

## 水平軸大型風力発電装置

杉山和彦\* 市原堅治\* 富田強\*\*

### Horizontal Axis Large-scale Wind Turbine System for Sakata Wind Power Station

by Kazuhiko SUGIYAMA, Kenji ICHIHARA, & Tsuyoshi TOMITA

In February 2003 a partnership contract was signed between Pfleiderer Wind Energy (a German manufacturer of wind turbines; currently Fuhrlaender Pfleiderer) and Ebara Corporation to launch off Ebara Pfleiderer Company Limited, a company involved in the manufacture, sales and after sale service of wind turbine power generation systems in Asia, including the sole rights in Japan for the same. The company started off commercial business in April the same year with a target of providing 700 MW of power in Japan and Asia in the next ten years. In November of 2004 the first wind turbine system (output power 1500 kW) was shipped to Sakata City, Yamagata Prefecture. The order had been placed by Cosmo Oil. The following outlines this power turbine system and introduces its superior features.

**Keywords:** Wind turbine, Generator, Double-fed induction generator, Pitch control system, Inverter, Speed control, Power control, Power factor control, Remote control, Sakata

#### 1. はじめに

当社は、ドイツの風車メーカーであるフライデラーウインドエナジー社（現在はファーランダー・フライデラー社）との間で、日本国内の独占権を含むアジア地域での風力発電装置の製造、販売、アフターサービスを行う合弁会社、荏原フライデラーウインドパワー(株)（以下、荏原フライデラー）を設立することに合意し、2003年2月に調印した。荏原フライデラーは2003年4月から営業を開始し、日本及びアジアにおいて今後10年間で合計70万kWの風力発電装置の販売を目指している。同社製としては第1号機となる1500 kW風力発電装置をコスモ石油(株)から当社が受注し、山形県酒田市において2004年11月に引き渡した（写真）。

ここでは、その風力発電装置の概要と特長について紹介する。

#### 2. 風力発電をめぐる背景

新エネルギーの中でも、自然エネルギーである風力エ



05-124 01/209

写真 風車全景

Photo Wind turbine overview

ネルギーは、二酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物などの大気汚染物質の排出を伴わないクリーンで再生可能なエネルギーであり、経済的にも有望であることから、その導入が急激に進み、日本では2004年度末現在の実績は、設備容量で、約92.6万kW（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構調査結果）である。経済産業

\* 風水力機械カンパニー 羽田工場 風車技術室（兼）荏原フライデラーウインドパワー(株)

\*\* 新エネルギーカンパニー 風力発電事業室 同

省は2010年までに300万kWにすることを目標に掲げ(2001年6月), 2003年4月から, 「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法(RPS法)」を施行する等, 自然エネルギー導入を積極的に支援している。

しかしながら技術的には, 日本の山岳地形によって風況の乱れ強度が大きいこと, 及び単機出力が1000 kWを超えて大形化したことに起因して種々の問題が顕在化しており, 日本の風況と環境に見合った風車が必要とされていた。

### 3. 酒田風力発電所の設備概要

コスモ石油酒田風力発電所は酒田市内の西側に位置し日本海に面しているため風況に恵まれているとともに,

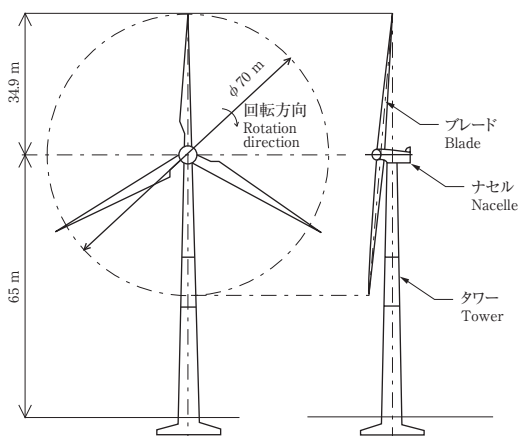


図2 風力発電装置概観  
Fig. 2 Outline of wind turbine

酒田港に隣接した港湾地区であるためタワー, ブレード, ナセル等の大形部品の輸送に有利である(図1)。

本風力発電装置は発電機, 増速機, 風車制御装置, ロータ, ナセル, タワーで構成されている。概観を図2に, 概要を表1に, 主要構成機器仕様を表2~6に示す。

