

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

丸山 勇祐 ・ 三輪 俊彦 ・ 齊藤 芳人

Field Measurement on Wind Loads of Wind Turbine Tower Located in Mountainous Area – Part 1 –

Yusuke MARUYAMA, Toshihiko MIWA, Yoshihito SAITOU



写真-1 計測対象風車の設置状況

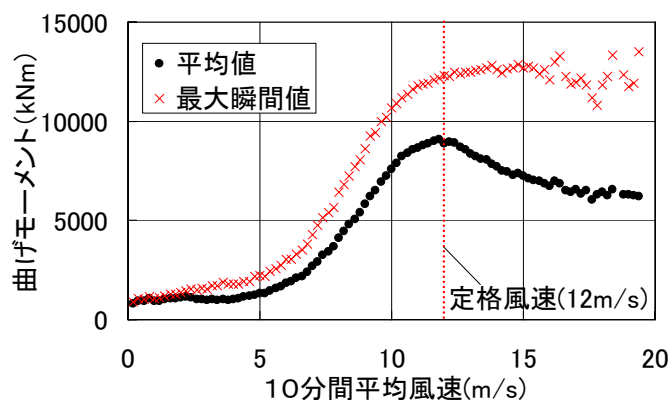


図-1 風車タワーに作用する風荷重

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いる。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され、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。計測項目は風車ナセル部における風向風速、風車タワー頂部の加速度および風車タワー中間部及び脚部におけるひずみである。これらの計測データを基に風車に作用する風荷重及びタワーの風応答を調査する。

技術の説明

風車に作用する風荷重(タワーに作用する曲げモーメント)は、風車回転時に大きく、ローター部分からの荷重(スラスト力)が支配的である。風車発電時の平均風荷重は定格風速のときに最大となるが、瞬間最大風荷重は定格風速以上ではほぼ一定となる。

風車の風応答においては、タワーの1次固有振動数成分とブレードの回転数成分が寄与している。ブレードの回転数の整数倍の成分も顕著に見られる。タワーの固有振動数とブレードの回転数の3倍が一致する共振現象はかなり低い風速で生じ、タワーに影響をほとんど与えない。風車タワーの減衰をRD法により評価してみたところ、風速・風車の状態等により変動することがわかった。

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およびタワーの風応答の実測を行った。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。風荷重の瞬間最大値は、定格風速以上の風速でも減少しない。
- ・ 風車回転時のタワーの振動応答には、タワーの固有振動数成分とブレードの回転数成分が大きく寄与する。
- ・ 風車タワーの減衰は、風車の運転状態・風速等により変化する。

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

丸 山 勇 祐 三 輪 俊 彦
斉 藤 芳 人

要 旨

近年、クリーンエネルギーとして風力発電設備の導入が急速に増加している。日本の風力発電の設備容量は2007年度末に約167万kWに達したが、国の2010年導入目標300万kW達成に向けてさらに加速的に導入が進むものと予想される。一方、宮古島や岩屋ウインドファームなど、風力発電設備の事故も数多く報告され、その耐風安全性の確保が緊急の課題となっている。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」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。

本報は、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結果のうち、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するものである。発電状態の風車タワーに作用する平均風荷重は定格風速でピークとなるが、瞬間最大風荷重は定格風速以上でほぼ一定となる。

キーワード 風力発電設備／実機計測／山間地／鋼製タワー／風荷重／風応答／減衰特性

目 次

- | | |
|----------|-------------|
| 1. はじめに | 4. 風応答特性 |
| 2. 計測の概要 | 5. タワーの減衰特性 |
| 3. 風荷重 | 6. おわりに |

FIELD MEASUREMENT ON WIND LOADS OF WIND TURBINE TOWER LOCATED IN MOUNTAINEOUS AREA – PART 1 -

Yusuke MARUYAMA Toshihiko MIWA
Yoshihito SAITOU

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. The capacity of wind power generation facilities reached about 1,670,000kW at the end of 2007 in Japan, and 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 built in mountainous area at Suzu, Noto Peninsula was carried out to investigate structural characteristics such as wind responses of a wind turbine tower, damping ratio and wind loads attacked a wind turbine. Average bending moment of wind turbine tower has a peak at the rated wind velocity, but momentary maximum one becomes nearly constant over the rated wind velocity in a state of generation.

