

風車タワーに作用する発電時最大風荷重の予測

Prediction of maximum wind load on wind turbine towers under operating conditions

石原 孟
Takeshi ISHIHARA¹⁾

石井 秀和
Hidekazu ISHII²⁾

ABSTRACT

Dynamic response analyses of a pitch-regulated 2 MW wind turbine were carried out to investigate maximum wind loads on wind turbine tower. The mean and maximum tower base bending moments increase with the increase in the wind speed below the rated wind speed, while above the rated wind speed, the mean base bending moment decreases with the increase in the wind speed and the maximum base bending moment increases with the increase in the wind speed when the turbulence intensity is high due to the pitch control. A formula for the estimation of the maximum base bending moment was proposed and verified by the field test of a 1.5 MW wind turbine. Proposed formula shows a good agreement with measurement. The extrapolation coefficient was also evaluated for the estimation of maximum wind load with a 50 years return period, which increases as the annual mean wind speed and turbulence intensity increase.

Key Words: Wind turbine towers, Maximum wind load, Extrapolation coefficient

1. はじめに

2005年に発行された風車に関する国際基準 IEC61400-1 の第3版¹⁾では、風車を建設するには設置地点の環境条件に基づき風車に作用する荷重を算出し、風車の健全性を評価することが求められている。風車の健全性を評価するには発電時と暴風時の風荷重を評価する必要がある。暴風時の風荷重に関しては、その評価式が提案されている²⁾。一方、発電時の風荷重の評価式に関する研究³⁾は少なく、暴風時の評価式を援用しているのが現状である。しかし、風車発電時の風荷重の特性は風車の制御により、従来の構造物と異なる応答を示す可能性⁴⁾があり、風車の制御方式を考慮した評価式の提案が急務である。

本研究では、出力 2MW の風車モデルを用い、時刻歴応答解析を行うことにより風車発電時の風荷重の特性を明らかにする。そしてガスト影響係数法より、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評価式を導出すると共に、実測データと比較することにより、その精度を検証する。最後に発電時の最大風荷重の 50 年再現期待値を算定するための統計的外挿係数の評価式を提案する。

2. 風車発電時の時刻歴応答解析

2.1 解析モデルの概要

本研究では土木学会構造工学委員会・風力発電設備支持物の動的解析と構造設計小委員会⁵⁾が作成した標準風車モデルを用いた。この風車モデルは3枚翼を有するアップウィンド式風車を対象に、現在陸上に最も多く建設されている風車を模擬して作成されたものである。風車の制御は可変ピッチ、可変速の制御方式を採用し、定格風速は約 12m/s、定格出力は 2MW である。時刻歴応答解析に使用される変動風速は、IEC61400-1 の標準乱流モデルを用いて作成した。平均風速の指数は 0.2 であり、風の主流方向の乱流強度 I_1 は次式によ

^{1),2)} 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授, 大学院生 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

り与えた。なお、乱流強度 I_1 は分位値の関数である¹⁾。

$$I_1 = I_{ref} (0.75 + 5.6 / U_H) \quad (1)$$

ここで、 I_{ref} は風速 15m/s における乱流強度の期待値、 U_H はハブ高さの風速を表す。また、変動風のスペクトルについては Kaimal モデルを用いた¹⁾。空力モデルとしてはタワーの影響を考慮するためにポテンシャルモデルを用いて、さらに翼端と翼根のロスも考慮した。本風車モデルでは PI 制御を採用し、発電機速度偏差 y (rad/s)、同残差 y_1 (rad) に対するトルク指令値 ΔQ_{Dem} (Nm) ならびにピッチ位置指令値 $\Delta \theta_{Dem}$ (rad) は、次式により表した⁶⁾。

$$\Delta Q_{Dem} = 380y + 80.85y_1 \quad (2)$$

$$\Delta \theta_{Dem} = 0.1152y + 0.05486y_1 \quad (3)$$

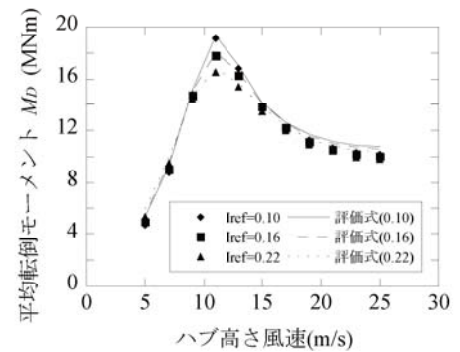
また、時刻歴応答解析では風車タワーの 2 次振動モードまで考慮し、1 次モードの構造減衰比は 0.8% とした。高次モードの構造減衰比は剛性比例型と仮定し求めた。タワー基部の支持条件は固定とし、風車本体は剛体と仮定した。