表1 風力発電装置概要  
Table 1 Main specifications of the wind turbine

種類 Turbine type	プロペラ式風車 Propeller type wind turbine
型式 Type name	EPW1570
定格出力 Rated output power	1500 kW
ブレード枚数 Number of blades	3枚
ロータ直径 Rotor diameter	70 m
受風面積 Swept area	3848 m <sup>2</sup>
ハブ高さ Hub height	65 m
ロータ回転速度 Rotor speed	11~22 min <sup>-1</sup>
カットイン風速 Cut-in wind speed	約3.5 m/s
カットアウト風速 Cut-out wind speed	25 m/s
定格風速 Rated wind speed	12 m/s
総質量 Total mass	199 t
出力制御方式 Power regulation	回転速度制御可変ピッチ方式 Blade pitch control, Variable speed
設計風速 Wind class	GLクラスII相当 GL class II equivalent

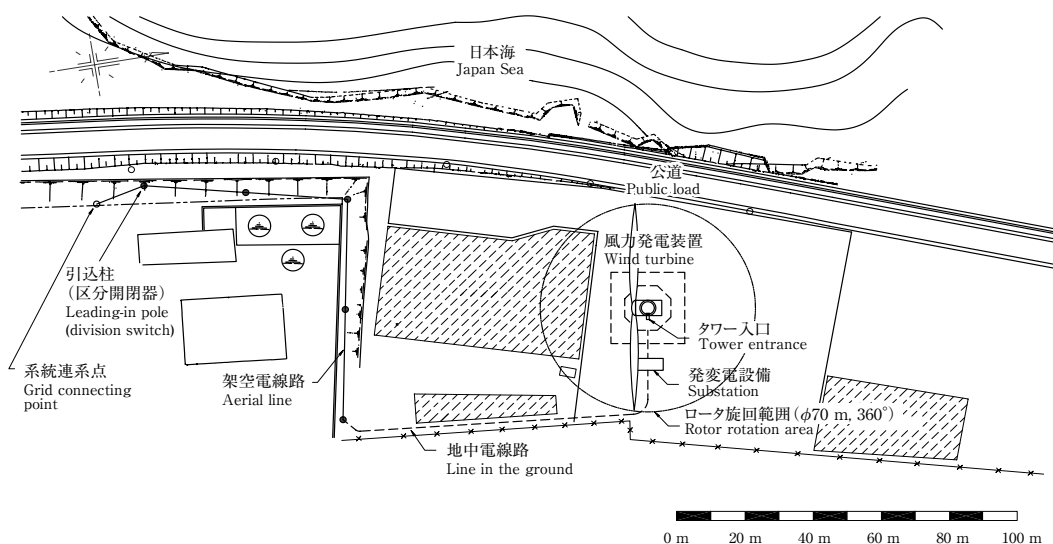


図1 風車配置図  
Fig. 1 Layout of wind turbine

表2 発電機  
Table 2 Generator

形式 Type	三相巻線形誘導発電機 3-phase wound asynchronous generator
冷却方式 Cooling type	水冷式 Water cooling
保護方式 Protection	全閉形IP54 Totally-enclosed IP54
結線方式 Connection	固定子：デルタ；回転子：スター Stator: delta ; Rotor: star
定格 Driving condition	連続定格 Continuous
出力 Rated power	1500 kW (DFIG運転時：回転子側出力含) (DFIG, Total output power)
電圧 Voltage	690 V
周波数 Frequency	50 Hz
絶縁の耐熱クラス Insulation class	F種 F class
極数 Number of poles	4