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、2007 年度末の設備導入量は約 167 万kW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¹⁾」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²⁾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何例^{3)~8)}が報告されている。

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。本報では、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する。

2. 計測の概要

2.1 計測対象風車

計測は、珠洲第 1 風力発電所(石川県珠洲市)の風車で実施した。風車の設置場所は能登半島の先端に近い大谷峠と鞍坪岳(石川県珠洲市)の間の牧草地であり、標高約 300m の山間部に位置している。珠洲風力発電の位置を図-1 に示す。



図-1 実測風車の設置場所

珠洲第 1 風力発電所は GE 製 1.5MW 機 10 機で構成され、総設備容量 15MW のウインドファームである。風車の諸元は定格発電量 1.5MW (定格風速 12.0m/s) , ローター直径 70.5m, ハブ高さ 64.7m である。珠洲風力発電所全景と周辺山岳地の状況を写真-1 に、計測対象風車の外観を写真-2 に示す。



写真-1 珠洲風力発電所



写真-2 計測対象風車

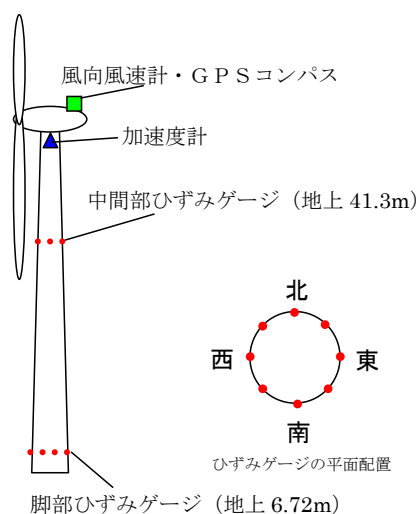


図-2 実風車の計測システム概要

2.2 計測の概要

図-2 に計測の概要を示す。風車タワーは鋼製円筒構造であり、タワートップ（ナセル下部）の高さは 63.1m である。地面から高さ 41.3m(タワー中間部)と 6.72m(タワー脚部)のタワー内面にひずみゲージを貼り付け、タワートップ部分には加速度計（3 方向）を設置した。また、ナセル上部には、風向風速計とナセルの向きを特定するための GPS コンパスを設置した。

タワー内に自動計測システムを設置し、0.1 秒（10Hz）間隔での連続計測を行っている。計測は 2007 年 5 月から開始し、現在も継続中である。ここでは 2007 年 12 月までの計測結果について報告する。

3. 風荷重

3.1 タワーに作用する曲げの算定

タワー壁面内側に 8 点ひずみゲージを設置しているが、ここではタワーの断面保持を仮定してひずみから曲げ応力を算定し、タワーに作用する曲げモーメントを求める。計測したひずみの分布を図-3 に示すような断面保持と仮定し、計測で得られた結果に近い断面形状を最小二乗法により求め、最大ひずみとその位置を算定する。ひずみ波形の実測波では、対角位置のひずみが対称な変動を示し、それぞれの成分が断面保持を仮定できるように分布しているのを確認している。

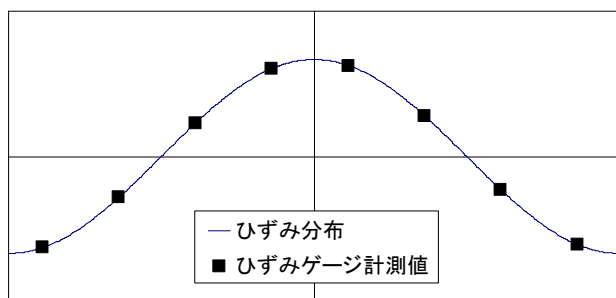


図-3 同一断面内のひずみの分布形状

上記手法で求めた断面内の最大ひずみから面内の最大曲げ応力を算定し、それに断面係数を乗ずることからタワーに作用している曲げモーメントを算定する。算定にあたっては、タワー部材のヤング係数を $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、タワー中間部の断面係数を $Z=0.077 \text{ m}^3$ （直径 2.66m、肉厚 14mm）、タワー脚部の断面係数を $Z=0.167 \text{ m}^3$ （直径 3.29m、肉厚 20mm）とした。

