フジタモデルによる竜巻の気圧低下評価について

清水 純太郎^{1,*}, 大坪 俊介²

Evaluation of Atmospheric-Pressure Change in Tornado Using Fujita Model

Juntaro SHIMIZU^{1,*} and Shunsuke OHTSUBO²

¹Fuel and Core Engineering Department, Mitsubishi Nuclear Fuel Co., Ltd.,
622-1 Funaishikawa, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1197, Japan

²Analysis & Engineering Center, MHI Nuclear Systems and Solution Engineering Co., Ltd.,
1-1-1 Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe 652-8585, Japan

(Received May 17, 2016; accepted in revised form September 29, 2016; published online January 31, 2017)

Evaluation of the atmospheric-pressure change (APC) in a tornado is necessary to assess the integrity of nuclear-related facilities. The Rankine model has been most frequently used to theoretically calculate the APC in a tornado. The result, however, is considered to be overly conservative because the Rankine model wind speed at the ground is larger than that in reality. On the other hand, the wind speed of the Fujita model is closer to that of actual tornadoes but is expressed by more complicated algebraic equations than that in the Rankine model. Also, because it is impossible to analytically derive the APC equation using the Fujita model, numerical computation is required. A previous study employed the finite element method (FEM) for such a purpose. However, a general-purpose FEM code often requires complicated input parameters. In order to conduct parametric studies to evaluate the integrity of facilities in various cases of tornadoes, the finite-difference method code “TORPEC”, which is specialized to analyze the APC, was developed as a convenient design tool. TORPEC is based on Poisson’s equation derived from the Navier-Stokes equation. It also runs on widely available technical calculation software such as Microsoft® Excel VBA or MATLAB®. Taking advantage of such convenience, various calculations have been conducted to reveal the characteristics of APC as functions of the maximum tangential wind speed, axial position and tornado radius. TORPEC is used as a benchmark in the existing paper. The case study results obtained by TORPEC show a constant ratio of the pressure drop of the Fujita model against the Rankine model. This factor can be used to derive the Fujita model result from the Rankine model result without FEM analysis.

KEYWORDS: *tornado, atmospheric-pressure change, Fujita model, numerical computation*

I. 緒 言

2011年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)において、津波により福島第一原子力発電所では大きな被害を生じた。これは直接的には想定以上の津波の襲来によるものであるが、この事故の反省から、原子力発電所について津波だけではなく種々の自然現象に対しても、極めてまれに発生する事象への備えが必要となっている¹⁾。原子燃料の加工施設についても工場建屋内に原子燃料の原料ないしは

製品としてウランを含有した加工設備を備えており、公衆への影響を最小限に留めるため、建屋ないしは設備を自然現象から防護する必要がある。

自然現象のうち、竜巻について考えると、極めて大きな風速や局所的な気圧低下が生じ、建物に大きな荷重を作用させるとともに、近隣にある設置物が飛来物となり建物に衝撃力を作用させる。国内でも佐呂間町、つくば市でフジタスケール F3 レベルの竜巻によって車両や一般建屋に被害が報告された事例がある^{2,3)}。

このため、近年、原子力施設に対しても竜巻評価が求められるようになり、飛来物や竜巻襲来時の気圧低下をランキン渦モデルにより評価する手法が検討されている^{4,5)}。また、竜巻によって生ずる気圧低下による建築物への影響

¹ 三菱原子燃料(株) 燃料・炉心技術部

² MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株) 解析技術センター

* Corresponding author, E-mail: juntaro_shimizu@mnf.co.jp

については, Kikitsu⁶⁾らによってランキン渦に近い模擬竜巻を実験的に発生させて評価しようとする試みがなされている。

ランキン渦モデルは基本的に竜巻の接線方向に風が吹くことを前提とした竜巻風速分布のモデルであり, 数学的取り扱い上の利便性は大きいものの, 実際に竜巻による被害が生じる地表面近傍, すなわち流体の境界層となる部分について風速分布がモデル化されないことから, 地上施設への影響を議論するためには適切なモデルとはいえない。

このようにランキン渦モデルを用いた評価には限界があり, 竜巻の立体的な風速構造を実験で再現することも難しいことから, より現実的な竜巻風速分布として, Fujita は地表面での風速を実際の竜巻を観察した結果から竜巻風速の工学モデル DBT-77 を考案している⁷⁾(以降, このモデルをフジタモデルと呼ぶ)。また, Eguchi らはフジタモデルを用いることができる飛来物評価コード TONBOS⁸⁾を開発しており, これを用いた評価が実際の竜巻被害状況をよく模擬することが報告されている^{9,10)}。