表3 増速機  
Table 3 Gear box

構造 Structure	遊星歯車2段，斜歯歯車1段 2 stage planetary, 1 stage helical
潤滑方式 Lubrication	強制潤滑方式 Forced lubrication
増速比 Gear ratio	90 : 1

#### 4. 荏原フライデラー製風力発電装置の特長

荏原フライデラー製風力発電装置は、巻線型誘導発電機を使用した可変速制御とブレードの可変ピッチ制御を組み合わせた方式を採用している。本方式は風速に応じた最適回転速度での運転ができることから、風力エネルギーを十分に活用することが可能であり、その上風速変動を吸収できるため、複雑地形で風の乱れが大きい日本に特に適合している。また、突入電流が発生しない、出力変動が小さい、力率制御が可能という優れた特長があり、系統連系に際しても有利なタイプである。

風力発電の適地の少ない日本においては、限られた系統容量でより多くのエネルギーを生み出せるように、同一定格出力でも、より高性能な風車の導入が求められるようになってきている。

一方、従来の経験から、欧州メーカー製の風力発電機をそのまま日本に導入した場合、環境の違いにより、次のような問題を起こすことが知られている。欧州と異なり山岳地等の起伏変化の激しい地域の多い日本では、ロー

表4 ロータ  
Table 4 Rotor

形式 Type	アップウインド形 Up wind
主軸支持方式 Shaft Support	増速機による直接支持方式 Supported by gear box
ブレード枚数 Number of blades	3枚
ブレード長さ Length	34 m
材料 Material	GFRP
ピッチ制御装置（駆動方式） Pitch angle control system	電動式 Electrical motor and gear
ピッチ制御装置（駆動装置個数） Number of pitch control system	3個
質量 Mass	31 t

表5 ナセル  
Table 5 Nacelle

構成 Structure	増速機，発電機，ヨーモータ，制御盤等を収納し，FRP製カバーを有する。ナセル上に風向計と風速計を装備する。 Gear box, generator, yaw motor, control cabinet are covered with a FRP cover. The anemoscope and anemometer are on the top of the nacelle.
ヨー制御装置（構成） Yaw system (Structure)	滑り軸受およびヨーギア，ヨーモータ Slide bearing, yaw gear, geared motor
ヨー制御装置（駆動方式） Yaw system (Control)	風向計による強制ヨー方式 Driven yaw controlled based on wind vane signal
質量 Mass	53 t

表6 タワー  
Table 6 Tower

形式 Type	テーパモノポール Conical, tubular
材料 Material	鋼板 Steel plate
塗装 Painting	ポリウレタン/エポキシ塗装 Poly-urethane/Epoxy resin
構造 Structure	出入口扉，昇降梯子，踊り場，照明器具付き Entrance door, ladder, stage, lighting
質量 Mass	115 t

タに水平方向以外の荷重が働き、ヨーシステムに想定外の負担がかかって故障を起こす例が見られる。また、風力発電の好適地が多い日本海側では冬季雷により様々な被害を受けている。

荏原フライデラー製風力発電装置は、可変速技術のパイオニアとして10年以上の開発を行ってきたウイン

ド・テック社の技術をベースに、従来の問題点を克服した最新の風力発電装置である。

風力発電装置のナセル組立図を図3に、単線結線図を図4示す。

4-1 発電機の制御

本風力発電装置（EPW1570）は風力エネルギーを有効利用するため直径70 mの大形ロータを採用すると共に、可変速制御を行っている。これにより、風速に応じた効率のよい回転速度で運転することが可能で、運転範囲全体を通して高い発電能力を発揮することができる。

