

大型風力発電装置の耐風設計のための実測調査

（その２）風車運転時のピーク風荷重について

丸山 勇祐・三輪 俊彦*¹・島村 亜紀子・岡田 直仁*¹

Field Measurement on Wind Loads of Wind Turbine Tower (Part 2) Peek Wind Loads of Generating Wind Turbine

Yusuke MARUYAMA, Toshihiko MIWA, Akiko SHIMAMURA, Naohito OKADA

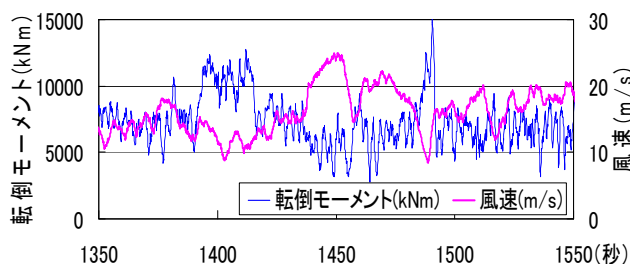


図-1 風荷重と風速の時刻歴（定格風速以上）

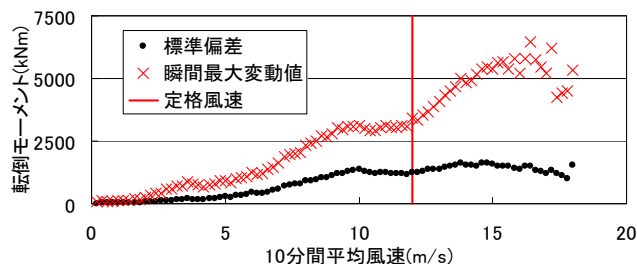


図-2 変動風荷重と風速の関係

研究の目的

クリーンエネルギーとして風力発電施設の導入が加速的に増えており、その耐風安全性の確保が緊急の課題となっている。風力発電設備の合理的設計に向けた基礎データを取得することを目的として、近年の導入風車の主流である大型機(1.5MW)を対象とし、今後国内において増加が予想される山間地に設置した実風車に対する計測を行っている。（その１）では実測結果から風車に作用する風荷重の傾向および風車タワーの振動応答特性について報告した。本報告では耐風設計で問題となる風車運転時のピーク風荷重に注目し、その発生機構、風の乱れ・風車の振動応答等との関係について検討する。

技術の説明

風車に作用する風荷重の特性は、定格風速を境に大きく異なる。定格風速以下では風速の変動に追従して風荷重が変動するが、定格風速を超えた領域では風荷重の変動は風速の変動の傾向とほぼ逆となる。定格風速を横切るような風速変動を持つ乱れに対して風車運転時のピーク風荷重が大きくなる。風車タワーの振動応答の特性は定格風速付近での変化は見られず、風車タワーの振動応答がピーク風荷重に与える影響は小さいと考えられる。

主な結論

山間地に建つ 1.5MW 風力発電装置のタワーに作用する風荷重の実測結果から、風車運転時のピーク風荷重について考察を行った。得られた知見を以下に記す。

- ・ 風車発電時のタワーに作用する平均風荷重は定格風速で最大となり、それ以上の風速では減少する。風荷重の最大瞬間値は、定格風速以上の風速でも減少しない。
- ・ 定格風速を超えた風速域では、風荷重の変動と風速の変動の傾向がほぼ逆になる。
- ・ 定格風速近傍の乱れを含む定格風速以上の強風時に、風車運転時のピーク風荷重が大きくなる。
- ・ 風車タワーの振動応答は定格風速付近での変化は見られなかったが、風荷重については定格風速付近で変動風荷重の特性が変化する。

