複雑地形における風況測定と風力タービン性能評価に関する研究*

(第1報, 竜飛ウィンドパークにおける NEDO-500 kW 機の性能評価)

今村 博^{*1}, 松宮 輝^{*2}
土屋 敬一^{*3}, 山田 佐佳^{*4}

Study on the Wind Measurements and Performance Evaluation of a WTGS in Complex Terrain

(1st Report, Evaluation of NEDO-500 kW WTGS at Tappi Wind Park)

Hiroshi IMAMURA, Hikaru MATSUMIYA,
Keiichi TSUCHIYA and Sayoshi YAMADA

As the use of wind turbine generator system (WTGS) expand over the world, complex terrain has become the site-candidates more often. Therefore, "Complex Terrain" is now one of the keen issues, which however, has been the original problem in a mountainous country such as Japan. International Electrotechnical Commission (IEC) is now actively preparing a standard entitled "Power Performance Measurement", which describes the procedure of measuring performance of a wind turbine generator system. However, the standard is applicable to WTGS built on rather flat open areas in principle and is hardly applicable to WTGS in complex terrain. This has been well recognized, but it is the opinion of the majority of the IEC working group that understandings and technique for power performance measurement of a WTGS in complex terrain is still under development. Therefore, a new and more reliable method of performance measurement of a WTGS in complex terrain is required not only from the technical aspects but also from economics. The particular purpose of the present work is to measure and evaluate the wind speed and power performance of the national 500 kW research WTGS, while the generalized purposes are: (1) to develop a reliable method of wind speed measurement and (2) to develop a reliable method of power performance measurement of a WTGS in complex terrain. In this work, firstly, the measured wind data in typical complex terrain such as Tappi wind-park are analyzed. Secondly, a new method of performance measurement/analysis is discussed. Method of bin is applied for data analysis, while a reference meteorological mast and reference factors are newly introduced. Finally, the new method is evaluated.

Key Words: Wind Turbine Generator System, Complex Terrain, Meteorological Mast, Anemometer, Turbulent Intensity

1. 緒 言

風力発電システム(WTGS)の利用が世界的な広がりを見せている中で、山岳部などの複雑地形がWTGS設置サイトの候補地になってきており⁽¹⁾、複雑地形における風況測定⁽²⁾⁽³⁾、計算コードによる賦存量推定⁽⁴⁾⁽⁵⁾、風車後流干渉⁽⁶⁾、風車翼疲労寿命予測⁽⁷⁾などの研究が行われている。

国際電気標準会議(IEC)の国際規格では、風車のクラスや風の数式モデルなどがより乱流強度の厳しい地域を考慮して改定される機運にある。また、複雑地形

における風車性能計測技術の確立も国際的論議の対象である。こうした動きの背景には、安定した風が吹く、平たんな平地で育ったデンマーク流風力技術(世界の70~80%を占めると思われる)が米国やギリシャ、イタリアなどの複雑な地形に遭遇したことによる、外部条件の的確な評価の必要性の認識がある。

しかし、現段階のIECによる風車性能計測技術に関する標準の最終ドラフト⁽⁸⁾は平たんな場所に設置されたWTGSの評価に関するものであるため、ドラフトには複雑地形に設置されたWTGSに適用するには、新たな手法の開発が必要であると記述されている。

WTGS設置位置における風速は、サイトが平たんであれば、WTGSから離れた位置に設置された参照風速計を用いて(性能評価に用いる風速は無限遠前方の一樣流風速とされている)高い精度で予測することが可能である。しかし、複雑地形においては、平たん

* 1997年3月31日 第74期通常総会講演会において講演、原稿受付 1997年12月18日。

^{*1} 正員, 新エネルギー・産業技術総合開発機構(☎170-6029 東京都豊島区東池袋3-1-1)。

^{*2} 正員, 機械技術研究所(☎305-8564 つくば市並木1-2)。

^{*3} 正員, 東北電力(株)(☎981-0952 仙台市青葉区中山7-2-1)。

^{*4} 東北電力(株)。

地と比較して流れ場の非定常・非一様性が大きいいため、参照風速計からのデータを WTGS 設置位置での風速として用いるには、地形因子の影響を十分考慮に入れる必要がある。また、ナセル、ブレードの影響や風車の運動条件等について、平坦地においてあらかじめ校正が行われていない風車ナセル搭載の風速計では、風車ロータに流入する風速を正確に把握することは難しい。

本研究の目的は、複雑地形における新しくかつ信頼性のある WTGS の性能評価法の確立にある。本報では、機械技術研究所および東北電力によるニューサンシャイン計画・大形風力発電システム開発⁽⁹⁾に関する研究において、竜飛ウィンドパークに建設された NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)500 kW 機に適用した場合について述べる。

