

風力発電設備の風応答評価式の提案

Wind response evaluation formulas for wind turbines

ファバンフック¹⁾ 石原 孟²⁾ ルンヴァンビン³⁾ 藤野陽三⁴⁾
 Pham Van PHUC¹⁾, Takeshi ISHIHARA²⁾, Luong Van BINH³⁾, Yozo FUJINO⁴⁾

ABSTRACT

Equivalent static wind load evaluation formulas considering the dynamic effects based on gust loading factors and the reduction coefficients were proposed to estimate the design wind load on the wind turbine in complex terrain. The second order moment of along wind fluctuation was considered to estimate the mean and standard deviation of wind loads. A gust loading factor based on a non-Gaussian assumption is derived to estimate the nonlinearity of wind loads, especially in the high turbulence intensity and is simplified by using the skewness of wind load in consideration with the resonance and background responses. The predicted wind responses by proposed methods showed favorable agreements with those by a full dynamic simulation. Finally, simplified formulas for gust loading factors were proposed to estimate the maximum wind load in various terrains.

Key Words: Wind Turbine, Wind load, Gust loading factor, Peak factor, Skewness of wind load

1. はじめに

風力発電設備の設計、製造においては国際規準^{1),2)}に従うことが多い。これらの規準は欧州の自然環境に合わせて作られ、乱れ強度の小さい平坦地形しか考慮していない³⁾。一方、日本では乱れの大きい山岳地帯に風車を建設することが多く、これらの地域の風況条件を考慮した耐風設計法の確立が急務である。現状では風車を支持するタワーは工作物とされ、その耐風設計は建築基準法⁴⁾に従い行われている。建築基準法では、建築物の振動効果及び変動風力の空間相関による規模効果を考慮したガスト影響係数を地表面粗度及び地表面高さの関数として評価しているが、対象とした建築物はアスペクト比が1~4、構造減衰が2%であるため、アスペクト比が10~20、構造減衰が0.5%~0.8%である風車とは大きく異なる。

建築物、長大橋梁、送電線等^{5,6,7)}の耐風設計ではそれぞれの構造物の動的効果を考慮した風荷重の評価式が提案されている。風車についても、同様な考え方に基づく評価式が提案され、文献8~10に示されている。風車に作用する最大風荷重は風荷重の平均値、標準偏差及びピークファクターにより求められる。変動風荷重が正規確率過程に従うと仮定すれば、ピークファクターはDavenport¹¹⁾により提案された評価式により表すことができる。しかし、乱れの大きい場合には変動風荷重の非線形成分を無視できず、ピークファクターが過小に評価される恐れがあるとKareem et al.¹²⁾や石川⁷⁾により指摘されている。日本では乱れの大きい山岳地帯に風車が設置されるケースが多く、変動風荷重の非線形成分を考慮したピークファクターの評価式の提案が望まれる。非正規確率過程を仮定したピークファクターのKareem et al.¹²⁾や石川⁷⁾の評価式は浮体構造と送電架渉線を対象としたもので、変動風荷重における共振成分を無視できる場合にのみ有効であり、共振成分の大きい風車の場合に適用できない。

風車は通常の構造物と異なり、風車のヨー角（ナセル方向）によって大きな揚力がブレードに作用するため、風方向の風荷重のみならず、風直角方向の風荷重も重要である。任意ヨー角における最大風荷重を評価するために、

^{1),3)} 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 大学院生 (〒113 - 8656 文京区本郷)
²⁾ 東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構 助教授 (〒113 - 8656 文京区弥生)
⁴⁾ 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 (〒113 - 8656 文京区本郷)

風方向と風直角の風荷重の組合せによる最大風荷重の評価が必要となる。

本研究では、風車タワーを対象に乱れの大きい山岳地帯にも適用できるピークファクターの評価式を導出し、風車の固有振動数と構造減衰を考慮した風荷重の算定式を提案する。更に風車タワーの振動特性に着目し、風荷重の組合せの評価式を提案することにより、任意ヨー角における最大風荷重の評価を可能にする。最後に本研究で提案された評価式を多質点風応答解析プログラム¹³⁾より検証すると共に、設計者に使いやすい形でガスト影響係数の簡便式を提案する。