フジタモデルが地表面近傍の風速をよくモデル化していると考えられることから, 風速のみならず, 気圧低下の評価についてもこれを用いた評価が試みられている。Eguchi らは有限要素法を用いた汎用の非定常乱流解析コード SMART-FEM¹¹⁾を開発しており, これを用いてフジタモデルにおける気圧低下を評価した場合, ランキン渦モデルの場合に比べて気圧低下が小さくなることを示している⁸⁾。

ただし, 汎用的かつ大規模な体系にも適用できるような有限要素法を使用することは, 大規模なコードの準備が必要となり, 多様な竜巻条件の下で施設への影響や各種の対策効果の評価を行う上で計算手法の選定や入出力インターフェイスの構築に長時間を要することとなるため, 簡易にフジタモデルを考慮した評価が可能となることが求められていた。

本研究では, 上記の問題を考慮し, 風速を既知としてナビエーストークス式を大幅に簡略化したポアソン方程式を差分法を用い解求することにより⁸⁾, 竜巻の気圧評価に特化した設計ツール(竜巻気圧低下評価プログラム(TORnado Pressure Evaluation Code: TORPEC))を開発した。このことにより, フジタモデルを活用した気圧低下を Microsoft[®] Excel VBA や Matlab[®] のように容易に入手できる環境で実行することができるようになった。また, パラメトリックスタディを行う利便性が向上した点を生かし, これまでの研究では明らかにされなかった風速が増加することによる気圧変化への影響や, 地表面から上空における軸方向の気圧低下分布, 竜巻半径の影響についても評価した。

II. TORPEC について

竜巻による気圧低下評価手法である TORPEC は, 風速

を既知としたナビエーストークスの式からポアソン方程式を導出し⁸⁾, 差分法近似により計算することにより, 複雑な風速モデルを用いた場合での気圧低下評価を Microsoft[®] Excel VBA や Matlab[®] のように容易に入手できる環境で実行するためのプログラムである。

1. ナビエーストークス式からポアソン方程式の導出

重力による気圧変化(静水圧)を考慮しない粘性率一定の非圧縮性流れのナビエーストークスの式を(1)に示す。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (1)$$

気圧低下については, 風速を既知とすることにより, (1)式を定常のポアソン方程式に変形できる。なお, 竜巻の風速モデルは軸対称であるが, 移動速度等対称性がない場合も想定されるため, 直交座標を用いる。

$$\sum_i \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 P}{\partial x_i^2} = R \quad (2)$$

ここで

$$R = - \sum_i \sum_j \frac{\partial \alpha_{i,j}}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\alpha_{i,j} = U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (4)$$

とする。(i=1, 2, 3 j=1, 2, 3)

ここで, 添え字 i, j の 1, 2 はそれぞれ水平方向成分(x, y に相当), 3 は鉛直成分(z に相当)を示し,

P : 気圧

U_i : i 方向風速

x_i : i 方向座標

ρ : 空気密度 (1.226 kg/m³)

ν : 空気動粘性係数 (1.6 × 10⁻⁵ m²/s)

とする。

2. ポアソン方程式の差分法近似

ポアソン方程式中の微分は, 中心差分で近似した。竜巻の気圧変化は座標に対してなめらかに変化することが予想されることから, 2 次精度の中心差分で十分と判断した。

(4)式の風速の微分は次のように近似し,

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \cong \frac{U_i(\dots, x_j + h, \dots) - U_i(\dots, x_j - h, \dots)}{2h} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \cong \frac{U_i(\dots, x_j + h, \dots) - 2 \cdot U_i(\dots, x_j, \dots) + U_i(\dots, x_j - h, \dots)}{2h} \quad (6)$$

ここで

$k=1, 2, 3$

$l=1, 2, 3$

ただし, $j \neq k \neq l$

h : x, y, z 方向の差分

$\alpha_{i,j}$ の微分は次のように近似し, (3) 式の R を求める。

$$\frac{\partial \alpha_{i,j}}{\partial x_i} \cong \frac{\alpha_{i,j}(\cdots, x_i + h, \cdots) - \alpha_{i,j}(\cdots, x_i - h, \cdots)}{2h} \quad (7)$$

