

複雑地形におけるダウンウィンド風車の性能優位性

Performance Advantage of Downwind Turbines in Complex Terrains

吉田 茂雄 *1

Shigeo YOSHIDA

Abstract

Downwind turbines have smaller misalignment toward upflow wind than upwind turbines, because of their tilt angles. It indicates the former produces more energy in complex terrains, where upflow wind is dominant in general. The performance advantage of downwind turbines in upflow wind was validated through wind turbine simulations and field tests of a turbine in both rotor positions. Furthermore, a case study in a typical wind farm in a complex terrain with eight 80m/2MW turbines in both rotor positions were carried out. It showed time and energy average inclinations were +6.0deg and +7.5deg each, and the downwind turbines produce 7.6% more energy than upwind turbines.

キーワード：風力発電, ダウンウィンド, 複雑地形, 吹上角, ミスアラインメント

Keywords: Wind Turbine, Downwind, Complex Terrain, Inclination, Misalignment

1. はじめに

1980年代に始まった近代風車開発の歴史は、経済性を追及した、大型化・低コスト化の歴史といっても過言でない。当時の風車は、種々の形態が乱立していたが、500kWクラスが主流となった80年代後半には3枚翼アップウィンドに、また、1,500kWクラスが主流になった90年代後半には可変速・ピッチ制御に概ね収束したように見える。今日、洋上を志向したロータ直径100mを越える超大型風車も、基本的にこの流れに沿っている。

起伏の多い地形は複雑地形と呼ばれるが、代表的な複雑地形における風況の例をFig.1に示す。風力発電は欧米の平坦地で成長してきており、技術標準等もこれが基準になっている。一方、スペインなどの南欧や日本などの環太平洋地域では、複雑地形に風力発電の適地が広く分布する。複雑地形では、従来無視されてきた吹上風の影響が顕著になるため、三次元的な発電量推算方法が提案された^{[1][2]}。同推算法によると、日本の風力発電適地の多くを占める複雑地では、一般に風速が高くなる吹上風にロータが正対するダウンウィンドの方が、発電量が大きくなることが示唆されている。

本研究では、吹上風におけるダウンウィンド風車の性能優位性を風車のシミュレーションならびに運転試験により検証し、発電量に対する影響を、風況・発電量シミュレーションにより示した。

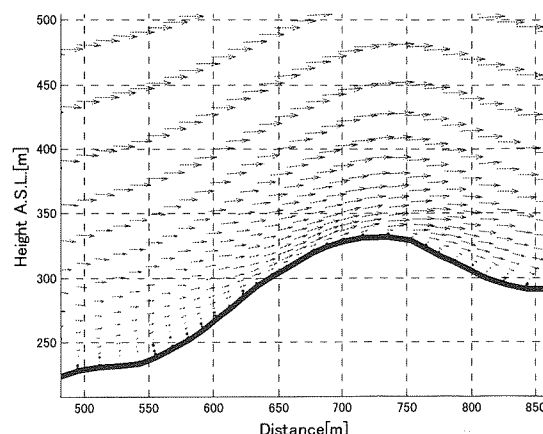


Fig.1 Typical Wind in Complex Terrain

2. 出力解析法

Figs.2,3に同一の吹上風（流入風速 W 、吹上角 γ ）に対するアップウィンドとダウンウィンドの風速ベクトルを示す。水平軸風車は、ロータとタワーの間のクリアランスを合理的に確保するため、アップウィンド風車は正の、ダウンウィンド風車は負のティルト角を持つ。本研究では、これらのロータ位置とティルト角の関係を前提とした。

既存の出力曲線ならびに発電量推算法は、風の水平成分（Figs.2,3中の U ）によるものである^{[3][4]}。風の三次元性が顕著な複雑地形における出力 P の推算法として、出力曲線（水平風）における出力 P_0 、定格出力 P_{Rate} 、吹上角 γ 、

*1 富士重工業(株) (〒320-8564 宇都宮市陽南1-1-11)
e-mail: yoshidas@utu.subaru-fhi.co.jp
(原稿受付: 2006年3月23日)