3.2 タワーに作用する曲げの実測結果

タワーに作用する曲げモーメントと風速の関係を、図-4（タワー中間部：地上 41.3m）および図-5（タワー脚部：地上 6.72m）に示す。図は、曲げモーメントの 10 分間平均値・10 分間の最大瞬間値（サンプリング 10Hz）と 10 分間平均風速の関係をプロットしている。

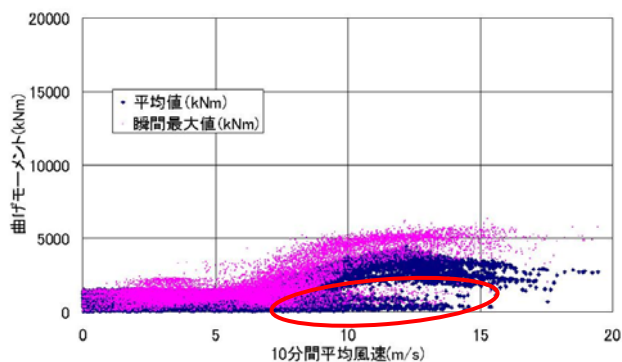


図-4 タワー中間部（地上 41.3m）の曲げモーメント

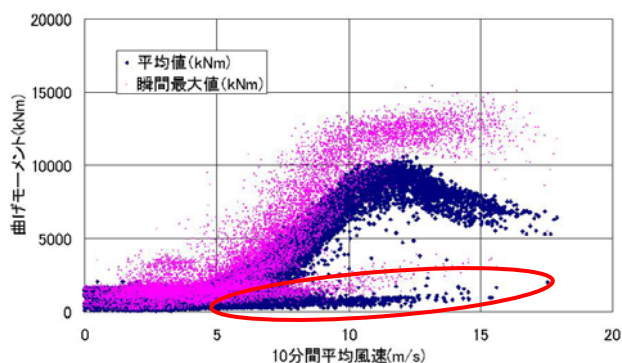


図-5 タワー脚部（地上 6.72m）の曲げモーメント

観測期間中カットアウト風速を超えるような風速がほとんど観測されていないことから、風速が 10m/s を超えているにもかかわらずほとんど曲げモーメントの発生していないデータ（図中の○囲み）は、メンテナンスなどによる風車停止時のデータであると考えられる。風車回転時と停止時の比較から、風車回転時の風荷重はローターからのスラスト力が支配的になっていることが分かる。

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。定格風速までは、風速の増加とともに発電出力も増加するが、定格風速より大きい風速では発電出力が一定となるように風車は制御される。一般に発電出力は風のエネルギー（風速の 3 乗に比例）に比例するが、発電出力を一定とするように制御運転されているため、本来であれば風速の 2 乗に比例するはずの風荷重（スラスト力）が、逆に風速の増加に伴って減少していると考えられる。

図-6 は風車回転時のタワー脚部の曲げモーメントについて、10 分間平均値と 10 分間の最大瞬間値（10Hz サンプリング値）の風速別アンサンブル平均を行った結果である。平均値は定格風速で最大となり、それ以上の風速では減少しているが、最大瞬間値に関しては風速が定格風速を超えてもほぼ一定の値を示している。曲げ荷重の変動成分は風の乱れによるタワーのパフェッティング振

動から生じていると考えられるが、風の乱れによって生じるバフティングは風速の増加とともに増大し風荷重の変動成分が大きくなるため、平均成分が減少しても平均成分と変動成分の和である瞬間値は下がらないものと考えられる。

図-7 は、アンサンブル平均で求めたタワー脚部曲げモーメントの最大瞬間値と平均値の比をガスト影響係数として表したものである。カットイン風速から定格風速までは徐々に小さくなるが、定格風速を超えると増加する。この傾向はカットアウト風速まで続くものと考えられる。

