

## 風力発電機 KWT300 のサイトキャリブレーションおよび性能評価

幽谷 栄二郎<sup>※1</sup>, 細見 雅生<sup>※2</sup>, 松下 大介<sup>※3</sup>, 松宮 輝<sup>※4</sup>

本研究は、駒井鉄工で開発した定格出力 300kW のプロトタイプ中規模風車のサイトキャリブレーションおよび性能評価に関する。風車の性能評価に関しては、国際基準に基づき信頼できる機関において検証されることになっており、欧州などでは中立な認証・試験機関によって実施されている。しかし、日本では認証機関および施設の整備がなされていないのが現状である。本稿では、日本の複雑地形における風車性能試験の試みとして、駒井鉄工、産業総合技術研究所および九州大学が共同で性能試験を実施した結果について報告する。

キーワード：中規模風車，性能評価，サイトキャリブレーション

### 1. 序

本研究は、建築物群によって構成される複雑地形としての臨海工業地域に設置されたプロトタイプ風車の性能計測，特にサイトキャリブレーション技術の適用事例に関する。風車の性能評価に関しては、国際基準 IEC61400-12-1<sup>(1)</sup>に基づき信頼できる機関において検証されることになっており、欧州などでは中立な認証・試験機関によって実施されている。しかし、日本では認証機関および施設の整備がなされていないのが現状である。本稿では、日本の複雑地形における風車性能試験の試みとして、駒井鉄工、産業総合技術研究所および九州大学が共同で性能試験を実施した結果について報告する。対象となる風車は、駒井鉄工で開発した定格出力 300kW の中規模風車のプロトタイプ機であり、千葉県内房の東京湾に面する駒井鉄工富津工場内に建設されている。風車周辺には風の乱れを引き起こす有意障害物が多く有効な風向が限定され、また計測期間が十分ではない。上記条件下で補正值の風速依存性を考慮したサイトキャリブレーション手法を用い、従来手法と比較して信頼性のある性能評価結果が得られた。

### 2. サイト条件と観測内容

#### 2. 1 サイト条件

本サイトは、臨海工業地域に位置しているため地形は平坦であるが、風車性能に影響を与える可能性の

高い建造物が周辺に多く位置している。性能計測にサイトキャリブレーション技術を適用する場合には、風車設置前に、風車のロータ中心に流入する風速と風車設置後に風速計測に使用する観測マスト位置での風速との（統計的な）相関係数を習得しなければならない。図 1 に観測マスト 1（または風車）および観測マスト 2 の建設位置を示す。

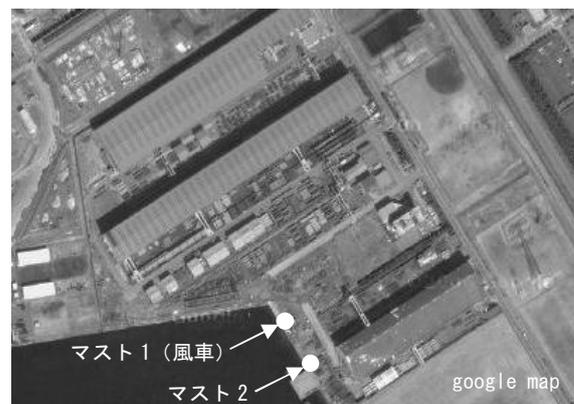


図 1 試験サイト周辺図

マスト 1 は風況調査およびサイトキャリブレーションデータ取得のために 2005 年 9 月から 2006 年 2 月まで風車建設地点に設置され、風車性能計測時には同じ地点に風車を建設した。マスト間距離は 67.7m であり、対象風車のロータ直径 ( $D=33m$ ) に対して  $2D$  となり、IEC による 2~4D の条件を満たしている。

※ 1 環境事業部係長 修士 (工学)

※ 2 環境事業部事業部長 博士 (工学)

※ 3 九州大学大学院工学研究院助教 修士 (工学)

※ 4 HIKARUWIND.LAB(株)代表取締役 博士 (工学) 産総研客員研究員

IEC61400-12-1 におけるサイトの複雑度評価は、Annex B に記載されており、表 1 に示すようにマスト下部と周囲地形との標高差に対して、マスト間距離  $L$ 、観測点高さ  $H$  およびロータ直径  $D$  で評価される。本サイトにおいては埋め立て地であることから地形は平坦であるが、南西に海が位置しているため岸壁高さや潮位を考慮すると、条件 1 における最大標高差が基準値の 1.8 倍程度となったため、このサイトにおいてはサイトキャリブレーションによる風速補正を行う必要がある。