また, 気圧を密度で除した値 $p \equiv P/\rho$ とし, p についても同様に次のとおり近似する。以下, 気圧とは圧力を密度で除した単位であらわすものとする。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} \cong \frac{p(\cdots, x_i + h, \cdots) - 2p(\cdots, x_i, \cdots) + p(\cdots, x_i - h, \cdots)}{h^2} \quad (8)$$

以上を整理し, 座標を x, y, z で表わすとする, (2) 式は次のとおりとなる。

$$\begin{aligned} & \frac{p(x+h, y, z) + p(x-h, y, z) + p(x, y+h, z) + p(x, y-h, z)}{h^2} \\ & + \frac{p(x, y, z+h) + p(x, y, z-h)}{h^2} - \frac{6p(x, y, z)}{h^2} = R(x, y, z) \end{aligned} \quad (9)$$

これを変形し,

$$\begin{aligned} p(x, y, z) = & \frac{p(x+h, y, z) + p(x-h, y, z) + p(x, y+h, z) + p(x, y-h, z)}{6} \\ & + \frac{p(x, y, z+h) + p(x, y, z-h)}{6} - \frac{R(x, y, z) \cdot h^2}{6} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

3. 差分方程式の解法(連立方程式の解法)

上記(10)式の連立方程式を解くため, SOR 法を用いたプログラムを作成した。SOR の加速係数 ω は収束条件である $\omega < 2$ を満たしつつ, 計算速度を向上させるため, 事前にランキンモデルによりサーベイした結果を踏まえ, $\omega = 1.9$ を採用した。

4. TORPEC の解析条件

TORPEC の解析条件を以下に示す。

(1) 解析対象について

地面上の竜巻中心を原点とする。

x - z 面および y - z 面について対称とし, 正の範囲のみ解析する。

x 方向および y 方向に正の方向に竜巻半径 (R_0) の 5 倍, z 方向に対しては 10 倍の範囲を, すなわち, **Fig. 1** に示す $5R_0 \times 5R_0 \times 10R_0$ の直方体を解析対象とする。

領域サイズの大きさは, ランキン渦モデルに基づく竜巻中心から水平方向に竜巻半径の 5 倍離れたところではほぼ気圧変化は認められないこと, 竜巻半径 30 m とするとその 5 倍であれば通常想定される建物の大きさを十分に包絡することから選定した。

(2) 境界条件について

境界条件としては以下のとおり。

(a) x - z 面, y - z 面に対し, 以下の条件を適用する。

$$p(x, -h, z) = p(x, h, z), \quad p(-h, y, z) = p(h, y, z) \quad (11)$$

Fig. 1 Tornado analysis region

- (b) $x = 5R_0, y = 5R_0, z = 0, 10R_0$ 面においては, 圧力値は一義的に定まらないため, Dirichlet 条件は成立しないが, 風速が既知であり, Neumann 条件として以下を与える。

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = - \sum_j \alpha_{i,j}(x_j, x_k, x_l) \quad (12)$$

これが, 境界面座標で成り立つようにする。

ただし, 地面の竜巻中心から一番遠い点 ($x = 5R_0, y = 5R_0, z = 0$) のみ圧力をゼロに固定した。

(3) 竜巻風速分布

竜巻風速分布はランキン渦モデルとフジタモデルを採用した。

フジタモデルの風速分布のモデル式については DBT-77⁷⁾に基づき Eguchi らにより定式化されている⁸⁾ものを用いた。

風速の定式化については, 以下のように各変数を定義する。

R_n : 内部コアの半径

$$R_n = nR_0$$

ここで

R_0 : 竜巻半径(外部コア半径)(最大接線風速となる半径)

$$n = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005R_0)$$

H_i : 流入層高さ

$$H_i = iR_0$$

ここで

$$i = 0.55(1 - n^2)$$

r' : 無次元化半径

$$r' = r/R_0$$

z' : 無次元化高さ

$$z' = z/H_i$$

(a) フジタモデル風速式⁸⁾ V_θ : 周方向(接線方向)風速

$$V_\theta = F_r(r') F_h(z') V_m \quad (13)$$

ここで

 V_m : 最大接線風速

$$F_r(r') = \begin{cases} r' & (r' < 1) \\ 1/r' & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (14)$$

$$F_h(z') = \begin{cases} z'^{k_0} & (z' < 1) \\ \exp(-k(z' - 1)) & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (15)$$

