計算科学技術部会セッション「外部ハザード評価のための数値解析」

（3）竜巻飛来物バザード評価におけるシミュレーション利用の現状

(3) Current Status on Numerical Simulation Methods to Evaluate Tornado Missile Hazard

*江口 譲[1]

[1]電中研

竜巻によって発生する飛来物の設計速度は，米国では米国原子力規制委員会 NRC の NUREG1.76[1]において，また日本では“原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（以下，「評価ガイド」）”[2]において例示されている。この他，評価ガイド[2]に準じた方法として，表 1 に示す評価手法が PWR 電力会社や電中研で利用・開発されており，数値シミュレーションが各評価法でどのように利用されているかについて概説する。

米国で NRC の NUREG1.76[1]では，まず，竜巻の風速場をランキン渦でモデル化する。ただし，飛来物解析に用いるランキン渦モデルは，周方向成分 V_θのみが存在する通常のランキン渦モデルとは異なり，式(1)に示すような上昇風速 V_z と径方向風速 V_r を付け加えたモデルである[2]。なお，式(1)で V_m は最大周方向風速，R_m は竜巻半径を表す。この竜巻風速に竜巻の x 方向移動速度 V_{tr} を加えると，位置(x, y, z) ，時刻 $t=T$ における風速ベクトル$(V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$は式(2)で表される。

$$\begin{pmatrix} V_r \\ V_\theta \\ V_Z \end{pmatrix} = \min\left(\frac{r}{R_m}, \frac{R_m}{r}\right) \times \frac{V_m}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 4/3 \end{pmatrix} \quad (1) \qquad \begin{pmatrix} V_{w,x} \\ V_{w,y} \\ V_{w,z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_r \cos\theta - V_\theta \sin\theta \\ V_r \sin\theta + V_\theta \cos\theta \\ V_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{tr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし，$r=\{(x-V_{tr}T)^2+y^2\}^{1/2}$ であり，θは竜巻中心$(V_{tr}T,0)$から位置(x, y) の線分が x 軸となす角度である。

NUREG1.76[1]では，物体運動に関しては，方向性を持たない平均抗力と重力が飛来物に作用すると仮定して，以下の方程式で飛来物の運動を計算している[3]。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\sqrt{(V_{w,x}-V_{M,x})^2+(V_{w,y}-V_{M,y})^2+(V_{w,z}-V_{M,z})^2}\,(V_{w,x}-V_{M,x}) \quad (3a)$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\sqrt{(V_{w,x}-V_{M,x})^2+(V_{w,y}-V_{M,y})^2+(V_{w,z}-V_{M,z})^2}\,(V_{w,y}-V_{M,y}) \quad (3b)$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\sqrt{(V_{w,x}-V_{M,x})^2+(V_{w,y}-V_{M,y})^2+(V_{w,z}-V_{M,z})^2}\,(V_{w,z}-V_{M,z}) - g \quad (3c)$$

ただし，$(V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ は飛来物の速度ベクトル，C_DA/m は飛行定数(定義は文献[3],p.16 の式(25)を参照)，g は重力加速度を表す。初期条件として物体は高度 40m の特定位置$(R_m,0,40)$ [m]に静止し，この物体が地面に落下するまでに達した最大水平速度を設計飛来物速度 V_h と定義している。

一方，評価ガイド[2]では，LES（Large-eddy simulation）で作成された竜巻風速場の中に，高さ 40m の広範な位置から多数の物体を落下させて，式(3a)-(3c)に基づき飛来物の運動を計算している[4][5]。これらの運動物体が落下するまでに達した各物体の最大水平速度の中の最大値を設計飛来物速度 V_h と定義している。

以上より，日米のガイドの評価法では，竜巻の風速場と飛来物の初期条件が異なっていることが分かる（表 1)。その結果，両ガイドの掲載値を飛行定数の関数としてプロットすると図 1 のようになり，米国のガイドの竜巻条件（半径 45.7m, 最大風速 103m/s）が日本のガイドの竜巻条件（半径 30m,最大風速 100m/s）よりも厳しいにもかかわらず，日本の設計飛来物速度が逆に大きい値となっている。この原因の一つとして数値シミュレーションの観点から指摘すべき点としては，日本の評価ガイド[2]の風速場は時間・空間平均風速が 100m/s になるようにスケーリングされている点である[5]。つまり，竜巻の最大風速は藤田スケー