表 1 試験サイトの要求条件

	距離	方位区分	最大傾斜 %	平面からの最大地形変化
1	~2L	360°	<3	<0.04(H+D)
2	2L~4L	測定方位区分	<5	<0.08(H+D)
3	2L~4L	測定方位区分以外	<10	適用されない
4	4L~8L	測定方位区分	<10	<0.13(H+D)

次に周囲の障害物の評価であるが、IEC61400-12-1 Annex A による風車ハブ高さおよび観測マスト高さにおける風速への影響度を障害物ごとに評価したマップを図 2 に示す。算定式中に用いる粗度長は、周囲の資材配置等を考慮して 1m と仮定した。

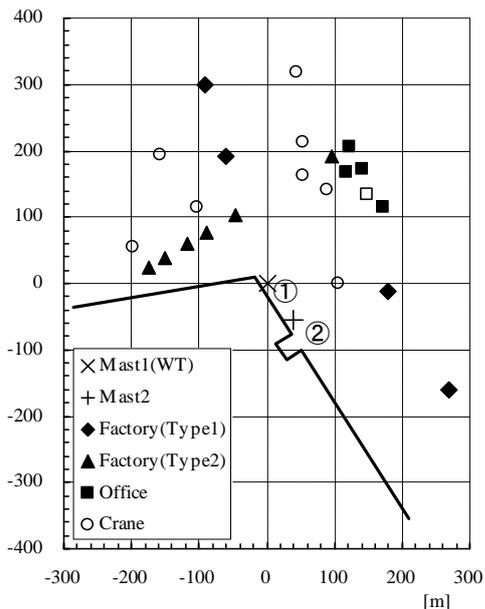


図 2 観測マスト周辺概要図

図中の塗りつぶしプロットが有意障害物となり、両マストに対して同じ結果となった。クレーンは可動式であるが、どの位置においてもハブ高さの風速に対しては影響を及ぼさない結果となっている。次に

これらの各有意障害物に対する後流の影響角  $\alpha$  は次式で表わされる。

$$\alpha = 1.3 \arctan\left(\frac{2.5}{L/D} + 0.15\right) + 10 \quad [\text{deg}] \quad (1)$$

ここで  $L$  は運転する風車または障害物までの距離、 $D$  は風車ロータ直径または等価直径であり、この範囲を算出して重ね合わせた図を図 3 に示す。風向は北を  $0^\circ$  として時計回りと定義している。図より、障害物により除外される風向は、 $258.5^\circ \sim 0^\circ \sim 147.8^\circ$  となる。また風車後流の影響を受けるためサイトキャリブレーションを性能評価に用いることができない風向は、 $284.3^\circ \sim 0^\circ \sim 3.8^\circ$  となった。

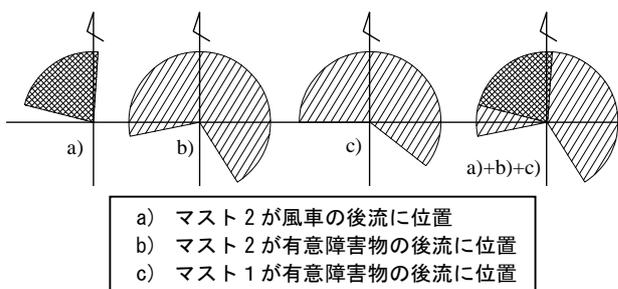


図 3 除外すべき方位区分

## 2. 2 試験風車および計測装置

試験対象風車は駒井鉄工製 KWT300 のプロトタイプ機であり、3 枚翼アップウィンド型の水平軸風車で、油圧シリンダーによる 3 枚翼同時ピッチ制御方式を取り入れ、発電機は誘導発電機を使用している。表 2 に風車仕様を、また図 4 に風車外観図を示す。

表 2 KWT300 プロトタイプ機の仕様

定格出力	300 kW
ローター直径 $D$	33 m
全高	60m
ハブ中心高さ $H$	43.5 m
ローター定格回転数	40.5 rpm
カットイン風速	3 m/s
カットアウト風速	25 m/s
定格風速	11.7 m/s
ブレード	LM15.4
ブレード断面	NACA63-200



図4 KWT300 プロトタイプ機

観測マストは45mであり、計測高さは風車ハブ高さと同じ43.5mとなっている。水平方向風速については、三杯式風速計および矢羽式風向計（Vaisala, WAV151/WAA151）を設置してあり、垂直方向風速については、下部にプロペラ式風速計（Young, Model27106T-90）を設置してある。それぞれの計測器は風洞試験により校正を行っている。また、地上高10mの位置に温湿度計および大気圧計を設置し、これら両マストでの観測データをデータロガー（TEAC, es8）により1Hzのサンプリングレートで記録している。

