

# 次世代 2 MW 級大型風車の開発

## Development of Next Generation 2MW Class Large Wind Turbines



上田悦紀\*1  
Yoshinori Ueda

柴田昌明\*2  
Masaaki Shibata

風力発電は地球温暖化防止を担う再生可能エネルギーの主役として世界的に導入拡大が続いている。これに応じて、より大量の電力を供給できるように、風車の大型化と高性能化が急速に進んでいる。当社も次世代大型風車として定格出力 2 400 kW・直径 92 m の新型高性能風車 MWT92/2.4 を開発中であり、来年春に横浜で初号機が運転を開始する予定である。MWT92/2.4 で採用した風車に働く荷重を低減するための新技術を紹介する。

### 1. はじめに

風力発電は、地球温暖化防止を担う再生可能エネルギーの主役として注目を集めている。世界の風力発電導入量は、2003年度末で 40.3 GW に達し（図 1）、日本でも 730 MW、約 800 台の風車が運転中である（図 2）。

導入拡大に伴い、規模の経済による建設コスト削減等を狙うために、欧州を中心に風車の大型化が急速に進んでいる（図 3）。ここ 10 年では定格出力は約 4 年で倍増している。これは従来の火力発電の経験より数倍早いペースである。日本においても 2003 年 3 月から 2 MW 級風車の導入が始まっており、既に 15 台が運転中である（表 1）。

