

大型風力タービン MWT-450 の開発

Development of Large Wind Turbine MWT-450

長崎造船所 岩 永 洋 一^{*1}

技術本部 渡部 洋 八 郎^{*2} 鳩 山 正 義^{*3}

柴 田 昌 明^{*4} 川 節 望^{*5}

風力発電は実用段階の電力源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 450 kW～600 kW 級の風車が主流になりつつある。この動向に対応するために新機種 MWT-450 を開発した。本風車の特徴として、以下の事項を紹介する。(1) 高揚力翼型・ワイドコードブレードを用いた高性能ブレードの設計、(2) 世界トップレベルの水準をねらった低振動・低騒音化設計、(3) 国際基準に準拠した強度評価、(4) 一方向強化 GFRP 採用によるブレード強度向上。

Wind turbines have come rapidly into wide use as electricity generating units reaching a commercial stage for power supply. The wind turbine generator output per unit tends to increase year after year. The wind turbines of 450 kW to 600 kW class became most popular in overseas markets. To meet this trend, a new type of wind turbine MWT-450 has been developed by Mitsubishi. The main features of this new turbine are as follows: (1) Design of a Large Lift Type Wide Chord High-Performance Blade. (2) Design for Epoch-Making Low Noise & Vibration Level. (3) Evaluation of Blade Strength in Conformance to International Standards. (4) Improvement in Blade Strength by the Use of Unidirectionally Strengthened GFRP.

1. ま え が き

無尽蔵で無害、無料の風力エネルギーを利用する風力発電は資源の枯渇問題やエネルギー自給率の向上、地球温暖化問題などへの対応策として見直され、急速に普及している。また、最近では発電単価の低減と立地難を解消するために大型機の開発が急ピッチで進んでいる。海外市場の中心はこれまでの 250～300 kW 機から 450～600 kW 機に移行しており、一部では 750 kW～1.5 MW 機の開発が進められている。一方、最近風力タービンが住宅の近くに立地することが多くなったため低騒音化に対する要求が強くなっている。以上のような市場の要求にこたえるために当社では新機種として低騒音型の風力タービン“MWT-450”を開発した。

2. 当社における風力タービンの開発

当社では、1980 年に試験用の 40 kW 小型風力タービンを長崎造船所に建設して以来、段階的に大型機の実用化へ向けた開発を進めている。初期の試験用風力タービンには大型ヘリコプタの回転翼をトラス型タワーの後流で回転させるダウンウィンド方式を採用した。次いで FRP 翼のダウンウィンド型を試作、これらの経験を経て多量生産型商用機として FRP 翼アップウィンド方式の 250 kW 風力タービンを開発した。この風力タービンは MWT-250 の名称で現在までに 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 台は同一機種のウィ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 風力タービン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た。現在東北電力(株)と共同で実証試験中である。一方これと平行して、MWT-250 の後継となる量産機 MWT-450 の開発に着手、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。図 1 に初期のヘリコプタ翼風力タービン、MWT-250、MWT-450 を示す。

