

# 風力発電設備の風荷重評価に関する数値的及び理論的研究

## その2 風向を考慮した風荷重評価式の提案

### Numerical and theoretical study of the evaluation of wind load on wind turbine: Part 2 Evaluation of wind load considering wind direction

○ ファバンフック<sup>1)</sup> 石原 孟<sup>2)</sup> 藤野 陽三<sup>3)</sup>  
Pham Van PHUC<sup>1)</sup> Takeshi ISHIHARA<sup>2)</sup> Yoza FUJINO<sup>3)</sup>

#### 1. はじめに

台風時には電柱の倒壊や電線の断線などにより、しばしば停電が発生する。この場合には風車のヨー制御が不能となり、風荷重はヨー制御が可能な場合に比べ大きくなるケースがある。しかし、現状では風向を考慮した風荷重の評価式が提案されておらず、台風時の風車の風荷重が過小に評価される恐れがある。また風車のタワーと基礎の耐風設計を行う際には、風荷重の評価法として等価静的法が採用され、ガスト影響係数は建築基準法<sup>1)</sup>に従い、風車の固有振動数と減衰に依存せず、一定値とするケースが多く、風車の構造特性により風荷重は過小または過大に評価される可能性がある。風車は通常の塔状構造物と異なり、風向によって大きな揚力がブレードに作用するため、風方向と共に、風直角方向のガスト応答が重要であり、風方向と風直角の風荷重の組合せによる最大風応答の評価が必要である。

本研究その2では、風車のブレードとタワーを対象に、固有振動数と構造減衰を考慮した風荷重の評価式を提案した。更に風車ブレードとタワーとの構造特性の違いに着目し、組合せ荷重の評価式の提案により、風向を考慮した最大風荷重の評価を可能にした。本研究で提案された評価式はその1に示した多質点風応答プログラム<sup>2)</sup>の解析結果と比較し、その妥当性を検証した。

#### 2. 風荷重評価の考え方

風向に対して、風方向と風直角方向の最大風荷重は平均風荷重とガスト影響係数により表すことができる。風車のブレードについてはフラップ方向の1次モードが支配的であり、また風車タワーについては図1に示すようにタワー部分について1次モードを考慮し、ローターが剛であると仮定する。また風速の空間相関の計算に当たり、平均風速と乱れ強さについては、ブレードの場合にはブレード長さ2/3の位置での値、風車タワーの場合にはハブ高さの値で代表される。

風荷重の評価式の提案にあたり、以下の点について

工夫した<sup>3)</sup>。まず平均風荷重については、風方向の変動風速成分  $u$  の標準偏差を考慮し、乱れ強さ  $I_u$  に依存する形の平均風荷重の評価式を導出した。そして、風直角方向のガスト応答については揚力勾配を考慮することにより、空気力負減衰を評価した。更にブレードとタワーの振動特性の違いを考慮し、風車ブレードとタワー別の風荷重の組合せ式を提案した。

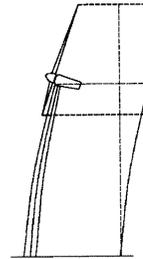


図1 風車タワーの振動モードのモデル化

#### 3. 風荷重評価式の提案

風車に作用する最大風荷重は平均風荷重とガスト影響係数の積により次のように求めることができる。

$$M_f = \overline{M_f} \times G_f \quad (1)$$

$$\overline{M_f} = \oint \frac{1}{2} \rho U^2(r) K_u C_f(r, \theta) c(r) r dr \quad (2)$$

$$K_u(r) = 1 + I_u^2(r) \quad (3)$$

ここで、 $f$  は風荷重の方向、 $f=D$  の場合には風方向、 $f=L$  の場合には風直角方向を表す。 $\overline{M_f}$  は平均風荷重、 $G_f$  はガスト影響係数、 $\oint$  は積分の記号、 $\rho$  は空気密度、 $U(r)$  は位置  $r$  の風速、 $I_u(r)$  は乱れ強さ、 $C_f$  は空気力係数、 $\theta$  は風向、 $c(r)$  はブレードの場合には翼幅、タワーの場合には直径、ナセルの場合には代表幅である。(3)式から分かるように、本研究で提案されている平均風荷重は乱れ強さ  $I_u$  の関数となっていることが分かる。

1) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 大学院生  
Graduate Student Dept. of Civil Eng., Univ. of Tokyo

2) 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 助教授  
Assoc. Prof. Institute of Eng. Innovation, Univ. of Tokyo

3) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 教授  
Professor Dept. of Civil Eng., Univ. of Tokyo