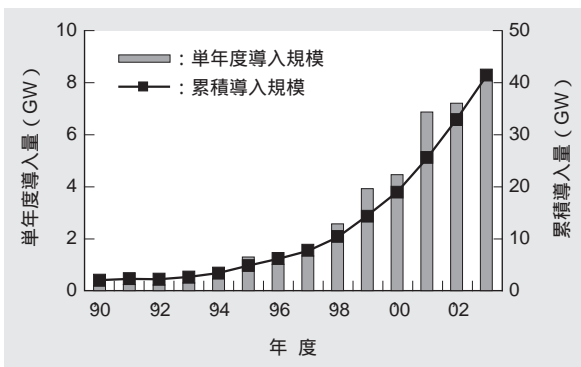


図 1 世界の風力発電の導入量

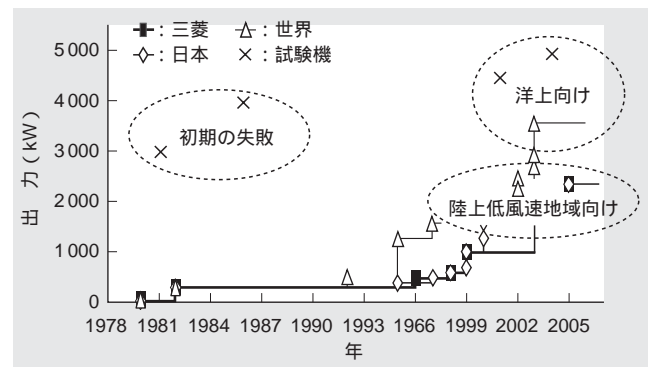


図 3 風車の大型化の推移

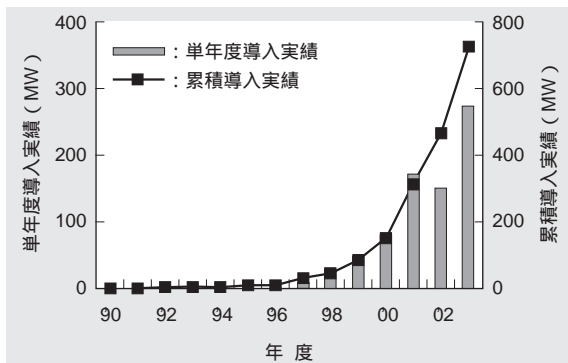


図 2 日本の風力発電の導入量

表 1 日本の 2 MW 級風車

| 運 開    | 定格 (kW) | 台 数  | 設置場所    |
|--------|---------|------|---------|
| 2003/3 | 1950    | 1    | 沖縄県具志川市 |
| 2003/3 | 1900    | 1    | 静岡県竜洋町  |
| 2004/1 | 2000    | 8    | 山形県酒田市  |
| 2004/3 | 1980    | 1    | 佐賀県鎮西市  |
| 2004/3 | 1980    | 1    | 愛知県田原町  |
| 2004/3 | 2000    | 1    | 兵庫県南淡町  |
| 2004/3 | 1950    | 1    | 東京都江東区  |
| 2004/3 | 1950    | 1    | 静岡県御前崎町 |
| 2005/4 | 2000    | (10) | 三重県美里市  |
| 2005/春 | 2400    | (1)  | 神奈川県横浜市 |

( ) 内は計画中

\*1 原動機事業本部タービン技術部タービン技術課主席

\*2 長崎造船所風力発電事業グループ主席

風車の大型化には、輸送と据付で機器サイズが制約されない風況の良い洋上風力開発向けの5 MW級の超大型風車と、陸上の平均風速8.5 m/s付近（IEC Class 相当）の低風速地域向けの2～3 MW級の高性能風車の2つの流れがある。当社の主力市場の米国と日本では当面は洋上風力のニーズは小さいため、当社の次期主力風車の開発は後者の低風速地域向けの高性能風車を目標とした。このタイプは定格出力に比べてロータ直径が大きいのが特徴である。三菱風車の大型化の経緯を図4に示す。

## 2. 風車の大型化の課題

### 2.1 風力発電の基本

風のエネルギー（発電量）は、風速の3乗と通過するロータ面積に比例する。

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 A = \frac{1}{2} \rho (AV)^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3$$

ここで、

- P : 風力エネルギー (W)
- ρ : 空気密度 (1.225 kg/m<sup>3</sup>)
- A : ロータ面積 (m<sup>2</sup>)
- V : 風速 (m/s)

したがって風車の効率を約43%、定格到達風速を11～12 m/sとすると、風車の定格出力とロータ直径の関係は大体、次のようになる(図4)。

$$\text{定格出力 kW} \approx 0.3 \times (\text{ロータ直径 m})^2$$

洋上風車は図4に破線で示す放物線ラインより高出力側(上)、低風速域用風車はロータ直径が大きい側(右)に位置づけられる。

### 2.2 風力発電の制約条件

エネルギー密度が薄い。

風速8 m/sで約0.3 kW/m<sup>2</sup>（太陽光は約1 kW/m<sup>2</sup>）発電効率にBetzの限界（16/27 = 59%）という理論上限があり、最新型の風車でも約43%に留まる。これはケーシングのないターボ機械である風車特有の制約条件である。風車は流入する風を減速させてエネルギーを取り出すが、減速率を上げると、風が風車を避けて流れて流入量が減るために効率に上限が生じる。

台風時は普段の百倍以上の荷重（普段の風速は6～9 m/s、台風時の瞬間風速は60 m/s以上<sup>(7)</sup>。風荷重は風速の2乗に比例する）が加わるため、強度設計が難しい。

### 2.3 風車の大型化の課題

上記の制約条件から、風車は火力発電、ディーゼル発電等の普通の発電設備より、定格出力に比べて外形が大きくなる。更にエネルギー密度を変えることができないので、出力を増やすには愚直にロータ直径を増やすしか方法がない。ここで比例で外挿設計すると次のような問題が生じる。

$$\begin{aligned} \text{出力} & \propto \text{ロータ面積} \quad (\text{翼長})^2 \quad (\text{寸法})^2 \\ \text{強度} & \propto (\text{荷重} / \text{断面積})^1 \quad (\text{寸法})^1 \quad (\text{出力})^{0.5} \end{aligned}$$

風車の翼先端速度は風切音による上限（風速8 m/sで約60 m/s）があり、ロータ径が拡大すると回転数は小さく抑える必要がある。これによるトルクの増大は、主軸と増速機的设计に影響する。