ならびにティルト角 α を用いた下式が提案されている^{[1][2]}。

$$P = \min \left\{ P_{Rate}, \left(\frac{\cos(\gamma + \alpha)}{\cos \gamma \cdot \cos \alpha} \right)^3 \cdot P_0 \right\} \quad (1)$$

同式によるティルト角 $\pm 6\text{deg}$ のロータについて、風の水平成分 U を一定とした場合の吹上角に対する出力比(水平風基準)を Fig.4 に示す。アップウィンド風車(ティルト角 $> 0\text{deg}$)における出力は、吹上角が増加するに伴い減少し、ダウンウィンド風車(同 $< 0\text{deg}$)では逆に増加するという、吹上風に対する一般的な傾向が示されている。これは、Figs.2,3 において、水平成分 U を一定とした場合、アップウィンドロータ(Fig.2)は、吹上角が増加するに従い垂直成分 U_N が小さくなるのに対して、ダウンウィンドロータ(Fig.3)は、逆に大きくなることから明白である。

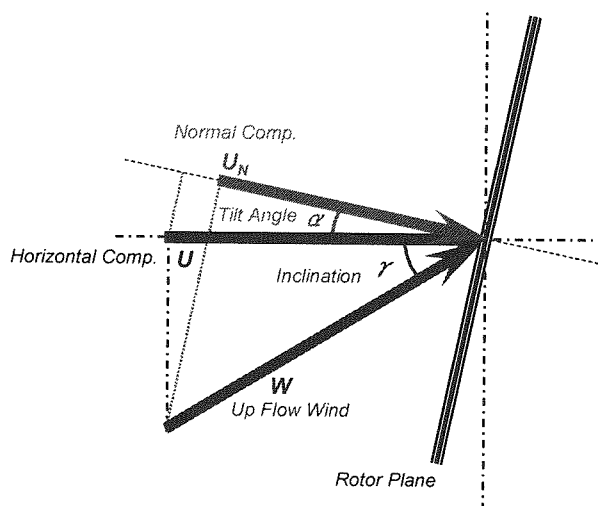


Fig.2 Upflow Wind into Upwind Rotor

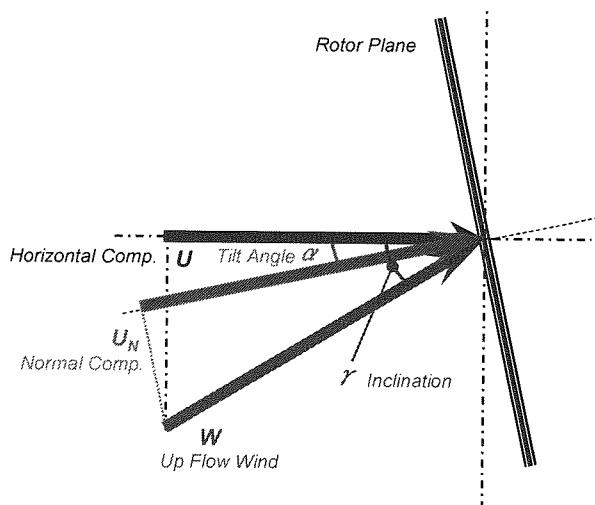


Fig.3 Upflow Wind into Downwind Rotor

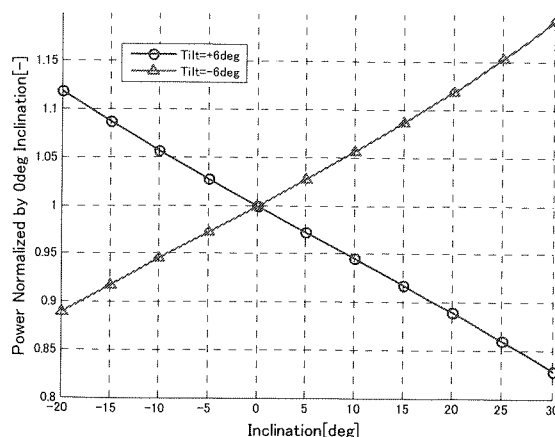


Fig.4 Normalized Power at Two Tilt Angles and Inclinations

3. フィールドテスト

3.1 試験概要

(1) 風車

式(1)の妥当性は、SUBARU22/100 試作機^[4]のシミュレーションと運転試験により報告されている^{[1][2]}。この運転試験は、ロータ風上側の吹上角を計測するために、同機を一時的にダウンウィンド形態に改修して実施したものである。一方、開発時のフィールドテストでは、通常のアップウィンド形態での試験を実施している^[4]。これらにより、吹上風におけるロータ位置の影響を評価する。

