

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

竜巻影響評価について
(補足説明資料)

平成27年4月

東京電力株式会社

補足説明資料 目次

1. 竜巻に対する防護	補足 1-1-1
1.1 重大事故等対処施設に対する考慮について	補足 1-1-1
1.2 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出について	補足 1-2-1
1.3 耐震Sクラス設備について	補足 1-3-1
1.4 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について	補足 1-4-1
2. 基準竜巻・設計竜巻の設定	補足 2-1-1
2.1 数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について	補足 2-1-1
2.2 竜巻検討地域において発生した竜巻	補足 2-2-1
2.3 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方	補足 2-3-1
2.4 地形効果による竜巻風速への影響について	補足 2-4-1
2.5 設計竜巻の特性値の設定	補足 2-5-1
3. 竜巻影響評価	補足 3-1-1
3.1 設計飛来物の設定	補足 3-1-1
3.2 飛来物の飛散距離および飛散高さの算出方法について	補足 3-2-1
3.3 竜巻防護施設の外殻となる施設および竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設（建屋）等の構造健全性の確認結果	補足 3-3-1
3.4 建屋開口部の調査結果について	補足 3-4-1
3.5 設計竜巻に対する設備の構造健全性の確認結果	補足 3-5-1
3.6 竜巻防護対策の概要について	補足 3-6-1
3.7 自動車の飛距離について	補足 3-7-1
3.8 解析コードについて	補足 3-8-1
3.9 竜巻随伴事象の抽出について	補足 3-9-1

設計竜巻の特性値の設定

1. 設計竜巻の移動速度 (V_T)

移動速度 (V_T) については、竜巻影響評価ガイド(以下、評価ガイド)を参照し、下記の式にて設定した。

$$V_T = 0.15 \cdot V_D \text{ (評価ガイドの 3.1 式)}$$

なお、この式は日本の竜巻観測記録(気象庁データベース)に基づいた竜巻移動速度(平均値)と最大風速との関係⁽¹⁾を参照して設定されており、風速場モデルに関わらず用いることができる。

2. 設計竜巻の最大接線風速 (V_{Rm})

最大接線風速(V_{Rm})については、評価ガイドを参照し、竜巻の最大風速から移動速度(V_T)を引いた値として、下記の式にて設定した。この値も風速場モデルによらず用いることができる。

$$V_{Rm} = V_D - V_T \text{ (評価ガイドの 3.2 式)}$$

3. 設計竜巻の最大接線風速半径 (R_m)

最大接線風速半径 (R_m) については、観測された被害幅を用いて推定している。

ランキン渦モデルを仮定すると、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、被害幅 r_0 、及び最大接線風速 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)

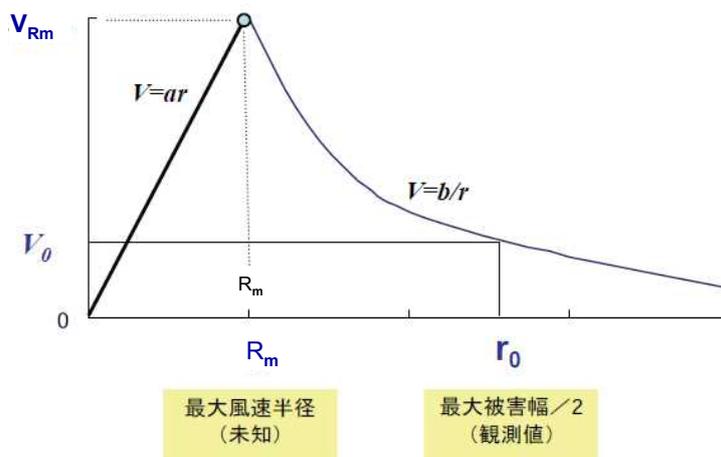


図 1 竜巻半径と風速との関係 (ランキン渦モデルの場合)

例えば、東京工芸大報告書⁽³⁾p. 163 の仮定 2 より、最大風速 $V_{Rm}=70\text{m/s}$ (F3 あるいは F3 に近い F2 竜巻)、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。

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

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

$$R_m \doteq 30.36(\text{m})$$

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、ランキン渦モデルと異なり高さによって風速が変化するが、外部コア半径の内側では r に比例して風速が大きくなり、外部コア半径の外側では r に反比例して小さくなる点ではランキン渦モデルと同様である。

