

1 MW 風力発電装置の開発

Development of 1 000kW Wind Turbine

原動機事業本部 高 塚 汎^{*1}
 長崎造船所 長 田 勇^{*2} 加 藤 英 司^{*3}
 技 術 本 部 柴 田 昌 明^{*4}

風力発電は環境に優しい再生可能な風のエネルギーを利用した発電システムとして急速に普及しており、単機出力も年々増大する傾向にある。海外市場では500～600 kW級の風車が主流を占めており、さらには1 MW以上の機器も開発及び実用化が行われている。当社においても1999年1 MW機を開発し、室蘭市祝津風力発電所向けに初号機を納入した。本風車の主な特徴を以下に示す。(1)新材料・新構造を採用して高剛性でありながら軽量・大型化を実現した26.8 m長大翼、(2)空力騒音を低減する新技術や防振技術により音響パワーレベルが99 dBAの低騒音化を実現、(3)室蘭市祝津風力発電所における運転実績や実証試験により計画どおりの性能・信頼性が得られていることを検証。

Wind turbines are widely used to generate electricity commercially. Output per turbine generator tends to increase over time, with 500kW to 600kW wind turbines most widely used overseas. Mitsubishi has developed the MWT-1000, first installed in Muroran. This new turbine features (1) a strong, large, light 26.8m blade; (2) a very low noise level of 99 dBA using new blade noise reduction and isolated gear and generator mounting; and (3) confirmed excellent efficiency and reliability based on data from operation and evaluation tests for the Muroran unit.

1. ま え が き

風力発電は環境に優しい再生可能な風のエネルギーを利用した発電システムとして、世界各地で建設されている。

1999年1月現在、世界で約9 200 MWの風力発電設備が建設されており、2000年には14 000 MW、2002年には21 000 MWの風力発電設備が建設されると予想されている。

その中であって、土地の有効利用から、風車技術の進歩と共に発電装置の大型化が図られ、現在では単機出力500～600 kWの機器が主流を占めており、さらには1 MW以上の機器も開発及び実用化が行われている。当社においても1999年に1 MW機を開発し、室蘭市祝津風力発電所向けに納入した。

以下に、1 MW風力発電装置の開発の経緯や技術的特徴並びに室蘭市祝津風力発電所向け初号機の運転実績について紹介する。

2. 三菱重工における風力発電装置の開発

三菱重工では、1980年に試験用の40 kW小型風力発電装置を長崎造船所香焼工場に建設して以来、段階的に大型機の実用化へ向けた開発を進めてきた。1982年に九州電力(株)沖永良部島向けに初の商用300 kW機を納入し、その運転を通して多くの知見、ノウハウを得、その後、多量生産型商用機としてFRP翼アップウインド方式の250 kW風力発電装置を開発した。この風力発電装置はMWT-250の型式で現在までに800台以上製作されている。特に米国カリフォルニア州テハチャピの660台は同一機種風のウインドファームとして世界最大を誇る。1991年には新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の大型風力発電システムの開発がスタートした。本開発で当社は500 kW風力発電装置の設計から建設までを担当、1996年10月に青森県竜飛岬に完成し、その後の運転研究により複雑地形における風車の性能・信頼性の検証を行った。一方、MWT-250の後継となる量産機MWT-450については、1996年1月に初号機をドイツのウインクラ社向けに納入した。こ

の風車は、設計手法の確かさを証明する型式認定機関ジャーマンシュエロイドの型式認定を、ヨーロッパメーカ以外で初めて取得した。この設計手法を用いて、海外でのさらなる単機容量アップのニーズに対応するため、1998年に600 kWクラスのMWT-600の開発を行い、1999年米国に131台を納入し現在商用運転を行っている。

ヨーロッパ競合他社が1 MW以上の大型風車の実用化を推進している中、三菱重工でも1998年に1 MW風車の本格的開発に着手し、国内初の1 MW風車を1999年3月に納入し4月より順調に運転を行っている。