2. 風荷重評価の基本的考え方

風による風車タワーの振動にはタワーの1次振動が卓越する。そこで、本研究では、風車タワーの1次振動モードと構造減衰を考慮し、風車タワーの風方向と風直角方向に作用する水平風荷重の評価式をスペクトルモーダル法により導出した。図1には風車タワーの風荷重の算定に用いたモデルを示し、タワー部分について1次振動モードを考慮し、ロータが剛であると仮定した。各ヨー角度における風方向と風直角方向の最大風荷重は、平均風荷重にガスト影響係数を乗じて求め、風荷重の組合せにより最大風荷重を求めた。平均風荷重については、風方向の変動風速成分の分散を考慮することにより、変動風から平均風荷重への寄与を評価した。また、ガスト影響係数は、風車の規模と振動特性の他、ピークファクターに及ぼす変動風荷重の非線形成分の影響も考慮した。なお、変動風荷重の空間相関を求める際には、ハブ高さでの平均風速と乱れ強度を代表値として用いた。風直角方向の風荷重の算定式は風方向の風荷重と同様な方法で導出することができるため、本論文では、風方向の風荷重における評価式の導出のみを示す。

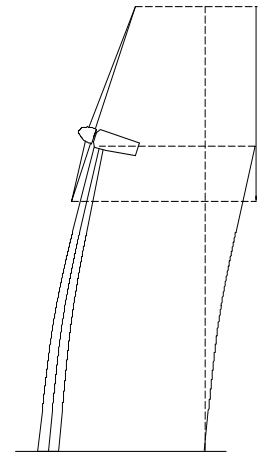


図1 風車タワーの振動モードのモデル化

3. 風荷重評価式の提案

風車の振動速度を考慮した相対風速を評価することにより、風車に作用する風方向の風力は次のように表すことができる。

$$F(z,t) = \frac{1}{2} \rho C_D A [U + u - \dot{x}]^2 = \frac{1}{2} \rho C_D A [U^2 + 2Uu + u^2 - 2U\dot{x}] + \frac{1}{2} \rho C_D A [2u\dot{x} - \dot{x}^2] \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 C_D は抗力係数、 U は高さ z における平均風速、 u は高さ z における変動風速、 \dot{x} は風車の振動速度を表す。式(1)の右辺の第2項は、2次微小量として無視できると考え、平均風力 $\bar{p}(z)$ と変動風力 $p(z,t)$ は、それぞれ式(2)と(3)により表すことができる。なお、風力の評価式には変動風速の2乗項 u^2 を残すことにより、平均風力には乱れ強度 I_u の効果を考慮することができる。

$$\bar{p}(z) = \overline{F(z,t)} = \frac{1}{2} \rho C_D A U^2 (1 + I_u^2) \quad (2)$$

$$p(z,t) = F(z,t) - \overline{F(z,t)} \approx \frac{1}{2} \rho C_D A (2Uu + u^2 - I_u^2) - \rho C_D A U\dot{x} = p_1(z,t) - \rho C_D A U\dot{x} \quad (3)$$

また文献9に従い、曲げモーメントの共振成分と非共振成分の標準偏差は、次式により表すことができる。

$$\sigma_{M1}(f_1, \xi) = \bar{M} I_u \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\xi}} \sqrt{R_u(f_1, \mu_1)} \sqrt{K_{MRu}(f_1, \mu_1)} \phi_1(\mu_1) \quad (4)$$

$$\sigma_{MB} = 2\bar{M} I_u \sqrt{K_{MBu} + K'_{MBu}} \quad (5)$$

ここで、 \bar{M} は平均曲げモーメント、 I_u は乱れ強度、 $R_u(f_1, \mu_1)$ は乱流のパワースペクトル密度関数、 f_1 と μ_1 は風車タワ

一の1次固有振動数と1次振動モード形， ϕ_1 は1次振動モードの補正係数， $K_{MRu}(f_1, \mu_1), K_{MBu}$ はそれぞれ共振成分と非共振成分における風力の空間相関を考慮する低減係数である．ただし，文献9と異なり，変動風力には変動風速の2乗項を考慮することにより，非共振成分の標準偏差には K'_{MBu} という低減係数が含まれている．