また、接線風速 V が最大となるのは、流入層の上端 ($z=1$) であるが、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、被害幅から最大接線風速半径を推定する際に、ランキン渦モデルと同様に求めることができると考えられるため、本検討においては評価ガイドを参照して最大接線風速半径 $R_m = 30\text{m}$ を設定する。

4. 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{\max})・最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{\max}$)

Fujita モデルにおける設計竜巻の最大気圧低下量・最大気圧低下率については、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、 ν は動粘性係数を、 ρ は空気密度を表す。なお、添え字 i, j は1から3までの整数とする。

式(1)を解くために有限要素法(計算方法の詳細は参考文献(2),(3)を参照)を用い、一辺300m($10R_m$)の立方体を解析領域として、この領域を1辺100個の有限要素に分割した。竜巻(最大周方向風速 $V_m=59\text{m/s}$ 、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Fujita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2にFujita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 $2946.5\text{m}^2/\text{s}^2$ であるので、これに空気密度 $1.22\text{kg}/\text{m}^3$ を乗じて最大圧力差を求めた。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値とした(表1)。なお、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理論値の比から求めた。

図3にFujita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 $137.44\text{m}/\text{s}^2$ であり、最大気圧変化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)。なお、この補正係数1.0096は、ランキン渦に対する最大気圧変化率の数値解析結果と理論値の比から求めた。

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

表1 最大気圧低下量

最大風速	最大旋回風速	空気密度で除した最大圧力差	最大圧力差
69m/s	59m/s	$2946.5\text{m}^2/\text{s}^2$	<u>3618Pa</u>

表2 最大気圧変化率

最大風速	最大旋回風速	移動速度	空気密度で除した最大圧力変化率	最大気圧変化率
69m/s	59m/s	10m/s	$137.44\text{m}/\text{s}^2$	<u>1693Pa/s</u>

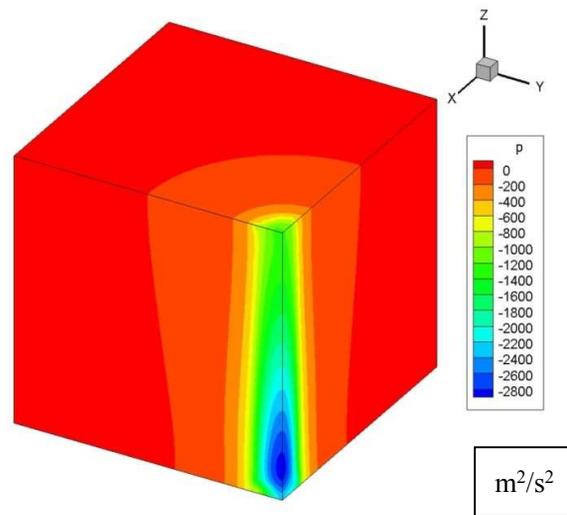


図2 最大周方向風速 $V_m=59\text{m/s}$ における Fujita モデルの圧力分布 (圧力は空気密度で除したもの, 最大値 $53.1\text{m}^2/\text{s}^2$, 最小値 $-2893.4\text{m}^2/\text{s}^2$)

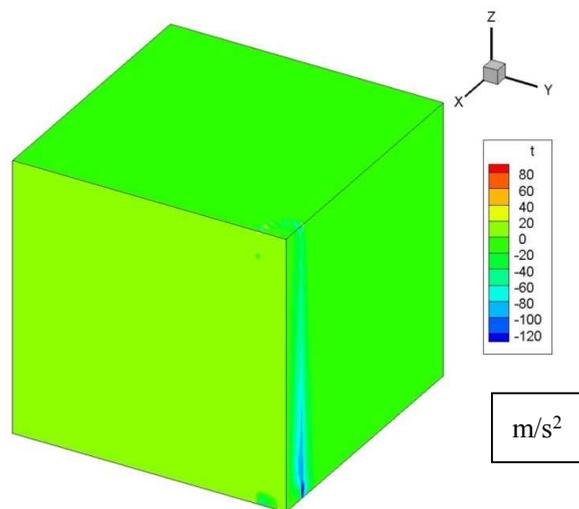


図3 最大周方向風速 $V_m=59\text{m/s}$ における Fujita モデルの圧力 (空気密度で除したもの) の x -方向空間微分値 (最大値 $93.4\text{m}/\text{s}^2$, 最小値 $-137.4\text{m}/\text{s}^2$)

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.
- (2) 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.
- (3) 江口 譲, 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)