3. MWT-1000の特徴及び構造

3.1 基本仕様及び主な特徴

当社では250～600 kW機を現在までに国内外で1 000台以上納入した実績がある。

これらの運転実績を基に今回開発したMWT-1000は、高性能・低騒音化を行い、日本国内特有の風速変動の激しい風況に対しても信頼性の高い風車となるよう設計を行っている。

MWT-1000の基本仕様を表1に示す。また、図1に室蘭市祝津風力発電所に建設されたMWT-500(490 kW)機及びMWT-1000(1 MW)機を示す。ロータは3枚のGFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)翼で構成され、ロータ直径は56 mである。アップウインド型^{*1}で定格風速は13 m/s、カットイン風速^{*2}、カットアウト風速^{*3}はそれぞれ3 m/s、24 m/sである。また、ロータ回転数は21/14 rpmの2速制御方式としている。出力制御方式は可変ピッチ制御であり、ロータヘッド内の油圧シリンダにより風速に応じて翼ピッチ角を最適制御する。風力エネルギーは翼からロータヘッド、主軸、増速機、フレキシブルカップリングを経て発電機に伝達される。また、発電機は誘導発電機で、系統連系はソフトスタート方式^{*4}を採用し突入電流の抑制を行っている。なお、MWT-1000の主な技術的特徴を以下に示す。

*1 エネルギーシステム技術部主管

*3 風力・船用機械設計部風車プロジェクト室

三菱重工技報 Vol. 37 No. 1 (2000-1)

*2 風力・船用機械設計部風車プロジェクト室主管

*4 長崎研究所振動研究室主務

表1 MWT-1000の主な仕様
Principal items of MWT-1000

項目	仕様
型式	可変翼式アップウィンド
定格出力	1 000 kW
ロータ直径	56 m
定格回転数	21 rpm/14 rpm
翼本数	3
定格風速	13 m/s
カットイン風速	3 m/s
カットアウト風速	24 m/s
耐風速	60 m/s
発電機	
型式	誘導発電機
電圧・相数	550 V/3相
周波数	50 Hz/60 Hz
タワー	
型式	モノポール
高さ(ナセル中心)	60 m

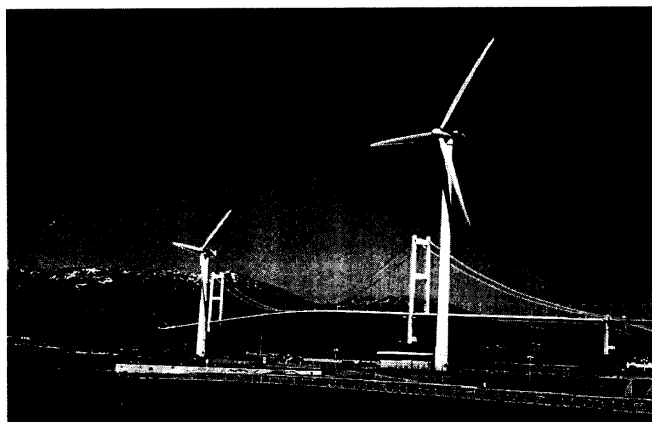


図1 三菱の風力発電装置 室蘭市祝津風力発電所で稼働中の風力発電装置、MWT-500(左)とMWT-1000(右)を示す。
Mitsubishi wind turbine

- (1) 実績のある250～600 kW機の基本設計データをベースとした信頼性の高い構造
- (2) 翼先端のシャープニング化による風切り音の低減、また、増速機及び発電機の防音支持による機械音の低減
- (3) 風車翼(GFRP製)は台風時の強風にも耐え得る高い強度を確保しながら大型化及び軽量化
- (4) サイリスタを用いたソフトスタータ方式による系統併入時の突入電流を定格電流以下に抑制
- (5) 極数変換方式の発電機採用による低風速時の性能アップ及び低騒音化

