

ドップラー・ソーダ風況観測による風車の発電量予測*

前田 太佳夫^{*1}, 中野 美和^{*2}, 清水 幸丸^{*1}Estimation of Generation Power of Wind Turbine due to
Doppler SODAR AssessmentTakao MAEDA^{*3}, Miwa NAKANO and Yukimaru SHIMIZU^{*3} Department of Mechanical Engineering, Mie University,
1515 Kamihama-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

This paper describes the wind assessment of high layer for siting the wind turbine on the complex terrain, which is based on the data measured by the use of Doppler SODAR. Although a rough estimation of the wind assessment using standard meteorological anemometers at low layer are cost effective and easy to be installed, it is necessary to measure the wind condition at hub height for accurate assessment. Comparison between measured data by Doppler SODAR and the data predicted from observation of the wind condition at low layer is performed. Large difference is seen in the measured wind profile and calculated power law plots of the wind. Estimation of generation power of wind turbine due to SODAR measurement agrees well with the actual turbine generation power. In the complex terrain, it can be said that observation of the low layers does not suffice to assess accurately the wind, while Doppler SODAR measurement is useful.

Key Words: Wind Mill, Flow Measurements, Velocity Distribution, SODAR Technique, Boundary Layer

1. 緒 言

近年, わが国においても風力発電装置の導入が進んでおり, それら風車の規模はロータ直径 60 m 以上, 回転軸高さ 60 m 以上のメガワット級風車が主流である。風力発電施設を建設する際には, 建設予定地の事前の風況調査が行われる。風況調査は一般的に, 低コストで実現できる測定高度 20~30 m のマスト上の風速計を用いて測定を行う。風車発電量の試算をする際には, 大形風車に対しては, 観測高さが風車回転軸高さよりも低いために, 風速計で観測された風況データから指数法則を用いて風車の回転軸高さの風速を算出し, その風速と風車出力曲線から発電量を予測する。しかし, 日本のように好風況地点が複雑地形に多く存在する地域の地表風は複雑であり, 指数法則を用いた上空の風況予測および風車発電量の試算には疑問が残る。これらの課題に対して, 風洞実験による風車発電量の予測⁽¹⁾ および常設風速計による風車発電量の評価⁽²⁾ などの研究が行われている。

本研究では, ドップラー・ソーダ(ドップラー式音波レーダ)を用いて上空の風況を直接観測し, 指数法則によって予測された風車回転軸高さの風況と比較した。また, ドップラー・ソーダと低層常設風速計との短時間の相関関係から, ドップラー・ソーダ観測後の跡地に設置された風車の回転軸高さにおける風況を, 常設風速計データから予測することを試みた。これらの風況データをもとにしてドップラー・ソーダ観測によって計算される風車発電量と指数法則によって試算される発電量を実際の発電量と比較することにより, 高高度の風況観測の必要性を示した。

おもな記号

a : 風速計 A での風速値からドップラー・ソーダの風速値を補正する式の係数(式(3))

U : 風速 m/s

U_{150} : ドップラー・ソーダによる地上高 150 m の観測風速 m/s

R^2 : 決定係数 [式(4)]

k : ワイブル分布の形状定数

c : ワイブル分布の尺度定数

添 字

A: 風速計 A での観測値

* 原稿受付 2003 年 8 月 11 日。

^{*1} 正員, 三重大学工学部(〒514-8507 津市上浜町 1515)。

^{*2} 学生員, 三重大学大学院。

E-mail: maeda@mach.mie-u.ac.jp

N : 風車ナセル上の観測値

D : ドップラー・ソーダによる観測値

2. 観測地点

図1に観測地点を示す。ただし、等高線の間隔は100 mである。観測地点は伊勢湾海岸線から西方へ約20 km 内陸部の山中である。本研究では、測定高度15 mの低層常設風速計(以後、風速計Aと略す)と、上空1000 mまで測定が可能なドップラー・ソーダによる観測を行った。その後、ドップラー・ソーダの観測地点に、回転軸高さ50 mの風車が建設された。本研究ではこの風車の発電量を解析対象とした。風車設置後、ドップラー・ソーダは撤去されたが、風速計Aは風車が稼働中の現在も観測を行っており、風車の発電記録に対して同時刻の風況観測が行われている。

