

大型風車「ダウンウィンド 2MW機」の開発 —日本の環境に適合した風力発電システム—

Development of 2-MW Downwind Turbine

松信 隆 Takashi Matsunobu

五十川 満 Mitsuru Isogawa

二見 基生 Moto Futami

長谷川 勉 Tsutomu Hasegawa

佐藤 和彦 Kazuhiko Sato

加藤 裕司 Hiroshi Kato

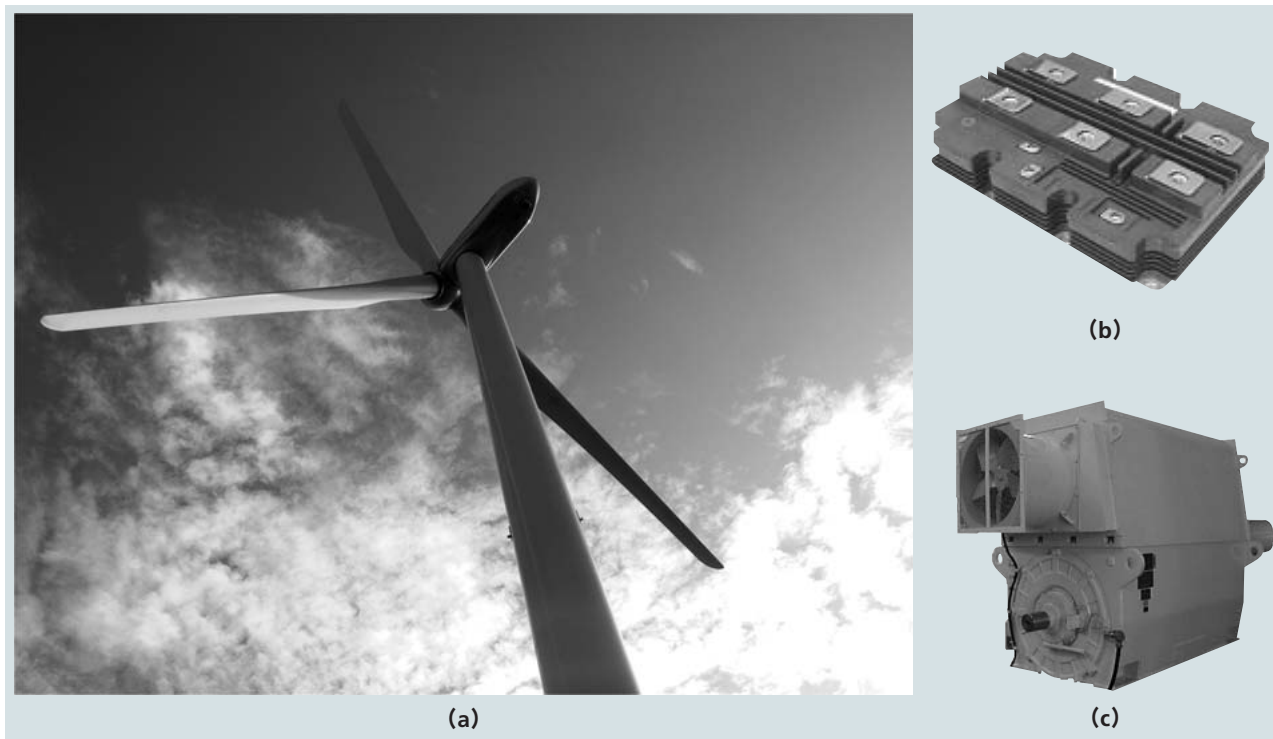


図1 大型風車ダウンウィンド 2MW機の量産1号機「SUBARU 80/2.0」および発電システム

株式会社ウィンド・パワー・いばらき「ウィンドパワー日立化成風力発電所」の大型風力発電システム「SUBARU 80/2.0」(ブレード直径80 m, 出力2,000 kWのダウンウィンド 2MW機の量産機)を(a)に、高圧IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)素子を(b)に、2,000 kW交流励磁型同期発電機を(c)にそれぞれ示す。