* 1 本店 土木部 設計グループ

大型風力発電装置の耐風設計のための実測調査 (その2) 風車運転時のピーク風荷重について

丸 山 勇 祐 三 輪 俊 彦^{*1}
島 村 亜紀子 岡 田 直 仁^{*1}

要 旨

クリーンエネルギーとして風力発電施設の導入が加速的に増えており、その耐風安全性の確保が緊急の課題となっている。風力発電設備の合理的設計に向けた基礎データを取得することを目的として、近年の導入風車の主流である大型機(1.5MW)を対象とし、今後国内において増加が予想される山間地に設置した実風車に対する計測を行っている。(その1)では実測結果から風車に作用する風荷重の傾向および風車タワーの振動応答特性について報告した。本報告では耐風設計で問題となる風車運転時のピーク風荷重に注目し、その発生機構、風の乱れ・風車の振動応答等との関係について検討を行った。風車に作用する風荷重の特性は、定格風速を境に大きく異なる。定格風速以下では風速の変動に追従して風荷重が変動するが、定格風速を超えた領域では風荷重の変動は風速の変動とほぼ傾向が逆となる。定格風速を横切るような風速変動を持つ乱れに対して風車運転時のピーク風荷重が大きくなる。風車タワーの振動応答の特性は定格風速付近での変化は見られず、風車タワーの振動応答がピーク風荷重に与える影響は小さいと考えられる。

キーワード 風力発電設備／実機計測／鋼製タワー／乱流強度／風荷重／風応答

目 次

- | | |
|------------------|------------------|
| 1. はじめに | 4. 風荷重と乱れの影響について |
| 2. 計測サイトの乱流強度 | 5. おわりに |
| 3. 風車タワーに作用する風荷重 | |

FIELD MEASUREMENT ON WIND LOADS OF WIND TURBINE TOWER (PART 2) PEEK WIND LOADS OF GENERATING WIND TURBINE

Yusuke MARUYAMA Toshihiko MIWA
Akiko SHIMAMURA Naohito OKADA

Synopsis:

Recently, clean-energies which do not cause pollution and global warming has attracted considerable attention. Wind power is an ideal one among the clean-energies. It is expected that the installation of wind power generation systems will increase acceleratingly. On the other hand, a lot of accidents of wind turbines are reported, and security of wind turbine safety for wind loads is an urgent problem.

A field measurement on a wind turbine with a rated power of 1500 kW was carried out to investigate structural characteristics such as wind responses of a wind turbine tower and wind loads attacked a wind turbine. Fluctuation of wind loads follows to one of wind velocity in region under the rated wind velocity, but it behaves oppositely in region over the rated wind velocity. Peak wind loads on generating wind turbine grow big for wind turbulence which has fluctuation crossing rated wind velocity. Influence of tower response is small to wind loads.

* 1 本店 土木部 設計グループ

1. はじめに

再生可能な風力エネルギーはその経済性と温暖化ガス排出の少ない電源として多くの期待を集めている。日本の風力発電の導入も加速的に増え、2008 年度末の設備導入量は約 185 万kW¹⁾となった。1998 年に閣議決定された新エネルギー導入大綱で、2010 年の風力発電導入目標を 300 万kWとされているが、導入目標達成に向けてさらに加速的に導入が進むものと予測される。

一方、宮古島や岩屋WFをはじめ日本各地で風力発電設備の事故が数多く報告²⁾³⁾され、その耐風安全性の確保が緊急の課題となっている。これらのことを受けて、2007 年 6 月の建築基準法改正においては、風力発電設備を含む高さ 60m以上の工作物に対しても高層建物と同じ大臣認定が必要となり、より精度の高い風車の設計が求められるようになった。土木学会では 2007 年秋に「風力発電設備支持物構造設計指針⁴⁾」を発刊し、風車の設計方法に関する指標を示したが、実際の風車に作用する風荷重や応答特性にはいまだ不明な点も多い。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)では、各地の風車において風速および応力の実測を実施し、2008 年 6 月に公開された日本型風力発電ガイドライン⁵⁾にその計測結果を報告している。また、風車に作用する風荷重および応答特性の調査を目的とした実測結果も^{6)~10)}報告されている。

筆者らは、風力発電設備の合理的設計に向けた基礎データを取得することを目的として、近年の導入風車の主流である大型機(1.5MW)を対象とし、今後国内において増加が予想される山間地に設置した実風車に対する計測を行っている。(その 1)¹¹⁾では、実測の概要および風車に作用する風荷重、風車タワーの風応答・減衰特性について報告した。この結果から、風車タワーに作用する平均風荷重は定格風速までは増加し定格風速を超えると減少するが、瞬間最大風荷重は定格風速までは風速とともに増加し定格風速を超えてからもほぼ一定の値となることを示した。風車運転時の風荷重は定格風速前後でその傾向が異なることがわかった。本報では、計測された時刻歴波形から定格風速以下及び以上の風荷重の傾向を詳細に調べ、ピーク風荷重の発生機構について考察するとともに、乱流強度と風荷重のガスト影響係数・ピークファクターとの関係を統計的に評価する。