風速計Aはドップラー・ソーダの観測地点から北東1.5 kmの位置にある。風速計Aの観測地点に対して、ドップラー・ソーダの観測地点は標高差で約10 m高い。

3. 測定方法

本研究で風況観測に用いた風速計Aおよびドップラー・ソーダの詳細を以下に示す。

風速計Aは三杯式風速計(測定精度は ± 0.5 m/sまたは風速の5%の大きいほうの値)と矢羽式風向計(測定精度は $\pm 5^\circ$)である。風速と風向を1 min平均の値として出力する。10 minに観測された1 min平均値の10個の平均を10 min平均とし、1 hに観測された10 min平均値の6個の平均を1 h平均とした。測定高度は地表面から15 mである。

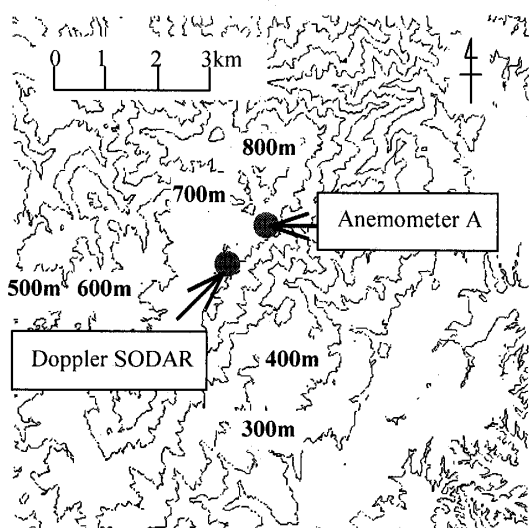


Fig. 1 Measurement site

本研究で用いたドップラー・ソーダ(風速測定精度は ± 0.3 m/sまたは風速の5%の大きいほうの値、風向測定精度は $\pm 5^\circ$)は、モノスタティック形と呼ばれる地上に設置された3個1組の送受信機から構成されている⁽³⁾。図2にドップラー・ソーダのパラボラ送受信機の写真を示す。個々の送受信機は直径1.25 m、高さ1.8 mであり、それぞれ上空3方向に向けられている。送受信機から発射された出力900 W、送信周波数2.4 kHzの音波の後方散乱波を受信することによって風速測定が行われる。音波は1台ずつ10 s間隔で発射され、30 sで1サイクルする。そして、この1サイクル間に測定されたデータを合成することにより、風速の水平方向成分、垂直方向成分、および風向が観測される。測定可能な高度は地上高10 m高から上空1000 m高であり、音速の精度範囲内で32高度まで同時測定可能である。また、観測された値は10 min平均で記録される。風速計Aと同様に、1 hに観測された10 min平均値の6個の平均を1 h平均とした。

本研究で発電量予測の対象とした風車は回転軸高さ50 m、翼車直径50 m、定格出力750 kWの3枚翼水平軸風車である。風車の回転面後方のナセル上部には風向風速計が設置されている。ナセル上風向風速計で観測された風速および発電量は1 h平均値として記録された。ただし記録される風速は0.5 m/sきざみである。

4. 測定データの整理方法

4.1 風況観測期間 ドップラー・ソーダによる観測データは1997年6月～1997年8月の期間中のものを用いた。また、解析対象とした風車発電量やナセル上風速計による観測期間は2000年1月～2002年12月の3年間のものを用いた。ドップラー・ソーダの観測地点に風車を建設するにあたり、ドップラー・ソーダを撤去したため、風車稼働時のドップラー・ソーダ

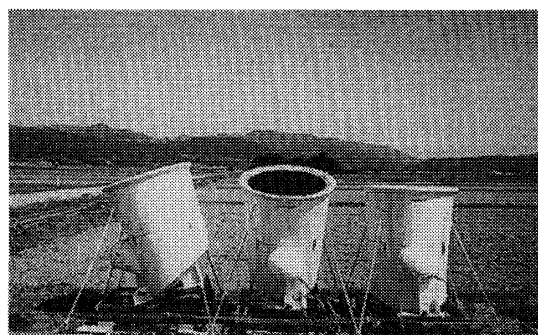


Fig. 2 Monostatic Doppler SODAR

による風況観測データは存在しない。したがって、本研究では、稼働中の風車の回転軸高さの風速を、風速計 A とドップラー・ソーダの風速から得られる補正式を用いて推定し、発電量試算の精度を検討することを試みた。