注) *1 翼の回転面が塔の風上側に位置する風車方式
 *2 風車が風からエネルギーを取出して負荷へ伝達を開始するときの最低の風速
 *3 風車の出力発生下における最大風速
 *4 商用電力系統と誘導発電機の間で電力用半導体スイッチを使用した電力突入電流抑制装置を採用する方法

3.2 翼開発

翼は500 kW級風車の翼長が18.3 mであるのに対して、約1.5倍の26.8 m長さとなる。翼設計時には翼に掛る外力として、風の乱れ、風向変化等を考慮したシミュレーション解析を行い、静的最大荷重(台風相当荷重)及び20年以上の運転にも耐えられるよう十分な安全率を持つように設計されている。性能については、

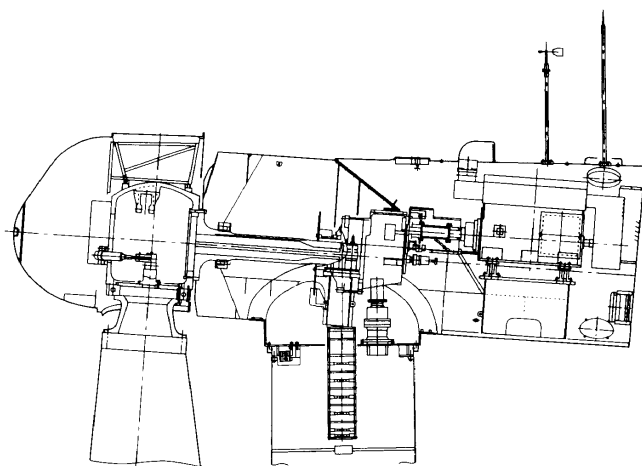
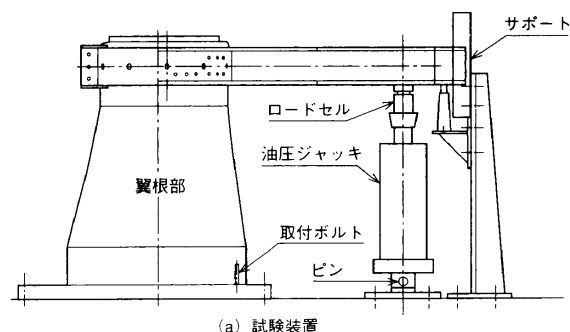
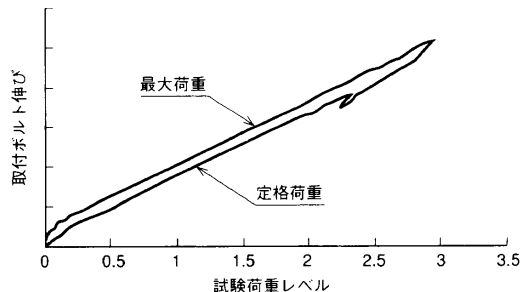


図2 ナセル構造 MWT-1000に採用した軽量ナセル及びナセル内構造を示す。
Nacelle of MWT-1000



(a) 試験装置



(b) 試験結果

図3 翼根引抜き試験 翼根部接合部の強度を検証するための(a)試験装置と(b)試験結果を示す。
Pulling-out test for MWT-1000 blade

各種翼型を解析検討して、効率の良いNASA LS(1)シリーズの翼型を採用している。

3.3 ナセル設計

ナセルは重量軽減のために薄板円筒シェル構造を採用している。ナセル構造を図2に示す。ナセルに掛る外力も、翼と同様なシミュレーション解析を行うことにより、静的最大荷重及び20年以上の運転に耐えられるよう十分な安全率を持つように設計されている。また、騒音低減のために回転系を防振支持して固体伝ば音対策を施している。