風力発電システムは、化石燃料代替エネルギーおよび地球環境改善の観点から、国内においても、その重要性はますます高くなってきている。これに応じた経済性と信頼性の高い風力発電システムを作るためには、風車本体設備、変電設備などのシステムおよび構成機器のそれぞれが、国内の地形、風の特性、雷や台風などの環境、風力発電所への資材の搬入制約、電力システムの制約に適合した経済性と信頼性を持つ必要がある。

日立製作所は富士重工業株式会社とともに、株式会社ウィンド・パワー・いばらき「ウィンドパワー日立化成風力発電所」に2MWの大型風力発電システムの量産機を設置し運転を開始した。この量産機は日本の環境に適合するために、ロータ型式はダウンウィンド型を採用した。さらに、据付け時の搬入や電力システムへの連系などにも配慮して改良を加え、高品質の電力をより効率的に発電することができる安定した運転を実現している。

1. はじめに

二酸化炭素(CO₂)の排出量抑制および地球温暖化防止に有効な風力発電の導入への期待が高まる中で、風力発電システムの発電効率向上、風力発電設備の大型化、建設工法の合理化、工期短縮、修理や点検の簡易化により、風力発電の発電コストを低減し、発電事業として成立しやすくなる検討が進められてきた。

日立製作所は、富士重工業株式会社と2008年2月に、茨城県神栖市において大型風車ダウンウィンド 2MW機の量産機(以下、量産機と記す)を完成し運転を開始した(図1参照)。量産機には、IEC(International Electrotechnical Commission:国際電気標準会議)の風力発電システムの国際規格を超えた基準を適用した。日本の環境により適合した風力発電システムとして、台風や雷、山岳地の風、狭隘(あい)な道路環境、据付けに用いる重機などの搬入、電力システムへの連系などに配慮した各種の改良を加えている。

ここでは、日本の環境に適合した風車をコンセプトに開発したダウンウインド 2MW機の量産のベースとなる株式会社ウインド・パワー・いばらき「ウインドパワー日立化成風力発電所」の風車本体、系統連系設備の設計、および建設工事について述べる。

2. 開発の概要

量産機の主要機器の配置は、ロータ(ブレード)と発電機などがタワーの頂部に搭載され、ロータの回転軸が水平方向にあることを基本としている。ロータと発電機などは、風向に合わせて水平面内において方向を変えることができる。ロータ型式を、ダウンウインド型としたことが最大の特徴である。大型風車においては、ロータをタワーより風上に配置したアップウインド風車が一般的であるが、量産機では、ロータをタワーより風下に配置している(図2参照)。量産機の主要仕様を表1に示す。

量産機には、日本の環境に、より適合し得るように、IECの風力発電システムの国際規格「IEC61400シリーズ」に規定される風車などに比べ、下記の改良を加えた。

- (1) 複雑・山岳地の吹上風を捕らえて発電量を増加
- (2) 耐風速(台風・停電時の強度)を向上
- (3) IEC規格を超えた正極雷への耐性を確保
- (4) 電力系統への連系を容易にする電力制御の採用
- (5) 搬入・据付けを容易にする分割式ナセル、タワーの採用
- (6) 保守補修性の向上、ナセル質量の低減