4・2 風向ごとの風況解析方法 本研究では、2000 年 1 月～2002 年 12 月のドップラー・ソーダの観測地点跡、つまり、風車設置地点の高度 20, 30, 50 m の各高度の風況を得たいため、1997 年 6 月～1997 年 8 月のドップラー・ソーダの 20, 30, 50 m の各高度の風況と風速計 A の風況の同時刻の相関関係を求め、この相関関係を用いて 2000 年 1 月～2002 年 12 月の風速計 A の風況からドップラー・ソーダが設置してあった地点の風況を推定した。しかし、一般的に地表風は地表面粗さや地形の影響を受けるため、隔たりのある 2 観測地点の風況が一致するとは断定し難い。したがって、まず、1997 年 6 月～1997 年 8 月のドップラー・ソーダにより観測された高度 20, 30, 50 m の風況と風速計 A で観測された風況の比較を行うことにより風速計 A のデータからドップラー・ソーダ跡の風況を導き出すことへの信頼性を確かめた。風況の比較を行うために、それぞれの観測地点、高度において風向出現率と風向別平均風速およびワイブル定数を算出した。ただし、風向出現率、風向別平均風速、ワイブル定数を算出する際には 1 h 平均のデータを用いた。また、ワイブル定数については風向ごとに算出した。

風向出現率は風向の卓越状況を明らかにする目的で用いられる。算出方法としては、風向を 16 分割し、平均風向を累積する。ただし、風速 0.2 m/s 以下の場合には静穏として扱うため、風向出現率には加味しない。

風向別平均風速は風力エネルギーの卓越風向を明らかにする目的で用いられる。算出方法としては、風向出現率と同様に、風向を 16 方位に分割し、風向ごとに風速を算術平均する。

ワイブル定数は風況特性を評価する目的で用いられる。ワイブル分布関数は、風速が V_x 以下の風の累積出現率 $F(V \leq V_x)$ として次式で表される。

$$F(V \leq V_x) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{V_x}{c} \right)^k \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 c は尺度定数、 k は形状定数である。式(1)に風速ごとの累積出現率を代入し最小二乗法により尺度定数 c と形状定数 k を求めた。

4・3 低層常設風速計のデータからドップラー・ソーダ跡地のデータの導き方 本研究では 4・2 節で示した方法により風速計 A の地点とドップラー・ソー

ダの地点の風況の相関を検証したうえで、風速計 A の観測データを用いてドップラー・ソーダの地点の上空風速を導くための補正式を求めた。ドップラー・ソーダと風速計 A の間には大きな障害物はないため、同時刻に無風状態になるとし、補正式は原点を通る一次関数とし、最小二乗法で決定した。

4・4 風車出力曲線の検証 本研究では風況観測によって得られる風車発電量の予測値と実測値の比較を行う。風速から発電量を試算するためには対象となる風車の出力曲線が必要である。一般的に、風車出力曲線は検定サイトによって実証試験された風車固有のものとして与えられる。しかし、大気中の風は非定常流かつ地形の影響を大きく受け、検定サイトにおける風況特性と実際の設置地の風況特性は一般に異なるため、仕様書に記載されている出力曲線と実際に風車設置後に得られた出力曲線は必ずしも一致しない。そこで、本研究では、仕様書の出力曲線は用いず、実際の発電量と実測された風速から設置地点における出力曲線を求めた。その際のデータ整理には BIN 法を用いた。BIN 法は変動する計測量を変数の区間ごとに分類し、その区間内のデータを平均化する手法である。本研究における BIN 法としては、風向および発電量等の計測量を風速 0.5 m/s 間隔ごとに分類し、この 0.5 m/s ごとの区間に含まれる計測量の平均値を求めた。

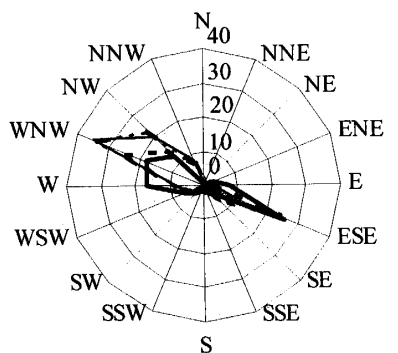
4・5 指数法則との比較 本研究では、一般の発電量予測に用いられている指数法則によって予測された風車回転軸高さでの風速から発電量を見積もることも試みた。指数法則は次式で表される。

