

# 発電時に風車タワーに作用する風荷重の簡易評価式の提案

## その2 風荷重の簡易評価式の提案

A simplified method for assessment of wind loading on a wind turbine tower in the operational conditions

Part2 A simplified method for assessment of wind loading

○石井 秀和<sup>1)</sup> 石原 孟<sup>2)</sup>  
Hidekazu ISHII<sup>1)</sup> Takeshi ISHIHARA<sup>2)</sup>

### 1. はじめに

風車発電時にはタワーなどの静止部分に風力が作用する他、ロータの回転により大きな推力がタワーの頂部に作用する。本論文その1に示すように、風車ロータに作用する推力は風車のピッチ制御により、大きな加振力になっている。その結果、風車発電時の風荷重の特性は風車停止時のそれと異なり、特に定格風速後の風荷重における変動成分は通常の構造物に比べ大きく、ガスト影響係数は風車停止時の値<sup>1)</sup>や建築基準法で定められている値より大きいことが予測される。

そこで、本研究その2では、その1に示したモデル風車を用い、ハブ高さにおける平均風速および乱れ強度を系統的に変化させ、発電時における最大風荷重の特性を調べるとともに、乱れの小さい洋上から乱れの大きい山岳地にまで適用できる風車発電時の最大風荷重の簡易評価式を提案する。

### 2. 発電時の風荷重の簡易評価式の提案

風車発電時にタワー基部に作用する風方向転倒モーメントの最大値 $M_{Dmax}$ はガスト影響係数法に基づき、次式により表される。

$$M_{Dmax} = M_D \times G_D \quad (1)$$

ここで、 $M_D$ はタワー基部に作用する風方向転倒モーメントの平均値、 $G_D$ はガスト影響係数である。

風方向転倒モーメントの平均値は、ハブ高さ $H$ での風速 $U_H$ 、ロータの受風面積 $\pi R^2$ 、風方向転倒モーメント係数 $C_{MD}$ により、次式から求められる<sup>2)</sup>。

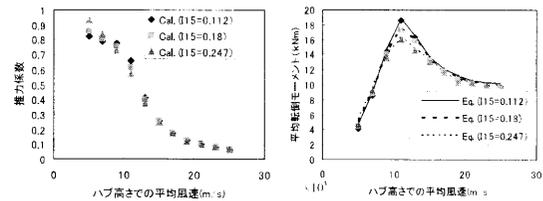
$$M_D = \frac{1}{2} \rho U_H^2 \pi R^2 H C_{MD} \quad (2)$$

$$C_{MD} = \varepsilon_T C_{DT} C_g + \varepsilon_N C_{DN} + C_T, \quad C_g = \frac{1}{3+3\alpha} + \frac{1}{6}$$

ここで、 $\rho$ は空気密度、 $C_T$ はロータのスラスト係数(また推力係数)、 $C_{DN}$ はナセルの平均抗力係数(1.2)、 $C_{DT}$ はタワーの平均抗力係数(0.6)である。また $\varepsilon_T$ と $\varepsilon_N$ はそれぞれロータ面積に対するタワー見付面積の比とナセル見付面積の比を表し、 $C_g$ は平均風速の鉛直分布に対する

補正係数、 $\alpha$ は平均風速のべき指数(0.2)である。

図1には平均転倒モーメントの予測結果を示す。図中のプロットは平均風速15m/sの時に於けるハブ高さでの乱れ強度 $I_{15}(=I_{ref} \times 1.123)$ が11.2%、18.0%、24.7%のときの解析結果である。平均転倒モーメントは乱れ強度に殆ど依存せず、定格風速時に最大値を示す。また乱れ強度が小さい程、その最大値が大きいことが分かる。メーカーから提供される $C_p$ を用いれば、平均転倒モーメントは式(2)から求めることができる。



(a) スラスト係数 (b) 平均転倒モーメント

図1 平均転倒モーメントの予測値と解析結果の比較

一方、ガスト影響係数は、次式により表される。

$$G_D = \frac{M_{Dmax}}{M_D} = 1 + g_D \frac{\sigma_{MD}}{M_D} \quad (3)$$

$$\approx 1 + g_D \frac{\sigma_{MDQ}}{M_D} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{MDR}^2}{\sigma_{MDQ}^2}} = 1 + g_D \frac{\sigma_{MDQ}}{M_D} \sqrt{1 + R_D}$$

ここで、 $g_D$ はピークファクター、 $\sigma_{MD}$ は風方向転倒モーメントの標準偏差であり、非共振成分 $\sigma_{MDQ}$ と共振成分 $\sigma_{MDR}$ により近似的に表せる。このガスト影響係数の評価式には転倒モーメントの非共振成分の標準偏差 $\sigma_{MDQ}$ 、ピークファクター $g_D$ および共振成分と非共振成分の比 $R_D$ の3つのパラメータが含まれている。

本研究その1に示したように、風車発電時の変動風荷重はピッチ制御の影響を強く受けるため、式(3)に含まれる3つのパラメータを理論的に導出することが困難である。そこで、本研究では時刻歴応答解析の結果からこれらのパラメータに関する経験式を求めた。