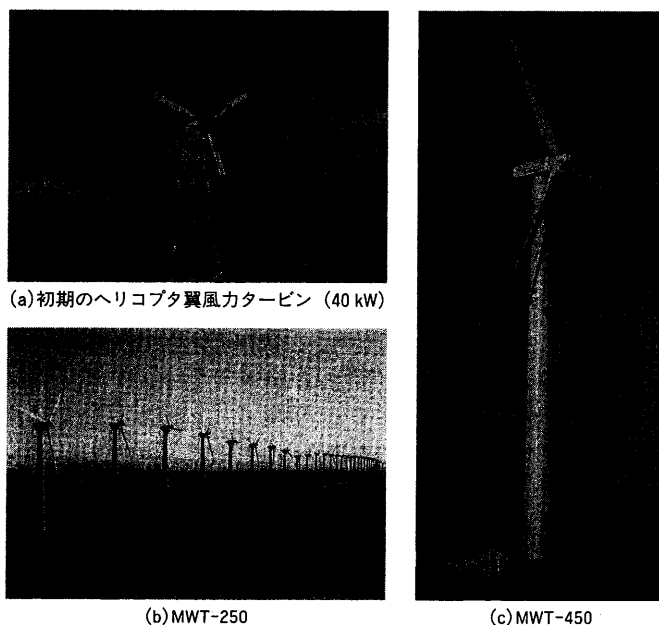


図 1 三菱の風力タービン 当社は小型機から中型機、大型機へと段階的に開発を進めている。
Mitsubishi wind turbine

3. MWT-450 の特徴及び構造

3.1 基本仕様及び主な特徴

MWT-450 機の基本仕様を表 1 に示す。ロータは 3 枚の GFRP 翼で構成され、直径は 39 m である。アップウィンド型で定格風速は 12.4 m/s、カットイン・カットアウト風速はそれぞれ 4.5 m/s、24.0 m/s である。また、ロータ回転数は 26 rpm と極めて低速である。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。トルクはブレードからロータヘッド、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。増速機には低

*1 風力・船用機械設計部船舶タービン設計課長

*4 長崎研究所振動研究室

*2 長崎研究所流体研究室主査

*5 長崎研究所材料・溶接研究室

*3 長崎研究所強度研究室主務

表1 MWT-450の主な仕様
Principal items of MWT-450

項目	仕様
定格出力	450 kW
形式	水平軸プロペラ型
ブレード枚数、配置	3枚、アップウィンド
ロータ直径	39 m
運転風速	定格：12.4 m/s カットイン：4.5 m/s カットアウト：24 m/s
翼長	18.3 m
増速機形式	遊星1段ヘリカル2段式
ハブ高さ	50 m

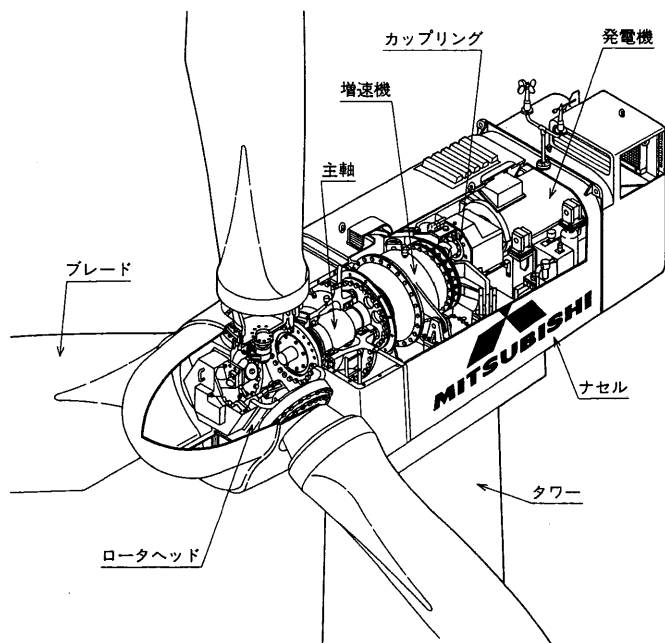


図2 ナセル内構造図 トルクはブレードからロータヘッド、主軸、増速機、フレキシブルカップリングを経て発電機に伝達される。
Arrangement in nacelle

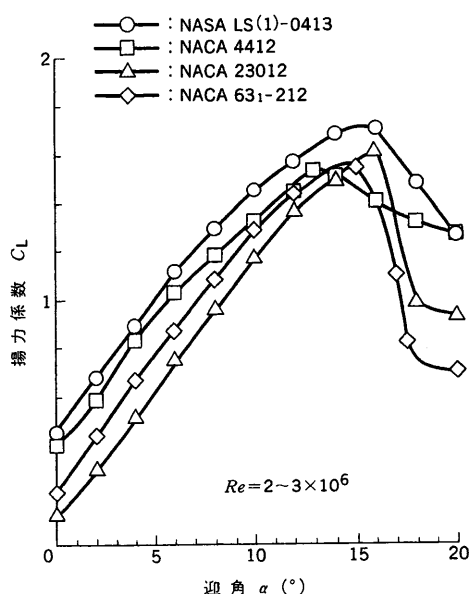


図3 翼型の揚力係数 MWT-450には風力タービンに使用されている翼型の中で揚力係数が最も大きいNASA LS(1)シリーズを使用した。
LS(1) Airfoil