$$U_2/U_1 = (z_2/z_1)^{1/n} \dots \dots \dots (2)$$

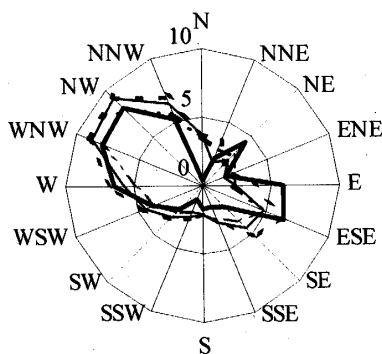
ここで、 z は地表面からの高さ、 U は地上高さ z における風速、 n はべき指数を表し、添字 1, 2 は風速計高さと風車回転軸高さのようなある特定の高度を示す。指数法則は地表面付近の風況から高高度の風況を予測する際に用いられる。一般的には、観測された地表面付近の二つの高度の風速から式(2)に基づいてべき指数を算出し、このべき指数を用いて、風車回転軸高さでの風速を予測する。本研究では、ドップラー・ソーダによって観測された 20 m と 30 m の風向別平均風速から、風向ごとにべき指数を算出した。ただし、風向によっては出現率が著しく小さく統計的に信頼性が乏しい場合があり、また、上層の風速値のほうが低層の風速値よりも低いなどの理由でべき指数が算出されない風向もある。このような場合に対しては、全風向の 10 min 平均風速でべき指数を算出した。

5. 観測結果と考察

5.1 ドップラー・ソーダの地点と低層常設風速計の地点での風況の相関 図3(a), (b)に1997年6月～1997年8月の3箇月間にドップラー・ソーダおよび風速計Aによって観測された1h平均値による風向出現率と風向別平均風速を示す。ドップラー・ソーダの観測値としては20, 30 mおよび50 m高のデータを示し、風速計Aの地上高は15 mである。図3(a)の風向出現率を見ると、ドップラー・ソーダおよび風速計Aの各観測地点においてWNWとESEの出現率が高く、分布形状もドップラー・ソーダと風速計Aとで類似の形をしていることからWNWとESEが卓越風向と考えられる。ここでドップラー・ソーダと風速計Aの各高度における風向出現率に関して、その卓越風向はESE, WNW, NWであり、出現率の和は60%を超えている。図3(b)に示す風向別平均風速を見ると、ESE, E, NEを除いて、高高度の平均風速が地表付近に比べて高くなっているが、全体



(a) Frequency of wind occurrence [%]



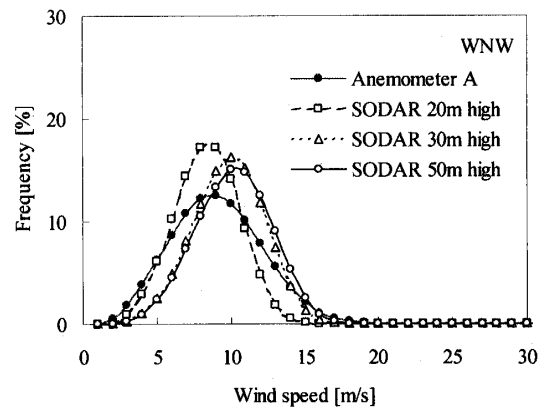
(b) Averaged wind speed [m/s]

— Anemometer (15m high)
 - - - SODAR (20m high)
 — SODAR (30m high)
 - - - SODAR (50m high)

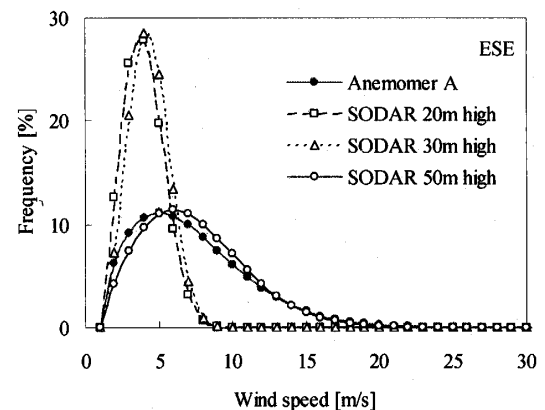
Fig. 3 Sectorwise distribution of averaged wind data

の分布形状としてはドップラー・ソーダの地点も風速計Aの地点もほぼ類似の形状となっている。なお、ESE, E, NEにおいて風速計Aの風速が高い値を示しているのは、風速計Aの地点は、伊勢湾から風が吹き上げてくるESEおよびEの方位に対して吹抜けのよい地点であり、また、NE方向には森林が伐採されて林道となっており局所的に吹抜けがよい状態となっているためであると考えられる。