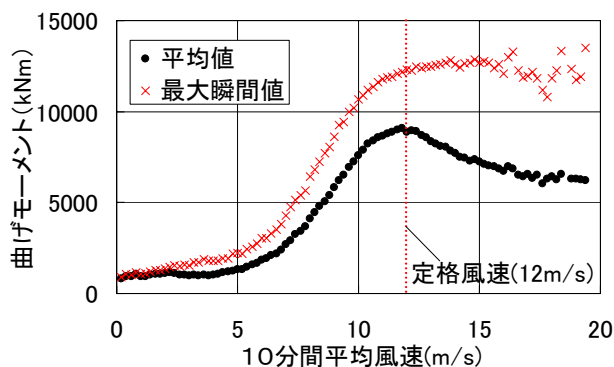


図-6 タワー脚部曲げのアンサンブル平均

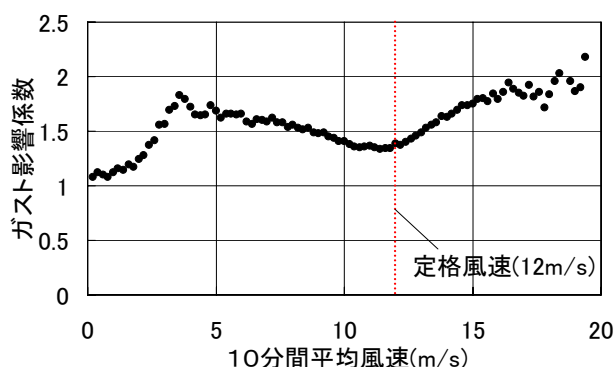


図-7 タワー風荷重のガスト影響係数

4. 風応答特性

4.1 発電停止時の風応答特性

風車メンテナンス時（フェザリング状態，ヨー制御稼働）のデータから，風車運転停止時のタワーの風応答特性を調べる。図-8 に運転停止時の時刻歴波形を示す。風速は定格風速(12m/s)近傍であり，風向はほぼ南である。図は風向風速および加速度応答の時刻歴である。風方向・風直交方向ともに一定周期の波が卓越して見られる。この周期が，タワーの1次固有周期だと考えられ，風直交方向に大きく出ている。

図-9 にこの加速度応答波形のパワースペクトル密度を示す。両方向ともに 0.39Hzのところに卓越したピークが見られるが，これがタワーの1次固有振動数である。風直交方向の 1.0Hz近傍に見られるピークは風車タワー後方

に形成される渦によるストローハル数成分と考えられる。他の鋭いピークは何らかの振動モードに起因するものと考えられる。風方向と風直交方向で異なってくるのは，ローター部分の質量バランスの違いによるものや，石原ら⁷⁾が報告している風車のブレードとタワーとの連成振動モードによる複雑な振動特性が出ているためと推察される。