風車性能計測期間は、2006年9月から開始して現在も継続しているが、調整等を随時行っているため、本稿で用いたデータは2007年1月から11月までとなっている。

### 3. 風況観測結果

#### 3.1 風況

風況観測期間は約5カ月であるが、図5に示す様に両マストのデータが同時に計測されている期間は8週間程度である。風向出現頻度は図6に示すように北方位が卓越風となっているが、これは計測期間が冬季に限られていたことによるものであり、後述する様に年間の卓越風は南北に偏った分布となる。また図7に示す風向別平均風速も南北で7m/s程度となり、全風向の平均風速は5.1m/sである。図より、北東方向でマスト2風速がマスト1に対して1m/s程度低い値となっているが、このことは図1に示す建物配置からもわかるようにマスト2近傍の建物影響を受けているものと考えられる。風速出現頻度は図8に示すように、両マストにおいてほぼ同様の分布となっている。このときのワイブルパラメータ  $K$  は1.7である。またサイトの風の乱れを示す  $I_{ref}$  は

1.68（データセット数43）となり IEC61400-1<sup>(3)</sup>の風車クラスではクラスSに相当する。

また各マストにおけるデータはIECに基づき10分データセットを作成し、また風速および風向に関しビン処理を行った。ビンの手法による分割は風向を $10^\circ$ としたが、風速に関してはデータ数が少ないために信頼性を考慮して1m/sとした。

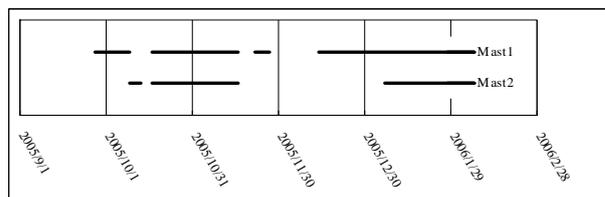


図5 風況観測期間

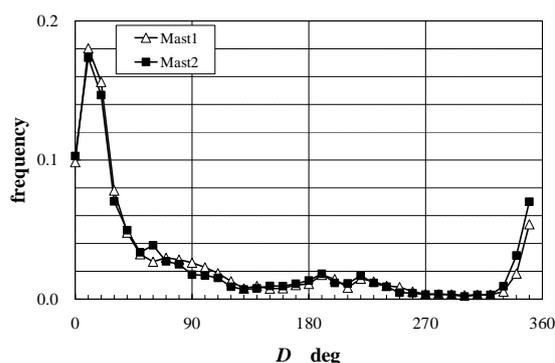


図6 風向出現頻度

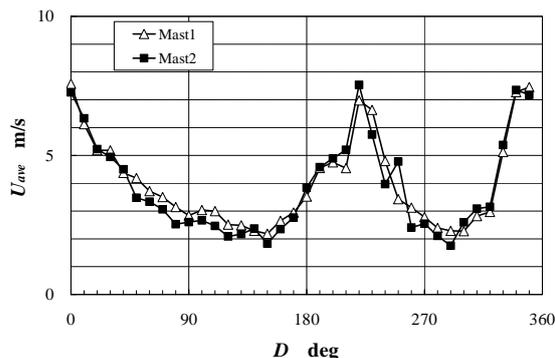


図7 方位別平均風速

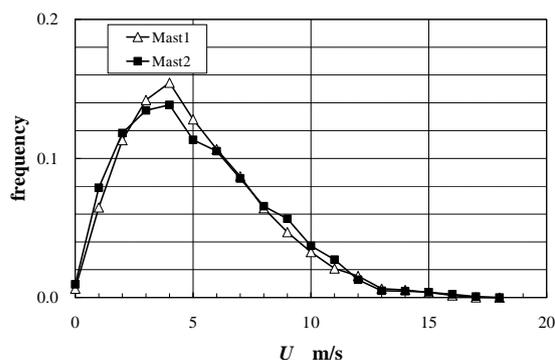


図8 風速出現頻度

風向ごとの風の変動を示すために、風速の標準偏差を平均風速で除した乱流強度を図9に示す。ここでは低風速での値が大きくなるため、対象風車の運転範囲の評価であることを考慮してカットイン風速である3m/s以上のデータを用いて算出した。両マストの風速計が張り出し方向は同じであり、風速計が観測マスト下流に位置し後流の影響を受ける風向である280°付近で乱流強度が大きくなっていることがわかる。北西方向では多くの障害物がマスト1に近く、東方向ではマスト2近傍に工場建屋がある影響が図中の乱流強度の差を生じている理由であると考えられる。また海風である200~230°で比較的乱れが小さいことは前述のサイト評価の内容と一致している。