図4に1997年6月～1997年8月の3箇月間にドップラー・ソーダによって観測された上空風と風速計Aによって観測された風の1h平均値によるワイブル分布の例を示す。WNWでは風速計Aとドップラー・ソーダの各高度の分布は類似しているのに対し、ESEでは、ドップラー・ソーダの20 m高と30 m高のワイブル分布は50 m高の分布と異なっている。しかし、WNWもESEもドップラー・ソーダの観測値を見ると、高度が増すにしたがい頻出風速が高くなっている。また、WNWもESEも風速計Aとドップラー・ソーダ50 m高の分布とは類似した形状を示していることがわかる。



(a) WNW wind



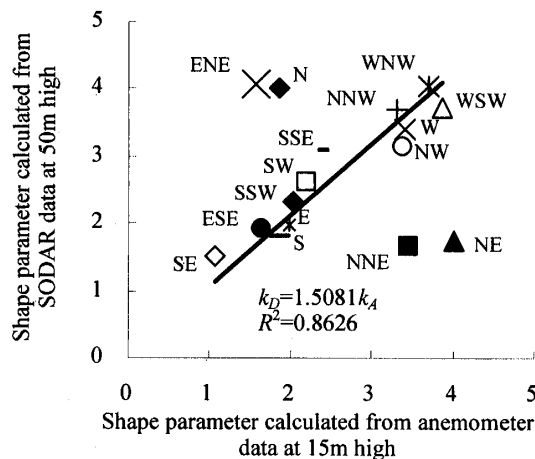
(b) ESE wind

Fig. 4 Comparison of Weibull distribution at anemometer A and SODAR positions

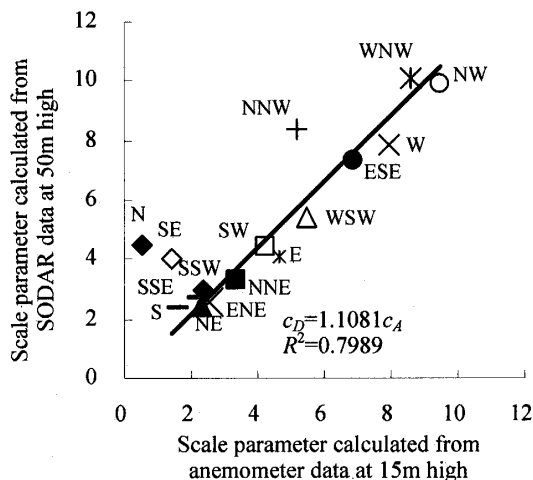
図5にドップラー・ソーダによって観測された上空50 mの風と風速計Aによって観測された風の1 h 平均値によるワイブル定数の相関を示す。横軸に風速計Aのワイブル定数、縦軸にドップラー・ソーダ50 m 上空におけるワイブル定数をとった。図5から、形状定数、尺度定数ともに、出現率の低いN, NNE, NE, ENEを除いて、線形関係にあることがわかる。

図3および図5よりドップラー・ソーダの地点と風速計Aの地点の風況特性は十分な相関があると判断できる。したがって、ドップラー・ソーダと風速計Aが同時に観測を行っていた1997年6月～1997年8月の測定値で得られた相関関係から得られた補正式〔後述の式(3)を参照〕を用いて、ドップラー・ソーダ跡地に風車設置後の上空の風況を風速計Aの値から得られるものとする。

次に、1997年6月～1997年8月のドップラー・ソーダの上空20, 30 m および50 m 高の風況と風速計



(a) Shape parameter



(b) Scale parameter

Fig. 5 Relation of Weibull parameters between SODAR data and anemometer data

A (15 m 高)の風況の相関関係を調べた。本研究では、補正式によって得られた風速を実際に観測された風況として扱うため、補正值と測定値の間に強い相関性が必要となる。そこで、10 min 平均のデータについてそれぞれ全風向を含んだ風速と風向の相関と、16 方位に分割した風向別の風速の相関を検討した。なお、平均化時間については、風速計Aとドップラー・ソーダの間には距離があるものの、風況データの標準的な平均化時間として、平均化時間10 minを採用した。