2. おもな記号

D : 風向

k : 相関関数 [式(1)参照]

M1: 風況観測塔 1

M2: 風況観測塔 2

P : 風車出力 kW

R : 相関係数

SS: 風車停止中データ

TI : 乱れ度 %

U : 風速 m/s

UO: 風車運転中データ

添字

1: 風況観測塔 1

2: 風況観測塔 2

C : 相関関数 k による補正

NV: 風車

r : 参照点

Fig. 1 Picture of Tappi wind park

3. 試験サイト

3・1 竜飛ウィンドパーク 1991 年日本最大の集合形風力発電所として、青森県津軽半島竜飛岬の青函トンネルの工事跡地に、東北電力により三菱重工業製 275 kW 風車が 5 機建設された。その後 1995 年に 300 kW 機が 5 機追加、さらに、ニューサンシャインプロジェクトによる NEDO-500 kW 機が 1996 年に設置された(図 1)。竜飛岬は年間平均風速が約 10 m/s と風力エネルギー資源に恵まれている。卓越風向は冬季が西、夏季が東と安定している。

3・2 NEDO-500 kW 風車 通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画推進本部の下でニューサンシャイン計画の一環として、風力発電システムの技術開発が 1981 年より行われている⁽⁹⁾。このうち 1991 年から NEDO により開始された大形風力発電システム開発は、コストの低減・土地の有効利用等を目指した研究であり、大形風力発電システムの開発、集合化における制御技術の開発を行っている。

NEDO-500 kW 機は 1996 年 10 月より試験運転が開始された。ロータ直径 38 m、ナセル高 38 m、3 枚翼、可変ピッチ回転数制御(ロータ回転数 32 rpm)、アップウィンドタイプである(図 2 および表 1)。技術開

Table 1 Specifications of NEDO-500 kW wind turbine

Number of blades	3
Rotor diameter	38 m
Hub height	38 m
Orientation	Up-wind
Power regulation	Variable pitch control
Rotation speed of rotor	32 rpm
Cut-in speed	5.5 m/s
Cut-out speed	24.0 m/s
Rated speed	12.5 m/s

Fig. 2 Outside view of NEDO-500 kW WTGS

発のポイントは、特定フロンを用いない充てん材を採用した翼、低騒音化を図るため工作精度を上げた二段式遊星歯車増速機と振動絶縁、信頼性向上を目指した作動方式の簡素化された翼ピッチ角コントロール駆動装置等である。

4. 測定方法

4.1 測定方法 本研究では、複雑地形において WTGS 設置位置における風速を見積もる方法として、WTGS が建設される前に 2 本の風況観測塔を建て、二点間の相関解析を行うことにより地形因子の影響を調べる方法を用いた。これは WTGS ロータ面内への流入風の非定常・非一様性等の影響を性能評価に含めない方法である。

観測塔 1 を WTGS 設置場所に、観測塔 2 を WTGS から離れた位置に設置し、この二地点間での風速 U 、風向 D 、乱れ度 TI などに関する相関解析を実施する。ある方位において、二地点の風速(と風向)の相関のよいことを見つければ、WTGS 設置のため観測塔を移設(あるいは撤去)後、相関のよい風向に対して、参照観測塔からのデータと

相関関数を用いて、WTGS 位置での風速を精度よく見積もることが可能となる。相関関数 k は風速と風向(あるいは乱れ度)の関数として表され、次式となる。

$$U = k(U_r, D_r) \dots\dots\dots (1)$$

U_r と D_r はそれぞれ、参照観測塔位置での風速と風向である。

4.2 データ収集システム

NEDO 機の設置場所の地形図を図 3 に示す。風車は丘陵頂上部、大きな障害物の影響の少ない場所に設置されている。風況観測塔は卓越風向線上に風車を挟む形で立てられ、東側および西側の観測塔をそれぞれ M1、M2 と呼ぶことにする。M1 は風車設置前に風車設置位置に設置し、二点相関解析用のデータを収集し(1996 年 1 月～8 月)、風車設置に伴い東側に移設された。M1 および M2 と風車の距離はそれぞれ、46 m(=1.21 d , d : 風車ロータ直径)、42 m(=1.11 d)(1996 年 9 月～)である。観測塔に取付けられた風向・風速計の高さは、風車ハブ高さ(地上高 38 m)と同じ海拔である。

