

## 富津工場における風況精査結果

木場 和義\* 早田 大希\*\* 田中 英之\*\*\*

環境問題の解決のために、CO<sub>2</sub>など温室効果ガスを出さないクリーンエネルギー（再生可能エネルギー）への早期の切り替えが世界的な要求事項になっている。当社でも、環境関連事業への取組みの一環として、クリーンエネルギーの中の風力発電について各種検討を進めている。この検討課題の一つとして局所的な風況を予測する技術があり、現地観測ならびに数値シミュレーション等について、具体例を通じて検討・開発を行っている。

キーワード：風力発電，風況精査，数値シミュレーション，局所風況予測

### まえがき

当社の富津工場は、房総半島の東京湾側中西部の埋立地に位置し、海からの安定した風が見込まれ、風力発電の可能性が考えられた。そこで、風力発電の具体的な検討を目的とした一年間の風況精査を計画し、NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）との共同研究事業として採用された。

観測方法や項目などについては、前稿<sup>1)</sup>で報告したとおりであるが、ここでは2002年11月～2003年10月の1年間に亘って実施した風況精査の結果をまとめ、数値シミュレーションによる予測との比較について検討を行った結果を報告する。

### 1. 観測データの整理・解析

風特性の観測は、高さ30mの観測支柱を設置して、高度30mと20mのそれぞれの高さに取り付けた、風杯式風速計と矢羽根式風向計を使用して行った。観測データは、観測支柱の下部に設置したデータロガーに、サンプリング間隔1秒で取り込み、10分間毎の平均値と最大値および標準偏差を算出して記録した。観測システムの設置状況を写真-1に、風速計と風向計を写真-2に示す。

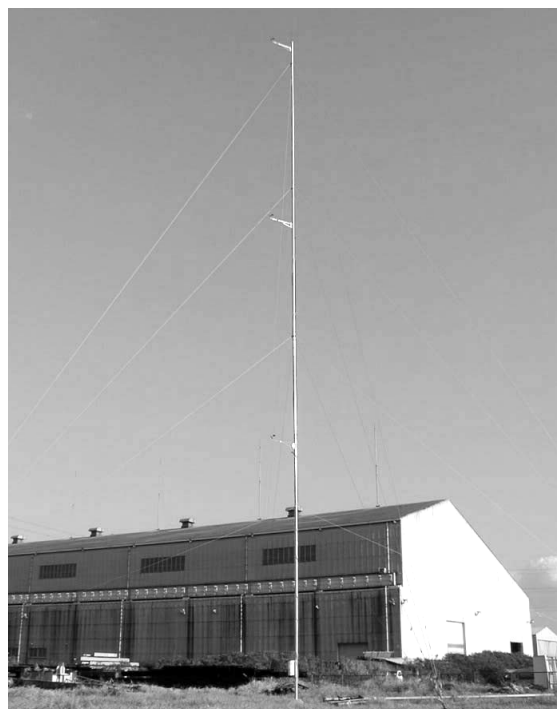


写真-1 観測システム設置状況

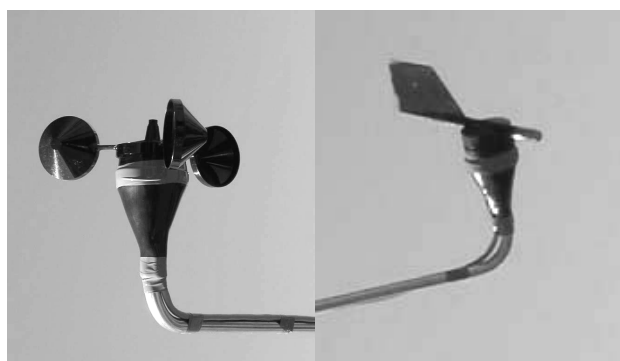


写真-2 風速計(左)と風向計(右)

(1) 平均風速

観測地点の月別平均風速,年平均風速を表-1 および図-1 に示す。

地上高 30m における年平均風速は 5.4m/s で,月別平均風速は最小が 4.3m/s (5月)で,最大が 6.7m/s (4月)であった。風速は5月から7月にかけて弱く,4月および8月に強くなっている。

代表期(寒候期:1月,暖候期:8月,年平均)における時間変動を,図-2 に示す。8月は午後5時頃に風が強く,夜中に弱くなる傾向が見られるが,1月には午前と午後の差はほとんど見られない。平均的には,昼前から午後にかけての時間帯に,風が強まる傾向にあることが分かる。

(2) 年間ならびに月別の風向出現率

風向の卓越状況を評価するため,16方位の風向出現率を算定した。

表-1 月別・年平均風速 (m/s)