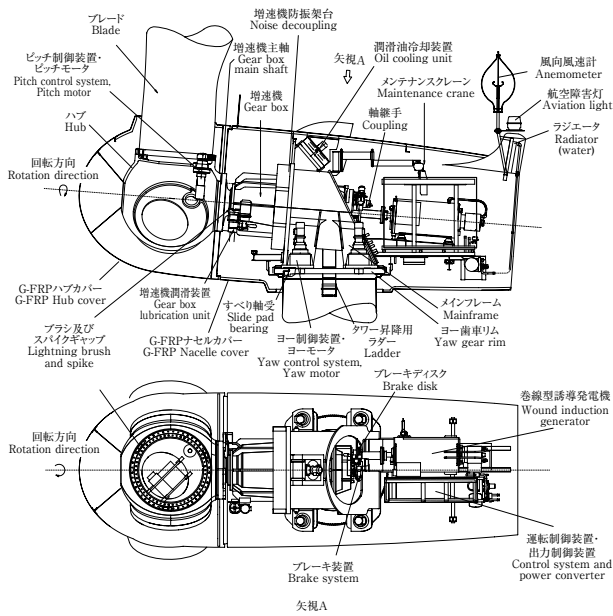


図3 ナセル組立図  
Fig. 3 Nacelle assembly

また、双方向インバータによる発電機制御を行っており、瞬間的な出力変動が抑制できる、突入電流が発生しない、力率制御が可能といった電氣的にも優れた特長がある。図5にEPW1570型のパワーカーブを示す。

(1) 二次励磁制御誘導発電機（DFIG）の概要

本風力発電装置で採用している二次励磁制御誘導発電機（DFIG：Double Fed Induction Generator）は巻線型誘導発電機の回転子にインバータを接続した装置構成となっており、回転子の励磁を制御することにより同期発電機と同様に発電機の出力、回転速度を制御することが可能である。また、インバータを制御することにより力率制御や突入電流の発生を抑制することができる。

(2) 回転速度制御

本風力発電装置は二次励磁制御巻線型誘導発電機の回転子励磁周波数を制御することにより、ロータ回転速度を風速に応じて最適に制御するため、高効率な運転が可能である。また、回転速度を変えることにより、瞬間的な風速変動による出力変動や乱れた風による変動荷重を吸収するため、電力品質を向上しかつ機器への悪影響を防止することができる。

回転子に接続されたインバータで以下の制御を行い、低い回転速度（カットイン風速時）から定格回転速度まで発生電力の周波数を一定に保つように制御する。

- ・ 発電機回転速度が同期回転速度より低い場合：回転子に電力を系統から供給する。
- ・ 発電機回転速度が同期回転速度より高い場合：回転子で電力を発電し、系統へ供給する。

