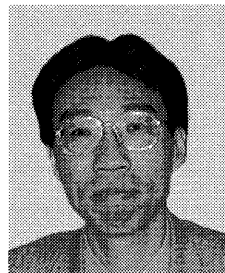


[シリーズ：どこまで行くのか、風力?] ⑩

# 風車の耐風設計技術



石原 孟\*

## 1. はじめに

近年新エネルギーの導入促進により風力発電設備がかなりのスピードで増えつつきている。わが国の風力発電の導入量は平成16年度末に94万kW、設置された風車の総数も924基に達した。また風車の規模も年々増大し、2000kWクラスの風車はブレードの先端までの高さが120mにも達し、30階建ての建物の高さに匹敵する。風車の大型化は風車の発電効率とコストなどを考えた場合に、その増大傾向は今後も続く予想される。その一方で、日本特有の気象や地形条件により、強風による風車の被害が多数報告されている<sup>(1)</sup>。

本稿では、近年わが国で発生した台風による風車の被害例を紹介し、現地調査の結果に基づき、被害原因を分析すると共に、風車の耐風設計の問題点を明らかにする。そして、風車の耐風設計技術の現状を説明し、これらの技術を活用した事例を紹介すると共に、風車の耐風設計技術の今後を展望する。なお、本稿は暴風時における風車の耐風設計技術に焦点を当て、風車稼働時の耐風設計技術は割愛させて頂きたい。

## 2. 風車の台風被害

風車の耐風設計技術を説明する前に、まず風車の台風被害例を紹介し、風車の耐風設計の問題点とそれに係わる技術課題を考える<sup>(2)(3)</sup>。

わが国における代表的な台風被害としては、1999年台風18号による鹿児島県笠沙町での風車タワーの座屈、2002年台風16号による沖縄県宮古島での風車基礎の崩壊、2003年台風14号による沖縄県宮古島での風車タワーの座屈、基礎の崩壊、ブレードの破損、2004年台風16号による高知県梶原町と大豊町の風車の破損と基礎の割裂などが挙げられる。

図1には2003年台風14号による沖縄県宮古島での風車被害の例を示す。風力発電機は島の北端の平良市狩俣に4基、南東部の城辺町七又に2基、南部の上野村新里に1基の、計7基であった。これらの風車は台風14号により倒壊または被害を受け、全て運転不能の状態となった。風力発電機の破損箇所もブレード、ナセル、タワー、基礎、ヨー制御機構、ピッチ制御機構と多岐にわたっている。

代表的な被害としては狩俣にある3号機と5号機の座屈倒壊である。3号と5号機は本体・タワー・基礎全て同じ設計のストール制御の風車であるが、破壊形態が異なる。両者の倒壊方向はほぼ同じ(南南西)であるが、ローターの向きが異なる。3号機は倒壊後のローターが上向

\* 東京大学大学院 工学系研究科  
E-mail : ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp  
原稿受付日 平成17年12月14日