図6に10 min 平均値によるドップラー・ソーダの50 m 高の風速 U_D と風速計A (15 m 高)の風速 U_A の相関としてESEを一例として示す。横軸に風速計Aの風速値、縦軸にドップラー・ソーダの風速値をとった。卓越風向であるESEについては、グラフからもドップラー・ソーダの位置と風速計Aの位置での風況のよい相関がわかる。また、表1に1997年6月～1997年8月の3箇月間にドップラー・ソーダで観測された20, 30 m および50 m の各高度と風速計A (15 m)の風速から得られた風向ごとの補正式の傾き a と決定係数 R^2 を示す。ここで補正式は風速計Aの地点での風速 U_A が無風のときにドップラー・ソーダの地点の風速 U_D も無風であるとして最小二乗法により次の線形式を用いた。

$$U_D = aU_A \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、決定係数 R^2 は次式を用いた。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m e_i^2}{\sum_{i=1}^m (U_{Di} - \bar{U}_D)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 e_i は風速値の最小二乗残差、 U_{Di} はドップラー・ソーダによる観測風速値、 m はデータ数である。

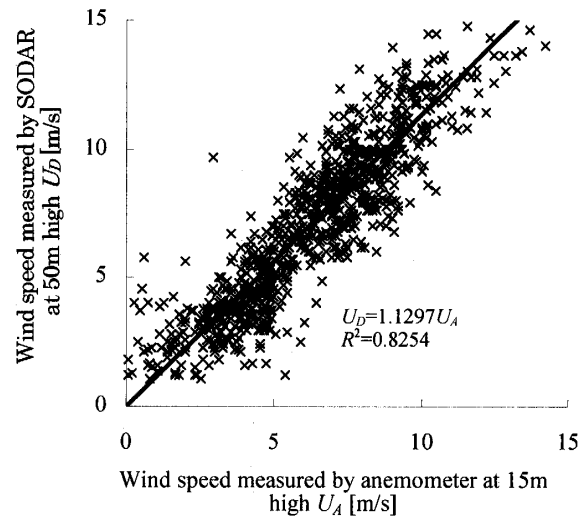


Fig. 6 Correlation of wind speed between measured by anemometer and SODAR (ESE wind)

Table 1 Slope and coefficient of determination of SODAR and anemometer data (coefficient of determination from anemometer data to SODAR data)

		E	ESE	SE	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
20m	slope a	-	0.9	-	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9
	coefficient of determination R^2	-	0.9	-	0.8	0.3	0.4	1.0	0.6	0.8
30m	slope a	-	1.1	1.1	1.1	0.9	1.0	1.1	1.1	0.9
	coefficient of determination R^2	-	0.8	0.7	0.7	0.1	0.4	0.5	0.7	0.5
50m	slope a	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0
	coefficient of determination R^2	0.4	0.8	0.7	0.7	0.2	0.5	0.4	0.7	0.4

ただし、各高度で出現率が1%未満の風向については統計量としてデータ数が少なく誤差が大きいため、表1に記号一で示してある。また、データ数がほとんど存在しないN, NNE, NE, ENE, SSE, S, SSWの風向のデータについては省略した。風向ごとの補正式の傾きに大きな差は見られないが、実際の風況を再現するには風向別の補正式から得られた値を用いるほうがよい。風向別に相関を調べた場合、出現率の低い風向の相関から得られた補正式は信頼性が低い。そこで、本研究では、各高度において、出現率が1%以上の風向については風向ごとの補正式を用い、それ以外の風向は全風向の10 min 平均風速の比をとることにより補正式の係数 a を求めた。

5.2 風車出力曲線の信頼性 風速から発電量を試算するため用いる出力曲線について考察する。図7に今回対象とした風車の出力曲線を示す。図7中のデータは1h 平均値で示してある。図7中では次の3種類のデータを示してある。(a)仕様書に記載されている出力曲線(実線)、(b)ナセル上部に設置されている風速計で観測された風速と出力の関係(Δ 印)、(c)補正式(3)から得た回転軸高さの風速と出力の関係(\circ 印)を示してある。(b)と(c)の出力曲線の算出にはBIN法を用いた。図7からわかるように風速15 m/s以上で(b)と(c)の発電量が異なっていることがわかる。

図8に表1の係数に基づく補正式(3)によって得られた風車回転軸高さの風速と、ナセル上部に設置されている風速計で観測された風速の比較を示す。横軸に補正式(3)によって得られた風車回転軸の高度における風速、縦軸にナセル上部に設置された風速計で観測された風速をとった。補正式(3)による風速とナセル上の風速の間の関係式は原点を通る直線として、最小二乗法を用いて算出した。この関係式の傾きは0.93