2. 計測サイトの乱流強度

計測対象とした珠洲風力発電所の位置を図-1 に周辺の状態を写真-1 に示す。風車タワーにおける計測概要を図-2 に示す。計測の詳細は前報¹¹⁾に記しているので参照いただきたい。

図-3 にナセル上部の乱流強度と平均風速の計測結果を示す。また、この地点における特性を見るため風速毎(0.5m/sピッチ)に平均したものと計測結果の各風速ビンにおける 84 パーセンタイル値を図-4 に示す。JIS C1400-

1¹²⁾において乱流強度の特性値は、計測または予測した平均値に標準偏差を加えることによって計算するとされているため、乱流強度の発生を正規分布と仮定した場合にその値は 84 パーセンタイル値となる。JISの 카테고리値と 84 パーセンタイル値を比較してみると、この計測地点における乱流強度はカテゴリ-Bに近い値となっている。定格風速(12m/s)近傍における平均的な乱流強度は 13~15%程度となっている。



図-1 実測風車の設置場所



写真-1 珠洲風力発電所

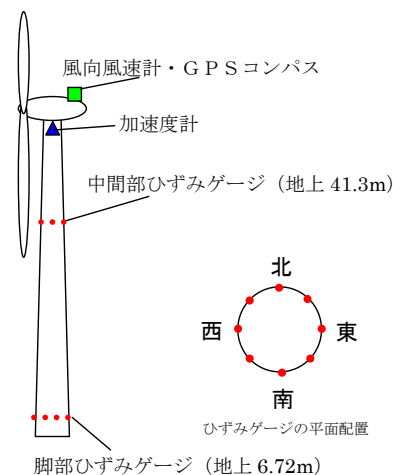


図-2 実風車の計測システム概要

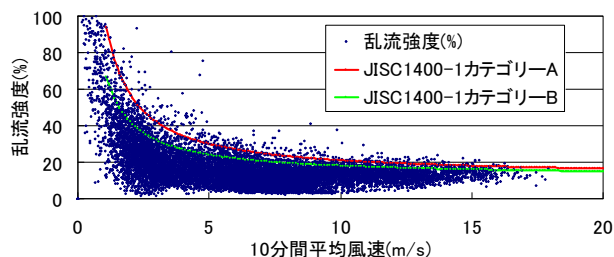


図-3 風車ナセル上部における乱流強度

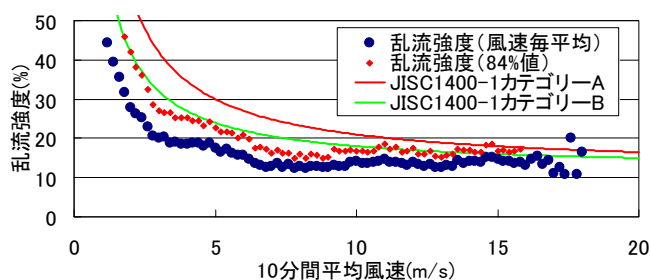


図-4 乱流強度の風速毎平均と 84 パーセンタイル値

3. 風車タワーに作用する風荷重

風車タワーに作用する風荷重としてタワー脚部の曲げモーメント（転倒モーメント）をその代表として議論を進める。図-5 に前報¹⁾に示した風荷重の特性として、風車タワー脚部曲げモーメントの風速毎平均の図を示す。横軸は 10 分間平均風速であり、プロットされている「平均値」とは 10 分間平均風速が同じ風速ビンに入る転倒モーメントの平均値を集めてアンサンブル平均したものである。「最大瞬間値」とは 10 分間平均風速が同じ風速ビンに入る転倒モーメントの瞬間最大値を集めてアンサンブル平均したものである。