2.2. 解析結果

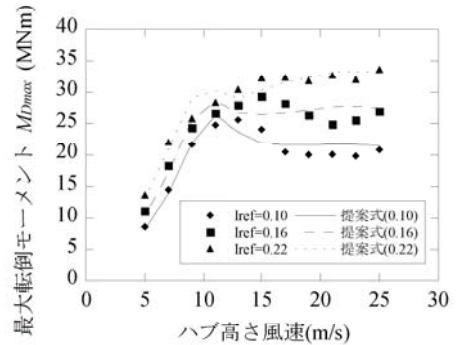
発電時の風荷重特性を評価するために作成した標準風車モデルに対し、乱流強度 I_{ref} を 0.10, 0.16, 0.22 の 3 通りに変化させ、各ケースに関しては平均風速を 5m/s から 25m/s まで 2m/s 刻みで、11 通りの 10 分間の時刻歴応答解析を 35 回ずつ行った。

図 1 には時刻歴応答解析により求めたタワー基部に作用する転倒モーメントの平均値、最大値とガスト影響係数の風速による変化を示す。各プロットは 35 ケースの平均値である。また、図中の線に関しては 3 章以降で述べる。風車タワー基部に作用する転倒モーメントの平均値と最大値は定格風速（約 12m/s）の前では平均風速の増大に伴い増大するが、定格風速の後では平均風速の増大に伴い、転倒モーメントの平均値は減少する。一方、転倒モーメントの最大値は乱れの小さいケースでは減少するが、乱れの大きいケースでは逆に増加している。また最大転倒モーメントの乱流強度への依存性は定格風速前より後の方が大きくなっていることが分かる。通常の構造物の風応答では転倒モーメントの平均値が減少するにつれその最大値も減少するが、転倒モーメントの最大値が逆に増大するのは構造物としての風車特有の現象と言える。また、ガスト影響係数は定格風速付近で最も小さいが、定格風速前には風速の増大と共に減少し、反対に定格風速後には風速の増大とともに増大する。なお、定格風速以下では図 1 の結果が乱流強度の風速依存性の影響を受けていることに注意されたい。

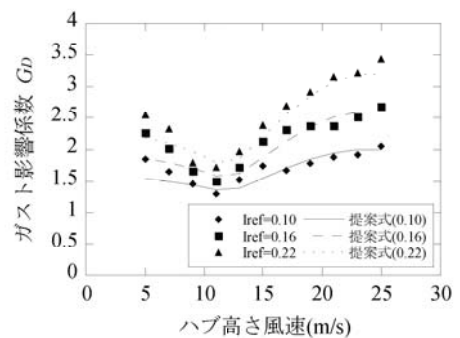
図 2 と図 3 には各々定格風速前の 9m/s および定格風速後の 15m/s における風速、発電機出力、ロータ回転数、風方向転倒モーメント、ピッチ角の時刻歴波形を示す。300sec までに特徴が現れているので前半の 300sec のみを示している。定格風速前（図 2）では発電量を最大にするようにピッチ角は 0 度でほぼ一定のままになっている。210sec 付近では急な風速変動に対応するため、回転数制御の他にピッチ角も変化させている。この図から、定格風速前の転倒モーメントは従来の構造物とほぼ同じような応答特性を示し、タワー基部の転倒モーメントの変動は風速の変動に追従して変動していることが分かる。このような振動をガスト励起型振動と呼ぶことが出来る。一方、定格風速後（図 3）では、風速が小さくなると、発電量を一定に保つように、ピッチ角が小さくなるように制御されている。このときには風速が小さくなっているにも関わ