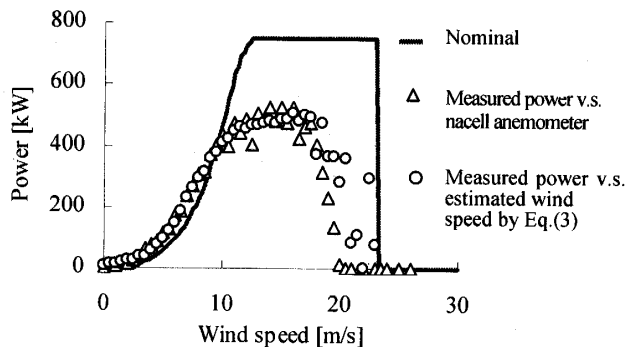


Fig. 7 Power curve based on several wind speed estimation

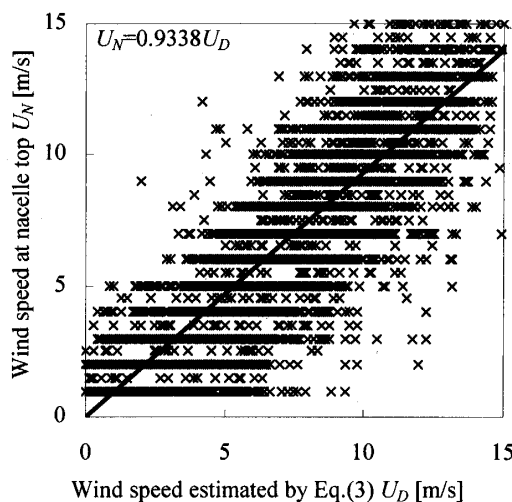


Fig. 8 Relation of wind speed between nacelle top and estimation by Eq.(3)

となっておりナセル上部の風速は補正式(3)によって得られた風車回転軸の高さにおける風速より低くなっている。このことから、ナセル上部の風速計は回転翼後流あるいはナセルで発達した境界層の影響を受けていると考えられ、その出力曲線は実際の現象に即しているとは考え難い。よって本研究では、風車発電量を算出する際には、補正式(3)から導出された高度50 mの風速との関係を正しい出力曲線として用いた。

5.3 実測と指数法則による発電量試算結果の比較

図9に前述の手法で算出した出力曲線を用いて測定風速から発電量を試算した結果と、実際の発電量を比較した結果を示す。ただし、発電量算出の際に用いた風況は、ドップラー・ソーダ50 m上空の風況をもとに補正式(3)によって求めた風車回転軸高さの風速とドップラー・ソーダから求めた20 mと30 m上空の風況から風向ごとに算出したべき指数を用いて算出した風況である。比較した観測期間は2002年1月～2002年12月の1年間とした。縦軸に無次元化した発電量、

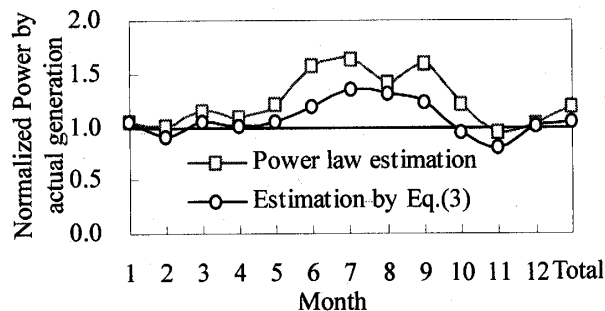


Fig. 9 Comparison of generation power by estimation by Eq.(3) and power law estimation in year 2002

横軸に観測した月を示す。図9を見ると、指数法則による試算よりも、ドップラー・ソーダによる観測値から得た補正式(3)のほうが実際の発電量に近いことがわかる。ここで図10にドップラー・ソーダによって観測された地表風の10 min 平均による速度分布と、ドップラー・ソーダの20 m 高と30 m 高の風速から求めた指数法則による速度分布の比較を示す。縦軸に高度をとり、横軸にドップラー・ソーダによる上空150 m の風速 U_{150} で無次元化した値をとった。図10はWNWとESEのものである。図10からわかるように、地上付近の風速から高高度における風速を求めることは難しく、指数法則による予測と実測値の差が明らかであり、上空50 m の実測値に対する指数法則による予測値の比はWNWで1.09, ESEで1.34となった。日本のような好風況地点が複雑地形に多く存在するサイトでは、周辺の山などの影響を受けるため、指数法則による風況の予測には相当な注意を要すると思われる。