タワーに作用する平均曲げモーメントは、定格風速 12m/s 以下では風速とともに増加し、定格風速近傍で最大となり、それより大きい風速では風速とともに減少する傾向が見られる。瞬間最大値（10 分間の最大値）については、定格風速近傍まで風速の増加とともに増加するが、定格風速より高い風速では荷重がほぼ一定あるいはわずかの増加の傾向がみられ、平均風荷重のように小さくならない。風力発電装置は定格発電量に達するとピッチ制御により発電量が定格発電量となるように制御される。風力発電量は風速の 3 乗に比例するためそれを一定にするように制御した場合、風速の 2 乗に比例する風荷重は小さくなるものと考えられる。瞬間最大風荷重（ピーク風荷重）が定格風速以上で小さくならないのは他の要因と考えられる。

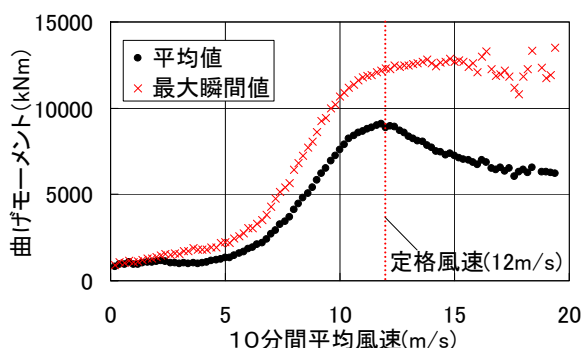


図-5 タワー脚部の曲げモーメントの風速毎平均

風車運転時のピーク風荷重の特性を明らかにするため、風向風速・タワー脚部の転倒モーメント・タワー頂部の

加速度の時刻歴波形を紹介する。前述したように定格風速以上と以下で風荷重の傾向が異なることから、図-6 に定格風速以下、図-7 に定格風速以上の時刻歴波形の例を示す。図の横軸は（秒）としているが、データを 1 時間ごとに区切っているため出てくる値であるが、その値には特に意味がなく後述の説明をわかりやすくするために表記している。図中曲げモーメントとあるのはタワー脚部の曲げモーメントである。

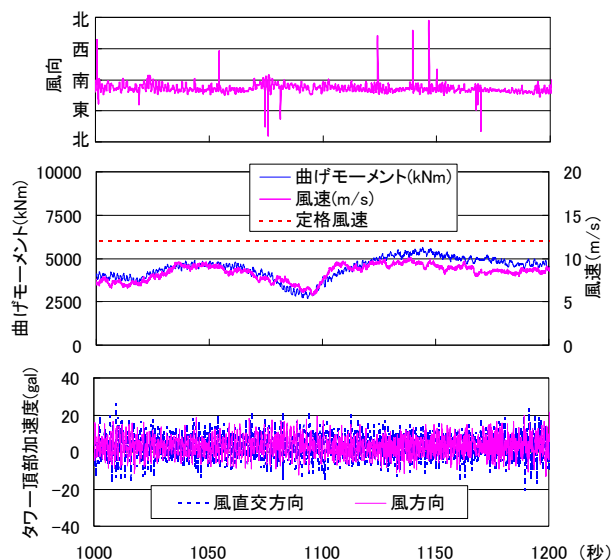


図-6 計測値の時刻歴（定格風速以下）

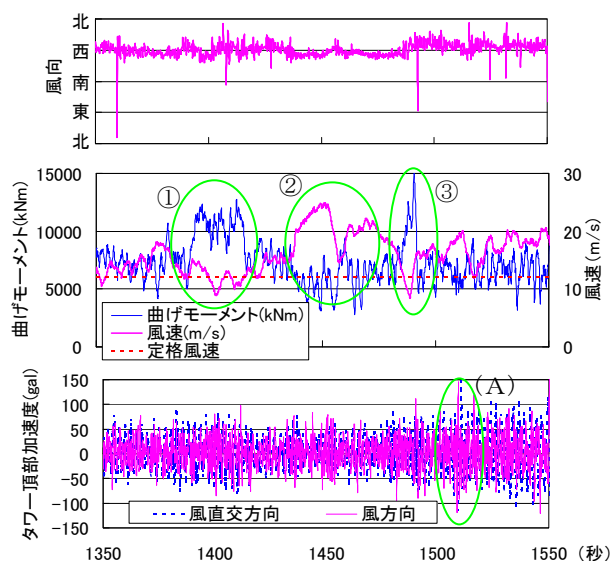


図-7 計測値の時刻歴（定格風速以上）

図-6 では、風向はほぼ南で一定であり、風速は 10m/s 程度（定格風速以下）である。タワー脚部の曲げモーメント（転倒モーメント）は風速の変動に応じて変動しているのが確認できる。加速度応答は風速がそれほど大きく変動しているわけではないのでほぼ一定の振幅で振動しているが、加速度応答と転倒モーメントの相関は低そうである。