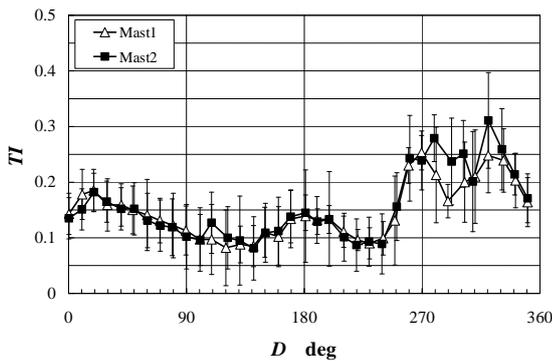


図9 方位別乱れ強さ

### 3. 2 サイトキャリブレーション

両観測マストにより計測されたデータは、異常値および点検時のデータを除外し、欠測のないデータセットのみを用いた。サイトキャリブレーションデータとして、4~16m/sの風速域の各データセットからマスト間風速比  $U_{mast1} / U_{mast2}$  および風向変化  $D_{mast1} - D_{mast2}$  を算出した。風向ビン幅は10°、風速ビン幅は1m/sである。データセットは図10に示すように各風向に対して8m/sより大きいまたは小さい風速域のデータ、およびその和を示しており、サイトキャリブレーションによる風車性能計測ができない北の卓越風向を除いては、海風である南から南西風向でのみ高風速が観測されていることがわかる。

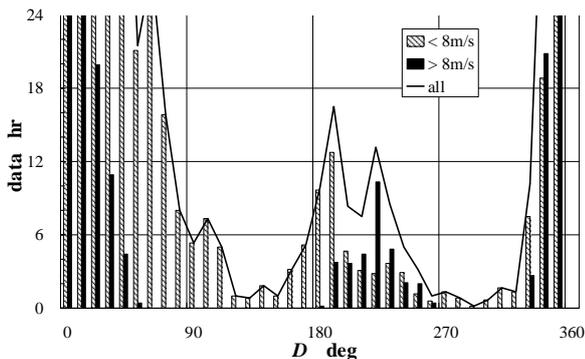
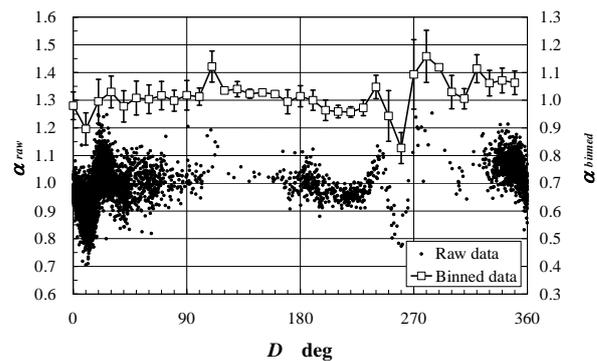


図10 風向別データセット

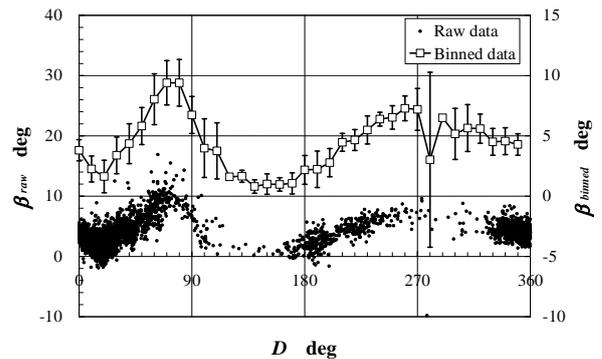
風速および風向の補正係数は、風向ビン  $j$  において、以下の式のように表わされる。算出された補正係数を図11に示す。縦軸はデータセットプロットとビン平均値をそれぞれ左右の軸で異なる表示をしている。データの少ない風向ではエラーバーで示す標準偏差も大きくなるのが分かり、上流が海である南から南西において風速で5%程度、また風向変化が5°程度となっていることがわかる。

$$\alpha_j = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} (U_{mast1} / U_{mast2})_j \quad (2)$$

$$\beta_j = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} (D_{mast1} - D_{mast2})_j \quad (3)$$



(a) 風速補正係数



(b) 風向補正係数

図11 サイトキャリブレーションデータ

前述した IEC61400-12-1 による計測における除外風向およびサイトキャリブレーションの適用条件の判定結果を表3に示す。表は各風向ごとに、風車後流および周囲障害物による除外風向の条件、サイトキャリブレーションにおける隣接する風向ビンとの風速比の差が0.02以下となる条件、データ計測期間が風速8m/s以上または未満の風速域で6時間以上、また全風速域(4~16m/s)において24時間以上である条件それぞれに対して判定を行っている。この結果からは、データ数の多い卓越風向での性能計測がで