4. 検証試験及び運転実績

4.1 翼根接合部強度試験

ロータハブと翼の接合部である翼根部の強度検証方法(試験方法)⁽¹⁾を図3(a)に示す。

実際に作用すると想定されるモーメント荷重を、油圧ジャッキを使用して翼根部に掛け、取付ボルトに掛る応力を計測して試験を行った。台風相当荷重の約3倍までの荷重試験を実施した。試験結果⁽¹⁾を図3(b)に示すが、翼根接合部の変形やクラックは認められず、十分な強度が確認された。

4.2 翼荷重試験

翼荷重試験は、MWT-1000の26.8m翼を使用して、定格風速時相当の荷重及び台風（風速60m/s）時相当の荷重を、図4に示すようなおもりを乗せる方法⁽¹⁾で実施し、そのときの応力及びたわみを計測した。その結果を表2に示す。翼製造時の補強効果もあり、計画より剛性の高い翼となっている。

4.3 翼動特性試験

翼の動特性を明らかにするため、ハンマリング加振試験を実施した。図5にフラット方向の応答波形⁽¹⁾を示す。これより、フラット方向の固有振動数は1.23Hzで、定格回転数において3.6Hz（回転次数成分の3.6倍）となることが確認された。したがって、開発した翼は共振を回避し良好にチューニングされていることが確かめられた。

4.4 翼空力音低減効果確認試験

翼から発生する騒音のメカニズムは(1)後縁渦騒音、(2)翼先端渦騒音、(3)失速による騒音などが考えられ、ピッチ制御の場合特に(1)、(2)に起因する騒音が発生する。MWT-1000の翼は、これらの(1)、(2)に起因する騒音対策のために、後縁薄肉化及び翼先端先細型の低騒音翼を採用した。これらの効果については、NEDO 500kWの実機風車翼を用いた騒音低減効果に関する実証

試験により検証されている。

4.5 室蘭市祝津発電所における運転実績⁽²⁾

図6に性能計測結果、図7に主軸応力の計測結果、図8に騒音計測結果、図9に定格風速付近での運転状況を示す。これより性能、応力共に計画どおりの良好な結果であることが確認された。特に性能に関しては風速10m/s以下の低風速において、計画値を上回る性能が得られ、定格風速以上においても定格出力一定に制