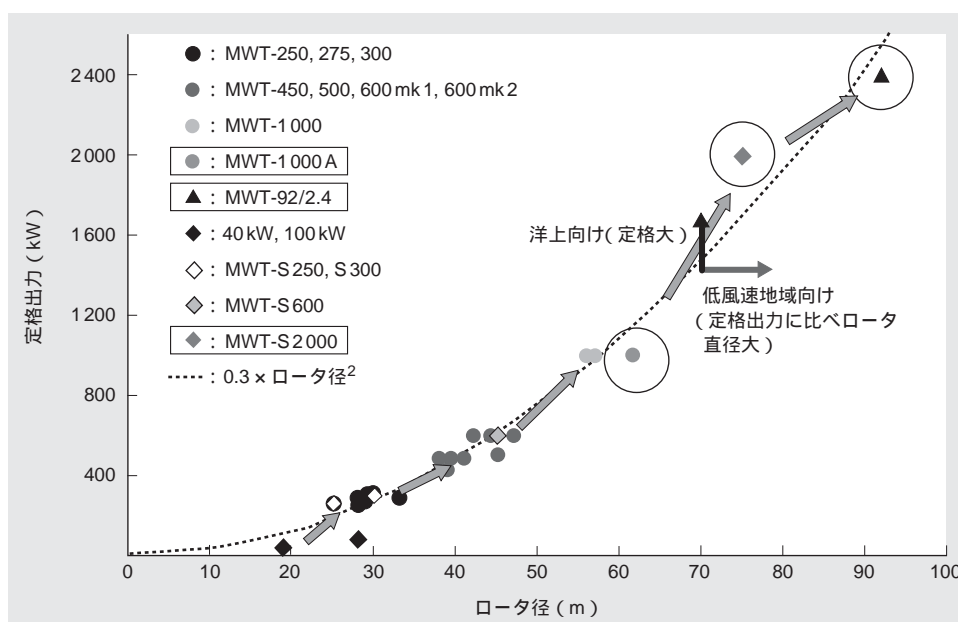
$$\begin{aligned} \text{主軸トルク} & \propto \text{出力} / \text{ロータ回転数} \quad (\text{出力})^{1.5} \\ \text{価格} & \propto \text{風車の重量} \quad (\text{各部寸法})^3 \quad (\text{出力})^{1.5} \end{aligned}$$


図4 三菱風車の大型化

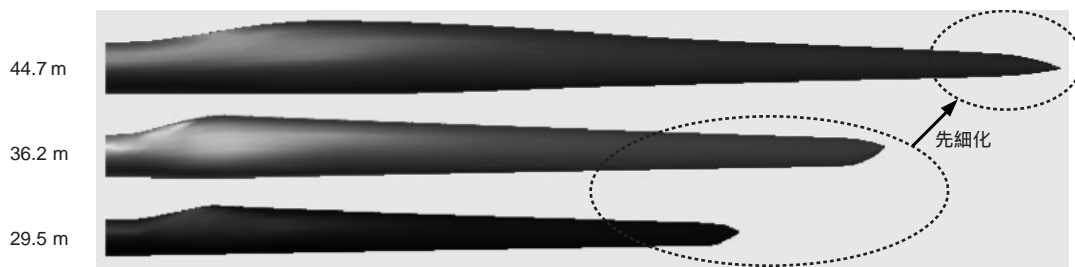


図5 スリム翼の採用

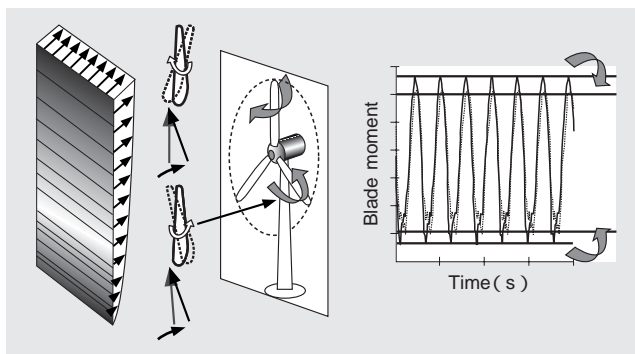


図6 翼の独立ピッチ制御

これは例えば出力が2倍になると、主軸トルクは2.8倍、強度は0.7倍、価格は2.8倍（kW単価で1.4倍）になることを意味する。対策として、次の2つの方法が有効である。