騒音化をねらって遊星1段ヘリカル2段式を新たに採用した。また、発電機は誘導発電機で、系統連結はソフトスタート方式を採用している。

なお、これらの機器の配置を図2に示す。

3.2 ブレードの空力設計

MWT-450のブレードの空力設計における課題は、周速の低減に伴う出力低下の回復であった。この対策として高揚力翼型のワイドコードブレードを採用した。先ず翼型に関しては風力タービンに使用されている翼型の揚力係数を比較した結果⁽¹⁾⁽²⁾、図3に示すようにMWT-250に使用されているLS(1)翼の揚力係数が既存翼型の中で最も大きく最適であることが分かり、本翼型を選定した。LS(1)翼はNASAにおいて軽飛行機用に翼面積を小さくする目的で開発された高揚力翼型である。次に、ブレードの形状は、製作の容易性から翼幅とねじり角が翼根部の最大幅から翼端に向けて直線的に変化するようにした。翼幅とねじり角をパラメータとした性能解析結果から最適な形状として、翼根部最大幅2 m、翼幅0.7 m、翼根・翼端間ねじり角12°を選定した。この新形状ブレードの翼端幅0.7 mは同クラスのNEDO 500 kW機に比べ約20%幅広い。以上の設計で低騒音と高出力を両立できるブレードが得られた。

3.3 ブレードの構造と材料

ブレードは図4に示すように、プロファイルをなす外皮と外皮荷重をロータ軸に伝える主桁(げた)から構成され、外皮と主桁の間には、外皮の座屈防止のためポリウレタン発泡材を充てんして

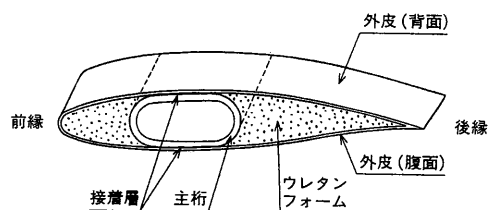
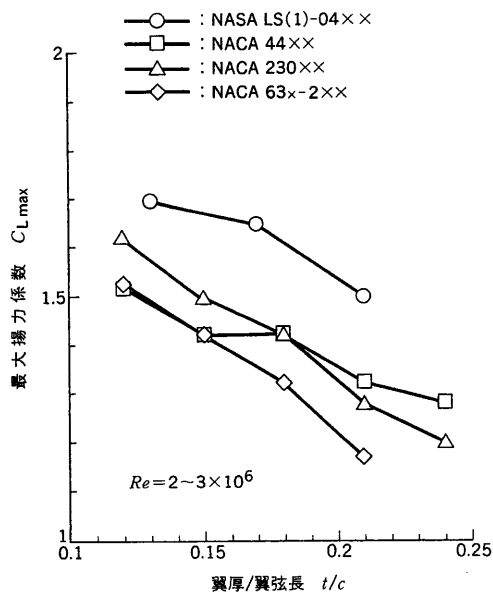


図4 翼の断面構造 外皮と主桁から構成され、外皮主桁間にはポリウレタンフォームを充てんし外皮と主桁の座屈防止を図っている。
Cross section of blade



いる。外皮は翼型を形成し翼の性能を決めるもので、表面には耐候性向上のためにゲルコート（無機物粉を混入させた耐候性塗料）を塗布している。

ブレード材料には成形・加工性、量産性、信頼性、価格等を考慮し GFRP を採用した。外皮にはガラスマットとガラスロービングクロスを交互に積層して使用しているが、荷重を伝える主桁については MWT-450 では軽量化のために UD ガラスクロス（一方方向ガラスクロス）を採用し、翼長方向を強化した材料を開発し使用した。開発材は引張強度及び弾性率共に従来材に比較して 1.8 倍の値を示した。