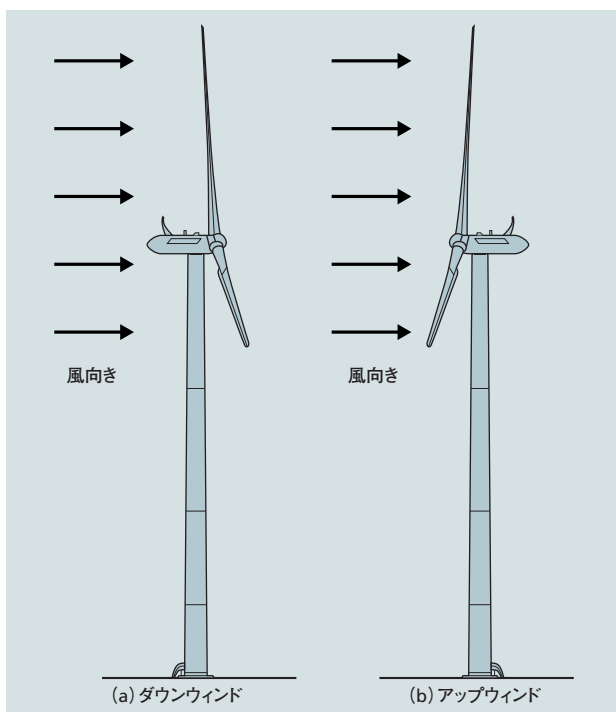


図2 風車型式の比較

ダウンウインド型は、ブレードをタワーより風下に設置する風車型式であり、アップウインド型では、ブレードがタワーよりも風上に置かれる。量産機は、ダウンウインド方式固有の安定性を活用し、特に山岳地や丘陵地において高効率で安定した発電出力を実現する。

表1 量産機の主要仕様

量産機は、ブレード頂の高さ120mの国産最大級となる大型風車である。

分類	項目	仕様
基本仕様	ロータ径	80 m
	ハブ高さ	80 m
	定格出力	2,000 kW
	定格風速	13 m/s
	カットイン風速	4 m/s
	カットアウト風速	25 m/s
発電機	発電機型式	交流励磁型同期機
	極数	4極
	周波数	50 Hz
制御	速度制御	可変速
	出力制御	ピッチ制御
	緊急ブレーキ	ピッチ制御
環境条件	ヨー制御	アクティブヨー
	耐雷強度	250 kA

3. 量産機の特徴

3.1 風車システム

3.1.1 ロータ

ロータは、ブレード、主軸、ブレードを軸に固定するハブで構成される。ブレードの取付角がピッチ角で、これを固定したものが固定ピッチ方式であり、風の状態に応じて風の捕らえ方をコントロールするのが可変ピッチ方式である。量産機では、この可変ピッチ方式を採用している。

ダウンウインド型では、ブレードの旋回領域がタワーの風下側に位置するため、ブレードが1回転するごとにタワーの後流(Wake)の領域を通過するため、ブレードへの変動荷重と騒音を発生させる可能性がある。しかし、タワーと十分に離隔距離を置いた位置で、ブレードを旋回させることにより、風速変動の影響を少なくし、ブレードの変動荷重と騒音の課題が解決できることを解析および実証機の運転によって確認している(図3参照)。

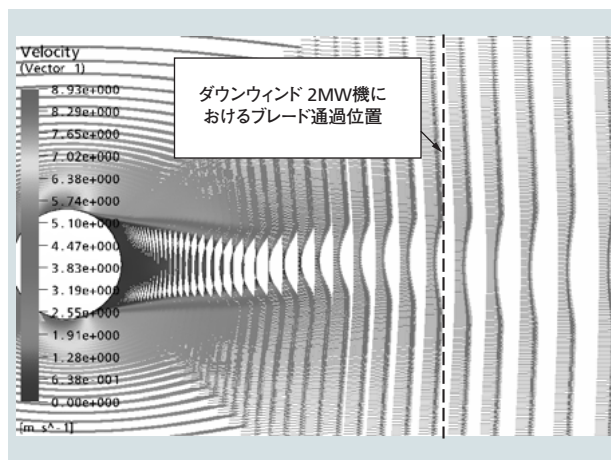


図3 タワーの後流解析¹⁾

量産機は、タワーの後流(Wake:タワーの風下側の風速が低下する領域)の影響を軽減するために、タワーとブレードの離隔を確保している。



図4 量産機のナセル部
軽量化に配慮するとともに、ダウンウィンド風車としての風向を考慮した流線型としている。この写真において風は、右から左に向かっている。

3.1.2 ナセル

ナセルは、ロータの主軸、増速機、発電機を搭載する構造物である。ナセルは、タワーの頂部にタワーの中心軸回りで回転可能な形で取り付けられ、ヨー駆動機構により、風の利用効率を高めるため、風の向きと一致するように制御される（[図4](#)参照）。

3.1.3 タワー

タワーは、円錐（すい）形の管状の鋼製タワーとし、輸送性を確保する観点から4個の分割構造としている。タワー基部は補機の設置スペースとして利用している。タワー内には、電力ケーブルと制御用の光ファイバなどを設置している。