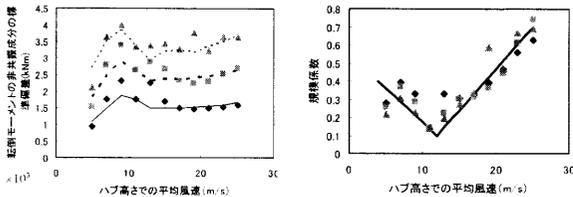
図2(a)には非共振成分の標準偏差を示し、乱れ強度の

1) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 修士1年 Master, Department of Civil Engineering, Univ. of Tokyo

2) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 Professor, Department of Civil Engineering, Univ. of Tokyo

大きいケースでは標準偏差の値も大きいことが分かる。一般に転倒モーメントの非共振成分の標準偏差は転倒モーメント平均値、乱れ強度、規模係数  $K$  を用いて、 $\sigma_{MDQ} = 2M_D I_1 \sqrt{K}$  で表される。ここで、 $I_1$  は風方向の乱れ強度であり、ハブ高さでの風速の関数である。

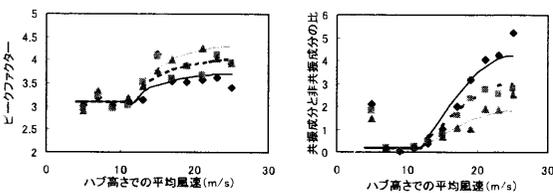
図 2(b)には規模係数  $K$  の風速による変化を示す。この図からわかるように、規模係数は定格風速前には風速の増大につれ小さくなるが、定格風速後には風速の増大につれ反対に大きくなる。実際、定格風速後にはピッチ制御により変動風荷重の相関が大きくなり、その結果、規模係数が大きくなったと推測される。



(a) 非共振成分の標準偏差 (b) 規模係数  $K$

図 2 非共振成分の予測値と解析結果の比較

図 3 にはピークファクターおよび共振成分と非共振成分の比の風速による変化を示す。定格風速前では両者ともほぼ一定値を示すのに対して、定格風速後では両者とも風速の増大に伴い、大きくなっていることが分かる。このようなピークファクターおよび共振成分と非共振成分の比の増大は定格風速後におけるピッチ制御に関係し、ピッチ制御により励起された共振成分の風荷重の増大によるものと考えられる。なお、風速 5m/s で見られる共振と非共振成分の比のピークはロータ回転とタワーとの共振によるものであり、荷重レベルが小さいため無視した。



(a) ピークファクター (b) 共振と非共振成分の比

図 3 ピークファクターおよび共振成分と非共振成分の比の予測値と解析結果との比較

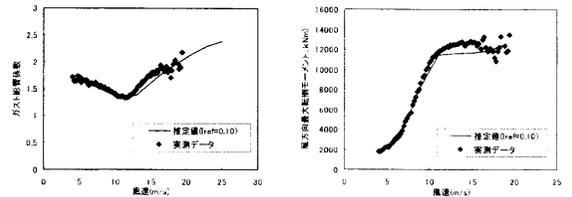
表 1 には本研究で提案したガスト影響係数を求めるために必要なパラメータの簡易予測式を示す。なお、本研究で提案した風荷重の評価式は発電時の最大風荷重の平均値を算出し、発電時の最大風荷重の 50 年再現期待値を求めるには外挿係数 (最大 1.5) 及び部分安全係数 1.25

を式(1)に乗じる必要がある。

### 3. 簡易評価式の検証

本研究が提案した評価式の妥当性を検証するために、石川県能登半島の珠洲第一風力発電所から得られた実測データ<sup>3)</sup>との比較を行った。対象風車は GE Wind Energy 社製の風車であり、定格出力 1500kW である。

図 4 には本提案式による予測値と実測値の比較を示し、ガスト影響係数とタワー基部の最大転倒モーメントともに実測とほぼ一致していることが分かる。予測値が実測値より若干小さいのは観測地点の乱れ強度は 15m/s 付近で 12%から 15%まで変化しているのに対して、図に風速 15m/s での乱れ強度が 11.2%の予測値を示している。



(a) ガスト影響係数 (b) 最大転倒モーメント

図 4 本提案式の予測値と実測値との比較

### 4. まとめ

本研究では、発電時の平均風速および乱れ強度を考慮した最大風荷重の簡便評価式を提案し、実測データと比較することにより、その有効性を示した。

表 1 本研究の提案式のまとめ

	定格風速前	定格風速後
$\sigma_{MDQ}$	$2M_D I_1 \sqrt{0.25 \frac{U_H - U_R}{U_{D7} - U_R} + 0.15}$	$2M_D I_1 \sqrt{0.55 \frac{U_H - U_R}{U_{D7} - U_R} + 0.15}$
$g_D$	3.1	$(4.5I_{1c} + 0.1) \sqrt{\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{U_H - U_R}{U_{D7} - U_R}\right)} + 3.1$
$R_D$	0.2	$(-17.8I_{1s} + 6) \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{U_H - U_R}{U_{D7} - U_R}\right) + 0.2$

### 参考文献

- 1) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 (2007 年版)，構造工学シリーズ 17，2007。
- 2) 山本学：風車回転時のタワーに作用する風荷重特性と設計用風荷重評価に関する研究，博士論文，2008。
- 3) 丸山勇祐，三輪俊彦，斉藤芳人：山間地に建つ大型風力発電装置の耐風設計のための実測調査 (その 1) 風車タワーに作用する風荷重と風応答特性，前田技術研究所所報，Vol. 49，2008。