 $k_0 = 1/6$ (推奨値)⁸⁾ $k = 0.03$ (推奨値)⁸⁾ V_r : 半径方向風速

$$V_r = V_\theta \tan \alpha \quad (16)$$

ここで

$$\tan \alpha = \begin{cases} 0 & (r' \leq n) \\ \frac{\tan \alpha_0}{1 - n^2} \left(1 - \frac{n^2}{r'^2} \right) & (n < r' < 1) \\ \tan \alpha_0 & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (17)$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A_m(1 - z'^{1.5}) & (z' < 1) \\ B_m \{1 - \exp(-k(z' - 1))\} & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (18)$$

$$B_m = \frac{3}{(k_0 + 1)(k_0 + 2.5)} k A_m \quad (19)$$

 $A_m = 0.75$ (推奨値)⁸⁾ V_z : 上昇風速(軸方向風速)

$$V_z = \begin{cases} 0 & (r' \leq n) \\ V_m w_0 & (n < r' < 1) \\ 0 & (r' \geq n) \end{cases} \quad (20)$$

ここで

$$w_0 = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{i}{1 - n^2} A_m (16z'^{\frac{7}{6}} - 7z'^{\frac{8}{3}}) & (z' < 1) \\ \frac{i B_m \exp(-k(z' - 1))}{k(1 - n^2)} \{2 - \exp(-k(z' - 1))\} & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (21)$$

(b) ランキン渦モデル風速式

$$\begin{pmatrix} V_r \\ V_\theta \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ f(r) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

ここで

$$f(r) = \begin{cases} V_m r' & (r' < 1) \\ V_m / r' & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (23)$$

 $r' = r/R_0$

(c) 風速ベクトル

周方向, 半径方向, 軸方向の風速を, x, y, z 3 軸方向の風速ベクトル, U_x, U_y, U_z に変換する。竜巻の移動速度は圧力分布に影響しないので無視すると,

$$\begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_r \cos \theta - V_\theta \sin \theta \\ V_r \sin \theta + V_\theta \cos \theta \\ V_z \end{pmatrix} \quad (24)$$

ここで,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (25)$$

$$\cos \theta = x/r \quad (26)$$

$$\sin \theta = y/r \quad (27)$$

となる。

なお, x - y 平面上の原点では, 0 除算をさけるため, $\cos \theta = 1$ であるものとする。

(d) ランキン渦モデルでの気圧低下評価式

ランキン渦モデルの風速式は円周方向の風速のみの単純な形となっているため, 渦内の流体の遠心力と圧力のつり合いにより気圧低下を定式化することができる。

ここではその結果のみ記載する。

$$p_a(r) = \begin{cases} \frac{V_m^2}{2} \left(2 - \frac{r^2}{R_0^2} \right) & 0 \leq r < R_0 \\ \frac{V_m^2}{2} \frac{R_0^2}{r^2} & R_0 \leq r \end{cases} \quad (28)$$

ここで

 r : 竜巻中心からの距離 p_a : 気圧低下(圧力を密度で除したもの)

III. TORPEC による評価

TORPEC を用いて, 解析コードの特性を評価し, 妥当性を確認したうえ, フジタモデルの特性調査を実施した。

すべての解析ケースについて **Table 1** に示す。風速については竜巻のフジタスケールに対応させたものとしている。竜巻の最大接線風速は過去の竜巻の観察結果に基づき, 最大風速に 0.85 を乗じたもの¹⁾としている。

1. メッシュ分割数依存性の確認

TORPEC において x 軸, y 軸のメッシュ分割数をパラメータとした評価結果を示す。解析ケースを Table 1 に示

Table 1 Analysis cases of TORPEC

Case	Mesh number along lateral axes	Max. tangential wind speed (Vm) ^{a)}	Tornado radius (Ro)
Case 1	20	85 m/s	30 m
Case 2	30	"	"
Case 3	40	"	"
Case 4	50	"	"
Case 5	75	"	"
Case 6	100	"	"
Case 7	125	"	"
Case 8	150	"	"
Case 9	200	"	"
Case 10	50	27 m/s (F0)	"
Case 11	"	42 m/s (F1)	"
Case 12	"	59 m/s (F2)	"
Case 13	"	68 m/s (F2-F3)	"
Case 14	"	78 m/s (F3)	"
Case 15	50	85 m/s (over F3)	20
Case 16	"	"	40

^{a)} Numbers with "F" mean Fujita scale.