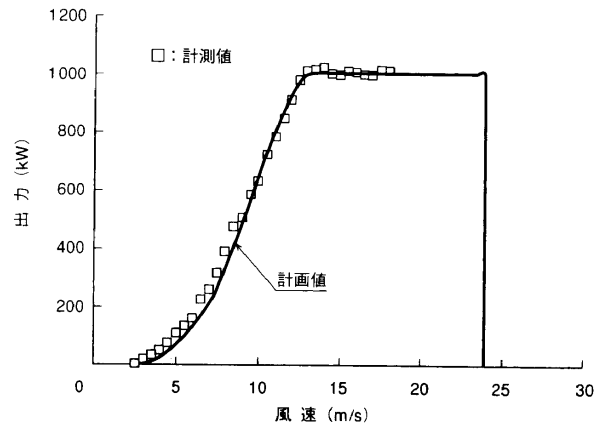


図6 MWT-1000のパワーカーブ 性能評価に用いる風速に対する出力を表す計画値曲線と計測値を示す。
Power curve of MWT-1000

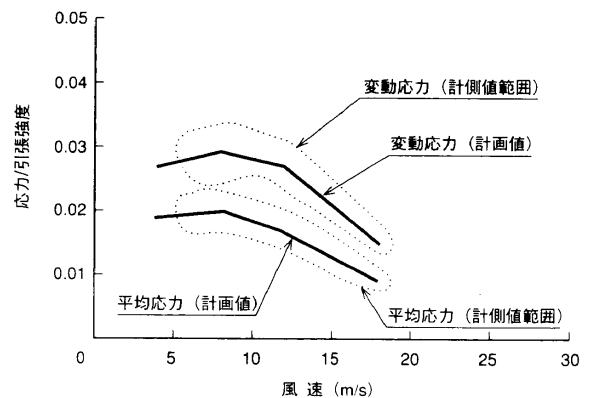


図7 主軸応力計測結果 風速に対する主軸応力の計測結果を示す。
Result of main shaft stress measurement

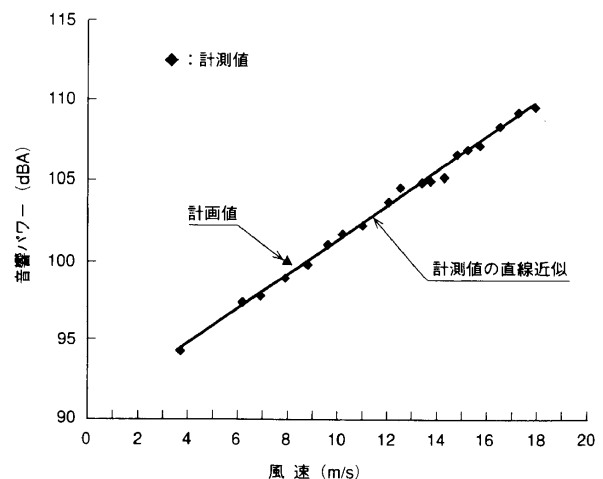


図8 騒音計測結果 風速に対する音響パワー計測結果を示す。
Results of noise measurement

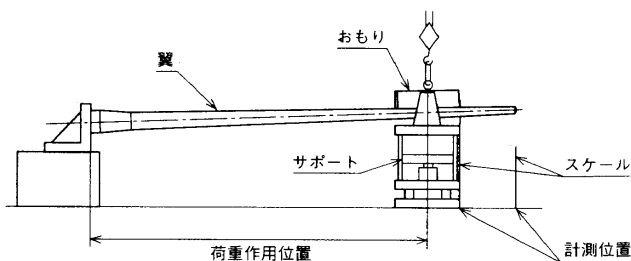


図4 翼の荷重試験 翼に定格荷重相当の荷重を付加し、発生する応力、たわみを検証した。
Rated load test for MWT-1000 blade

表2 荷重試験結果

Load test result for MWT-1000 blade

	定格荷重時	台風相当荷重時
計画値	1 681 mm	3 056 mm
実測値	1 514 mm	2 856 mm

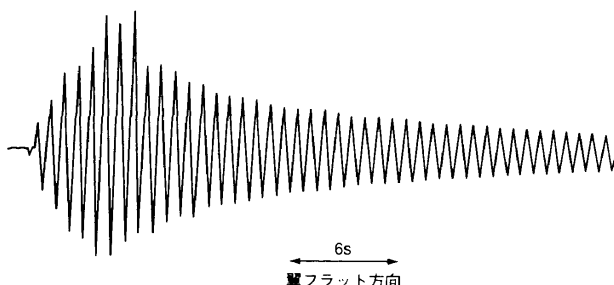


図5 翼のフラット方向の動的応答波形 翼の固有振動数、ダンピングなどの動的特性を検証する加振試験結果（動的応答波形）を示す。
Response curve of MWT-1000 blade

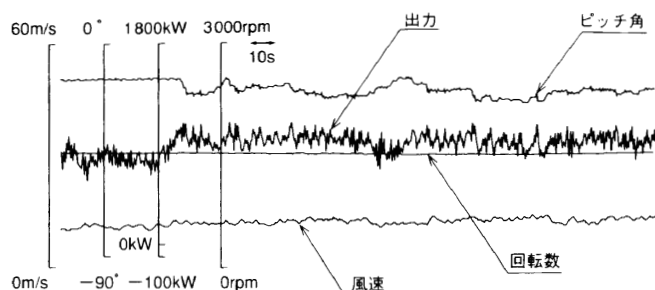


図9 MWT-1000 運転状況 MWT-1000の運転チャートを示す。
Operation record of MWT-1000

御できていることが確認された。また、図8に示した騒音値に関しては、風速8 m/s時における音響パワーレベルが、計画値の100 dBAに対して計測値が99 dBAと良好な結果が得られた。また、図9の運転状況から、風速の変化に合せ、翼ピッチ角を可変し出力制御を行っており、ピッチ角の可変応答の速度により出力が変動しているが、ほぼ定格出力で制御されており、良好な結果が得られた。