以上の関係式から，風車に作用する最大風荷重は次のように求めることができる．

$$M_D = \overline{M_D} \times G_D = \overline{M_D} + g_D \sigma_{MD} \quad (6)$$

ここで， G_D はガスト影響係数， σ_{MD} は風車タワー基部における曲げモーメントの共振成分と非共振成分の標準偏差により次式により表すことができる．

$$\sigma_{MD} = \sqrt{\sigma_{M1}^2(f_1, \xi) + \sigma_{MB}^2} \quad (7)$$

また風車タワー基部における曲げモーメントの平均値は次式により求められる．

$$\overline{M_D}(h) = [\overline{F_r} + \overline{F_n}] \times (H_h - h) + \int_h^{H_t} \overline{q_t}(z)(z-h) dz \quad (8)$$

$$\overline{F_r} = \int 0.5 \rho U^2(r) K_u(r) C_b c(r) dr \quad (\text{ロータに作用する平均風力}) \quad (9)$$

$$\overline{F_n}(\phi) = 0.5 \rho U_h^2 K_u(H_h) C_n A_n \quad (\text{ナセルに作用する平均風力}) \quad (10)$$

$$\overline{q_t}(z) = 0.5 \rho U^2(z) K_u(z) C_t d(z) \quad (\text{タワーに作用する平均風力の分布}) \quad (11)$$

$$K_u(r) = 1 + I_u^2(r) \quad (12)$$

ここで， C_b, C_n, C_t はそれぞれのブレード，ナセル，タワーの抗力係数， $c(r)$ はブレードの翼幅， $d(z)$ はタワーの直径， A_n はナセルの代表面積， H_t はタワー高さ， $K_u(r)$ は乱れ強さ I_u の関数である．また， g_D はピークファクターであり，3.1節で詳しく説明する．

3.1 ピークファクターの評価式

ピークファクターの予測精度を向上させるために，非正規確率過程を仮定したピークファクターはKareem et al.¹²⁾，石川⁷⁾により提案されている．Kareemらは，ピークの数が無限大の場合の漸近式を用い，最大ピーク値の累積確率分布関数を2重指数分布と仮定し，その期待値としてピークファクターを定めた．しかし，実際はピーク数が有限であり，大きな誤差が生じる恐れがある．石川⁷⁾は西島¹⁴⁾の考え方に従い，評価時間 T における非正規確率過程が平均的に1回超えるようなしきい値をピークファクターとし，数値解析結果と比較することにより，その有効性を示した．このピークファクターの評価式を次式により表す．

$$g = \kappa \left\{ \sqrt{2 \ln v'_y T} + h_3 (2 \ln v'_y T - 1) + h_4 \left[(2 \ln v'_y T)^{3/2} - 3 \sqrt{2 \ln v'_y T} \right] \right\} \quad (13)$$

$$h_3 = \alpha_3 \sqrt{4 + 2 \sqrt{1 + \frac{3(\alpha_4 - 3)}{2}}} , \quad h_4 = \left(\sqrt{1 + \frac{3(\alpha_4 - 3)}{2}} - 1 \right) / 18 \quad (14)$$

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{1 + 2h_3^2 + 6h_4^2}} ; \quad v'_y = \frac{1}{\kappa \sqrt{1 + 4h_3^2 + 18h_4^2}} v_y \quad (15)$$

ここで， α_3, α_4 はそれぞれ風荷重の歪度および尖度， v_y は非正規確率過程 y の評価時間 T におけるゼロクロッシング数である．石川⁷⁾は送電線に作用する風荷重の共振成分を無視できると仮定し，歪度は次のように求めた．ここで $K_{SMB}, K'_{SMB}, a_{r1}, a_{r2}$ は空間相関係数である．

$$\alpha_3 = \frac{3I_u a_{r1} + I_u^3 a_{r2}}{(K_{SMB} + K'_{SMB})^{3/2}} \quad (16)$$

本研究では風車を対象とした風応答解析により尖度 α_4 がピークファクターへの寄与率が低いことから，正規確率過程における尖度の理論値を用い， α_4 を3と仮定し，ピークファクターの評価式を式(17)のように簡略化した．また，風荷重の共振成分を考慮するために，歪度を風荷重の標準偏差における共振成分と非共振成分の比 R_D の関数 $f(R_D)$ として仮定した．また， I_u^3 は I_u に， K'_{SMB} は K_{SMB} に比べて十分に小さいことを考え，歪度 α_3 の評価式は式(18)のように表した．また $f(R_D)$ は文献15に示すように同定した．

$$g = \kappa \left\{ \sqrt{2 \ln v'_y T} + h_3 (2 \ln v'_y T - 1) \right\} \quad (17)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{1.3 R_D^2 + 1} \frac{3 I_u a_{r1}}{(K_{SMB})^{3/2}} \quad (18)$$