図-7 では、風向はほぼ西で一定であり、風速は 10 分間

平均風速で定格風速を超えている。定格風速を超えた風速域では、風速の上昇に伴って転倒モーメントが小さくなり、風速の減少とともに転倒モーメントが大きくなるという逆対称に近い変動が見られる。振動応答が大きくなっているとき（1510 秒付近：図中(A)）に、風荷重の変動が特に大きくなっていないことから、風荷重に対しては風速変動の方が支配的であり、振動応答の影響は小さいと考えられる。また、1490 秒付近に生じているピーク風荷重時に、特に大きな振動応答が生じていないことからそのことがわかる。これらのことから、風車運転時の風荷重においては、タワーの振動応答よりも風速変動によって生じるピッチ制御・ロータの速度制御・ロータの空気力学的な動的挙動等の影響が関与していると考えられる。

図-7 中丸で囲んだ①に示すような風速が定格風速付近のときに風荷重が平均的に大きくなっている。②の状態では風速変動が大きく起こっているが、変動前後の風速が定格風速より高い状態（風速 20m/s 前後）であるため、変動が大きくても風荷重は大きくない。③の状態は転倒モーメントの最大値が 15000(kNm)を超えており、前報¹¹⁾で報告した計測中最大級のピーク風荷重が作用した瞬間であり、このときの 10 分間平均風速は 16.4(m/s)であった。③の部分拡大した時刻歴波形を図-8 に示す。

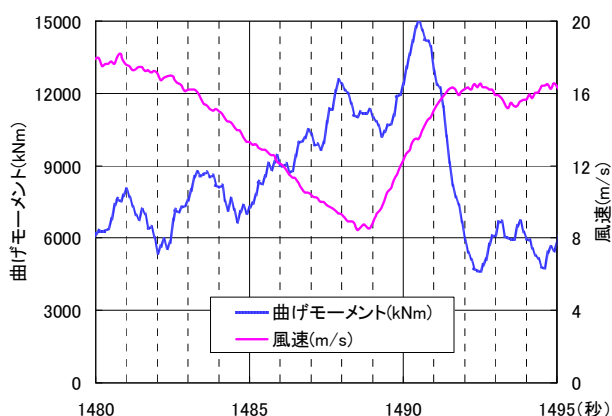


図-8 ピーク風荷重発生時の時刻歴波形

図-8 の時刻歴波形の前半では風速の低下とともに風荷重の増大が見られる。また、定格風速を下回ってからもしばらくは風荷重の増加が見られ、図中「1488 秒」でピークとなっている。風速は「1489 秒」から上昇し始めるがやや遅れて風荷重も上昇し始める。「1490 秒」で定格風速を超えるが、その後も風荷重は増大し「1490.5 秒」付近でピーク風荷重が生じている。風速の変動に対して風荷重の変動が少し遅れたような時刻歴が見られるが、ピッチ制御が作用するまでの遅れ等の影響ではないかと考えられる。この時刻歴の観測結果から運転時の風車タワーに作用するピーク風荷重は、風速の変動が定格風速付近を横切る時に生じているものと考えられる。また、

ピッチ制御の効果にわずかの遅れがみられるため、風速変動が急に増加する時にはかなり大きな風荷重が作用する場合もあると考えられる。また、大きな荷重変動の中に小さな変動が見られるが、これがほぼ 2.5 秒周期で生じていることから、タワーの振動（固有周期約 2.5 秒）による荷重変動と考えられる。「1490.5 秒」で見られるピーク風荷重は風速が急激に増加したことでタワーの振動による荷重の方向が一致したことにより荷重が大きくなったとも考えられる。

平均風速がカットアウト風速（強風に対して安全性を確保するために風車の運転を停止する風速：25m/s）付近において乱れが強く、風速変動の下限値が定格風速付近になるときは、風車運転時の風荷重がかなり大きくなる可能性があると考えられる。