(3) 出力制御

風力発電装置の出力制御は、発電機回転子の励磁電流をベクトル制御することにより行われる。瞬間的な風速

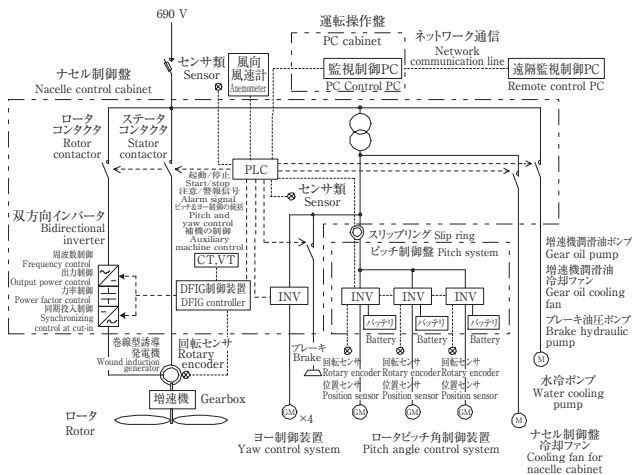


図4 単線結線図  
Fig. 4 Single diagram of wind turbine

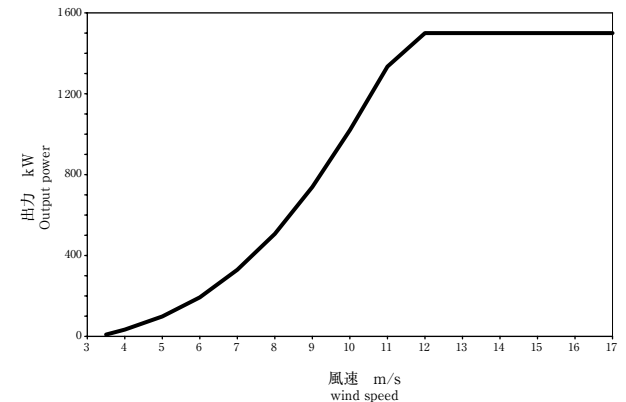


図5 EPW1570型のパワーカーブ  
Fig. 5 EPW1570 power curve

変動が発生しても、発電機出力を一定に制御することが可能なため、瞬時的な出力変動の小さい高品質な電力を供給することができる。風速が高く定格出力以上となる場合は風車ロータブレードのピッチ角制御を行い風力エネルギーを逃がすことにより、発電機の出力が許容範囲内に収まるよう調整する。この場合でも、発電機出力は回転子励磁により制御されるため、出力変動の少ない発電が可能である。

本風力発電装置はカットアウト風速時（5秒平均風速：35 m/s、5分平均風速：25 m/s）、ブレードピッチ角制御によりロータ回転速度を制御し、自動的に発電を停止させる。

#### (4) 電圧制御

風力発電装置のステータ側の出力電圧は、誘導発電機のため、基本的に系統の電圧に合わせて発電される。一方、ロータ側の出力電圧は系統側インバータにより系統側の電圧に合わせて出力制御される。電圧が設定値以上に上昇又は低下した場合、自動的に発電機を系統から切り離し、停止する。

#### (5) 力率制御

風力発電装置の力率は、インバータによって回転子励磁電流のベクトル制御を行い調整される。これにより発電機出力に関係なく、力率を系統側の要求等に合わせて制御することができる。設定値は通常1であるが、進み0.95～遅れ0.9の範囲で変更することが可能である。

#### (6) 発電機始動時の突入電流制御について

風速が上がり発電機の回転速度が上昇した時、発電機は自動的に系統へ連系される。このとき、発電機回転子に接続されたインバータを制御し同期投入することにより、突入電流の発生を防ぐため、変動の影響を受けやすい系統にも対応することができる。

### 4-2 電動ピッチ制御機構

電動独立ピッチシステムの採用により、高速で正確なピッチ制御が可能である。3枚の各ブレードには、それぞれギアモータとコントローラを装備した独立ピッチシステムがあり、一つが故障しても安全に停止することが可能である。更にバッテリーにより電源がバックアップされているため風車への外部電源供給が断たれた場合でもブレードをフェザリング方向に回転させ、風車を安全に停止させることが可能である。また、油圧を使用しないため、油の漏洩による環境汚染の心配がないという点で優れている。

### 4-3 すべり軸受ヨーシステム

前述のように、欧州の風力発電装置をそのまま日本に

導入した場合、欧州と異なり山岳地等の起伏変化の激しい地域に適地の多い日本では、吹き上げや乱流により、ロータに水平方向以外の荷重が働き、ヨーシステムに想定外の負担がかかって故障を起こすことがあることが知られている。

すべり軸受ヨーシステムは、タワー上部に設けられたフランジの上下及び側面にスライドパッドを配し、この上にナセルを滑らせて回転させる方式で、ロータとナセルの質量及び風による荷重をスライドパッド面全体でしっかり受け止めることができる。更に、ヨー動作時にはその動荷重も受け止める。スライドパッドには摩擦力があるため、油圧装置を用いたヨーブレーキが省略され、ヨーモータの小容量ブレーキ機能により位置保持が可能である。また、通常用いられる転がり軸受のようなグリスの補充が不要で、メンテナンスの手間が軽減でき、油の漏洩により周囲を汚す可能性も少ない等の特長がある。

#### 4-4 ロータ支持方式

従来のようにロータを主軸受と増速機に分けて支持するのではなく、ロータは増速機で直接支持する構造を採用している。ロータは増速機の主軸に直結され、増速機ケーシングの外周360°に設けられたフランジを特殊ゴムで支えて支持する特殊な構造のため、ロータから伝達されるどの方向の荷重も従来のシステムに比べて均等な剛性で支持することが可能である。増速機に作用した荷重はメインフレームを通じ、すべり軸受ヨーシステムを介してタワーに伝達される。