風車の基本仕様を Table 1 に、外観を Fig.5 に示す。ここで、ダウンウィンド形態では、運転中の吹上角を計測するため、ナセル風上側に 2m のブームを張り出し、その先端に二次元超音波風速計を設置した。

なお、計測値に対する風車制御による影響を排除するため、両形態において、基本的に同一の制御を適用している。

Table 1 SUBARU22/100 General Specifications

Rotor Position	Upwind	Downwind
Rotor Diameter	22m	22m
Rated Power	100kW	100kW
Power Control	Pitch	Pitch
Speed Control	Variable	Variable
Tilt Angle	+6deg	-6deg
Hub Height	24m	24m

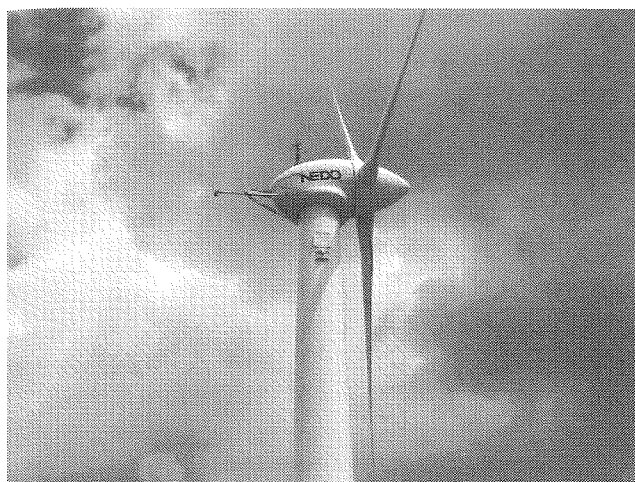


Fig.5 SUBARU22/100 Downwind Configuration
with Front Anemometer

(2)試験サイト

試験サイトは沖縄県伊是名島の沿岸から 1km 弱内陸の標高約 40m の地点にある。試験サイトの位置を Fig.6 に、その矩形部を拡大し、試験サイト平面図として Fig.7 に示す。本試験ではサイトの北側に位置する 2 号機を使用した。この位置の西から北にかけて高さ約 20m の斜面があり、この方位からは三次元的な風（吹上風）が期待される (Fig.8)。



Fig.6 Test Site Location in Izena Island

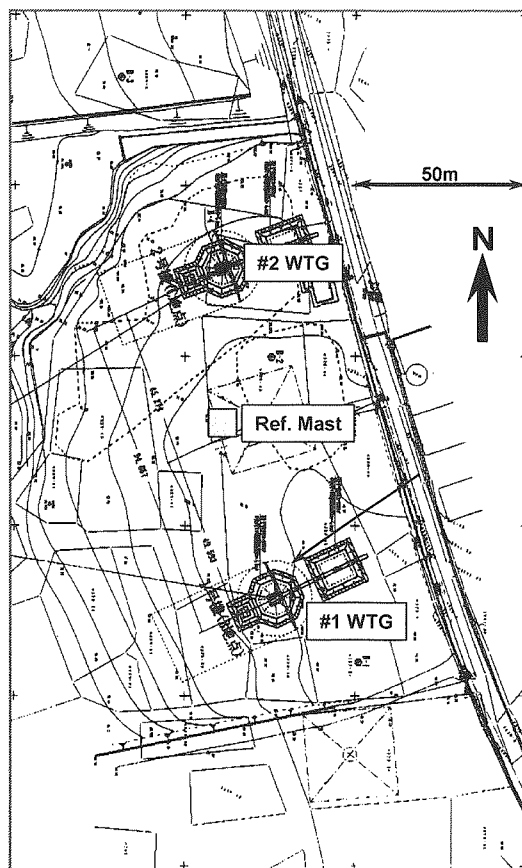


Fig.7 Plan View of Test Site
(Close-up of the Rectangle in Fig.6)