4. 風荷重と乱れの影響について

前章では、ピッチ制御が働き始める定格風速を境に風荷重と風速の関係が異なることを示し、定格風速以上の風速域でピーク風荷重が生じる現象を時刻歴波形で調べた。この結果から定格風速以上で発電運転中の風車に作用する風荷重は乱れの強さの影響を受ける可能性があることを示した。本章では、風の乱れと風荷重及び風応答の相関関係について考察を進め、風車運転時のタワーに作用する風荷重のガスト影響係数（ピーク値と平均値の比）・ピークファクター（ピーク変動値と標準偏差の比）について検討する。

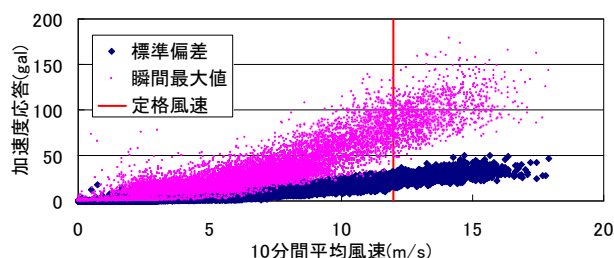


図-9 風車タワーの加速度応答

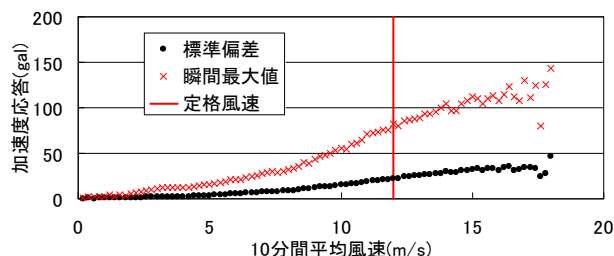


図-10 風車タワーの加速度応答の風速毎平均

図-9 に風車タワー頂部で計測された加速度応答と 10 分間平均風速の関係を示す。加速度は水平方向に 2 方向計測しているが、その 2 つからタワーの最大応答を計算した結果をプロットしている。図-10 は図-9 の結果を風速毎

に平均したものであり、図-11 は図-10 を基に算定したピークファクターと乱流強度の関係である。加速度応答は風速の増加とともに直線的に大きくなっており、風荷重で見られたような定格風速近傍での変化は見られない。加速度応答のピークファクターは風車運転時において概ね 3.5～3.8 の値となっており、風の乱れに応じて変化している。風車運転時の風車タワーの振動応答は風の乱れによる振動が支配的であると考えられる。