(a) 転倒モーメントの平均値



(b) 転倒モーメントの最大値



(c) ガスト影響係数

図1 タワー基部の転倒モーメントの平均値、最大値とガスト影響係数

らず、大きな転倒モーメントが励起されていることが分かる。ピッチ角を小さくすることにより発電量が大きくなるが、風方向の推力も大きくなり、大きな転倒モーメントが発生する。このように励起された転倒モーメントは大きな変動転倒モーメントをもたらし、転倒モーメントの平均値が下がっても、最大値は増加するという現象が起こる。この現象をピッチ制御励起型振動と呼ぶことができる⁴⁾。

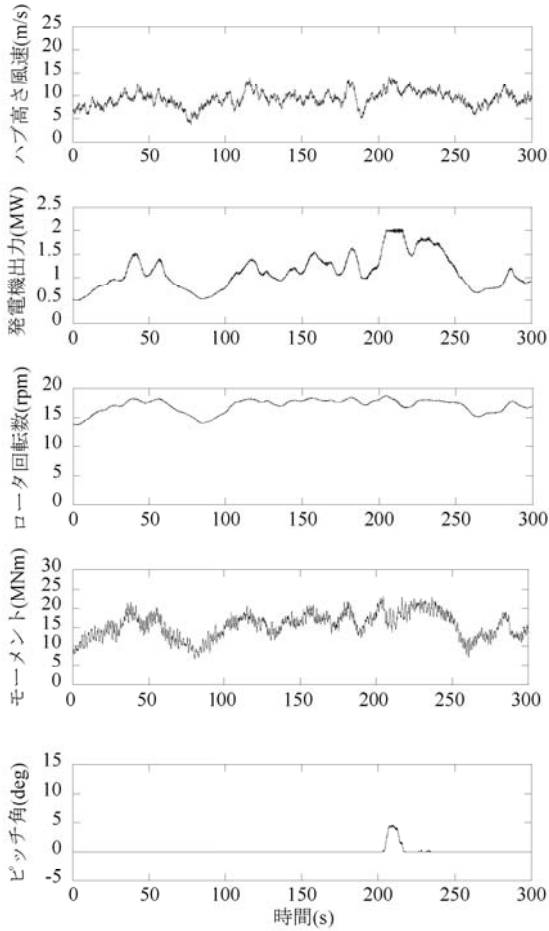


図2 風速9 m/sにおけるハブ高さの風速，発電機出力，ロータ回転数，転倒モーメント，ピッチ角の時刻歴波形

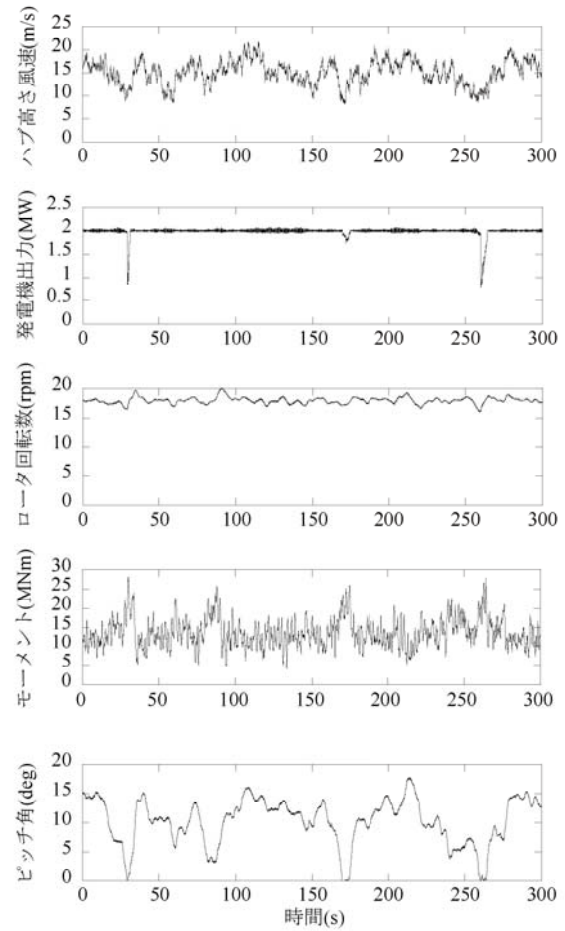


図3 風速15 m/sにおけるハブ高さの風速，発電機出力，ロータ回転数，転倒モーメント，ピッチ角の時刻歴波形

3. 発電時の最大風荷重の評価式

発電時最大風荷重の50年再現期待値は、時刻歴応答解析から求めることが可能であるが、数百ケースの時刻歴応答解析を行わなければならない、解析に時間を要する上、風車の制御を含む時刻歴応答解析用のプログラムも必要である。本研究では、発電時の風車に作用する最大風荷重および統計的外挿係数の評価式を提案し、発電時の最大風荷重の期待値 M_{Dmax} に最大風荷重の統計的外挿係数と風荷重の部分係数を乗じて、発電時の最大風荷重の50年再現期待値 M_{D50} を次式により求めた。

$$M_{D50} = M_{Dmax} \times \gamma_e \times \gamma_f, \quad M_{Dmax} = \max(M_{Di} \times G_{Di}) \quad (4)$$

ここで、 M_{Di} と G_{Di} は、それぞれ風速階級 U_{Hi} に対応する発電時の平均風荷重とガスト影響係数であり、 γ_e と γ_f はそれぞれ最大風荷重の統計的外挿係数と風荷重の部分係数である¹⁾。

3.1 発電時の平均風荷重

発電時の平均風荷重は次式により求められる³⁾。

$$M_D = \left[\frac{1}{2} \rho U_H^2 C_T \pi R^2 + \frac{1}{2} \rho U_H^2 C_{DN} A_N \right] \times H + \int_0^{H_t} \frac{1}{2} \rho U(z)^2 C_{DT} d(z) z dz \quad (5)$$