Fig.8 Test Site from North-West

3.2 試験結果

(1)風況

風のパワーは風速の三乗に比例する。一般的な風車は、機器の強度を確保するため、高風速域では出力が定格出力になるように効率を下げて運転する。逆に、低風速域では、風のパワーを有効に電力に変換すべく、極力高効率が得られるように制御する。本風車の場合、風速 6~8m/s で効率が最大（一定）となるように設計している。したがって、

以降、この6~8m/sに限定して、両形態の性能比較を行う。

ダウンウィンド形態の全試験結果(2004年02月20日~26日)のうち、6~8m/sで抽出したデータの、吹上角に対する乱流強度をFig.9に示す。同図には、吹上角2deg刻みのBin平均値も併記する。全般的に、吹上角0deg付近で平均乱流強度は極小となり、傾斜が大きくなるに従い、乱流強度も高くなる傾向がある。

次に、風向に対する風上風速計の風速と吹上角(10min平均値)をFig.10に示す。吹上角は正負混在しているが、風上に斜面のある西(-90deg)~北西(-45deg)にかけては、全てのデータが吹上風(+1~+11deg)になっている。

(2)吹上角の効果

風速6~8m/sの、吹上角に対する効率比(水平風基準)をFig.11に示す。-2deg以上の吹上角において、式(1)はBin平均値の傾向を良く捉えている。逆に、-2deg以下の吹上角の場合に両者の差が目立つが、次章に示すように負の吹上角ではエネルギー密度が低いため、発電量推算における影響は大きくない。

(3)性能比較

風向-120~40degに限定して作成したダウンウィンド形態とアップウィンド形態の出力曲線をFig.12に示す。これらは、いずれも1min平均値を元に作成した1m/s刻みのBin平均値であり、横軸の風速はマストの値を示す。なお、この風向範囲では、全ての10min平均値で正の吹上角が得られているとともに、参照風況マストは風車後流の影響を受けないものと考えられる。これらの図に示した風速域では、全般的にダウンウィンドの方が3~11%高い効率が得られている。