使用した風向風速計は、気象庁で採用されているプロペラ式風向風速計で、時定数はおおよそ 1 s である。風向は 16 方位に分割して記録される。風況データの収録方法は、三点(NN, M1 および M2)同時計測、サンプリング間隔 0.5 s として、風速、風向、乱れ度、風向乱れ、発電機出力等を、基本的に 10 min 平均(10 min の取得データ数 1 200 個の算術平均)で収録し、必要に応じて 0.5 s 間隔サンプリングで時間変動データを収録した。なお、乱れ度 TI は 10 min に取得した風速変動データの標準偏差を平均風速で割った値をパーセント表示したものである。

本論文で整理を行ったデータは、風況データに関しては、1996 年 1 月から 1997 年 6 月の期間、WTGS 運転データについては 1996 年 10 月から 1997 年 6 月に取得したものである。

Fig. 3 Topography map of test site

(a) Frequency of the wind occurrence [%] (b) Average wind speed U [m/s] (c) Average turbulent intensity TI [%]

Fig. 4 Sectorwise distribution of average wind data

(a) M1

(b) M2

Fig. 5 Distribution of average turbulent intensity TI in sectorwise wind speed bins

5. 結果および考察

5.1 方位別平均データ 図4にWTGS設置サイトにおける, (a)風配図, (b)方位別平均風速分布および(c)方位別平均乱れ度分布を示す. NEDO機設置箇所での卓越風向は冬季に西(W), 夏季は東(E)であり, この卓越風向での平均風速は約10 m/sと高い風力エネルギー賦存量を示す. また, 風向が西(W)から北(N)にかけては乱れ度は30%と大きく, 逆に東風の場合は10%と小さな値を示している.

5.2 方位別乱れ度 図5はbinの方法⁽¹⁰⁾を用いて, 16方位別の風速bin幅を1.0 m/sとした場合の, 各bin内の平均乱れ度 TI の分布である.

観測塔M1およびM2における TI の分布の傾向は類似しており, 特に, WNW, NW方位での大きな乱れ度が特徴的である. また全方位の風速範囲 $U < 4.0$ m/s では乱れ度は30%を超える大きな値を示しているが, これは低い風速では乱れ度が大きくなる自然風の特徴である. NEDO機のカットイン風速は5.5 m/sで, 風速範囲 $U < 4.0$ m/s のデータは発電状態における補正データとしては用いない.

5.3 相関解析 図6は風速bin幅を1.0 m/sと

(a) Correlation coefficients for wind speed, R_U (b) Correlation coefficients for wind direction, R_D Fig. 6 Distribution of correlation coefficients R between two meteorological masts in sectorwise wind speed bins

Table 2 Sectorwise correlation function* of wind speed

Bearing	$a_0(D)$	$a_1(D)$	$R_U(D)$
N	0.344	0.769	0.979
NNE	0.702	0.708	0.951
NE	0.175	0.998	0.998
ENE	0.187	0.989	0.997
E	0.052	1.001	0.999
ESE	0.057	1.015	0.997
SE	-0.386	1.089	0.994
SSE	-0.065	1.074	0.963
S	0.274	0.853	0.952
SSW	0.224	0.863	0.948
SW	0.949	0.972	0.906
WSW	0.695	1.042	0.963
W	-0.110	0.968	0.992
WNW	0.172	0.939	0.988
NW	-0.146	1.191	0.957
NNW	0.112	1.054	0.953

* $U_2 = a_1(D)U_1 + a_0(D)$

して, 16方位別の風速bin内での観測塔M1とM2間の, (a)風速相関係数 R_U および(b)風向相関係数 R_D の分布図である. 風向相関係数 R_D は16方位をN(北)を0°として時計回りに22.5°おきの数値で表し求めた.

東風(E-ESE)では測定風速範囲で風速 U および風向 D の相関はよく, 特に風速相関係数 R_U は計測された風速範囲ではほぼ0.9を超える値を示している. 逆

 (a) SE₁-E₂ (reference M1)

 (b) WNW₁-W₂ (reference M2)

 Fig. 7 Correlation diagram of wind speed U for different wind direction

にもう一方の卓越風向である西風(WSW-WNW)では、風向の相関はよいものの、風速の相関はよくないことがわかる。

以上のデータ解析から、WTGSの出力評価のための参照用方位としては東風のデータを用いればよいことがわかった。

詳細な相関解析を行うためには、風速 bin 内で相関のよい bin での相関関数を求める方法が考えられるが、E 方位では全風速範囲で速度相関係数がよいので、全風速範囲をカバーする相関関数として、WTGS 設置位置での風速 U を求める経験式を立てた。表 2 に各方位における相関関数と相関係数を示す。