- (1) 構成機器の比強度向上
- (2) 風車に働く空力荷重の低減

翼の比強度向上では内部構造、翼根結合法と材料強度の3点を改良した。その概要は“三菱重工の新型風車(MWT-1000A, MWT-S2000)の開発と運転実績<sup>1)</sup>”を踏襲する。今回は荷重低減技術について説明する。

### 3. 空力荷重の低減技術

MWT92/2.4では次のような空力荷重の低減技術を採用した。

- (1) スリム翼の採用

先細のスリムな翼形状(図5)の採用により、ロータ径拡大(長翼化)に伴うスラスト力の増大を抑制する。つまり、片持ち梁としての翼の先端荷重を減らして効率的に主軸に働くモーメントを抑制した。

- (2) 可変速運転

風車を可変速運転することにより、風の短周期の変動をロータ回転数の増減で吸収、平準化して、疲労荷重を軽減する。これはギアレス同期可変速風車での経験<sup>6)</sup>を活かしている。

- (3) 翼の独立ピッチ制御

地表の摩擦のために風速には高度分布(ウィンドシェア)があり、風車には1回転毎に疲労荷重が加

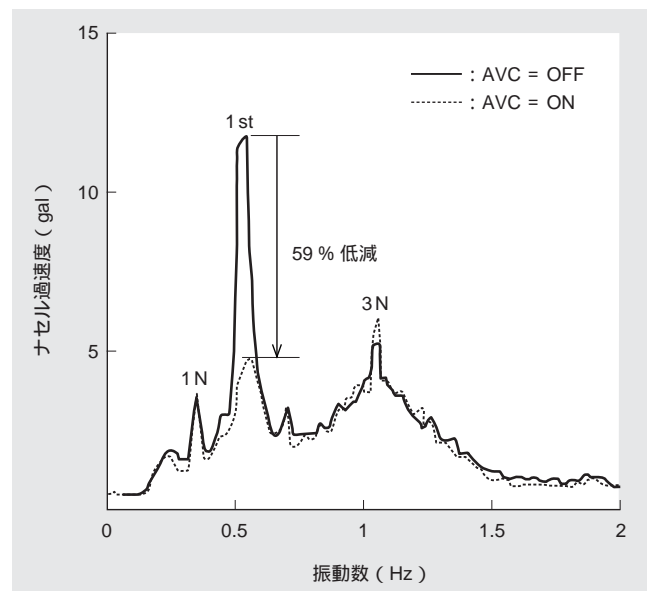


図7 タワーのアクティブ制振の効果

わる。

回転に同期して、荷重変動を相殺するように翼のピッチ角を微修正して、疲労荷重を軽減する(図6)。翼に応力センサーを設置して、より詳細な荷重制御を行う研究を進めている。

- (4) タワーのアクティブ制振

タワー上部にセンサーを設置し、その情報を元に翼のピッチ角をタワー変位が相殺されるように微小制御して、風車に働く主風向の荷重を軽減する。

愛媛県瀬戸町の当社1000 kW風車で作動確認を行った結果を図7に示す。

- (5) SmartYawによる台風対策

2003年の台風14号による宮古島の風車倒壊被害で、停電時の突風対策が注目されている<sup>7)</sup>。停電中でも確実に風車の風向制御を行う新しい工夫がSmartYawシステムである。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する方式である(図8)。ロータ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。詳細は“三菱重工の風力発電装置の新機種と新技術<sup>12)</sup>”に示す。SmartYawを採用した当社1000 kW