3.2 1次固有振動数と1次振動モード形の算定式

風車タワーに作用する変動風荷重を算定する際には、タワーの1次固有振動数と1次振動モード形を用いる必要がある。文献13に示すように、タワー頂部にロータとナセルを集中質量として簡略化されるタワーモデルを用い、レイリーの方法¹⁶⁾とたわみ曲線法により固有値解析を算定することが多いが、誤差が生じる。本研究ではタワーの1次固有振動数に関しては、ブレードとタワーの連成効果を考慮し、レイリーの方法により求めた値を修正した。具体的には、定格出力400kW~2000kWの7機の風車を対象とし、3次元モデルを用いて固有値解析により風車タワーの1次固有振動数を求め、修正レイリー式(19)を提案した。図2には修正レイリー式と3次元モデルを用いた固有値解析により求めた風車タワーの1次固有振動数の比を示す。修正レイリー式により求めた値は、固有値解析の結果とよく一致することが分かる。図3には400kWストール制御風車の1次振動モード形の解析例を示す。たわみ曲線法から求めた式(21)により算出したタワーの1次振動モード形は固有値解析の結果とよく一致していることが分かる。

$$f = 0.92 \sqrt{\frac{\int_0^{H_t} EI(z) \dot{x}^2 dz}{\int_0^{H_t} m(z) x^2(z) dz + (m_R + m_N) x^2(H_t)}} \quad (19)$$

$$\mu(z) = x(z)/x(H_t) \quad (20)$$

$$\text{ただし, } \ddot{x}(z) = \frac{M(z)}{EI(z)}, \quad x(z) = \int_{H_t-z}^{H_t} \left\{ \int_{H_t-\eta}^{H_t} \frac{M(\xi)}{EI(\xi)} d\xi \right\} d\eta \quad (21)$$

$$M(z) = (m_R + m_N) g (H_t - z) + g \int_{H_t-z}^{H_t} m(\xi) (H_t - \xi) d\xi \quad (22)$$

ここで、 E はタワーのヤング率、 $I(z)$ は断面2次モーメント、 $m(z)$ はタワーの質量分布、 m_N はナセルの質量、 m_R はロータの質量、 H_t はタワーの高さである。

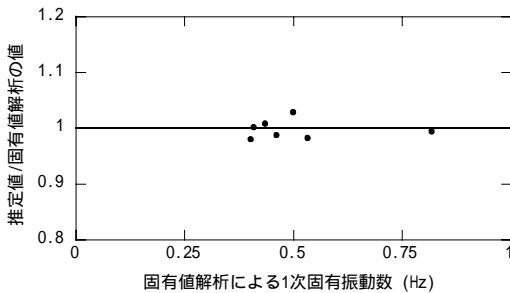


図2 風車タワーの1次固有振動数

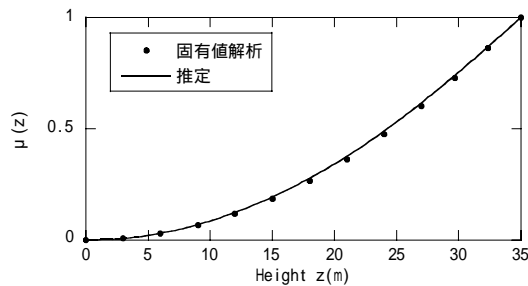


図3 風車タワーの1次モード形(400kWストール制御風車)

3.3 風荷重の組合せの評価式

風車タワーに作用する風荷重は、タワーに作用する風力のみならず、風車のロータ及びナセルからの風荷重も加算される。風車のロータに作用する風荷重はブレードに作用する抗力のみならず、ヨー角度によって大きな揚力を受ける。その結果、風車タワーに作用する最大風荷重を評価する際には、風荷重の風方向及び風直角方向成分の組合せを考慮する必要がある。風車タワーの異方差が小さいため、図4に示すような連成振動が発生する。この図から、風方向と風直角方向の風荷重の最大値は同時に発生しないことが分かる。タワーに作用する最大風荷重は、風方向の風荷重の最大値と風直角方向の平均値及び標準偏差からの組合せ、または風直角方向の風荷重の最大値と風方向の平均値及び標準偏差からの組合せから、式(23)