開発に当っては材料強度特性向上とともに製作用業性、量産性も考慮して適正なガラス繊維の積層構成を決定し、最終的には翼重量を従来構造を用いた場合に比べ約 40 % 減少と大幅な軽量化を達成できた。

4. 低振動・低騒音化設計

風力タービンにおける騒音発生は、ブレードが空气中を回転することによって空力的に生じる翼放射騒音、増速機から発生される機械音、そして増速機の振動が軸受を介してナセルやタワーに伝達され、ナセル表面やタワー表面より放射される機械騒音に大別される。従来機の計測結果から判断するとこれらの寄与度はおおむね同一レベルであり、低騒音化のためにはこれらすべての要因に対して低減を図る必要がある。MWT-450 は同一出力レベルで世界トップレベルの低騒音化を図るため、すべての要因に対してそれぞれ以下に示す低騒音対策を施している。

4.1 翼騒音低減

MWT-450 はロータ回転数が 26 rpm であり、既存機 MWT-250 に比べ翼周速を大幅に低減させている。すなわち、MWT-250 の周速が 65.3 m/s であるのに対し、MWT-450 は 53.1 m/s であり周速比は約 0.813 である。したがって、翼により発生する空力騒音の音響エネルギーが周速の 5.5 乗に比例し、翼幅に比例すると仮定すれば、これにより MWT-450 は MWT-250 に比べて約 2.7 dB の低減効果となる。

4.2 増速機騒音低減

増速機の騒音は歯車の噛合（かみあ）い起振力によって引き起される。この噛合い起振力は、主に歯の噛合い枚数の周期的変化によって発生する。したがって、あらかじめ起振力解析を行い、この噛合い枚数の周期的変化が最小となるように、歯形修正量を決定している。

また、図 5 は、遊星歯車装置の内歯車の歯形状が音響パワーに与える影響を調べた結果である⁽³⁾。図から、歯形状の違いにより音響パワーで 8 dBA の違いが生じていることが分かる。したがって、遊星歯車装置の騒音を低減させるには、内歯の歯形を凹面状にしないことが重要であり、歯形の誤差管理を徹底して低騒音化を図っている。

さらに、MWT-450 では MWT-250 が遊星 2 段式であったのに対し遊星 1 段ヘリカル 2 段式を新たに採用し、中・高速段に平行軸はすば歯車を用いることによって低騒音化を図っている。

このように MWT-450 では歯形修正とはすば歯車の効果により、音響パワーレベルで総合的に約 13 dBA の騒音低減効果を達成している。

4.3 ナセル・タワーの機械騒音低減

MWT-450 は増速機並びに発電機をラバースプッシュにより弾性支持している。これによって、剛支持に比べ増速機や発電機から

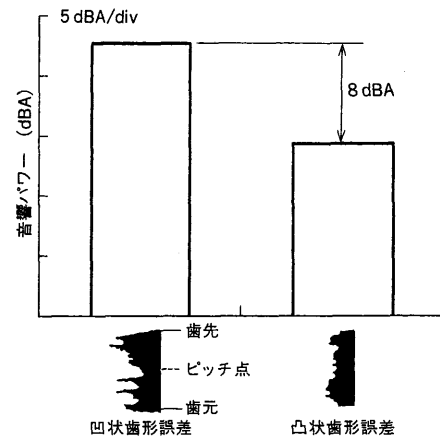


図5 歯形が騒音に及ぼす影響 噛合い部の歯形誤差と音響パワーの関係を示す。歯形誤差が凹状である場合と凸状である場合で、音響パワーに 8 dBA 差が生じた試験結果を示す。

Relation between tooth profile and noise

ナセルやタワーに伝搬される振動エネルギーは大幅に低減される。したがって、ナセルやタワー表面から放射される機械騒音が大幅に低減される。なお、MWT-250 を改造して実施した工場試験の結果、弾性支持することにより剛支持に比べて約 5.4 dBA の低減効果が確認されている。