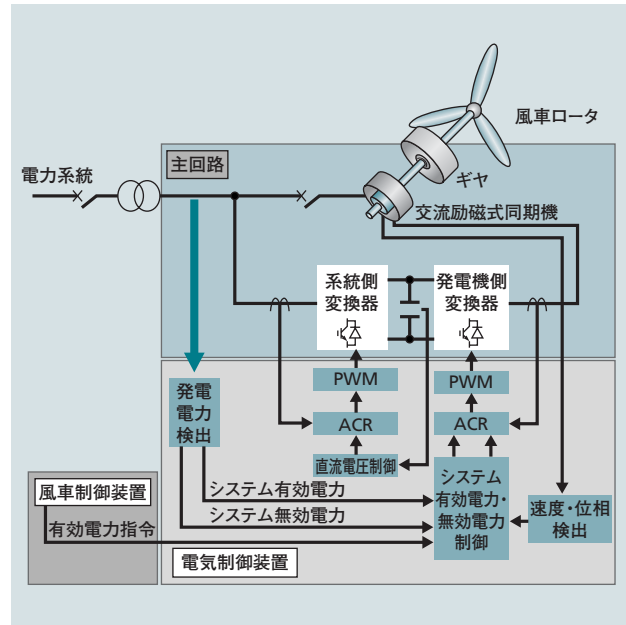
3.1.4 発電機システム

発電機は、回転子と固定子それぞれに巻線を備えた4極空冷式発電機を使用した。この種の発電機は交流励磁同期発電機と呼ばれる。電力変換器で回転子の磁界を制御することで、広いロータ速度範囲に追従した運転が可能となる。送電システムの電圧を安定させるために、系統から発電機を見た力率で、遅れ0.9から進み0.95の範囲内での制御を可能とした。系統の周波数変動は 50 ± 3 Hz以内に追従できる（[図5](#)参照）。

また、1,400 V定格のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)は、発電機端の電圧を一般の風力用発電機の660~690 Vに対して約2倍の1,400 Vに高電圧化し、ナセルに設置される発電機とタワー基部に設置されるIGBT間の送電電力損失を低減している。

3.1.5 耐雷システム

直撃雷対策として、レセプタクル、避雷針、棟上げ導体への雷電流を、引き下げ導線を用いて接地まで導く。ブレードには、先端に取り付けた無垢（むく）のアルミ鋳物製大型レセプタクルとブレード中間点の両面に取り付けた円形レセプタクルを組み込んだ³⁾。IEC保護レベルIで基本設計するとともに、正



注:略語説明 PWM (Pulse Width Modulation),
ACR (Automatic Current Regulator)

図5 発電制御の構成

発電システムの有効電力・無効電力制御²⁾により、電力系統連系に配慮した発電出力を実現する。



図6 高さ80 mでのブレード組立

直径80 mのブレード地組(地上で3枚のブレードを組み立てるプロセス)スペースを縮小することが可能となる高所でのブレード組立工法を開発した。

極雷にも耐えるように、電流波高値250 kA、全電荷350 Cに設定している。

3.2 輸送および建設技術

一般道路における橋梁(りょう)設計上の耐荷重および1,000 kW級風車の搬入質量に合わせ、ナセルを40 t以下の単位で搬入可能なように分割できる構造としている。量産機では、350 tクローラークレーンの使用を目標にナセル部の小型軽量化および工法の改善を適用している。さらに建設時に整地が必要となる地上部分の面積を縮小するため、高さ80 mの位置でブレードをハブに取り付ける工法を適用した（[図6](#)参照）。