以上により、吹上風においては、ダウンウィンド形態の方がより高い出力が得られることが示された。

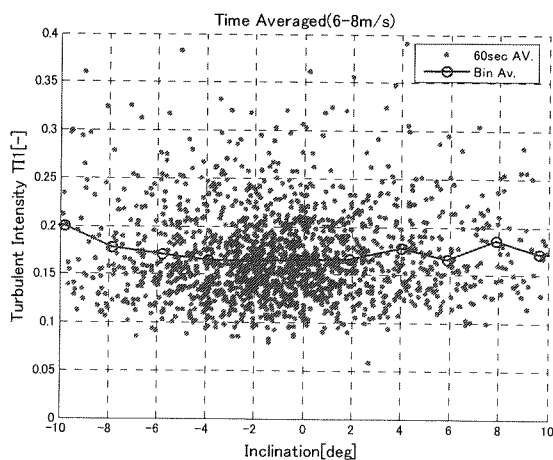


Fig.9 Turbulent Intensity against Wind Inclination

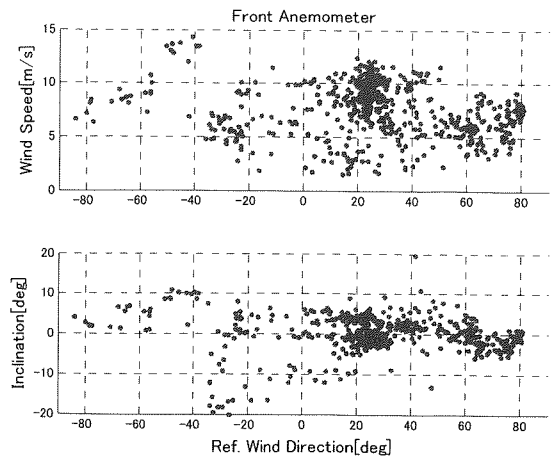


Fig.10 Front Anemometer Wind Speed and Inclination

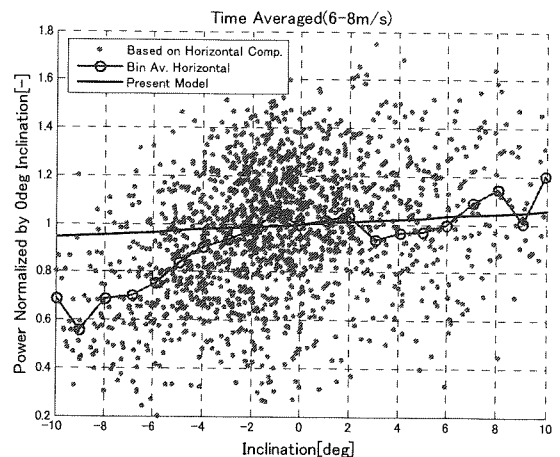


Fig.11 Normalized Power against Inclination

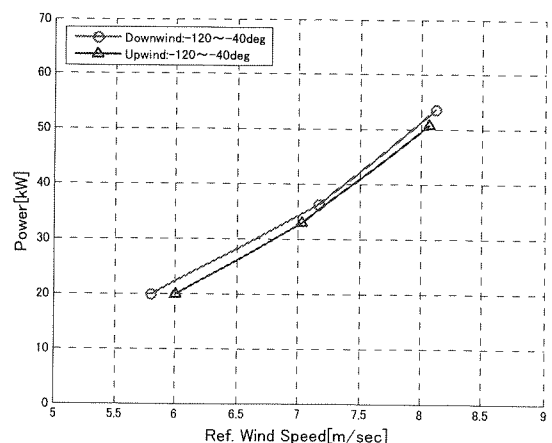


Fig.12 Powers in Downwind and Upwind Configurations against Reference Wind Speed

4. 風況・発電量シミュレーション

(1) 局所風況シミュレーション

発電量に対するロータ位置の影響を評価するため、国内の代表的な複雑地形におけるウィンドファームについて風況シミュレーションを実施した。シミュレーション領域を Fig.13 ならびに Table 2 に示す。実際には同サイトには多数の風車が設置されているが、本検討では、解析境界に近いものを除いた 8 機について評価した。なお、解析法には局所風況シミュレーションコードである LAWEPS^[5]を使用した。

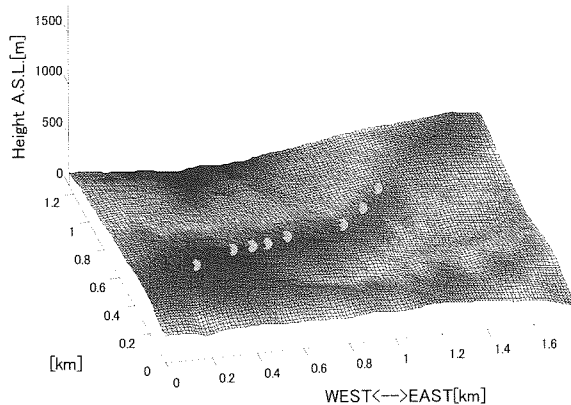


Fig.13 Simulation Domain(Turbine #1-West to #8-East)

Table 2 Simulation Domain

	X	Y	Z
Region	1,780m	1,260m	2,000m
Grid Width	16.2m	20.7m	-
Points	81	81	31

(2) 風車

本検討で想定したアップウィンド、ダウンウィンド両形態の風車仕様を Table 3 に示す。ここで、ダウンウィンド風車は富士重工製 SUBARU80/2.0^[6] (Fig.14) である。一方、アップウィンド風車は、同機を同一の仕様でアップウィンド形態とした仮想的な風車である。両形態の出力曲線を Fig.15 に示す。これは、乱流強度 15%を想定し、同一の風車制御を適用した動的シミュレーションによる解析結果である。同図ではあまり明確ではないが、ダウンウィンド形態はタワーの影響が大きいのと、ロータの投影面積が減少しているため、水平風における出力がアップウィンドよりも 1.5%程度減少している。