5・4 東風・西風データ例 図 7 に風車の運転条件および風向による三地点における風速相関の相違例として、1996 年 11 月 27 日から 29 日にかけて測定した 10 min 平均データを示す。観測塔 M1 は NEDO 機の東側 42 m の位置に移設されてある。

(a) ESE (reference M1)

(b) W (reference M2)

Fig. 8 Power performance of NEDO-500 kW WTGS

図 7 (a) は風向が東風(M1 で SE, M2 では E 風向)の場合の速度相関図である。参照観測塔は風車の上流側に位置する M1 とする。

風車が静止している場合(図 7 中 SS で表記)、M1(東側、風車の上流)と M2(西側、風車の下流)の風速相関は、相関係数が $R_u = 0.987$ とかなりよい。これに対してナセル搭載風速計によるデータ(図 7 中 NN で表記)と M1 との風速相関は $R_u = 0.784$ と悪い。NN のデータは M1 の風速よりも高めであるが、これはナセルによる排除効果、あるいはウィンドシェアによる高さ方向の風速の増加等により、風速計位置における風速が増加したためと考えられる。

風車が稼働している場合(図 7 中 UO で表記)、NN の風速は M1 の速度の約 95% にまで減速している。理想風車では、ロータ直後の風速は無限遠前方一様流速の $2/3$ になるが、風車の稼働状態、ナセルの存在による増速効果等がこの測定値には含まれていると考えられる。風車下流位置 M2 における風速はさらに減速し、M1 における風速の約 60% となっている。

西風(M1でWNW, M2ではW風向)の場合のデータについて, 図7(b)に示す. 参照観測塔をM2とした場合の風速相関図である. 風速の相関は図7(a)の東風と比べるとばらつきを示し, 風車停止中(SS)での相関は $R_v=0.897$ とよくない. また, 風車稼動(UO)状態での下流側(M1)の風速の減少は, 東風の場合と違い(風速範囲が異なるが)理想風車のような傾向を示していない.

以上示した測定結果から, 東風のデータは風車稼動状態を定性的にとらえているといえる.

5.5 NEDO 機の性能評価 複雑地形におけるWTGSの出力性能評価として, 方位別風速 bin の相関関数を用いて, 相関のよい bin 内のデータを評価用に用い, 相関の悪いデータは評価から除外する方法により詳細な評価が可能になると思われる. しかし, 本論文では, 取得した発電データ数が少ない(収集期間: 1996年10月~1997年6月)ため, 参照観測塔と風車設置位置との風速の相関の特により東風と, 相関の悪い西風の場合についての風車出力性能評価例を示す.

図8(a)に ESE_1 (東南東風, 参照観測塔 M1)およ

び図8(b)に W_2 (西風, 参照観測塔 M2)風向における風車性能曲線の例を示す. 図8中で, 添字の NN および C はそれぞれ, ナセル搭載風速計で測定した風速, および参照観測塔データからの相関関数(表2)を用いて求めた風速に対する出力の 10 min 平均生データのプロットを示し, 半黒塗り記号は, bin の方法を用いて風速 bin 幅を 0.5 m/s とした場合(IEC 標準⁽⁸⁾に準拠)のデータを示す.

ナセル搭載風速計(NN)の風速は5.4節で述べたようにロータ面通過後の減速した風速であるため, ロータ面に流入する風速よりも低い値と考えられる. このため, ナセル搭載風速計風速に対する出力のプロットでは, 図8(a) ESE_1 , 図8(b) W_2 ともに定格風速(12.5 m/s)以下では出力が設計値よりも低風速側に大きくずれており, 実際の出力よりも高い値として評価されている.

ESE_1 の場合, 相関関数を用いて修正した値では, $U < 7$ m/s の風速域で設計値よりもわずかに大きくなっている以外, ほぼ設計曲線と一致している. これに対し, W_2 では, 参照位置と風車設置場所における相関が悪いため, ナセル上風速および相関関数により求

(a) M1 (upwind of WTGS)

(b) M2 (downwind of WTGS)

Fig. 9 Distribution of turbulent intensity TI for wind speed U in case of ESE_1 under operation of WTGS

(a) M1 (downwind of WTGS)

(b) M2 (upwind of WTGS)

Fig. 10 Distribution of turbulent intensity TI for wind speed U in case of W_2 under operation of WTGS

めた風速に対してプロットした出力値は、ばらつきが大きい。また、定格風速 ($U \geq 12.5$ m/s) で定格出力 500 kW を大きく下回っているデータがあるが、これは突風などが原因の過回転・過出力制御による発電休止データが 10 min 平均値に含まれたためと考えられる。