ここで,

$$U(z) = U_H \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha \quad (6)$$

また ρ は空気密度, C_T はロータのスラスト係数(乱流強度に依存する), R は風車ロータ半径, C_{DN} はナセルの平均抗力係数, A_N はナセルの見付面積, H はハブ高さ, H_t はタワー高さであり, C_{DT} はタワーの平均抗力係数, α は平均風速のべき指数である。

図 1(a)には, 評価式(5)により算定したタワー基部の転倒モーメントの平均値と時刻歴応答解析結果との比較を示している。この例ではナセルの平均抗力係数 C_{DN} , タワーの平均抗力係数 C_{DT} , 平均風速のべき指数 α は各々 1.2, 0.6, 0.2 とした。提案式により求められた転倒モーメントの平均値は, 時刻歴応答解析結果とよく一致していることが分かる。

3.2 ガスト影響係数

風速 U_H に対応する発電時のガスト影響係数 G_D は, 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と平均値との比として次式により表される。

$$G_D = \frac{M_D + g_D \sigma_{MD}}{M_D} = 1 + g_D \frac{\sigma_{MD}}{M_D} \cong 1 + g_D \frac{\sigma_{MDQ}}{M_D} \sqrt{1 + R_D} \quad (7)$$

ここで, σ_{MD} は風方向の転倒モーメントの標準偏差であり, σ_{MDQ} は非共振成分である。また共振成分 σ_{MDR}^2 と非共振成分 σ_{MDQ}^2 との比 R_D は次式より表わされる。

$$R_D = \frac{\sigma_{MDR}^2}{\sigma_{MDQ}^2} \quad (8)$$

さらに非共振成分 σ_{MDQ} は, 乱流強度 I_1 , タワー基部の平均転倒モーメント M_D および規模係数 K の関数として次式で表せると仮定した。

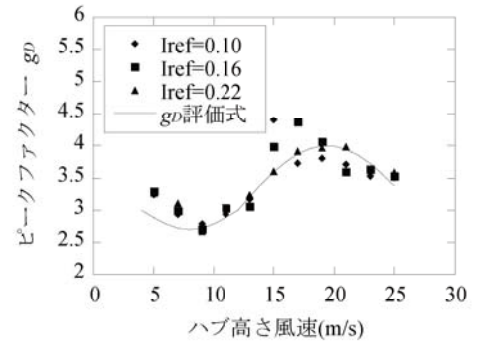
$$\sigma_{MDQ} = 2M_D I_1 \sqrt{K} \quad (9)$$