(3) 風況解析結果

8 地点における通年の吹上角に対する風速とエネルギー密度を Fig.16 に示す。時間平均吹上角と、エネルギー平均吹上角は各々 +6.0deg と +7.5deg であり、明らかにエネルギーが吹上風に集中していることが示されている。

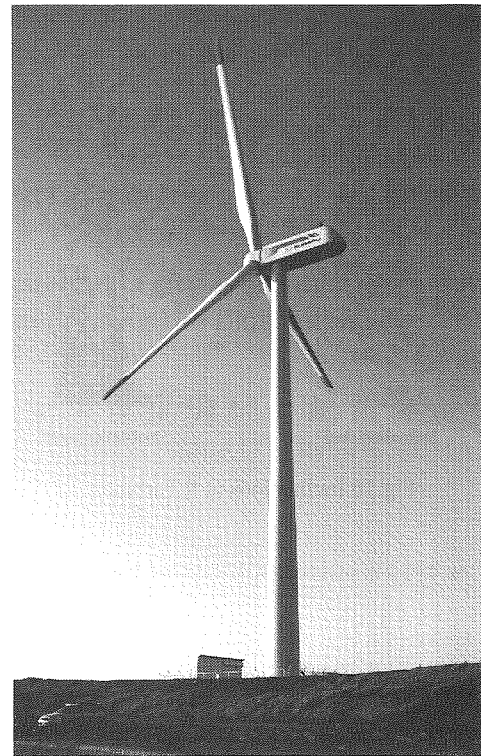


Fig.14 SUBARU80/2.0 Downwind Turbine^[6]

Table 3 Upwind/Downwind Turbines in Calculation

Rotor Position	Upwind	Downwind
Rotor Diameter	80m	80m
Rated Power	2000kW	2000kW
Power Control	Pitch	Pitch
Speed Control	Variable	Variable
Tilt Angle	+4deg	-8deg
Coning Angle	0deg	+5deg
Hub Height	62m	62m