す (Case1~9)。

この結果を地上面における竜巻中心位置の気圧低下量と、平面で x 軸と y 軸の両端の気圧の差を誤差とみなし、その値のメッシュ分割数依存性を **Fig. 2** に示す。

メッシュ分割数を 200 とした場合でもやや変化する傾向にあるが、その変化は小さくなりつつありほぼ収束していることがわかる。また、メッシュ分割数が 50 であれば、その変化の絶対値は中心気圧低下量に比べて十分小さいこと、気圧低下量の絶対値はむしろ小さい値に収束しつつあることから、メッシュ分割数が 50 程度で気圧低下量をやや保守的に評価することとなり実用上問題ないことがわかる。

2. 有限要素法解析結果との比較

TORPEC の解析結果 (メッシュ分割数 50) を有限要素法で求めた Eguchi らの先行解析結果⁸⁾ と比較して示す。竜巻評価条件は最大接線風速 (V_m) が 85 m/s、竜巻外部コア半径 (R_o) が 30 m である。メッシュ分割数、竜巻対象範囲、境界条件は Eguchi らの解析でも今回の解析と同じである。

Figure 3 に地面上の y 座標上の気圧低下、**Fig. 4** に y - z 断面の z 方向の気圧低下を示す。それぞれの図で左側に示すものが先行する解析結果、右側が TORPEC の結果であるが、ここから TORPEC の結果は先行解析結果とよく一致していることがわかる。

ただし、フジモデルでは地表面近傍の速度分布が急変

Fig. 2 Analysis results as a function of mesh number

Fig. 3 Pressure distribution on ground plane

Fig. 4 Pressure distribution on lateral-vertical plane

Fig. 5 Comparison of pressure analysis result between Rankine and Fujita model on the lateral plane 12m above the ground

することから、解析手法の差により先行解析結果とわずかに差が生じたものと考えられる。

3. フジタモデル特性評価

フジタモデルによる竜巻による気圧低下の風速依存性、軸方向分布、竜巻半径の影響評価結果について評価した。比較のためのランキン渦モデルでの竜巻中心位置での気圧低下量は(28)式により評価した。解析ケースを Table 1 に示す (Case4 と Case10～16)。

地上から 12 m 上空における竜巻中心の気圧低下の風速依存性を Fig. 5 に示す。ここで地上から 12 m を選定したのは、建築物の高さを念頭に置いたものである。

いずれの風速においてもフジタモデルでの気圧低下評価結果はランキン渦モデルでの気圧低下評価結果に対し一定

の比率で小さくなっていることがわかる。これは、ランキン渦モデルの風速に対するフジタモデルの風速が一定の比率となっているためである。

次に気圧低下の軸方向分布について Fig. 6 に示す。ここには竜巻半径が異なる場合の解析結果もあわせて示す。

いずれの竜巻半径においてもフジタモデルでは地上から離れるにしたがって気圧低下量が増加し、再び減少する傾向にあることがわかる。これは、フジタモデルの周方向風速が地表面から流入層高さに至るまでは増加し、それ以上の高さでは少しずつ低減していくことによる影響である。

また、竜巻半径が大きくなるにつれ、軸方向の分布変化が小さくなる傾向があり、地表面においては竜巻半径が大きいほうが地表面における気圧低下が大きい傾向にあるが、地上面から約 12 m の高さでいずれの竜巻半径も同等

Fig. 6 Pressure difference axial distribution

の値となり、最大値はむしろ竜巻半径が小さいほうが大きい結果となっている。竜巻の風速が同じであれば竜巻半径が小さくなる分、竜巻中の気体に作用する慣性力は大きくなる傾向にあるため、気圧は低下する傾向となるはずであり、この予想どおりの結果が解析でも確認されている。

IV. 結 論

本研究では、竜巻の気圧評価に特化した設計ツールとして差分法を利用した比較的簡易な評価手法：TORPECを開発した。これまではフジタモデルを用いた気圧評価に有限要素法を用いる必要があったが、このTORPECにより多様な竜巻条件の下で施設への影響や各種の対策効果の評価に対し竜巻気圧評価を容易に入手できる環境のもと実施できるようになった。本研究ではTORPECをMatlab®上で作動させたが、Microsoft® EXCEL-VBAなど様々な計算機環境に適応することができる。