最終的に, ガスト影響係数 G_D は, ピークファクター g_D , 共振成分と非共振成分の比 R_D および規模係数 K の関数として次式により表される。

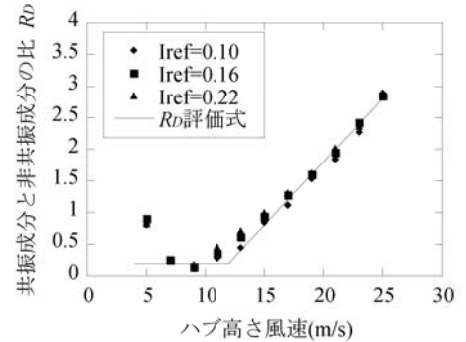
$$G_D \cong 1 + 2I_1 g_D \sqrt{K} \sqrt{1 + R_D} \quad (10)$$

式(10)にある 3 つのパラメータの評価式を求めるため, 乱流強度を 0.10, 0.16, 0.22 の 3 通りに変化させ, それぞれのパラメータの風速による変化を調べた。図 4 にはピークファクター g_D , 共振成分と非共振成分の比 R_D および規模係数 K の風速による変化を示す。定格風速前では, R_D がほぼ一定値を示すのに対して, g_D と K は風速の増大と共に増減している。一方, 定格風速後では, g_D は風速の増大と共に緩やかに増減しているのに対して,

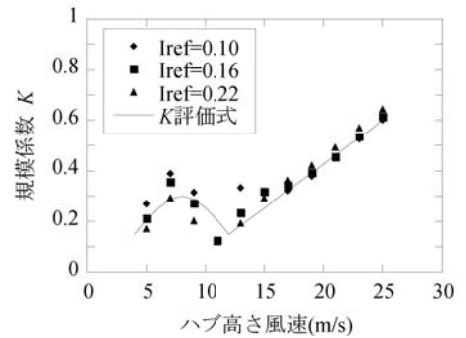
R_D と K は風速の増大に伴い線形的に増大している。このような現象は, 定格風速後におけるピッチ制御に関係しているものと思われる。また風速 5m/s で見られる共振と非共振成分の比のピークはロータ回転とタ



(a) ピークファクター



(b) 共振成分と非共振成分の比



(c) 規模係数

図 4 ピークファクター, 共振成分と非共振成分の比および規模係数の予測値と解析結果との比較

表 1 発電時の最大風荷重の評価式

	定格風速前	定格風速後
g_D	$-0.3 \sin \left(\pi \cdot \frac{U_{in} - U_H}{U_{in} - U_r} \right) + 3.0$	$\sin \left(\frac{7\pi}{8} \cdot \frac{U_H - U_r}{U_{out} - U_r} \right) + 3.0$
R_D	0.2	$2.6 \frac{U_H - U_r}{U_{out} - U_r} + 0.2$
K	$0.15 \sin \left(\pi \cdot \frac{U_{in} - U_H}{U_{in} - U_r} \right) + 0.15$	$0.45 \frac{U_H - U_r}{U_{out} - U_r} + 0.15$

ワーとの共振によるものである。これらのパラメータに関する評価式を表1にまとめた。ここで、 U_r は定格風速、 U_{in} と U_{out} は各々カットイン風速とカットアウト風速を表す。図中の実線は、これらのパラメータを表わす提案式により求めた値であり、時刻歴応答解析の結果を概ね表わしていることがわかる。

図1(b)(c)には、提案式(4)と(10)により求めた風車の基部における転倒モーメントの最大値とガスト影響係数 G_d の風速による変化を示している。この図から提案式により求められた転倒モーメントの最大値とガスト影響係数は時刻歴応答解析の結果とよく一致していることがわかる。また定格風速前のガスト影響係数が風速の増大に伴い減少し、定格風速後のそれらは風速の増大に伴い増大している特性もよく捉えられている。ガスト影響係数の定格風速前の減少は、乱流強度 I_1 の減少によるものであり、一方、定格風速後の増大はピッチ制御により励起された変動風荷重の増大によるものである。

提案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定格出力1500kWのGE Wind Energy社製風車の実測データ⁷⁾との比較を行った。図5には観測から得られたハブ高さにおける乱流強度の平均値を I_1 として用いて、提案式(10)と(4)により算出される風車タワーの基部における転倒モーメントのガスト影響係数と最大値と実測値の比較を示す。提案式によるガスト影響係数とタワー基部の最大転倒モーメントはともに実測値とよく一致していることが分かる。