表3 サイトキャリブレーションの適用方位区分

D deg	Obstacles		Site calibration			Data number [hr]		
	WT	others	$\alpha$	$\Delta\alpha$		<8	8<	all
0	×	×	0.981	0.085	×	62	65	128
10	×	×	0.896	0.098	×	156	64	220
20		×	0.994	0.098	×	152	20	172
30		×	1.030	0.052	×	63	11	74
40		×	0.978	0.052	×	42	4	46
50		×	1.009	0.031	×	21	0	22
60		×	1.004	0.013	○	28	0	28
70		×	1.017	0.018	○	16	0	16
80		×	0.999	0.018	○	8	0	8
90		×	1.017	0.018	○	5	0	5
100		×	1.013	0.109	×	7	0	7
110		×	1.122	0.109	×	5	0	5
120		×	1.035	0.087	×	1	0	1
130		×	1.040	0.017	○	1	0	1
140		×	1.023	0.017	○	2	0	2
150		○	1.028	0.006	○	1	0	1
160		○	1.022	0.027	×	3	0	3
170		○	0.995	0.027	×	5	0	5
180		○	1.013	0.018	○	10	0	10
190		○	1.001	0.037	×	13	4	17
200		○	0.964	0.037	×	5	4	8
210		○	0.959	0.005	○	3	4	8
220		○	0.957	0.015	○	3	10	13
230		○	0.972	0.074	×	4	5	9
240		○	1.046	0.103	×	3	2	5
250		○	0.943	0.116	×	1	2	3
260		×	0.827	0.266	×	1	0	1
270		×	1.093	0.266	×	1	0	1
280	×	×	1.158	0.065	×	1	0	1
290	×	×	1.119	0.090	×	0	0	0
300	×	×	1.029	0.090	×	1	0	1
310	×	×	1.005	0.096	×	2	0	2
320	×	×	1.101	0.096	×	1	0	1
330	×	×	1.064	0.037	×	8	3	10
340	×	×	1.071	0.008	○	19	21	40
350	×	×	1.063	0.082	×	43	45	87

きないこと、またサイトキャリブレーションを適用できる風向はないことがわかる。しかし本稿では、このようなサイトにおける風車性能評価の試みとして、障害物の影響のない南から南西の風向において、比較的データ数の多い 180~230°の範囲で各測定風速域でのデータが条件の 50%以上であるため、この風向での風車性能の信頼性は高いとみなす。

ここで、風速比のばらつきが風況のみでなく、周囲障害物の影響によるものである可能性から、例えば 図 12 に示すように、平坦地に近い風向ビン 20 (200±5°) におけるサイトキャリブレーションデータは風速の増大により変化していることがわかる。これは複雑地形における風速比に見られる傾向であり(4)(5)、風速を考慮した補正方法により風車に流入する風速算出精度の向上が期待できる。

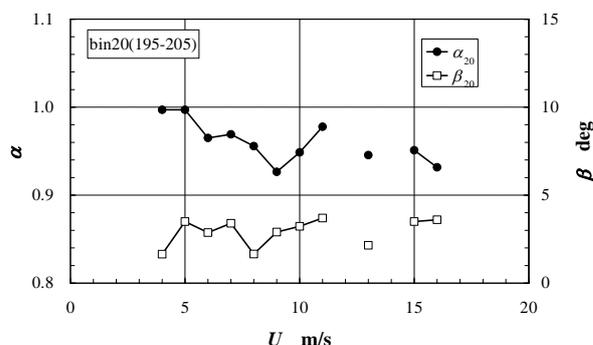


図 12 サイトキャリブレーションデータの風速依存

### 3. 3 二次元ピンサイトキャリブレーション

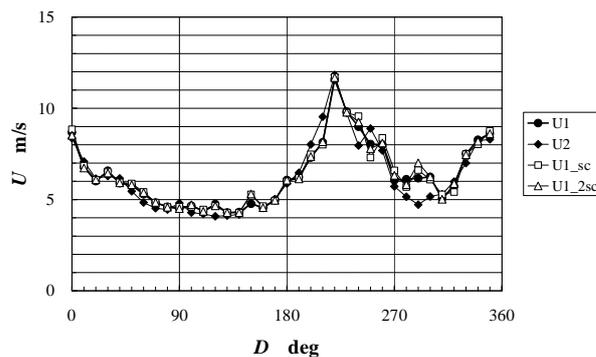
前述の補正係数の算出式(2)および(3)において、データは風向ビン  $j$  に加えて風速ビン  $i$  を導入する。風車性能計測時に参照マストとなるマスト 2 の風速風向ビンに対して補正係数  $\alpha_{i,j}$  および  $\beta_{i,j}$  を算出し、各 10 分データセットの風速ビンおよび風向ビンに対応する係数を用いて補正を行う。