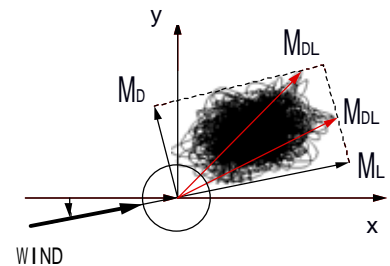


図4 転倒モーメントのリサーチ

により評価することができる．ここで， M_D, M_L は風方向，風直角方向の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， σ_{MD}, σ_{ML} は転倒モーメントの標準偏差を表す．

$$M_{DL} = \max \left(\sqrt{M_L^2 + (\overline{M_D} + \sigma_{MD})^2}, \sqrt{M_D^2 + (\overline{M_L} + \sigma_{ML})^2} \right) \quad (23)$$

4. 数値計算結果との比較

本研究で提案した評価式の予測精度を調べるために，400kWのストール制御風車を対象に，提案式により求められた粗度区分 Ⅰ～Ⅳにおける風荷重と風応答解析から得られた風荷重との比較を図5に示した．また，風荷重の組合せの予測精度を調べるために，各ヨー角に対して最大風荷重を求め，図6に示した．正規確率過程を仮定した従来の評価式により求めた風荷重は過小に評価され，非正規確率過程を仮定した本提案式の値は風応答解析の結果に近いことが図5から分かる．特に乱れの大きい粗度区分Ⅳにおいて風荷重の予測誤差は従来の評価式の1/3程度までに低減し，本研究で提案した評価式の妥当性が確認された．

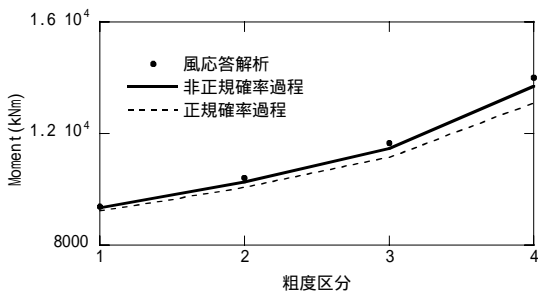


図5 タワー転倒モーメントの粗度区分による変化

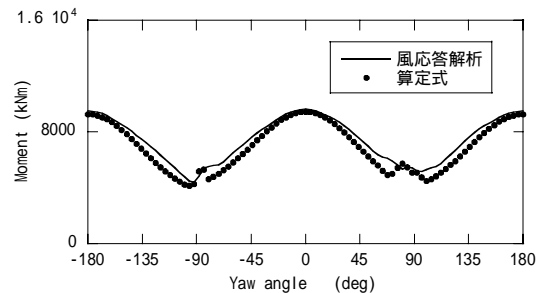


図6 タワー転倒モーメントのヨー角による変化

5. ガスト影響係数の簡便式の提案

本研究では，建築基準法を模して，ガスト影響係数の簡便式を作成した．ここで，暴風時にヨー制御を行わない場合を想定し，ストール制御風車の場合には，風車ロータが風向きに正対する時，ピッチ制御風車の場合には，フェザーリングで横風を受ける時の最大風荷重を求めることとした．また，この2つのケースのいずれも風方向の風荷重が支配的であり，風直角方向の風荷重を無視した．簡便式の作成にあたり，各粗度区分に対して定格出力100kW~2000kW（ハブ高さ H_h 24m~76.5m）の6機の風車を対象に，本研究で提案した評価式によりストール制御及びピッチ制御風車のガスト影響係数を求め，粗度区分毎におけるガスト影響係数の簡便式を表1に示した．表中の α は構造減衰 ξ (%)の関数であり，次式により表す．

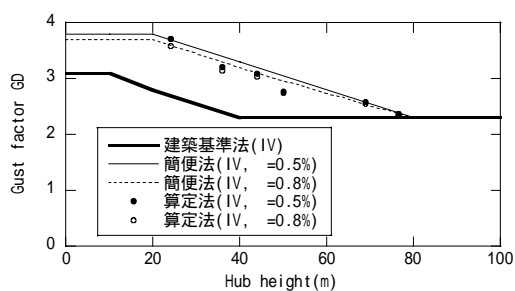
$$\alpha = (\xi - 0.5) / 3 \quad (24)$$

簡便式の妥当性を示すために，簡便式により求めたガスト影響係数（実線と点線）と本研究に提案した評価式により求めたガスト影響係数（プロット）を図7に示した．また，比較のために，建築基準法によるガスト影響係数も併記した．建築基準法によるガスト影響係数は，風車の規模が小さい時に過小に評価するが，風車の規模が大きくなると，本研究の値とほぼ一致することが分かる．