ルに応じた特定の平均時間のガスト風速で定義すべきであり，長時間平均・空間平均のアンサンブル風速とは異なる点である。具体的には，評価ガイド[2]の LES 風速場を藤田スケール F4（最大風速 100m/s）の平均時間（4 秒）に Durst 曲線（図 2）で換算すると，評価ガイド[2]の LES 風速場は 1.5x84+16=142m/s 程度の最大風速の竜巻に相当することになる。このような過度に保守的な竜巻条件を用いていることが，評価ガイド[2]の設計飛来物速度が米国の値[1]よりも大きくなっている原因の一つである。

電中研では，実際の竜巻風速場に近いフジタモデル[6]を利用し，地上面を含めた任意の高度に物体を初期配置して，流体抗力・重力および地面効果による揚力を考慮して物体の運動を計算する手法（ソフトウエア名：TONBOS）を開発した[7]。この手法は，実際の物体設置高度を反映することができ，自動車などの評価値が米国 NRC ガイドの掲載値とも整合しており，より合理的な評価手法であると考えられる。

表１　各機関で開発・利用されている竜巻飛来物評価法

機関名	仮定する風速場	物体初期高度 z	物体初期位置(x, y)	飛来物の運動モデル
米国 NRC[1]	ランキン渦モデル 式(1), (2)	地面から 40m (z=40m)	$(R_m,0)$の位置	式(3a)-(3c) ・３自由度並進運動方程式を基礎式とする ・平均抗力と重力を外力とする ・地面効果による揚力を考慮（電中研モデル[7]のみ）
国内 PWR 電力会社			最大水平速度が発生する位置 (x_{max}, y_{max})	
原子力規制委員会[2]，[4]，[5]	非定常乱流渦(LES)			
電中研[7]	フジタモデル[6]	実際の物体の設置高度		

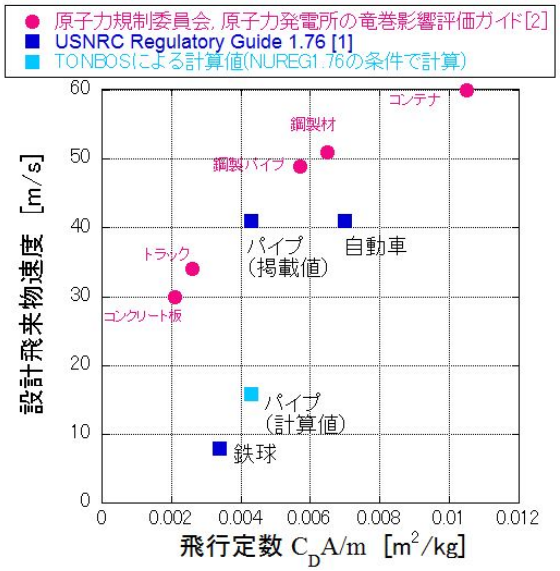


図１　日米ガイドの設計飛来物速度の掲載値

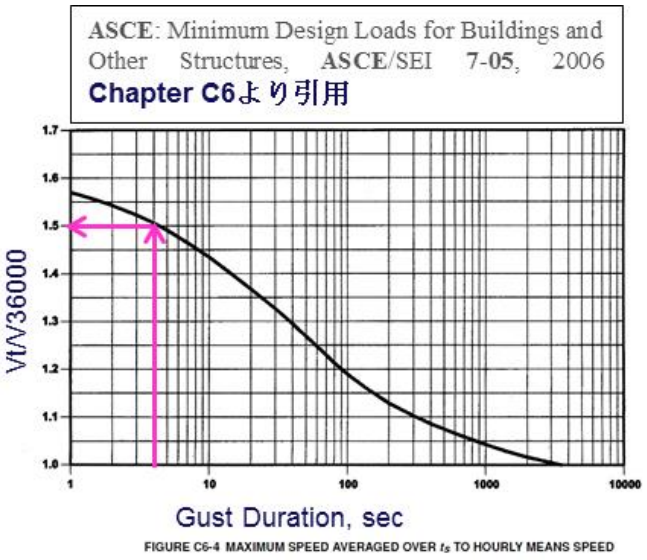


図２　１時間平均風速に対する風速増倍率(Durst 曲線)

参考文献

[1] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Regulatory Guide 1.76, Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.

[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，原規技発第 13061911 号, 2013 (改正：原規技発第 1409172 号, 2014).

[3] Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile, NBSIR 76-1050, 1976.

[4] 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.

[5] Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99(4)，pp.249-256，2011.

[6] Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978.

[7] 江口譲，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.

---

*Yuzuru Eguchi[1]

[1]CRIEPI