜巻影響評価に関しては、保全学会原子力規制関連事項検討会において、電力中央研究所の多大なる協力のもと検討を行ったものであり、関係者の皆様に心から御礼申し上げます。

力中央研究所 研究報告 N14002, 2014.

[3] 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.

[4] 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.

(平成 27 年 3 月 18 日)

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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

### 著者紹介



著者：佐藤 大輔  
所属・役職：東北電力株式会社  
火力原子力本部 原子力部 副長  
専門分野：原子力工学

## 開催案内

### First Announcement The Maintenance Science Summer School 2015 Tokyo, JAPAN July 27-31, 2015

開催日：2015 年 7 月 27 日 -31 日

開催場所：東京大学

参加申し込み締め切り：2015 年 5 月 31 日

詳細は本誌会議案内および

日本保全学会ウェブサイト (<http://www.jsm.or.jp/jsm/at/summerschool2015.html>) を御覧ください