#### 4-5 タワー

タワーは、ロータ、ナセル及びタワーの自重とブレード、ナセル及びタワーが受ける風圧荷重を考慮し有限要素法による解析を行い、問題のないことを確認した。

#### 4-6 遠隔監視制御システム

風力発電装置の運転停止時間を最小限とするグレード別故障復帰システムを採用した、日本語仕様、受変電設備を含めた統合監視が可能な遠隔監視制御システムを当社独自で開発し、24時間監視を実施している。荏原遠隔監視画面の一例を図6に示す。

##### (1) 自動復帰

火急の修理を要しない軽微な異常が発生した場合、故障原因が自動的に除去された後、風力発電装置停止後約2分後に自動復帰する。

##### (2) 遠隔操作復帰

火急の修理は要しないが、(1)に比較しやや重い故障（例えばディスクブレーキ作動を伴うような故障）が発



図6 荏原遠隔監視画面  
Fig. 6 EBARA remote control system

生じた場合、顧客又は(株)ウインド・サービスによる遠隔操作で復帰する。

(3) 現場手動復帰

復帰前に点検又は修理を要する故障が発生した場合、(株)ウインド・サービスにより処置した後、現場運転操作盤にて故障復帰する。

4-7 落雷対策

風力発電の適地は日本海側にも多くあるがこれらの地域は冬季に雷が多発することでも知られている。このため、多くの風車が制御機器の焼損、通信障害、最悪の場合はブレードの損傷・交換といった被害を受けている。本風力発電装置は以下に述べる徹底した落雷対策を行っており、雷による被害防止に努めている。

(1) ナセル・ハブ内

次の構造とすることにより速やかに雷電流を逃がす構造となっている。

- ①各ブレード先端部を金属製レセプタとし、ブレード内に避雷導線を装着
- ②各可動部にブラシ及びスパイクギャップを装備（ブレード-ハブ間、ハブ-ナセル間）
- ③ナセルカバーの周囲に導線を張り巡らしたファラデーケージを装備

- ④風向・風速計も避雷ガードに加えアレスタで保護
- ⑤ナセルとタワー間にブラシを設けるとともに避雷導線も装着し抵抗を低減

(2) タワー下

環状接地による等電位ボンディングを実施し、更に落雷による被害を防げるレベルに接地抵抗を低減するなど以下の対策を行っている。

- ①環状接地線により、落雷時の大地電位上昇を抑制
- ②環状接地線内の等電位化
- ③通信信号線の光ファイバ化による制御系統保護（ナセルとタワー下間及びタワー下と発電設備間）

5. おわりに

当社は、従来から環境共生（ゼロエミッション）型社会の構築に必要な技術とシステムの開発に積極的に取り組んできた。風力発電については1997年に発電所建設の一括請負事業者として参入し、デンマークのエヌイージー・ミーコン社及びドイツのデウインド社の風力発電装置を、エコ・パワー(株)をはじめとして、民間企業、地方自治体向けに納入しており、2004年度末までに105基、10万8千kWの建設実績を有している。

当社はグループ会社として発電事業会社のエコ・パワー(株)、風力発電メンテナンス会社の(株)ウインド・サービスを持ち、計画から建設、運転保守まで総合的に行ってきたが、風車本体の設計・製造は行っていなかった。

荏原フライデラー設立により、風力発電装置の本体の製造技術を取得し、発電事業運営から風力発電装置の製造、建設エンジニアリング、メンテナンスサービスに至るまでのグループとして一貫した風力発電事業体制を確立した。このような中で第1号機として酒田風力発電所を建設・運転開始したことは今後の発展の礎となるものと考えている。

最後に受注から現在に至るまでの間、多大なるご助言・ご支援をいただいたコスモ石油(株)をはじめ関係者の皆様に深く謝意を表す。