5. ブレードの強度設計

5.1 ブレードの強度試験

新翼開発に際しては実翼を用いて製品翼としての静的破壊強度と疲労強度の最終確認を行う。実翼の場合、構造不連続や接着層などがあり、特に疲労強度は小型試験片による値に比べ大幅に下回るため重要な確認試験となる。

図 6 は 450 kW 実翼の疲労試験状況を示している。試験方法は、翼の基部を翼の固有振動数近傍でわずかに加振し、共振現象を利用して翼に所要の荷重を与えるものであり、翼先端部をレバー等で荷重や変位を与える方式に比べ、装置の簡素化と試験日数の短縮化が図れる。

試験は、翼の面内曲げ（エッジ方向）と面外曲げ（フラット方向）の 2 ケースを行った。また試験方法として、ある一定繰返し

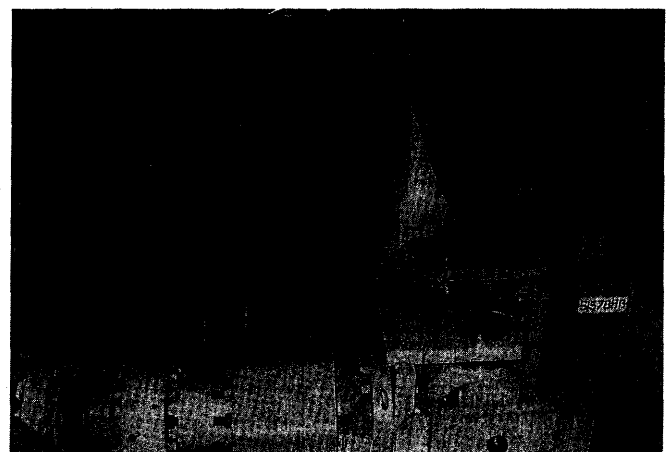


図6 疲労試験装置 翼の根元側から見たもの。加振機、リンク層、翼の取付け状況を示す。同写真はフラット方向の疲労試験状況を示すものである。

Fatigue test equipment

数の後、負荷荷重を漸次増加していく加速試験法を適用し、各荷重ステップについての疲労損傷率を線形加算して疲労強度を求めた。

これらの試験の結果、翼は20年の使用に対して十分な強度を有することが確認された。また、試験時には超音波探傷法により非破壊的に接着層や内部構造の健全性も調査された。

5.2 ブレードの強度評価

風力タービンは鉛直面内を回転するため1回転に1回の自重繰返しを受けると同時に、風の息や乱れ、突風、地表からの高さで風速が異なるウィンドシャワー、さらにはタワーの前を通過するときのタワーブロックによる風荷重の変動を受ける。風力タービンはこのように複雑に変動する風のなかで運転され、かつ出力制御のため風速に応じてブレードのピッチ制御を行うため、ブレードは非常に複雑な外力変化を受ける。風力タービンの耐用年数を20年とすれば、これらの繰返し数は $10^8 \sim 10^9$ 回になり、疲労に対して十分な強度を有することが必要である。また、風力タービンの一生においては、台風や突風荷重などの過大荷重が作用する場合、機器が故障して異常な外力を受けることがあり、これらの極限荷重に対して十分な強度を有することが必要である。MWT-450はこれらの変動荷重や極限荷重に対し、国際機関(IEC)の定める規定⁽⁴⁾に準じて強度評価を実施している。

疲労強度の評価プロセスを図7に示すが、その概要は以下のとおりである。

- (1) IECで規定されたモデル(パワースペクトラムやタービュランス、ウィンドシャワー、コヒーレンシー)に適合する変動風の時刻歴波形を多次元自己回帰モデルにより生成する。
- (2) ブレードのFEM振動解析を行い、モード座標系を用いて低次元化された振動モデルを作成。上述の変動風に対する時刻歴応答計算を行い、変動応力を計算する。
- (3) 平均風速ごとに得られた応力波形に対してレインフロー法で波形カウントを行いマイナー則により疲労損傷率を計算する。
- (4) 得られた損傷率を用いて単位時間当りの疲労損傷率と平均風速の関係を求める。
- (5) これに風速頻度分布としてレーリー分布を乗じて単位時間における疲労損傷率を求め、最後に20年間の運転時間を乗じて疲労損傷率を算定する。