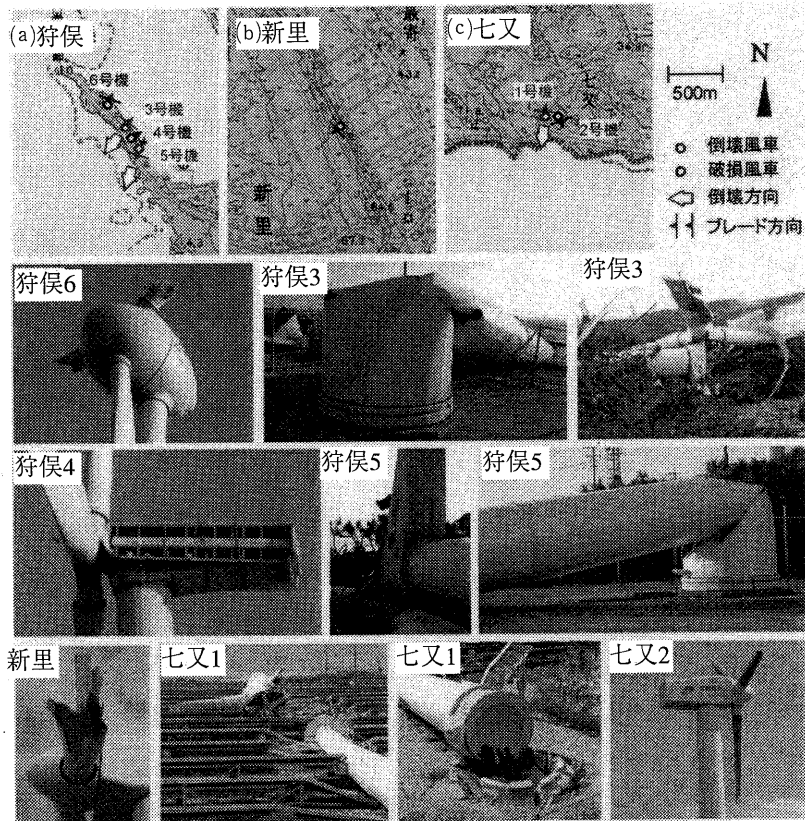


図1 台風14号により沖縄県宮古島での風車被害の状況<sup>(2)</sup>

きになっていることから、倒壊前の3号機のローターは北北東を向いていたと推定される。一方、5号機のローターは下向きになっていることから、5号機は倒壊前はローターが南南西を向いていたと推定される。当日台風接近時の風向がほぼ北であったことを考えると、ストール制御である3号機と5号機のローターは東の方向を向いて、風を逃がす状態で停止されるべきである。現地調査からは風車のヨー・ブレーキが台風時にすべったことで、3号～5号機のローターが北北東または南南西を向いたことにより、風車に大きな風荷重が作用したことが分かった。

一方、城辺町七又にある1号機は基礎が破壊され倒壊している。タワーを基礎に固定するためのアンカー部分は丸ごと基礎から引き抜けていた。七又1号機はピッチ制御の風車であり、台風時にはブレードのピッチを変えてフェザリ

ングの状態となり、風荷重を小さくするように設計されていたが、現地調査から2本のブレードがフェザリングの状態になっていなかったことが分かった。これにより台風時に風力発電機に大きな風荷重を作用し、基礎が破壊に至ったと推定された。更に上野村新里にある宮古土地改良事業のピッチ制御の風車は全てのブレードが中程で折損しており、一部のブレードは300m離れた地点まで飛散した。この風車は1枚のブレードが正常なピッチ角と正反対のピッチ角になっており、暴風時にピッチ制御機構が破損したと推定される。

台風14号時には島のほぼ全域が停電し、風車の制御が不能になったことが被害を拡大させた一因と考えられる。しかし、台風時の停電は一般に発生することであり、バックアップ電源のない風車に関してはあらゆる風向から吹いてくる風に対して耐風安全性を確保する必要がある。