前述のように、1999年4月より運転がなされている室蘭市祝津風力発電所の1 MW機の運転結果から、性能、各部応力、騒音

共に計画値どおりの良好な結果が得られ、計画どおりの信頼性が得られていることが確認された。

5. む す び

風力発電は昨今の地球環境の問題から、クリーンな風力エネルギーを利用した発電システムとして需要が急速に高まっており、1 MW以上の大型風車への期待も大きい。また、風車騒音の近隣地域への影響低減のニーズも大きく、低騒音型風車の開発が望まれるようになってきている。当社でもこのようなニーズにこたえ、今後とも風車の大型化とともに適切な翼形状による風切り音の低減及び出力変動の小さいギヤレス可変速風車など高性能・低騒音型風車の開発を行い、より環境に優しい風力発電の導入・普及促進に貢献していきたいと考える。

参 考 文 献

- (1) Isamu Osada, Development of 1 MW Wind Turbine, ICOP '99
- (2) 加藤英司, 三菱1000 kW 風力発電設備の運転実績, 平成11年度火原協 (1999)

開放特許・新案

電 気 集 じん 装 置

実用新案登録 第02077124号
発明者 神戸造船所 川西好光

お問合せ先

三菱重工業株式会社
技術本部特許部特許企画グループ
〒220-8401 神奈川県横浜市西区みなとみらい三丁目3番1号
☎ 横浜 (045) 224-9070
FAX 横浜 (045) 224-9908

入口の絞りダクトと、同絞りダクトの電気集じん装置の軸に交叉する前壁に対向して、ほぼ鉛直面上に水平に並べ設けられた複数の整流板と、同整流板の最下端部に、それに沿って上端部が揺動可能に懸架された複数の長方形の懸架式ガス遮断板とを備え、上記懸架式ガス遮断板の下端は上記前壁と

所定の間隔にあることを特徴とする電気集じん装置。

図面の簡単な説明

図1は、本考案の一実施例の前部縦断面図、図2は、同実施例の図1のII部詳細図、図3は同実施例の図2のIII～III視図である。

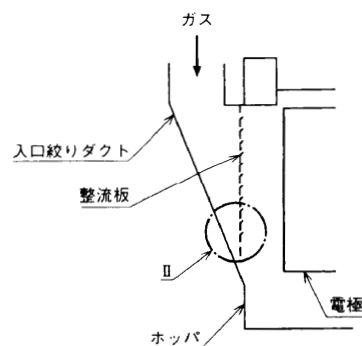


図1

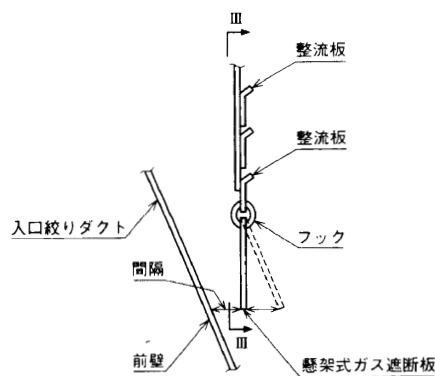


図2

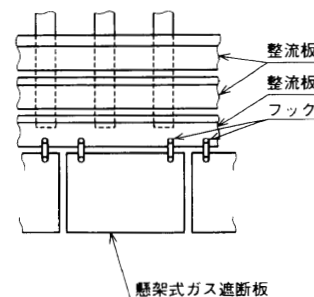


図3