図11に図7で示した出力曲線の違いによる発電量試算を比較するため、本研究で算出した出力曲線と風車の仕様書に示されている出力曲線を用いて発電量を試算した結果を示す。ただし、この場合の風況としてドップラー・ソーダの観測値から得た補正式(3)から導出される50 m 上空の風況を用いた。比較した観測期間は2002年1月～2002年12月の1年間とした。図11中△印は仕様書に示されている出力曲線を用いて発電量を試算した結果、○印は本研究で算出した出力曲線を用いた発電量試算の結果である。図11より、仕様書の出力曲線を用いて試算した発電量は、本研究で算出した出力曲線を用いて試算した発電量より実際の発電量との差が大きくなっている。これは風車の検定地と設置地点の風況の差によるものであると考えられる。このことより風車設置の際には、事前に高高度、特に風車回転面にあたる高度の風況調査を行い発電量

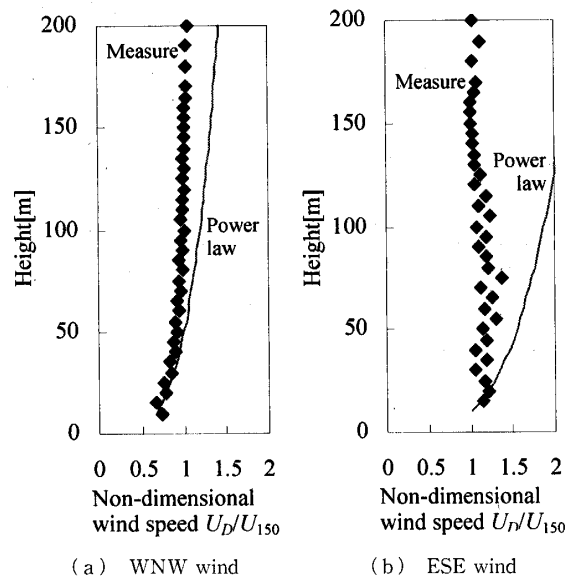


Fig. 10 Wind speed profile of atmospheric boundary layer

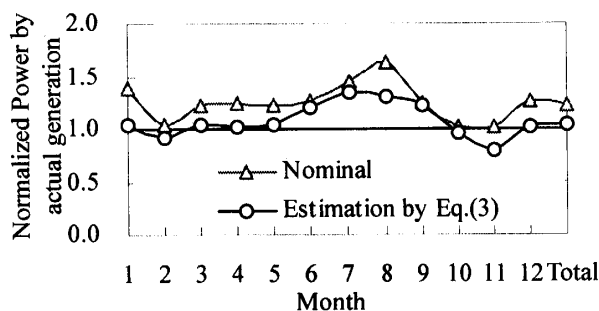


Fig. 11 Comparison of generation power by several power curves in Fig. 7

の正確な試算と、風況による出力曲線の検定を行うことが必要である。

6. 結 言

本研究では、ドップラー・ソーダを用いた風況観測結果をもとにして、実際の発電量と指数法則によって得られた風況で算出した発電量を比較することを通じて、以下のことを明らかにした。

- (1) ドップラー・ソーダによる風況観測は、数箇月間だけでも風向別の風況を整理しておけば、高精度の風況精査に活用できる。
- (2) ドップラー・ソーダによる風況観測から試算される発電量は、実際の発電量とよく合う。
- (3) 大気中の風は非定常で複雑であるため、発電量の試算方法を用いる際に、あらゆる設置地点で、風車の検定地で算出された出力曲線が適しているとはいえない。

(4) 日本のような複雑地形が多い場所においては, 地表面付近の風況から地形の影響を受ける高高度の風況を指数法則を用いて予測するのは困難であり, ドップラー・ソーダを用いた高高度の風況観測は有効である。

本研究の遂行に際して, 風車発電データを提供していただいた久居市役所の方々, およびデータ評価に助

言をいただいた(株)カイジョー 伊藤芳樹氏, 平井重雄氏に記して謝意を表す。

文 献

- (1) 土屋敬一・松阪知行, 機論, **61**-590, B (1995), 3735-3740.
- (2) 今村博・ほか3名, 機論, **64**-626, B (1998), 3323-3329.
- (3) Ito, Y., *Acoustic Remote Sensing Applications*, (1997), 85-104, Narosa Publishing House.