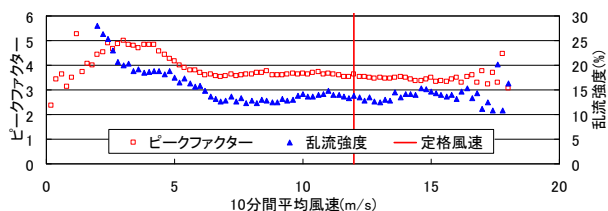


図-11 加速度応答のピークファクター

図-12 に風車タワー脚部の曲げモーメントの標準偏差および最大変動値と 10 分間平均風速の関係を示す。図-13 に図-12 を風速毎に平均したものを示す。

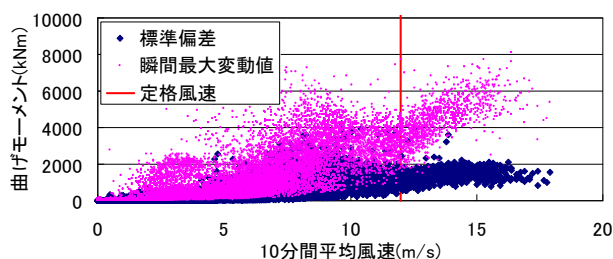


図-12 風荷重の変動成分

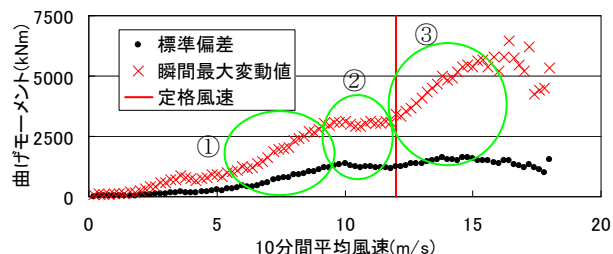


図-13 風荷重の変動成分の風速毎平均

転倒モーメントの瞬間最大変動値（最大瞬間値－10 分間平均値）は、10m/s 以下の風速ではかなりばらつき大きな値も出ている。風速 10m/s～定格風速の範囲では最大変動値が小さくなり、定格風速を超えると風速の増加とともに最大変動値も増加する。風速毎の平均でみると、大きく分けて 3 つの傾向が見られる。風車が発電を開始してから風速 10m/s までの範囲①では、風速の増加とともに風荷重の標準偏差、最大変動値ともに増加する。この風速域では、風車の発電量が風速とともに増大するばかりで、瞬間的にもピッチ制御が働かないものと考えられる。風速 10m/s～定格風速の範囲②では、風荷重の標準偏差、最大変動値ともに風速に関係なくほぼ一定となつて

いる。この風速域では、風速が高くなった時にはピッチ制御が働き風荷重の上限が抑えられることによって風荷重の変動が小さくなっているものと考えられる。定格風速を超える範囲③では、風荷重の標準偏差がほぼ一定であるにもかかわらず、最大変動値は風速とともに増加している。風速 15m/s をこえると最大変動値が増加しなくなるようであるが、この部分の計測データが少ないため明確なことはいえない。定格風速以上の風速域では常時ピッチ制御が働いている状態であるが、風速の下がった時にピッチ制御が解除され、ピッチ制御が働き始める瞬間に前章で示したような瞬間的に大きな風荷重が作用しているものと考えられる。瞬間的に大きな風荷重が作用する現象は定常的に発生しないことから、風荷重の標準偏差がほぼ一定であるにもかかわらず最大変動値が風速とともに増加している原因と考えられる。

図-14 に風車タワー脚部曲げモーメントのガスト影響係数とピークファクターを示す。算定するにあたっては、風速毎に平均した値を用いた。

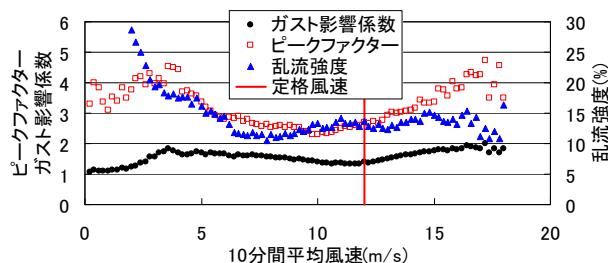


図-14 風荷重のガスト影響係数とピークファクター

ガスト影響係数は、風車運転開始風速付近から風速 10m/s 付近までは風速の増加とともに減少し、風速 10m/s から定格風速付近までは 1.3～1.4 の値で一定となり、定格風速以上では風速とともに増加し、風速 15m/s を超える風速では 2.0 程度となる。ピークファクターは風車運転開始風速付近から風速 10m/s 付近まで風速とともに減少するが、風速 10m/s 以上では風速とともに増加する傾向が見られる。風速 15m/s 以上では 4.0 を超え 5.0 に近い値となっている。

風車運転時の最大風荷重と乱流強度との相関について考察する。今までの考察から風車のピッチ制御の有無が最大風荷重の変動に関与していると考えられるため、ピッチ制御が働かない 10 分間平均風速が 6～10m/s で瞬間最大風速が 12m/s を越えないケース（定格風速未満）を図-15 に、ピッチ制御が働いている 10 分間平均風速が 12m/s 以上のケース（定格風速以上）を図-16 に示す。どちらの図も横軸が乱流強度であり縦軸が風車脚部の曲げモーメントの変動値である。

定格風速未満では、風荷重の標準偏差・最大変動値ともに乱れの強さに比例した傾向を示す。定格風速以上では標準偏差・最大変動値ともに乱流強度の増加とともに

大きくなっている傾向が見られるが定格風速未満ほど明確ではない。また、標準偏差の分布のまとまりに比較して最大変動値のばらつきが大きい。ピッチ制御の働く複雑な荷重状態に関しては、定格風速以下の状態とは異なった現象としてとらえるべきだと考えられる。定格風速以上の現象に対してピークファクター等による統計的な設計法を適用するためには更なるデータの蓄積が必要だと考えられる。