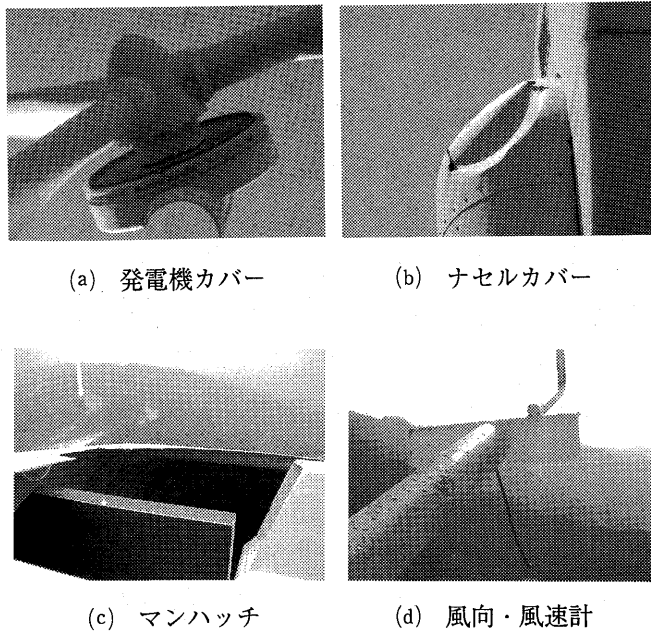


図2 台風16号による大豊町での風車被害の状況

図2には2004年台風16号による大豊町での風車被害の状況を示す。ハブ、ナセル、発電機のカバーなどの非構造部材が大きな被害を受けたことが特徴である。大豊町の風力発電所には2基の風車があり、1号機の被害としては風向・風速計の破壊・飛散の他、発電機カバーの亀裂とハブカバーの一部損傷が発生したが、損傷の度合いが比較的軽い。一方、同じタイプの2号機は風向・風速計の破壊・飛散の他、発電機カバーが大破し、発電機のコイルも損傷を受け使用不能となった。またマンハッチ部分が破損・飛散し、ナセルカバーも飛来物の衝突により陥没している。大豊町の風力発電設備は全く同じタイプの風車であるが、被害状況は2基の風車が共通している部分と大きく異なる部分がある。

まず、風車発電機に取り付けられている風向・風速計は2基とも暴風により破壊され、飛散した。風向・風速計の耐風性が不十分であった可能性がある。一方、発電機カバーについては1号機の被害が軽微であったのに対して、同じタイプの2号機は発電機カバーが大破した。

表1 風車の台風被害

損傷部位	損傷状態
風向・風速計	飛散
ハブカバー	破損
ナセルカバー	破損・亀裂
ブレード	折損
ピッチ制御機構	破損
ヨー・ブレーキ	滑り
タワー	座屈
基礎	コーン破壊・亀裂

2基の風車はほぼ同じような地形の上に隣接して建設されていたことを考えると、風速に大きな差が生じたと考えにくい。また発電機カバーの設計も同じであることから、発電機カバーの損傷原因は別にあると推定される。現地調査から、マンハッチ飛散がナセルカバーの一部陥没の原因になっている可能性があることが推定された。すなわち、飛散したマンハッチがナセルに当たり、カバーの一部を陥没させた。また2号機のマンハッチが破損したことにより、発電機内部の圧力変動が1号機より増大し、結果的に発電機カバーに作用する風力が増大し、大破に至ったと推定される。

風車に取り付けられている風向・風速計は極値風以下の風速で破損すると、風車の制御が不可能となり、その結果、設計時に考慮していない大きな風荷重が風車に作用する可能性があり、またナセルカバーの損傷により、内部にある発電機の大きな損傷をもたらす可能性がある。従って、風車の耐風設計を行う際には、風向・風速計やナセルカバーなどの非構造部材の耐風強度を十分に考慮する必要がある。

表1はこれまでの風車の台風被害を整理したものであり、その被害原因は強度不足によるものがあれば、想定外の風荷重が作用したことによるものもある。いずれのケースも以下に紹介する風車の耐風設計技術によりそのメカニズムを明らかにすることができ、またこれらの技術

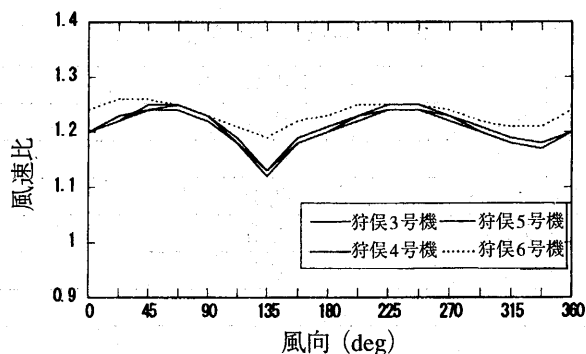


図3 狩俣サイトでの風速比の風向による変化

を応用すれば、台風による風車の被害を低減することが可能である。

### 3. 風車の耐風設計技術とその適用例

風車の台風による被害例と風車の耐風設計の問題点を検討してきたが、本章ではこれらの問題を解決するための耐風設計技術を紹介する。

風車は風のエネルギーを利用する発電機械であると同時に、土木・建築構造物と同様に50年に一度吹く極値風に耐えなければならない構造物でもある。風車を発電機械として考えた時の耐風設計基準は国際規格IEC61400-1<sup>(4)</sup>と国際認証機関GL(Germanischer Lloyd)のガイドライン<sup>(5)</sup>がある。一方、風車を建設する際の耐風設計基準としては建築基準法<sup>(6)</sup>が挙げられる。風車の耐風安全性を考える際には風車の製造と建設の両面から検討する必要がある。以下、風車の製造及び建設に関わる耐風設計技術を紹介する。