補正係数  $\alpha_{i,j}$  および  $\beta_{i,j}$  は風速  $V$  の関数であるので、

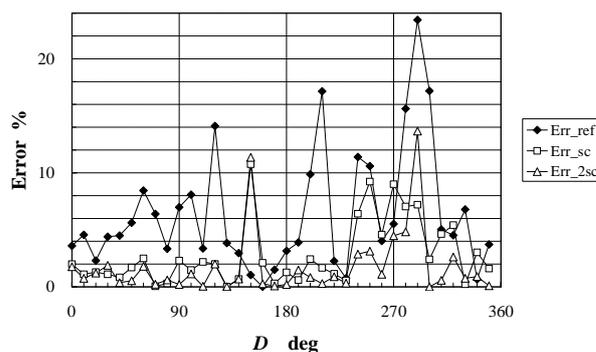
$$\alpha_{ij} = \alpha_j \Big|_{V=V_i}, \beta_{ij} = \beta_j \Big|_{V=V_i} \quad (4)$$

である。

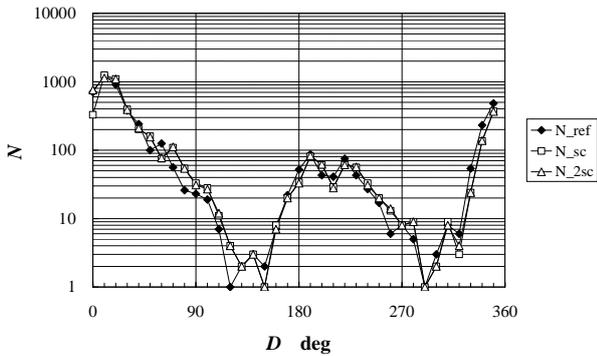
精度の検証のために、風向ごとのマスト 1 の期間平均風速の見積もりにおいて 3 つの解析手法による平均風速、不確かさ、データ数の比較を行った結果を図 13 に示す。



(a) 平均風速



(b) マスト 1 の風速不確かさ



(c) データ数

図 13 解析手法の違いによる比較

風速計がマストの後流の影響を受ける 290°方向を除くと、参照風速となるマスト 2 の誤差が大きくなるのは、マスト 2 の近傍に障害物がある 120°方向および両マストにとって海風となる風向があるが、これは風が強く風向変化があることがその一因であると考えられる。サイトキャリブレーションによるマスト 1 風速はデータセット数が 10 以下となるような極端にデータの少ない風向を除いては、マスト 1 風速を真値とした場合、従来の手法では平均 2.0%、二次元ビンを用いた方法で平均 0.9% の誤差となった。このことから、データ数が不十分であってもサイトキャリブレーションを行うことで風速予測精度が向上するといえる。

#### 4. 風車性能試験

##### 4. 1 風況比較

風車性能計測は 2007 年 1 月から現在も継続して行っているが、プロトタイプであるためにトルクテーブルなどの制御パラメータの改善および修正が生じており、本稿では制御内容が同一である 2007 年 11 月までのデータを用いている。図 14 に風況調査期間および性能計測期間における風向出現頻度を示す。風況調査期間が冬季であったため、夏季の卓越風向である南方向のデータが多くなっている他は同様の傾向を示しており、また図 15 に示す風速出現頻度は、低風速域で頻度が異なり性能評価を行う風速域では高風速のデータ割合が多くなることになる。また、図 16 にマスト 2 における風速域 4~16m/s における平均風速および乱流強度の風向別分布を示す。グラフの概形は類似しているものの分布形状に差が生じている。二次元サイトキャリブレーションでは、キャリブレーションデータのないビンのデータが多くなることから、このことは風速予測の不確かさを大きくする要因と考えられる。今回のデータでは、データ数が少ないビンによる不確かさから二次元ビン手法の補正値を算出していないデータセットは全体の約 10% あり、その風向ビンでの評価は行っていない。この問題に対しては、サイトキャリブレーション