以上の解析手法はMWT-250について実機計測データとの対応により推定精度が確認されている。

5. む す び

風力発電は長所が多く、将来も長期的に需要は増え続けることが期待できる。ただし、そのためには種々の技術的課題を克服し、機器の信頼性向上と発電コストの低減を図る必要がある。主な技術的課題として、可変速度制御、ブレードの軽量化、翼の高揚力化、タワーのスリム化などが挙げられる。当社ではこれらに対し、今後とも国や大学との連携を強めて積極的に取り組み、メガワット級風力タービンや革新型風力タービンの開発を行う方針である。

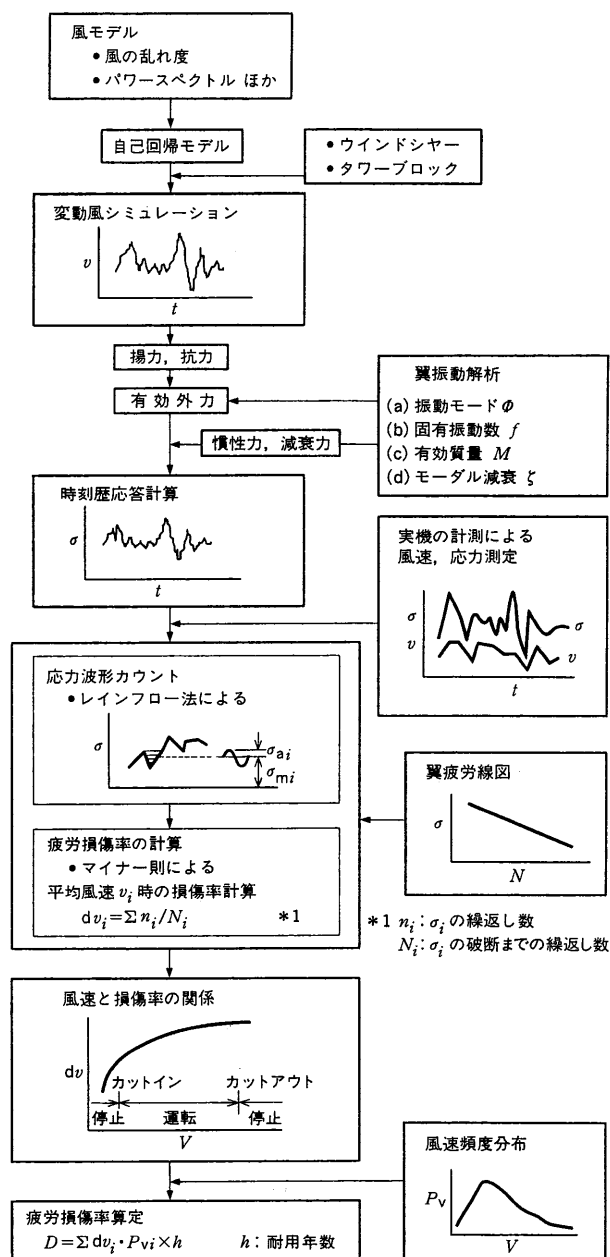


図7 疲労強度評価のフローチャート 変動風のモデル化、翼の応答計算、変動応力カウント、損傷率計算など翼疲労強度評価の作業の流れを示したものである。

Flowchart of fatigue strength evaluation

参考文献

- (1) Abbott, I. H. et al., Theory of Wing Sections
- (2) Mcghee, R. J. et al., NASA TM X-72843 June (1976)
- (3) Shoda, K. et al., Influence of tooth profile error for an epicyclic gear noise, Proc. of the Inter Noise'95 (1995-7)
- (4) International Electrical Commission Technical Committee, No.88 Safety of Wind Turbine generator systems