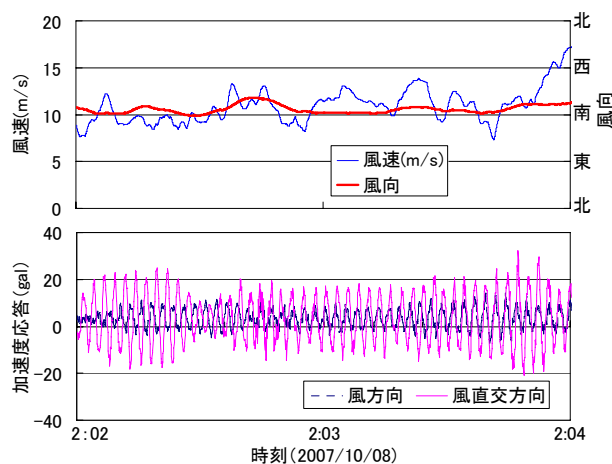


図-8 風車停止時の加速度応答時刻歴

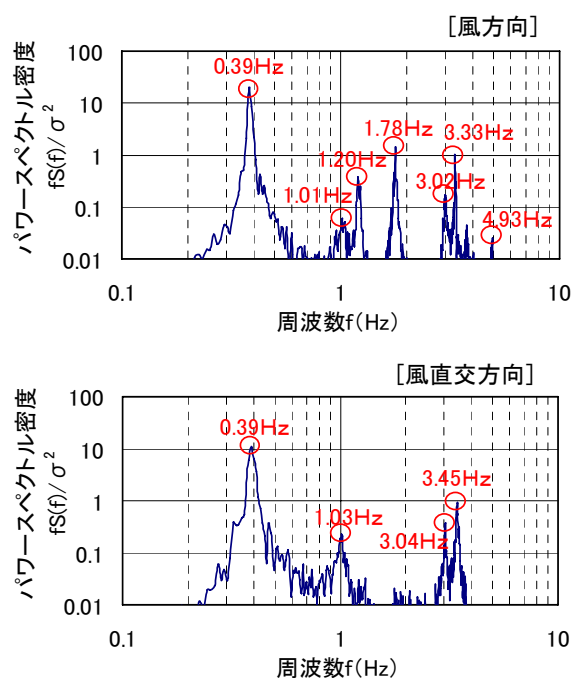


図-9 風応答のパワースペクトル（風車停止時）

4.2 定格風速発電時の風応答特性

図-10 に定格風速近傍で発電状態にある風車タワーの加速度応答の時刻歴波形を，図-11 にそのパワースペクトル密度を示す。風速は 10～15m/s であり，風向はほぼ東である。加速度応答波形には1次固有振動数(0.39Hz)より高周波の成分が見られるようになり，発電停止時より応答振幅が大きくなっている。パワースペクトル密度で見

られる 0.33Hz のピークは風車回転数（定格回転数 22.2rpm）に起因するものと考えられ、ブレードが3枚であるためその3倍の 1.0Hz 近傍にもピークが見られる。このピークは風方向で顕著に現れ、その整数倍の周波数にもピークが見られる。

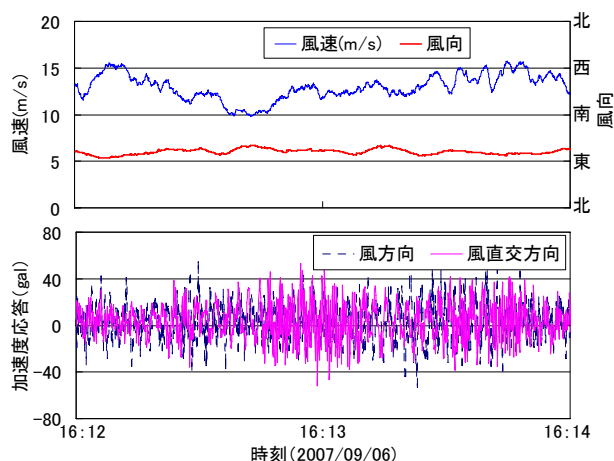


図-10 定格発電時の加速度応答時刻歴

られる。山本ら³⁾ が報告している風車タワーの1次固有振動数と風車回転数の3倍の値が一致する現象はさらに低い風速で生じることが予測され、風車に作用する風荷重としての影響は小さいと考えられる。風車回転数のピークは風方向に顕著で、0.6Hzの整数倍にピークがある。