のための計測期間を長くすることで改善されると考えられる。

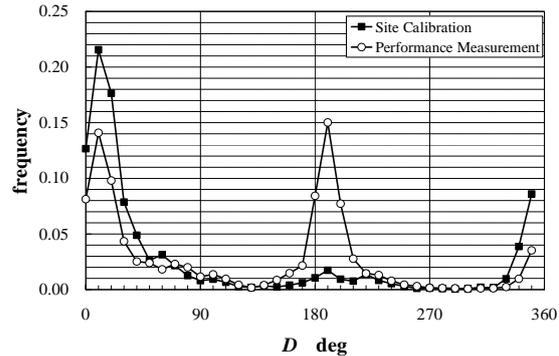


図 14 風向出現頻度

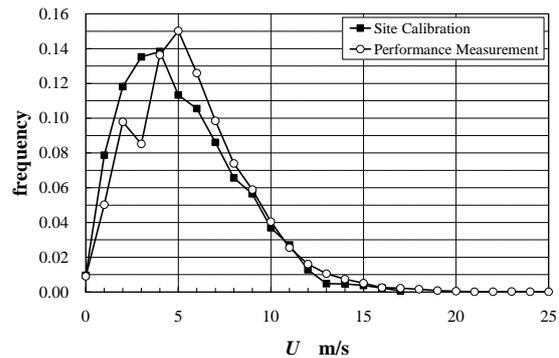
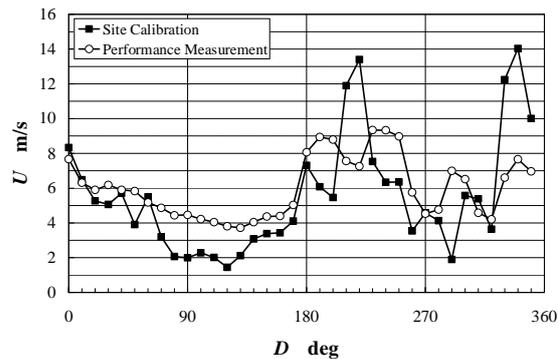
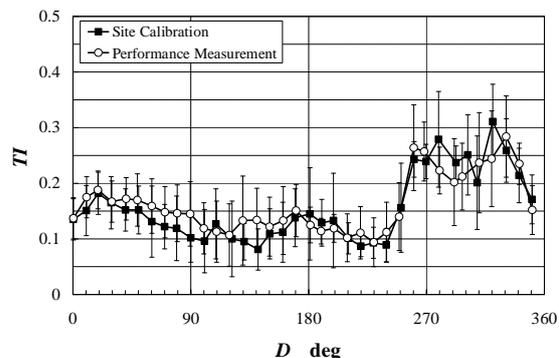


図 15 風速出現頻度



(a) 方位別平均風速

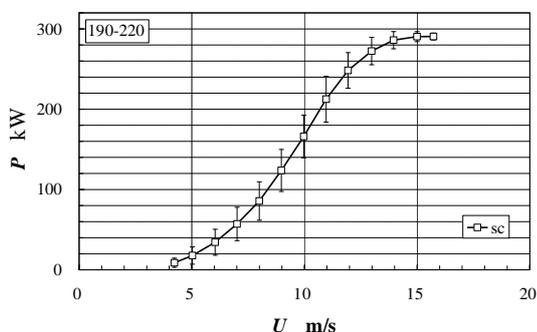


(b) 方位別乱れ強さ

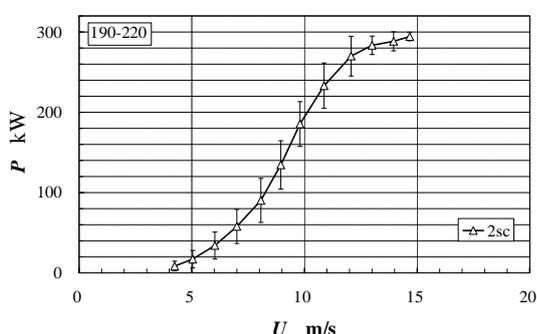
図 16 計測期間の違いによる比較

#### 4. 2 出力曲線

信頼性の高い風向において風速補正を行った性能曲線を図 17 に示す。ここで風速ビンは 1m/s とし、エラーバーは標準偏差を示す。図より、各風速ビンにおける不確かさはほぼ同じであるが、同風速においては二次元サイトキャリブレーションによる出力の方が大きくなる結果となっている。データのばらつきがほぼ同じとなる原因としては、これらの風向におけるデータ数が、サイトキャリブレーションを適用する場合においても IEC の基準値と比較して十分ではないことに加え、二次元ビンの手法を用いるためにはさらにデータ数が必要となると考えられる。また、風車性能計測期間では、風況調査期間と比べて、これらの風向において高風速域のデータが多いこともその一因と考えられる。これらの問題に対しては、二次元サイトキャリブレーションを行う前提で長期間のデータを取得することにより信頼性の高い性能評価ができる可能性があり、また IEC における基準値よりデータ数が少ない場合の不確かさの評価を行う必要があるが、これについては今後の課題とする。