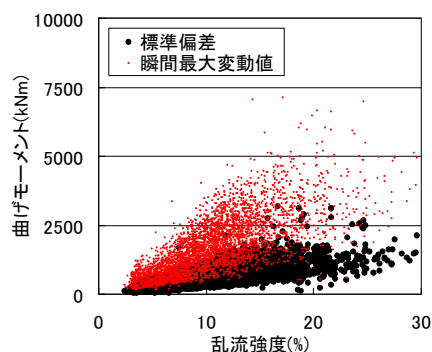


図-13 乱流強度と変動風荷重の相関
(定格風速未満)

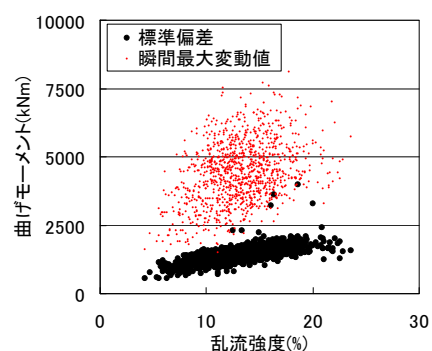


図-14 乱流強度と変動風荷重の相関
(定格風速以上)

5. おわりに

定格発電量 1.5MW の風力発電装置のタワーに作用する変動風荷重・風応答の実測結果について報告し、考察を行った。得られた知見を以下に記す。

- 1) 風車発電時のタワーに作用する平均風荷重は定格風速で最大となり、それ以上の風速では減少する。風荷重の最大瞬間値は、定格風速以上の風速でも減少しない。
- 2) 定格風速を超えた風速域では、ピッチ制御により風荷重の変動と風速の変動の傾向がほぼ逆になる。また、風速変動に対して風荷重の変動は少し遅れる。
- 3) 定格風速近傍の乱れを含む定格風速以上の強風時に風車運転時のピーク風荷重が大きくなる。
- 4) 定格風速を超える領域での風車運転時のピーク風荷重とタワーの振動応答の相関は小さく、風荷重に与えるタワーの振動応答の影響は小さいものと考えられる。

今後は実測結果に基づいて設計式を提案していきたい。

謝辞

風力発電設備の計測にあたって、珠洲風力開発（株）及び日本風力開発（株）に多大なご配慮をいただきました。計測の計画及び結果の考察にあたっては、日本風力開発（株）・宮城雄一氏及び（株）風力エネルギー研究所・鈴木章弘氏にご助言・ご助力をいただきました。また、計器の設置にあたっては、前田建設工業（株）北陸支店珠洲風力（作）の職員の方々にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) NEDO 新エネルギー開発部：日本における風力発電設備・導入状況，日本における風力発電の状況
<http://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/state/1-01.html>
- 2) 沖縄電力（株）：台風 14 号による風力発電設備の倒壊等事故調査報告について（概要）
<http://www.nisa.meti.go.jp/text/denanka/161125-1.pdf>
- 3) （株）ユーラスエナジー岩屋：岩屋ウィンドファーム発電所 11A 号風車倒壊事故報告（別紙）
<http://www.eurus-energy.com/data/20070316d.pdf>
- 4) 土木学会編著：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説，（社）土木学会，2007。
- 5) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構：日本型風力発電ガイドライン，(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構，2008。
- 6) 山本学，内藤幸雄，近藤宏二，大熊武司：実測に基づく風力発電コンクリートタワーの風応答特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 607 号，pp.45-52，2006。
- 7) 山本学，内藤幸雄，近藤宏二，大熊武司：実測による風力発電タワーの荷重特性と作用外力の推定，日本建築学会構造系論文集，第 617 号，pp.39-46，2007。
- 8) 山本学，近藤宏二，大熊武司：風車回転時の風力発電設備に作用する風力に関する風洞実験，日本建築学会構造系論文集，第 625 号，pp.375-382，2008。
- 9) 山本学，内藤幸雄，近藤宏二，桜庭和子：風力発電タワーの風荷重に関する実測，第 19 回風工学シンポジウム，pp.157-162，2006。
- 10) 石原孟，ファパンフック，高原影滋，銘荻壮宏：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，pp.175-180，2006。
- 11) 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，前田建設技術研究所報 Vol.50，2008。
- 12) JIS C 1400-1(IEC 61400-1) 風力発電システムー第 1 部：安全要件，2001