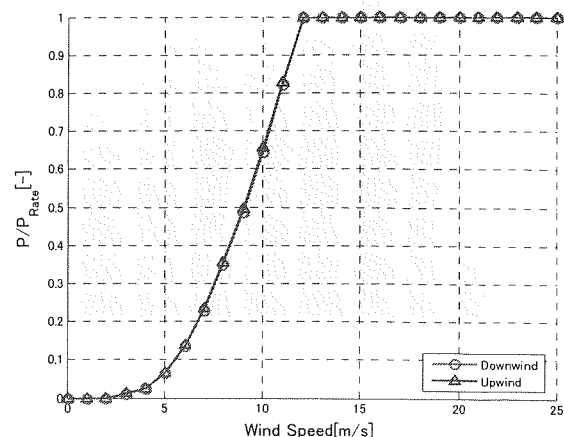


Fig.15 Normalized Power Curves

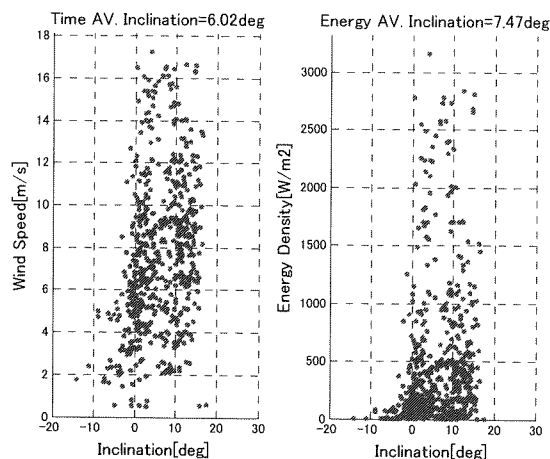


Fig.16 Inclinations at 8 Turbines

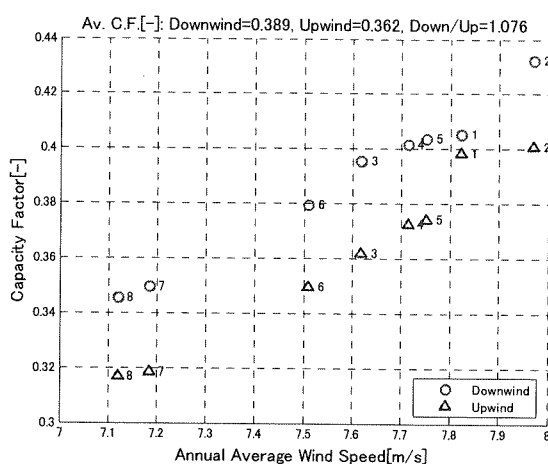
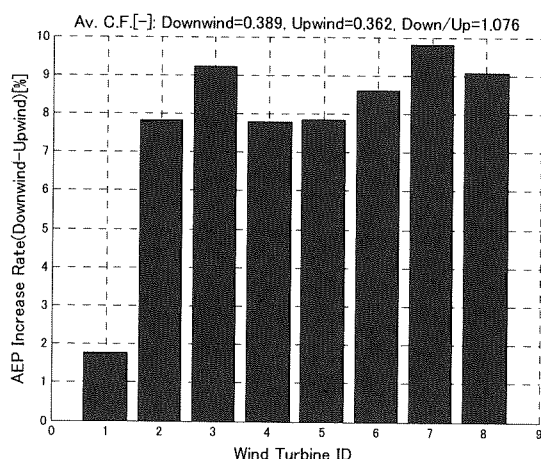


Fig.17 Capacity Factors in both Configurations

Fig.18 AEP, CF Comparison
between Downwind and Upwind Configurations

(4)年間総発電量 (Annual Energy Production; AEP)

定格出力の年間の平均出力を設備利用率 (Capacity Factor; CF) という。Fig.17 に両形態の設備利用率の解析結果を示す。ここで、発電量の計算には Fig.15 の出力曲線

と式(1)を用い、風車間の干渉は考慮していない。なお、図中の番号は風車の番号を示す。同図により、平均風速と設備利用率は各々7~8m/s、0.32~0.43 に分布しており、全般的に、ダウンウィンドの方が高い値を示している。位置ごとの両者の比を Fig.18 に示す。ウィンドファーム全体の設備利用率は、アップウィンド (36.2%) に対してダウンウィンド (38.9%) は、相対的に 7.6%程度大きい値に推算されている。

以上のように、複雑地形では吹上風にエネルギーが集中しているため、吹上風に対するロータのミスアラインメントが小さいダウンウィンド風車の方が高い発電量が得られることが示された。売電収入は発電量に比例する一方で、両形態の設備コスト差は僅少であるため、上記の発電量の差がウィンドファームの経済性に与える影響は甚大であると考えられる。

本研究結果から、風力発電適地の大半が複雑地形に分布する我が国の風車として、ダウンウィンド風車が適している可能性が示唆された。

5. まとめ

- (1)SUBARU22/100 のフィールドテストにより、吹上角+1~+11deg において、ダウンウィンド形態がアップウィンド形態と比較して出力が3~11%増加することが示された。
- (2)実際のウィンドファームにおけるケーススタディにおいて、ダウンウィンドの年間発電量はアップウィンドよりも7.6%増加することが示された。

6. 謝辞

本研究の実証試験には、NEDO 離島用風力発電プロジェクト^[4]の成果の一部を用いた。

参考文献

- [1] 吉田茂雄他, 複雑地形における三次元的発電量推算法, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.29/No.2, 2005, pp.75-83.
- [2] S. Yoshida, et al, Three-Dimensional Power Calculation Method Which Improves Estimation Accuracy, European Wind Energy Conference 2006.
- [3] IEC61400-12, Wind Turbine Generator Systems – Part 12: Wind Turbine Power Performance Testing, 1998.
- [4] S. Yoshida, et al, Development of Wind Turbine System for Remote Island, Global Wind Power 2000.
- [5] 村上周三他, 局所風況予測システム LAWEPS の開発と検証, ながれ 22, 2003, pp.375-385.
- [6] 富士重工業, SUBARU80/2.0 パンフレット, 2006.