3.1 ガスト影響係数の評価 上記の仮定に基づき、まずガスト影響係数を評価する式を以下のように提案した。

$$G_f(\theta) = 1 + g_f \left( \sigma_{M_f} / \overline{M_f} \right) \quad (4)$$

$$g_f = \sqrt{2 \ln(600\nu_f)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(600\nu_f)}} \quad (5)$$

$$\nu_f = \nu_f(n, \sigma_{M1f}(n, \xi), \sigma_{MBf}) \quad (6)$$

$$\sigma_{M_f} = \sqrt{\sigma_{M1f}^2(n, \xi) + \sigma_{MBf}^2} \quad (7)$$

ここで、 $g_f$  はピークファクター、 $\overline{M_f}$  は平均風荷重、 $\sigma_{M_f}$  は風荷重の標準偏差、 $\nu_f$  はレベルクロスング数、 $\sigma_{M1f}$ 、 $\sigma_{MBf}$  は風荷重の共振成分と非共振成分である。(6)と(7)式からは、本研究で提案したガスト影響係数の評価式は風車の固有振動数と構造減衰に依存していることが分かる。

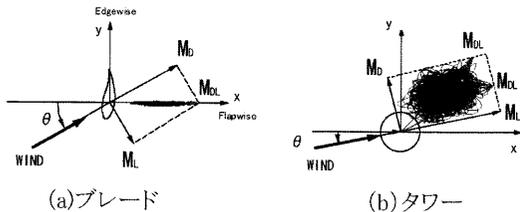


図2 転倒モーメントのリサージュと風荷重の組合せ

3.2 組合せ風荷重の評価式 まずブレードについて考える。ブレードは異方性を持っているため、どの方向に変動風が作用されても、図 2(a)に示すようにフラップ方向の振動が支配的である。従って、最大風荷重は風方向と風直角方向の最大値の平方根で次式により表すことができる。

$$M_{DL} = \sqrt{M_D^2 + M_L^2} \quad (8)$$

ここで、 $M_D$ 、 $M_L$  は風方向、風直角方向のブレード転倒モーメントの最大値を表す。

次に風車のタワーについて考える。風車のタワーは異方性がないため、図 2(b)に示すように連成振動が発生する。従って、最大風荷重は風方向と風直角方向の風荷重の最大値、平均値と標準偏差の組合せから次式により評価することができる。

$$M_{DL} = \max \left( \sqrt{M_L^2 + (\overline{M_D} + \sigma_D)^2}, \sqrt{M_D^2 + (\overline{M_L} + \sigma_L)^2} \right) \quad (9)$$

ここで、 $M_D$ 、 $M_L$  は風方向、風直角方向のタワー転倒モーメントの最大値、 $\overline{M_D}$ 、 $\overline{M_L}$  は転倒モーメントの平均値、 $\sigma_D$ 、 $\sigma_L$  は転倒モーメントの標準偏差である。

#### 4. 風応答解析結果との比較

本提案式の有効性を調べるために、400kW のストール制御風車を対象に風応答解析を行い、その結果と比較した。解析は本論文その1に示した解析モデルと解析コードを使用した。計算条件としては、風速は一樣、乱れ強さは  $I_u = 0.125$ 、 $I_v = I_w = 0.8I_u$  とした。またブレードの捻れを無視した。

図3と図4にはそれぞれブレードと風車タワーの提案式による予測値、風応答の解析結果及び建築基準法による予測結果を示す。本提案式による結果は風応答解析の結果とよく一致し、一方、建築基準法による予測結果は風向によって風荷重を過小評価していることが分かる。

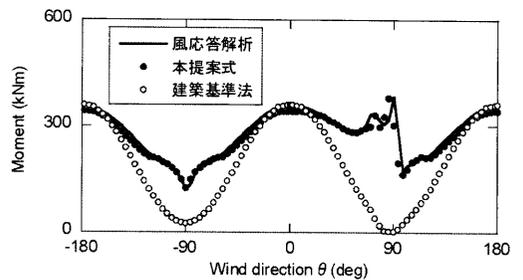


図3 ブレードの転倒モーメントの風向による変化

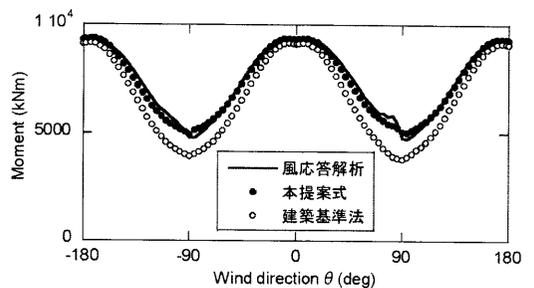


図4 タワーの転倒モーメントの風向による変化

#### 5. まとめ

本論文では乱れ強さを考慮した平均風荷重の評価式やブレードとタワーとの振動特性を考慮したガスト影響係数の評価式を提案し、風向を考慮した風荷重の評価を可能にしたと共に、風応答解析結果との比較により提案式の有効性と予測精度を検証した。

#### 参考文献

- 1) 建築基準法施行令、第 87 条、2000.
- 2) 石原孟、フアンブク、他：風力発電設備の風荷重評価に関する数値的及び理論的研究、その1 実風車における現地観測と風応答解析、風工学会誌、2005.
- 3) P.V. PHUC: 強風時の風車の風応答に関する数値的及び理論的研究、東京大学修士論文、2004.