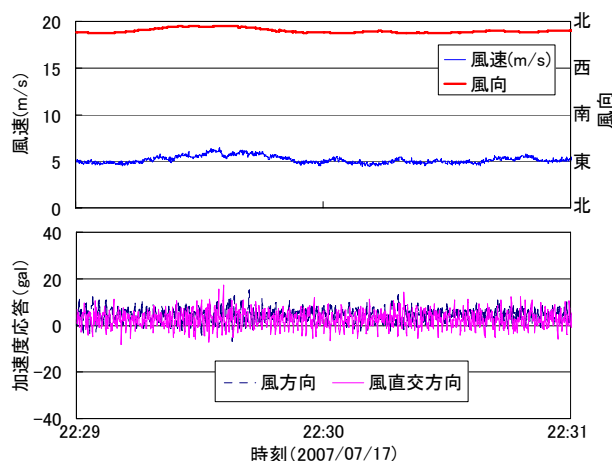


図-12 低風速発電時の加速度応答時刻歴

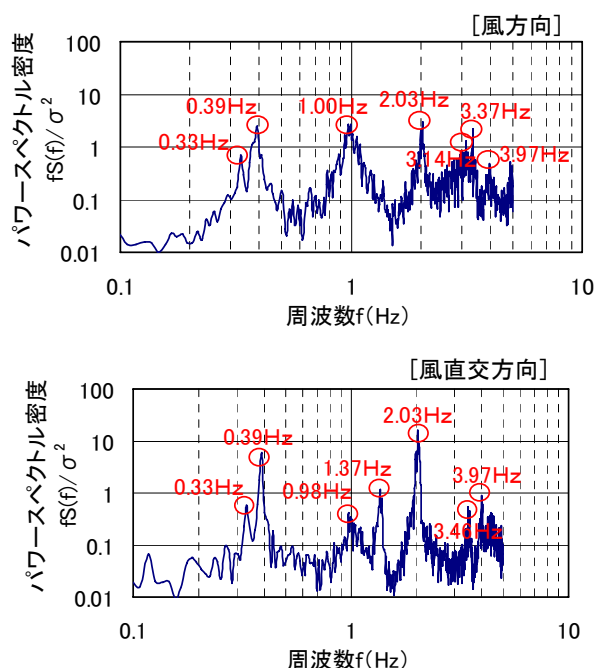


図-11 風応答のパワースペクトル（定格発電時）

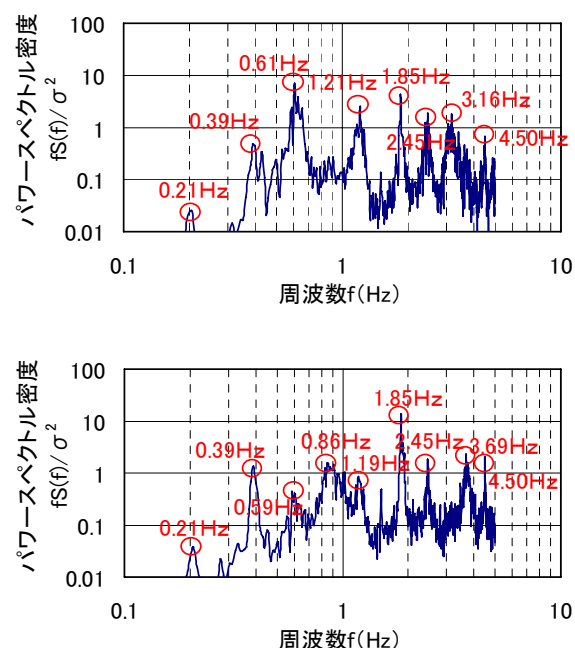


図-13 風応答のパワースペクトル（低風速発電時）

4.3 低風速発電時の風応答

定格風速より低い風速で発電状態にある風車タワーの加速度応答の時刻歴波形を図-12に、そのパワースペクトル密度を図-13に示す。風速は約 5m/sであり、風向はほぼ北である。加速度応答波形には1次固有振動数より高周波の成分が見られる。パワースペクトル密度には、定格風速時において、0.33Hz・1.0Hzに見られていたピークが回転数が下がったことにより 0.2Hz・0.6Hz付近に見

5. タワーの減衰特性

長期間の計測データを基に、RD法⁹⁾により風車タワーの構造減衰定数を算定する。加速度波形を 100 秒（40 波）毎に分割し、0.33Hz～0.5Hzのバンドパスフィルターを通した後、波形の最初の極大値から波形を重ね合わせるによりRD法を実行する。風車の運転状態、風速（振動振幅）によって減衰が変わることが考えられるため、100 秒間の平均風速が 2m/s以下、2～5m/s、5～10m/s、

10m/s以上（風車運転時），10m/s以上（風車静止時）の5種類に分けてRD法を実行した結果を図-14に示す。それぞれのケースの波形の重ね合わせ回数も図の下に記す。

低風速時には減衰定数が0.5%程度であるが，風速の上昇とともに風車が回転すると減衰が下がり定格風速（風速10m/s以上）付近では0.4%となっている。風の強い状態で風車が運転していない場合には減衰定数が0.8%となる。

風速10m/s以上で風車運転時には，風車回転数が4章で示したように0.33Hz近傍となり，バンドパスフィルタでの除去が困難となるためビートを打ったような波形となっている。ビートの周期は約16秒であり，風車固有振動数0.39Hzと風車回転数0.33Hzの差（0.06Hz）の逆数となっている。

風車回転時には空力減衰が作用して減衰が大きくなると思っていたが，風車回転時には減衰が小さくなっている。空力減衰は風車の速度応答に比例するものであるためRD法ではランダム成分として除去されたのではないかと考えられる。風車運転停止時には減衰定数が0.8%となっているので，暴風時の設計用に構造減衰定数0.8%（土木学会指針・増速機付き風車の減衰）を用いるのは妥当と考えられる。

6. おわりに

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およびタワーの風応答の計測を行った。得られた知見を以下に記す。