3.3 統計的外挿係数

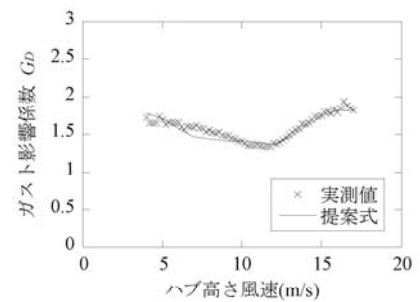
最大風荷重の50年再現期待値を算定するために、式(4)に示す最大風荷重の統計的外挿係数を求める必要がある。期間 T における発電時最大風荷重が s を超える確率 $F_{ext}(s;T)$ は次式により表せる⁸⁾。

$$F_{ext}(s;T) = \int_{U_{in}}^{U_{out}} F_s(s|U;T)f(U)dU \quad (11)$$

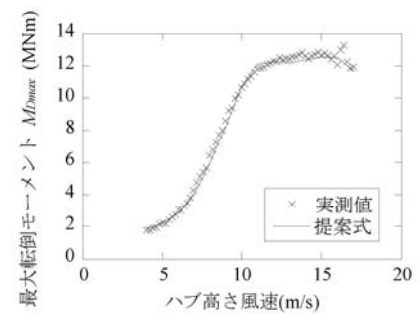
ここで、 $F_s(s|U;T)$ は平均風速 U の時に期間 T における発電時最大風荷重が s を超える確率であり、 $f(U)$ は平均風速 U の出現頻度分布である。超過確率 $F_s(s|U;T)$ は、各平均風速階級 U に対して実施した35回の時刻歴応答解析の時系列データから求めた最大値を用いて推定した。35個のデータを昇順に並べ、 $s_1, s_2, \dots, s_{35}$ とすると、平均風速階級 U の時の超過確率 $F_s(s_i|U;T)$ は次式を用いて推定できる。なお、極端なデータのばらつきの影響を除くため、上位から10%のデータを除いた32個のデータを用いて確率分布を推定した。

$$F_s(s_i|U;T) = 1 - \frac{i}{n+1} \quad (12)$$

図6には乱流強度 $I_{ref}=0.16$ の場合における風速9m/sおよび15m/sの時に推定された最大風荷重の超過確率分布を示す。図中のプロットは時刻歴応答解析から得られた値、実線は3パラメータワイブル分布により近似した最大風荷重の超過確率分布を示す。ワイブル分布にある3つのパラメータはモーメント法により推定した。図7には風速の出現頻度分布 $f(U)$ がレイリー分布に従うと仮定し、年平均風速が10m/sの場合の超過確率分布 $F_{ext}(s;T)$ を示す。図中の点線は再現期間50年における発電時最大風荷重が s_r を越える確率を表し、次式により求められる。