#### 3-1 風車設置地点での風速評価技術

風車を建設する際に設置地点での設計風速の評価を誤ると、台風時に大きな被害を受ける可能性がある。風車は風況のよい地点に建設され、台風時には周辺地域よりも強い風が吹くことが多い。風速が大きくなる要因としては地形や地表面粗度の変化による増速効果が挙げられ、3次元気流解析によりその値を正確に評価することが可能である。

図3には3次元気流解析ソフトMASCOTに

より風車倒壊地点(狩俣サイト)での増速効果<sup>(7)</sup>を求めた例を示す。ここで、風速の増速効果は風速比(気流解析から得られた風車ハブ高さの平均風速と平坦な地形上高さ13.5mの平均風速との比)で表す。図3からはいずれの風向も風速比が1より大きく、1.25に達した風向もあることが分かる。ちなみに、この地点に建築基準法(粗度区分Ⅱ)の高さ補正式を適用し求めた風速比は狩俣3、4、5号機(36m)の場合は1.16である。気流解析により求められた風速比より小さく、増速効果が過小評価されていることが分かる。これは狩俣サイトが海に囲まれているため(図2(a))、陸よりも海として設計風速を評価する必要があることを示唆している。

風圧力は風速の2乗に比例しているため、風速の評価精度は風荷重の評価精度に大きな影響を与え、設計風速を求める際には精度の高い評価方法を採用することが望ましい。

#### 3-2 風車に作用する風荷重の評価技術

風車は一般構造物と異なり、暴風時にも完全に静止せず、ゆっくりと遊転している。また風車はトップヘビイであり、振動しやすい構造となっているため、風応答を評価する際に空力減衰の考慮が不可欠である。ここで、風応答予測ソフトCASTにより400kWストール制御の風車に作用する風荷重を評価し、現地観測結果と比較した例を紹介する<sup>(8)</sup>。

図4には対象風車と計測機器の設置位置を示す。ナセルの上には風向・風速計、タワー頂部には応答加速度計、タワー脚部には動歪みゲージを設置した。応答加速度の観測データから風車の固有振動数、構造減衰を算出すると共に、動歪みの観測データからタワー基部における曲げモーメントを求めた。

表2には固有振動数の観測値と固有値解析の結果との比較を示す。表中の「ブレード」はブレードのみのモデル、「タワー」はブレード、

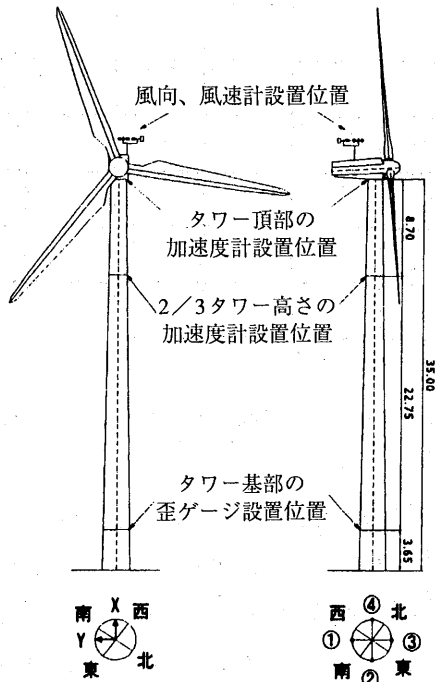
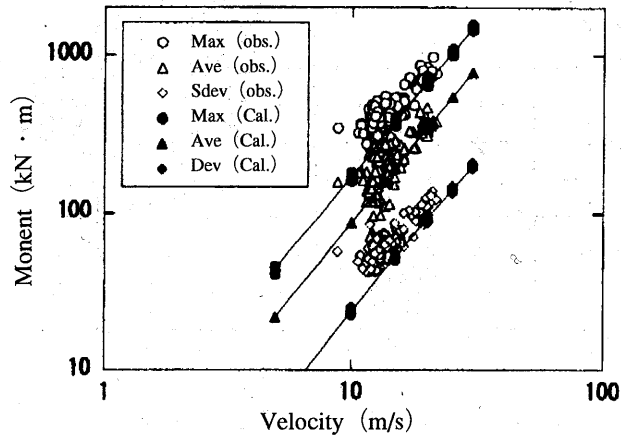