また、本研究でフジタモデルを用いた竜巻気圧の風速依存性や軸方向依存性、竜巻半径の影響について議論した。その結果、フジタモデルによる気圧低下評価は風速によらずランキン渦モデルによるものよりも一定の割合で小さく評価されることがわかった。また、フジタモデルによる気圧低下は地上から上空に向かう軸方向分布があり、地上から離れるにしたがって気圧低下量が増加し、再び減少する傾向にあることがわかった。また、この傾向は竜巻半径によっても変化することがわかった。

今後は、先行するEguchiらの研究による有限要素法と同じ竜巻条件での解析結果と、このTORPECによる解析結果が同等の結果となったことを踏まえ、TORPECにより竜巻条件(風速、軸方向高さ、竜巻半径)を与えることでフジタモデルによる竜巻の気圧低下をより容易に評価することができる。また、ランキン渦モデルに対しフジタモデ

ルの気圧低下が一定の比率となることが分かったことから、あらかじめ、この比率を評価し、ランキン渦モデルにこの比率を乗じたもので評価するといった応用ができる。

(一財)電力中央研究所 原子力リスク研究センター 江口 譲 氏から境界条件の取り扱い方について貴重なご意見を頂いたのでここに謝意を表する。

— 参考文献 —

- 1) *Assessment Guide for Tornado Effect on Nuclear Power Plants*, Nuclear Regulation Authority (2013), [in Japanese].
- 2) T. Tsutsumi, A. Takahashi, S. Minami, Y. Uematsu, "Damage to buildings induced by a tornado in Saroma town, Hokkaido, on November 7, 2006-Damage characteristics of buildings in snowy cold regions based on field survey-", *J. Wind Eng., JAWE* **34**, No.3 (No.120) (2009), [in Japanese].
- 3) *Report on Field Surveys and Subsequent Investigations of Building Damage Following the May 6, 2012 Tornado in Tsukuba City, Ibaraki Prefecture, Japan*, ISSN1346-7328&ISSN0286-4630, National Institute for Land and Infrastructure Management Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan, Building Research Institute, Incorporated Administrative Institution, Japan (2013), [in Japanese].
- 4) H. Inoue, S. Fukunishi, T. Suzuki, *Assessment Guide for Tornado Effect on Nuclear Power Plants (Draft) with its Commentaries*, JNES-RE-2013-9009, Japan Nuclear Energy Safety Organization (2013), [in Japanese].
- 5) *Study on Tornado Effect on Nuclear Power Plants Report for the Study Entrusted by Japan Nuclear Energy Safety Organization*, Tokyo Polytechnic University (2011), [in Japanese].
- 6) H. Kikitsu, Y. Okuda, H. Kawai, J. Kanda, "Experimental study on characteristics of tornado-induced wind force on a low-rise building," *22nd Symp. Jpn. Assoc. for Wind Eng.* (2012), [in Japanese].
- 7) T. T. Fujita, *Workbook of Tornadoes and High Winds for Engineering Applications*, Department of the Geophysical Sciences U., Chicago (1978).
- 8) Y. Eguchi, S. Sugimoto, Y. Hattori, H. Hirakuchi, "Development of TONBOS for simulation of liftoff and flight of objects driven by a tornado," *Civil Eng. Res. Lab. Rep.*, No. N14002, Central Research Institute of Electric Power Industry (2014), [in Japanese].
- 9) S. Narabayashi, K. Sugiyama, K. Morishita et al., *Guidelines about the Setting on Design Tornado Wind Velocity and Missile Speed for Tornado Impact Evaluation on Light Water Type Nuclear Power Plant*, JSM-NRE-009, Japan Society of Maintenology (2015), [in Japanese].
- 10) Y. Eguchi, S. Sugimoto, Y. Hattori, H. Hirakuchi, "A rational method to evaluate tornado-borne missile speed in nuclear power plants (Validation of a numerical code based on Fujita's tornado model)," *Trans. JSME*, **81**, No.823 (2015), [in Japanese].
- 11) Y. Eguchi, Y. Hattori, "Development of computer codes for

an unsteady turbulent flow with complex geometry. Part1:
Development of SMART-FEM code based on finite ele-
ment method for large-eddy simulation," *Abiko Res. Lab.*

Rep., No. U02042, Central Research Institute of Electric
Power Industry (2003), [in Japanese].