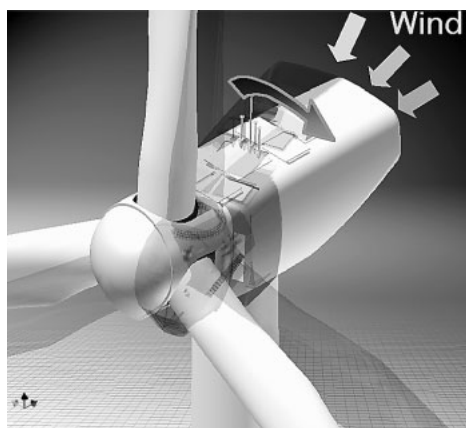


図8 SmartYaw動作時の概念図



図10 MWT92/2.4風車の完成予想図

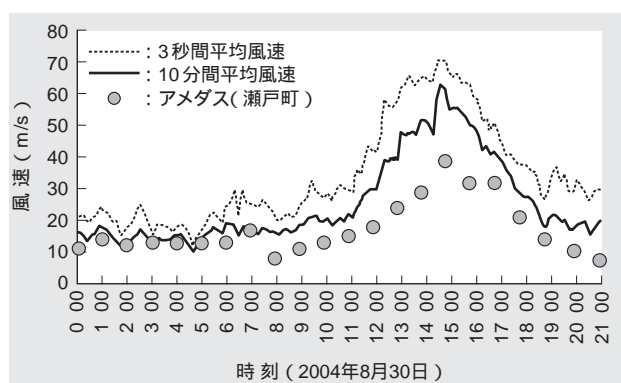


図9 台風16号通過時の風速の推移 瀬戸ウィンドヒル1号機のアメダス観測値

風車 MWT-1000A は、Class 設計でありながら、2004年の台風16号(8月30日)と18号(9月7日)が愛媛県瀬戸町を直撃した際の瞬間最大風速70 m/sを越える突風(ナセル風速計観測値:図9)にも耐え、その有効性を証明した。

#### 4. ま と め

風車の大型化は急ピッチで進んでおり、風車メーカーは新型の大型機種の開発に取り組んでいる。また、今後風車は、陸上用と洋上用の2用途に分化すると予測される。

陸上用の風車には、

- 40 mを超える長大翼の輸送
- タワー高さ70 m以上へのナセル吊揚げのクレーン容量

の二つの制約があるため、定格出力で2～3 MW、ロータ径で約90 mが、当面の上限になると思われる。当社が2005年春に横浜製作所の構内に建設するMWT92/2.4風車(図10)は陸上向け風車としては最

大となる。

洋上風力開発は、まだ経済性と機器の信頼性が試行段階である。もし成功すれば、陸上のような輸送と据付の制約がなく、更に規模の経済が陸上よりも強く働くため、風車は更に一層大型化(5 MW級)していく見込みである。この場合も当社は適時、キャッチアップを図る予定である。

当社は国産唯一の大型風車メーカーとして、人と環境が調和した明るい未来を築くために、今後とも技術開発と新製品の提供を続けていく所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) 上田悦紀ほか、三菱重工の新型風車(MWT-1000A, MWT-S2000)の開発と運転実績、三菱重工技報 Vol.40 No.4 (2003)
- (2) 黒岩隆夫ほか、三菱重工の風力発電装置の新機種と新技術、三菱重工技報 Vol.41 No.3 (2004)
- (3) 上田悦紀、巨大風力発電設備、日本機械学会誌“メカライフ”2004年3月号
- (4) 柴田昌明ほか、Research & Development Trends in Wind Energy, POWER-GEN, Renewable Energy 2004
- (5) 上田悦紀、大型風力発電設備の開発、日本動力協会誌“動力”第262号(平成16年春季号)
- (6) 長田勇ほか、ギヤレス可変速風力発電装置の開発 三菱重工技報 Vol.38 No.2 (2001)
- (7) 石原孟ほか、2003年台風14号による風力発電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 No.12 (2003)



上田悦紀



柴田昌明