図4 対象風車と計測機器の設置位置

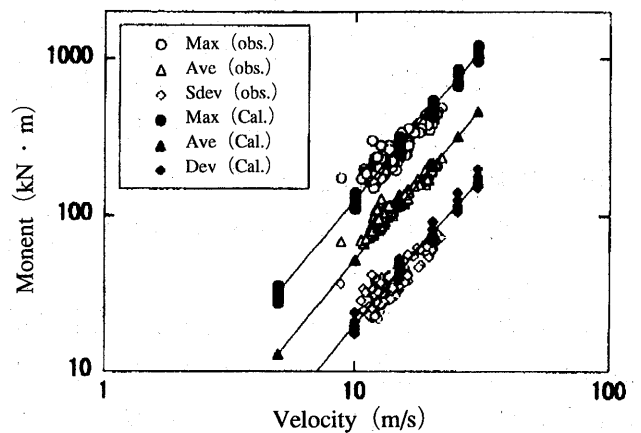
表2 固有振動数の観測値と予測値との比較

No	観測 (Hz)	固有値解析の結果 (Hz)		
		ブレード	タワー	風車全体
1	0.81	2.575	0.854	0.81
2	0.81	6.187	0.854	0.81
3	2.43	—	6.938	2.41
4	2.43	—	6.938	2.53
5	2.43	—	—	2.62
6	4.62	—	—	4.51
7	5.58	—	—	5.26
8	5.58	—	—	5.73
9	6.42	—	—	6.21
10	6.85	—	—	6.35

ハブ、ナセルをタワー頂部の集中質量として簡略化したタワーモデル、「風車全体」はブレード、ハブ、ナセル、タワーの構造諸元を正確に評価したモデルである。表2から分かるように、観測から得られた1、2次また9、10次モードはタワーの1、2次と3、4次モードに対応し、観測の3、4、5次モードはブレードの1次モードに対応している。また、風車モデルは風車の各部分を詳細にモデル化したことによ



(a) ナセル方向



(b) ナセル直角方向

図5 タワー基部における転倒曲げモーメント

り、観測された風車のすべての振動数を精度よく再現できた。一方、簡略したタワーモデルを用いる場合に、風車タワーの1次固有振動数を約5%過大評価することが分かる。

図5には風応答解析により得られたタワー基部における曲げモーメントの最大値、平均値、標準偏差と観測値の比較結果を示す。解析では風車全体の多質点モデルを用い、風応答の時刻歴を求めた。タワーの抗力係数については0.6を採用し、ナセルの抗力係数と揚力係数は実験値<sup>(9)</sup>を採用した。また、ブレードの各断面における抗力と揚力係数は翼厚比12%と21%の翼断面の空気力係数から内挿して求めた。各風速レベルでの風応答を評価するために、ハブ高さの平