参照観測塔と風車設置場所での相関のよい方位においては、風車設置場所における風速を参照観測塔のデータから見積もり、風車性能を精度よく評価可能となるが、相関の悪い方位では、適切な評価が行えないことが示された。

5・6 乱れ度 図 9 および図 10 にそれぞれ図 8 (a) の ESE₁, (b) の W₂ と同じ風向時の WTGS 運転中における風況観測塔位置での乱れ度分布を示す。

図 9 の ESE₁ では、風車上流側 (a) では、乱れ度 TI は 20% を下回っているが、風車下流位置 (b) では、運転中の風車後流中であるため TI は増加している。図 10 の W₂ では、風車上流側 (b) においても TI は 20% を超える大きな値を示しており、下流側 (a) では低風速領域 ($U < 5.0$ m/s) でさらに増加している。

西風の場合に NN-M2 の二点間の相関が悪いのは、このように流れに大きな乱れ成分が含まれているためであると推察される。西風の場合に乱れが大きい原因としては、図 3 に示されるように、地形のこう配が急しゅんであること、NEDO 機の西側には他の風車 (300 kW 機が 5 台) が存在していることなどが考えられる。乱れ度と地形起伏の関係について、風速の瞬時変動時系列データのパワースペクトルから渦のスケールを見積もる⁽¹¹⁾ ことにより解析が可能と考えられ、次報において報告する。

6. 結 言

竜飛ウィンドパークの場合、参照観測塔と WTGS 設置点間の風速相関のよい方位は、卓越風向である東と東南東であり、風況データ (取得期間: 1996 年 1 月 ~ 8 月) を用いたこの方位の風速相関係数は 0.998, 平均の乱れ度は 9.0% であった。また、bin の方法を用いて方位別の風速 bin 内の相関係数を調べたところ、測定された風速範囲にわたって卓越風向の東方位の相関が高いことがわかった。この方位で、風車の上流東

側に設置された参照観測塔のデータを用いて、風況データより求めた相関関数により WTGS 設置場所での風速を予測し、風車出力性能の評価を行った結果、設計性能曲線と補正データはよく一致した。

本研究で提案した手法のように、WTGS 建設予定地に事前に 2 本の風況観測塔を立てて、WTGS 設置点での相関解析を行っておけば、複雑地形においても、新規に設置された WTGS の性能を平たん地と同様に適切に評価を行えることを定量的に示した。

今後は地形と乱れ度および相関係数の関係を、統計的手法を用いて評価を行い、複雑地形における風車性能評価法の標準となる方法の提案を試みる。

文 献

- (1) IEA *Wind Energy Annu. Rep.* 95, NREL, (1996).
- (2) Restive, A. and Petersen, E. L., Wind Measurements and Modelling in Mountainous Regions of Portugal. Preliminary Results, *Proc. Euro. Wind Energy Conf.*, Lubeck-Travemunde, (1993), 603-606.
- (3) Petersen, E. L., ほか 2 名, Measurements and Modelling in Complex Terrain, *Proc. Euro. Wind Energy Conf.*, Goteborg, (1996), 580-583.
- (4) Mortensen, N. G., ほか 3 名, WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program), Riso National Laboratory, Denmark, (1989).
- (5) Tombrou, M., ほか 2 名, Tests of Prediction Effectiveness of Wind Energy Computer Models in Complex Terrain, *Proc. Euro. Wind Energy Conf.*, Lubeck-Travemunde, (1993), 599-602.
- (6) Stefanatos, N. Ch., ほか 2 名, Wake Measurements in Complex Terrain, *Proc. Euro. Wind Energy Conf.*, Goteborg, (1996), 773-777.
- (7) 土屋敬一・猪俣登, 風車翼の疲労寿命予測 (竜飛ウィンドパークの場合), 機論, 63-607, B (1997), 944-949.
- (8) IEC/TC88/FDIS, 1400-12 Ed. 1, Wind Turbine Generator Systems Part 12-Wind Turbine Power Performance Measurements Testing, (1997) (to be published).
- (9) 川村伸称, ニューサンシャイン計画における風力利用開発, 第 18 回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, (1996), 1-5.
- (10) Morfiadakis, E., *Load and Power Measurement Programme on a Vestas V27 Wind Turbine*, Centre for Renewable Energy Sources (1995).
- (11) Glinou, G. L., ほか 2 名, Analysis of Full Scale Measurements for the investigation of Turbulence Structure Acting on a Rotor Disk over Complex Terrain, *Proc. Euro. Wind Energy Conf.*, Goteborg, (1996), 639-643.