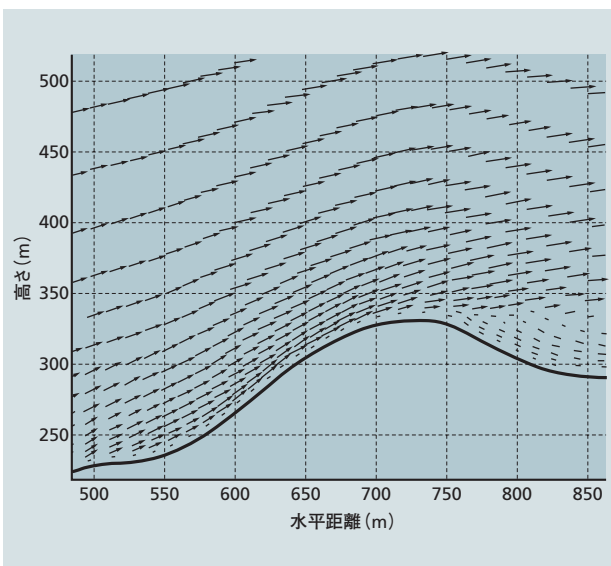


図7 山の斜面における風の流れ⁴⁾
風力発電にとって有効な吹上風が山の斜面に沿って発生する。

4. 設置条件と発電量増加

風力発電の経済性の向上には、発電量の増加が重要である。特に山岳地の多い日本国内においては、地形による発電量の変化にも配慮が必要である。

山の斜面における風の流れは、山の斜面を吹き上げる際に風速が増加し、風力発電に有効な状態となる(図7参照)。

ダウンウインド風車が吹上風環境下で運転される場合の出力 $P(V)$ は次式で与えられる⁴⁾。

$$P(V) = \min \left\{ P_{\text{Rate}} \left(\frac{\cos(\gamma + \alpha)}{c_s \sin \gamma \times \cos \alpha} \right)^3 \times P_0 \right\}$$

[P_{Rate} :定格出力, P_0 :定格パワーカーブ(水平風による),
 γ :吹上角, α :チルト角]

タワーの風下にロータが位置するダウンウインド風車のロータ回転軸は、風上に向かって下を向いている(チルト角)ために、風向とロータ軸との間の角度誤差はアップウインド風車に比較して少ない。前述した式によれば、吹上角が $+6.0$ 度である場合、ダウンウインド風車は、アップウインド風車に比較し、約7.6%の発電量増加が期待できる。

5. おわりに

ここでは、大型風車ダウンウインド2MW機のベースとなる量産機について述べた。

量産機の運転により、当初、システム設計の段階で検討・計画していた項目についての貴重な運転データが得られた。これらのデータを基に解析、評価し、今後の設計に反映して、よりいっそうの技術開発に努めていく考えである。日本特有の課題である地形、台風、雷などの制約に適合しやすい大型風力発電システム技術を普及させることを目標に、風力発電事業者の方々の理解と協力を得ながら、風力発電の立地が難しかった地域へ風車の設置を推進していきたい。

参考文献

- 1) 永尾:2 MW大型風車「SUBARU80/2.0」の開発, 日本風力エネルギー協会誌通巻77号(2006.6)
- 2) 日立製作所, 電力優先制御による発電機制御, 特許第2555407号広報
- 3) 永尾:ダウンウインド型風力発電, ターボ機械(2006.11)
- 4) S. Yoshida:Performance of Downwind Turbines in Complex Terrains, Wind Engineering Vol. 30, No.6(2006)

執筆者紹介



松信 隆
1983年日立製作所入社, 電力グループ 電機システム事業部 FH推進部 所属
現在, 風力発電システムの取りまとめに従事



長谷川 勉
1982年日立製作所入社, 電力グループ 電機システム事業部 FH推進部 所属
現在, 風力発電システムの取りまとめに従事
電気学会会員



五十川 満
1972年日立製作所入社, 電力グループ 電機システム事業部 FH推進部 所属
現在, 風力発電システムの取りまとめに従事
電気学会会員



佐藤 和彦
1982年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 新エネルギーシステムエンジニアリンググループ 所属
現在, 風力発電システムの開発に従事



二見 基生
1987年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター インバータイバージョンセンタ 所属
現在, 風力発電システムをはじめとするパワーエレクトロニクスシステムの開発に従事
電気学会会員



加藤 裕司
1985年富士重工業株式会社入社, エコテクノロジーカンパニー 風力発電プロジェクト 所属
現在, 風力発電システムの開発に従事