(a) ガスト影響係数



(b) 転倒モーメントの最大値

図5 提案式による予測値と実測値との比較

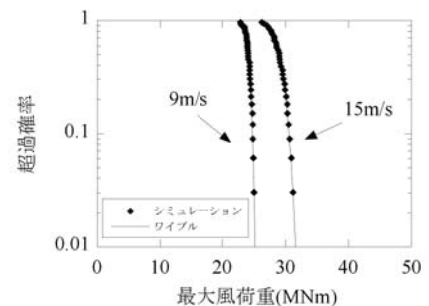


図6 風速別最大風荷重の超過確率分布

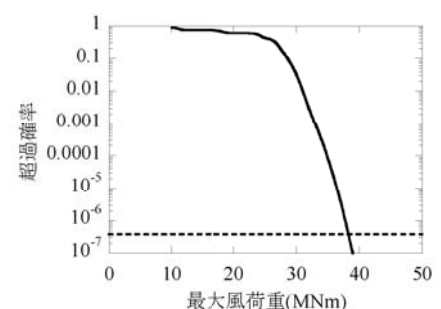


図7 風車発電時の最大風荷重の超過確率分布

$$F_{\text{ext}}(s_r; T) = \frac{T}{T_r} = 3.8 \times 10^{-7} \quad (13)$$

ここで、超過確率は期間 T を最大風荷重の評価時間 10 分とし、再現期間 T_r を 50 年として求め、超過確率が 3.8×10^{-7} となる 50 年再現期間の最大風荷重 s_r は図 7 から求めた。具体的に発電時最大風荷重の 50 年再現期待値 s_r は、3 パラメータワイブルを仮定して推定された超過確率を表す実線と超過確率 3.8×10^{-7} を表す点線の交点の値 (38376.1 kNm) として求めた。本研究では、図 7 から求められた発電時最大風荷重の 50 年再現期待値と図 1 に示す発電時の最大風荷重の期待値との比を統計的外挿係数 γ_e とする。図 8 には統計的外挿係数の年平均風速 U_a と乱流強度 I_{ref} による変化を示す。年平均風速 U_a を 6, 7, 8, 9, 10 m/s の 5 通り、乱流強度 I_{ref} を 0.10, 0.16, 0.22 の 3 通りに変化させ、計 15 通りの解析を行った。統計的外挿係数は、年平均風速および乱流強度の増加とともに増大することが分かる。統計的外挿係数の評価式を年平均風速 U_a と乱流強度 I_{ref} により次式で表した⁹⁾。

$$\gamma_e = I_{ref} (\ln(U_a) + 0.83) + 0.82 \quad (14)$$

図中の実線、破線、点線はそれぞれ評価式(14)により求めた統計的外挿係数であり、時刻歴応答解析結果をよく表していることがわかる。

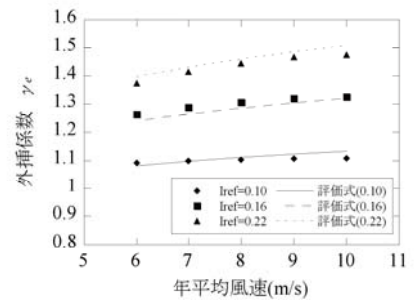


図 8 統計的外挿係数の年平均風速と乱流強度による変化

4. まとめ

本研究では、2MW の標準風車モデルを用いて時刻歴応答解析を行い、風車タワーに作用する発電時最大風荷重の特性を明らかにすると共に、その評価式を提案し、以下の結論を得た。

- 1) 風車タワー基部に作用する転倒モーメントの平均値と最大値は、定格風速の前では平均風速の増大に伴い増大するが、定格風速の後では平均風速の増大に伴い転倒モーメントの平均値は減少する。一方、転倒モーメントの最大値は乱れの小さいケースでは減少するが、乱れの大きいケースでは逆に増加する。
- 2) 本研究で提案した風車に作用する発電時の最大風荷重の評価式より算定された風車タワー基部の転倒モーメントの最大値は、時刻歴応答解析および実測により得られた風車タワー基部の転倒モーメントの最大値とよく一致していることを示した。
- 3) 風車タワーに作用する発電時最大風荷重の 50 年再現期待値を求めるための統計的外挿係数の評価式を提案した。この統計的外挿係数は年平均風速および乱流強度の増加と共に増大することが分かった。

参考文献

- 1) IEC 61400-1: Wind turbines-Part1: Design requirements, Ed.3, 2005.
- 2) ファフックバン, 石原孟, ビンルンヴァン, 藤野陽三: 風力発電設備の風応答評価式の提案, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.181-186, 2006.
- 3) 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.
- 4) 石原孟, 石井秀和: 風車発電時にタワーに作用する最大風荷重の特性とその予測式の提案, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.181-184, 2009.
- 5) 土木学会構造工学委員会・風力発電設備支持物の動解析と構造設計小委員会, <http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/TCWRDWT/>
- 6) 吉田茂雄: 風車支持物の空力弾性シミュレーションのための可変速・ピッチ制御パラメータ, 風力エネルギー, Vol.33, No.4, pp.104-111, 2009.
- 7) 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.
- 8) P.J. Moriarty, W.E. Holley, S.P. Butterfield: Extrapolation of Extreme and Fatigue Loads Using Probabilistic Methods, NREL-NWTC, 2004.
- 9) H. Ishii and T. Ishihara: Numerical study of maximum wind load on wind turbine towers under operating conditions, Proc. of the Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering, 295, pp.1-8, 2010.