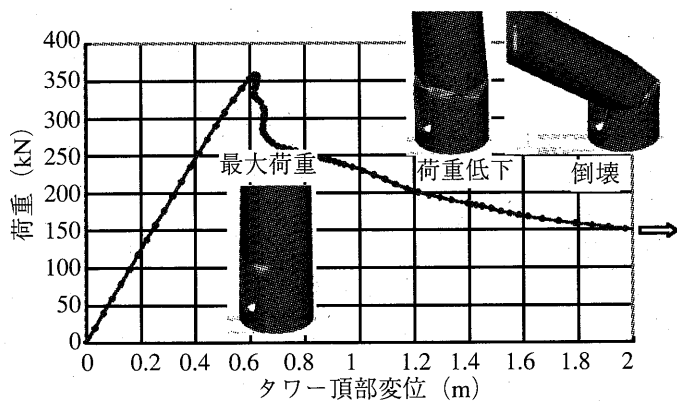


図6 荷重とタワー頂部変位との関係

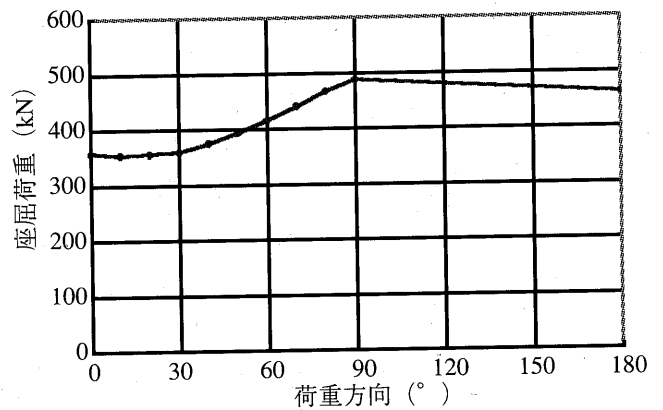


図7 タワーの座屈強度と開口方向との関係

均風速は5、10、15、20、25、30m/sを変化させ、北風の時の解析を行い、観測結果との比較を行った。この解析ではそれぞれの風速に対して6つの自然風を発生し、風応答を求めた。各風速レベルにおいては予測された曲げモーメントの最大値、平均値、標準偏差が観測値とよく一致することが分かる。

この例から、変動風、空気力係数、風車の構造諸元と振動特性を正しくモデル化すれば、風車に作用する風荷重を正確に評価することが可能であることが分かる。

### 3-3 風車タワーの強度評価技術

風車タワーの断面形状が円形であり、その強度は理論式により評価することができる。しかし、タワー基部付近にある開口部は3次元的な形状となっているため、その応力分布は複雑である。また風荷重が作用する方向により、強度も変化する。第2章に紹介した台風14号による宮古島の風車被害の例では同じ仕様の3基の風車は2基が座屈倒壊し、1基が生き残っていた。各風車に作用する風荷重が異なっていることや開口部の方向も関係していることが事故調査から分かっている<sup>(3)</sup>。

図6には弾塑性大変形を考慮できる有限要素解析により求めた荷重とタワー頂部変位との関係を示す。タワー頂部変位は荷重が小さい時に、荷重の増加と共に線形的に大きくなるが、

タワー頂部の変位がある値を超えると、荷重が急激に低下し、座屈が発生する。座屈時の塑性域は開口部上端に集中していることが図6からはっきりと分かる。図7にはタワーの座屈強度と開口方向との関係を示す。タワー下部にある開口部が風下に面している場合に座屈強度が低くなることが分かる。

## 4. 今後の展望

以上のように計算機を利用した耐風設計技術とその活用事例を中心に紹介した。現状では風車の耐風設計は風洞実験と数値解析が複合的に用いられているが、10年後には高性能な並列計算機の普及に伴い、より汎用性の高い流体・構造の連成解析が実現され、台風時や複雑地形上の大気乱流中における風車の3次元挙動をリアルタイムでシミュレートすることが可能になると期待している。

風車の耐風設計のための解析技術だけではなく、風荷重を低減するためのより効果的な制御技術も開発されるであろう。SmartYawシステム<sup>(4)</sup>はその一つの例である。SmartYawシステムは風車の待機姿勢を風下側に変更することにより、風見鶏効果でヨー制御を行う。ローターに作用する風荷重をヨーの駆動力として使うので、停電中でも有効である。また最近ではダウンウィンドローター<sup>(5)</sup>を利用した2000kWの大型

風力発電システムが開発され、停電時や暴風待機時に風を受け流すことにより、より高い耐風安全性が期待される。また風に耐えるための「耐風」技術だけではなく、風をうまく利用して風車の振動を低減する制御技術の開発も期待されている<sup>(12)</sup>。

日本は台風の多い国であり、また多くの台風被害を経験している。台風被害の教訓を生かし開発された日本の耐風設計技術を台風、ハリケーン、サイクロンの被害を受けている他の国と地域に適用することにより、強風による風車の被害を減らし、風力発電設備利用率の向上に貢献すると期待している。