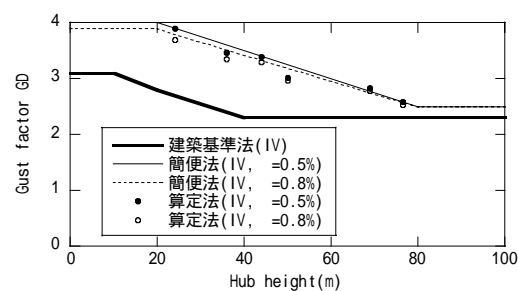
表1 粗度区分及びハブ高さ H_h に対応するガスト影響係数

ハブ高さ H_h 地表面粗度区分	(1)	(2)	(3)
	20m 以下の場合	20m を超え 80m 未満の場合	80m 以上の場合
	2.5- (2.6-)	(1)と(3)とに掲げる数値を直線的に補間した数値	1.8 (2.0)
	2.8- (2.9-)		2.0 (2.1)
	3.2- (3.4-)		2.1 (2.2)
	3.8- (4.0-)		2.3 (2.5)

()内の数値はピッチ制御風車のガスト影響係数



ストール制御風車



ピッチ制御風車

図7 ガスト影響係数のハブ高さによる変化(粗度区分IV)

6. まとめ

本研究では非正規確率過程を取り入れ、風車の振動特性を考慮したガスト影響係数の評価式を提案するとともに、乱れの大きい場合における風車タワーに作用する風荷重の高精度の評価手法を確立した。また、風荷重の風方向と風直角方向成分との組合せを考慮することにより、任意ヨー角における最大風荷重の評価を可能にし、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。以下、結論をまとめる。

1) 風車の振動特性を考慮した最大風荷重の評価式を提案し、更に、風荷重の風方向と風直角方向成分との組合せを考慮することにより、任意のヨー角における最大風荷重の評価を可能にした。

2) 非正規確率過程に関する理論を導入し、共振成分と非共振成分を考慮した風荷重の歪度の評価式を導出するとともに、乱れの大きい場合にも適用できるピークファクターの評価式を提案した。これにより、ガスト影響係数の評価精度が向上され、乱れの大きい場合における風荷重の予測誤差は従来の評価式の1/3程度までに低減した。

3) レイリーの方法と撓み曲線の算定法を修正することにより、風荷重の算定に必要な風車タワーの1次固有振動数と1次モード形を求めるための近似式を提案した。

4) 本研究で提案した評価式を用い、ガスト影響係数を求めるための簡便式を提案し、風車タワーに作用する最大風荷重を精度よく予測できる評価手法を確立した。

参考文献

- 1) GL2003: Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2003.
- 2) IEC 61400-1: WIND TURBINES, Part 1, Design requirements, 3rd Edition, 2005.
- 3) 牛山泉: 日本型風力発電システムの開発, 風工学会誌, No.103, pp.95-98, 2005.
- 4) 建築基準法施行令, 第87条, 2000.
- 5) 日本建築学会: 塔状鋼構造設計指針・同解説, 2004.
- 6) 本州四国連絡橋公団: 耐風設計基準・同解説, 1976.
- 7) 石川智巳: 送電用鉄塔の動的効果を考慮した風荷重評価法に関する研究, 博士論文, 2004.
- 8) DNV and RISØE: Guidelines for Design of Wind Turbines, 2nd Edition, 2003.
- 9) T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins E. Bossanyi: Wind Energy Handbook, WILEY, 2001.
- 10) DS 472: Loads and safety of wind turbine construction, 1st Edition, Danish Energy Agency, Riso, Denmark, 1992.
- 11) Davenport: Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading, Proceedings of the Institute of Civil Engineering, pp.187-196, 1964.
- 12) A. Kareem, J. Zhao: Analysis of Non-Gaussian Surge response of tension leg platforms under Wind Loads, Transaction of the ASME, Vol.116, 1994.
- 13) 石原孟, 他: 風力発電設備の風応答予測に関する研究, 第19回風工学シンポジウム, 2006.
- 14) 西嶋一欽, 神田順, H. Choi: 非正規を有する変動風圧のピークファクター評価式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第557号, pp.79-84, 2002.
- 15) L.V.Binh, 他: 風荷重の歪度を考慮したピークファクター評価式の提案, 第61回土木学会年次学術講演概要集, 2006.
- 16) J.W Tedesco, W.G Mcdougal, C. A. Ross: Structural dynamics, Theory and applications, Addison Wesley Longman, pp.467-469, 1999.