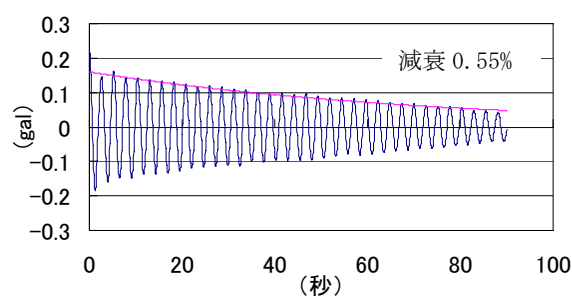
- 1) 風車発電時のタワーに作用する平均風荷重は定格風速で最大となり，それ以上の風速では減少する。風荷重の瞬間最大値は，定格風速以上の風速でも減少しない。
- 2) 風車回転時のタワーの応答には，タワーの固有周期成分とブレードの回転数成分が大きく寄与することが明らかになった。
- 3) 風車タワーの構造減衰は，風車の運転状態・風速等により変化することがわかった。

今回の計測では，カットアウト風速より高い風速のデータが取得されていない。さらに計測を続け，暴風時のデータについても考察を進める予定である。また，風車の構造減衰については不明な点が多く出てきたため，さらに詳細な検討が必要であると考えられる。

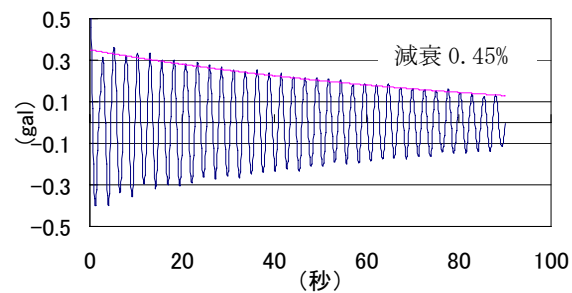
現在，タワーの計測と並行して風車基礎のアンカーボルト及び鉄筋の計測を開始している。この結果についても改めて報告する予定である。

謝辞

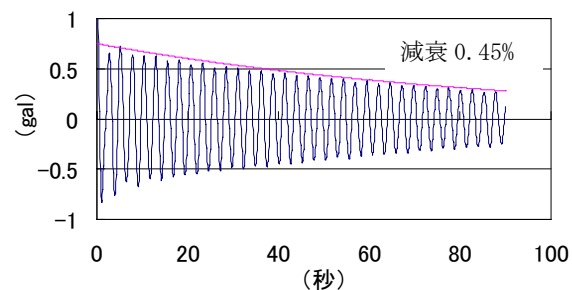
風力発電設備の計測にあたって，珠洲風力開発（株）及び日本風力開発（株）に多大なご配慮をいただきました。計測の計画及び結果の考察にあたっては，日本風力



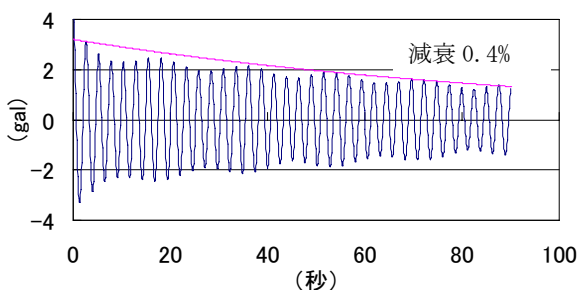
（風速 2m/s 以下：重ねせ 8446 回）



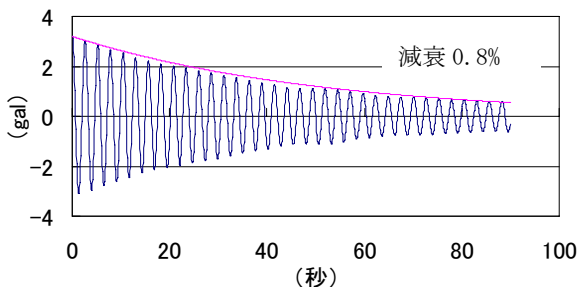
（風速 2~5m/s：重ねせ 32718 回）



（風速 5~10m/s：重ねせ 46020 回）



（風速 10m/s 以上運転時：重ねせ 12805 回）



（風速 10m/s 以上静止時：重ねせ 1069 回）

図-14 RD法による減衰波形

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) 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.
- 2) (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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 石原孟，ファバンフック，高原影滋，銘荏壮宏：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.
- 8) ファバンフック，石原孟，ルウンヴァンビン，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，pp.181-186，2006.
- 9) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会構造系論文集，第 454 号，pp.29-38，1993.