(a) サイトキャリブレーション



(b) 二次元ビンサイトキャリブレーション

図 17 補正パワーカーブ

また、これらの曲線(sc および 2sc)と、設計カーブ (Design), およびサイトキャリブレーションを行わない、つまり地形が平坦地であると見なした場合の曲線(ref)を重ねたグラフを図 18 に示す。前述した図 13 (b) からは、この風向範囲においては参照マストに

よる風車位置の風速予測精度は、風速補正を行うことで向上すると予測されるが、風向の平均化および風速ビン処理を行うことで参照マスト風速による曲線(ref)は、サイトキャリブレーションによる曲線(sc)との差はほぼないといえる。これは風向によるばらつきが平均化により平滑化されたことによるものと考えられる。一方で二次元サイトキャリブレーションによる曲線(2sc)は、これらの曲線より出力を大きく見積もる傾向にあり、たとえば定格風速においては 10% 程度の差を生じていることがわかる。これらの結果と設計曲線との比較を行うことはできないが、風速比の風速依存性のあるサイトにおいては、十分なデータ数を確保できるならば、二次元サイトキャリブレーションを用いることでより確からしい性能評価を行うことができると考えられる。

この結果はサイトキャリブレーションによる出力特性にばらつきがあっても、平均化によりほぼ同じパワーカーブ特性が得られることを示しており、平均的な発電量を計測するときの風車性能評価としての信頼性は高いものと期待される。しかしながら、臨海工業地域における風車性能解析手法として確立するためにはさらなる性能計測事例もしくは平坦地における計測による実証が必要と考えている。また、出力が定格出力より低い傾向を示しているが、これは定格出力の初期の制御シーケンスに起因しており、本試験計測後に改良を行った。改良後の出力性能については次の機会に紹介したいと考えている。

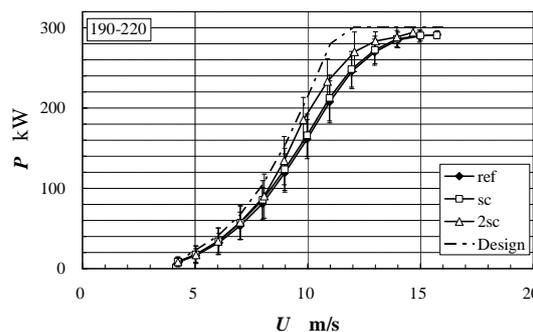


図 18 パワーカーブ比較

#### 5. まとめ

建築物により複雑な風況を形成している臨海工場地域に設置された 300kW プロトタイプ風車について、サイトキャリブレーション技術を用いて性能計測を行い、入念な分析を通じて信頼できる出力曲線が取得できることを実証した。

当該試験サイトは IEC 標準による性能計測法によるサイトキャリブレーション手法を用いてもなお困難な立地、観測条件にある。実際の計測を通じて、周囲障害物の影響により、風速補正係数は風向のみならず風速にも大きく依存することが認められた。

このことは流体力学上では当然のことであり、本研究では風速と風向でビン処理を行う二次元ビンの手法を用いることにより、IEC 標準で規定する風向のみの一次元ビン手法を改善するものであると考える。以上をまとめた結論は、IEC 性能計測法の適用が困難な複雑地形に設置された風車でも、細心で適正なサイトキャリブレーション技術の適用により、信頼性がより向上した出力曲線を取得できること、二次元ビンの手法などの、より高次の手法が推奨されることである。

将来課題としては、本手法の一般性の検証、単純に言えば解析事例の拡大であり、今後複数サイトのデータを取得し比較することで実現できると考えられる。

さらに、風車は、現在、性能向上のために制御プログラムの改善中であり、改善後の性能曲線については、計測データが収集出来た段階で新たに公表する予定である。また、量産機ベースの性能についても今後試験サイトを得て、性能計測を実施し、新たなサイトキャリブレーション手法による性能評価技術を確立し、信頼性の高い風車設備の供給につなげたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) IEC61400-12-1 (Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbine), (2005).
- 2) 細見,駒井鉄工・風車 KWT300 の開発と実証, p1-154~1-159, 第7回風力エネルギー利用総合セミナー, (2007).
- 3) IEC61400-1 (Wind turbines - Part 1: Design requirements), (2005).
- 4) H., Matsumiya, D., Matsushita, et.al, Wind Turbine Performance Measurements in Complex Terrain with CFD Application, Annual Report of the Faculty of Engineering Kyushu University, pp46-56, (2007).
- 5) 九大・産総研, NEDO 報告書「風力発電システムの性能計測技術に関する標準化調査」, (2006).