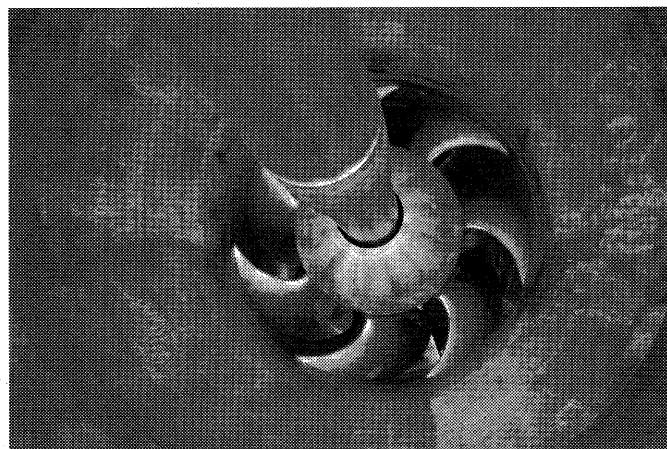
#### <参考文献>

- (1) NEDO技術開発機構：平成16年度風力発電利用率向上調査委員会及び故障・事故調査分科報告書，2005。
- (2) 石原孟・山口敦・藤野陽三：2003年台風14号による風力発電設備の被害とシミュレーションによる強風の推定，土木学会誌，Vol.88，pp.45-48，2003。
- (3) 高原景滋・銘苅壮宏・新城文博・石原孟・松浦真一：台風14号（マエミー）による宮古島の風力発電設備倒壊

- 等事故について，風力エネルギー，Vol.28，No.4，pp.40-47，2004。
- (4) IEC61400-1: Wind turbine generator systems Part1 : Safety requirements, 1999, 2003, 2005.
- (5) Germanischer Lloyd, Rules and Guidelines IV, Industrial Services 1, Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2003.
- (6) 2001年版建築物の構造関係技術基準解説書，工学図書株式会社，2001。
- (7) 石原孟・山口敦・高原景滋・銘苅壮宏・新城文博：風洞実験と気流解析に基づく台風0314号の最大風速の推定，構造工学論文集，Vol.51A，pp.911-920，2005。
- (8) 石原孟，ファバンフック，高原景滋，銘苅壮宏：実風車における現地観測と風応答解析，第27回風力エネルギー利用シンポジウム論文集，pp.153-156，2005。
- (9) 嶋田健司・野田博・石原孟：風力発電機ナセルの耐風設計に関する風洞実験，その1，風力実験，日本風工会誌，Vol.30，No.2，pp. 251-252，2005。
- (10) 柴田昌明・林義之：設計荷重低減のための新コンセプト，第25回風力エネルギー利用シンポジウム論文集，pp.225-227，2003。
- (11) 富士重工業(株)，パンフレット，2000kW大型風力発電システム，SUBARU80/2.0，2005。
- (12) 上田悦紀・高田泰之・外蘭茂・柴田昌明：大型風車MWT92/2.4の開発，第26回風力エネルギー利用シンポジウム論文集，pp.175-178，2004。

#### [表紙写真説明]

### フローノイズシミュレータ(低騒音回流水槽)用送水ポンプ



供試体（船舶および機器）の流動、騒音試験のために用いるフローノイズシミュレータの開発を実施し2005年3月に完成した。本送水ポンプでは低騒音化が大きな技術課題であったが、様々な設計コンセプト（前進レイキ、前進スキューインペラ、上流デイスティオン低減管路他）を適用することにより世界最高レベルの低騒音ポンプを開発した。

- 外形寸法：4,300mm、インペラ枚数7枚、  
ディフューザ枚数9枚
- 回転数：71rpm、最大流量 60m<sup>3</sup>/s、揚程 3.6m

(提供：防衛庁技術研究本部第一研究所、三菱重工業(株))

表紙用写真を募集しています。

掲載期間は1月～12月の1年間です。受付は常時受付けております。適切なものがありましたら御提供下さい。年度毎の採択は10月の定例理事会で行います。連絡、問い合わせ先：TEL03-3944-8002（編集理事委員会）