地上高	'03.1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	'02.11月	12月	年平均
30m	5.4	5.1	6.1	6.7	4.3	4.7	4.4	6.5	5.3	5.1	5.6	5.0	5.4
20m	4.9	4.4	5.5	6.2	4.0	4.5	3.9	6.1	5.0	4.7	5.2	4.4	4.9

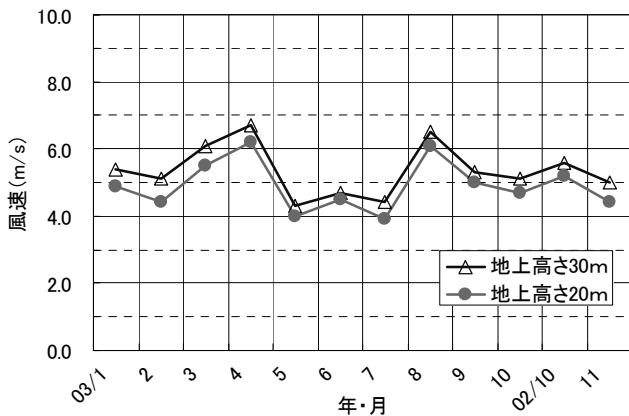


図-1 月別平均風速

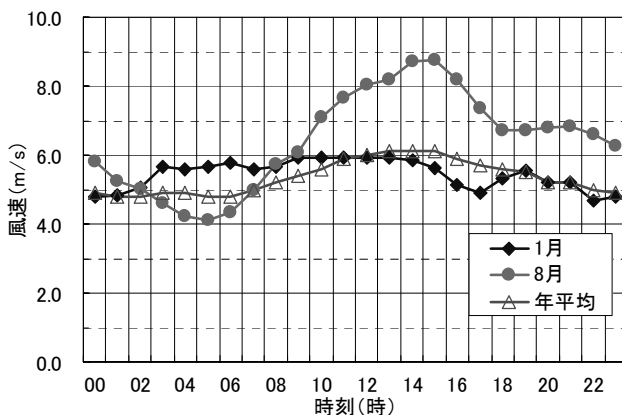


図-2 時間平均風速(地上高 30m)

地上高 30m の風向出現率を表-2 に示す。これを見ると,春から夏にかけての卓越風向は南南西~南西,秋から冬にかけては概ね北北東~北東となっている。

年間の風配図を図-3 に示す。年間を通じての卓越風向は,北北東~北東およびこれに反対方向の南南西~南西となっている。この風軸上(北北東~北東と南南西~南西)の年間風向出現率は 68.0%と高く,安定した風向で風力開発に適した地点であると言える。

(3) 風速の鉛直分布

風速の鉛直分布は「べき指数法則」に従うという仮定の下に,べき指数 n を算定して,地形条件と

表-2 風向の出現率(地上高 30m)

風向	'03.1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	'02.11月	12月	年間
N	11.7	8.6	<b>23.3</b>	5.1	5.4	3.5	4.4	1.4	6.7	7.0	6.7	5.0	7.4
NNE	<b>27.4</b>	<b>36.8</b>	<b>28.8</b>	<b>21.8</b>	<b>16.7</b>	5.8	<b>14.0</b>	2.3	<b>25.6</b>	<b>36.2</b>	<b>26.3</b>	<b>33.9</b>	<b>23.0</b>
NE	<b>11.8</b>	<b>24.4</b>	8.6	11.8	9.9	5.4	13.0	2.9	16.1	<b>16.8</b>	<b>11.4</b>	<b>21.5</b>	12.8
ENE	7.3	11.3	2.7	6.9	9.1	9.3	9.9	4.1	9.4	9.5	7.6	10.9	8.2
E	8.9	8.3	2.5	2.8	8.1	7.4	12.1	5.6	6.1	10.6	7.6	8.2	7.4
ESE	5.6	3.0	3.5	2.8	8.1	4.6	5.6	2.1	2.2	3.6	6.9	6.2	4.5
SE	2.4	0.9	1.8	2.4	4.3	3.2	2.7	1.2	1.9	0.8	2.4	2.0	2.2
SSE	0.7	0.7	2.5	3.2	5.0	3.2	2.2	1.9	1.1	1.2	1.7	0.7	2.0
S	0.7	0.7	1.8	6.0	7.8	4.0	3.1	6.6	2.1	0.8	0.7	0.5	2.9
SSW	2.0	0.7	9.0	<b>22.2</b>	<b>11.0</b>	<b>33.6</b>	<b>22.2</b>	<b>52.6</b>	<b>18.6</b>	3.6	4.0	0.9	<b>15.1</b>
SW	1.7	1.5	7.6	10.0	7.9	<b>12.1</b>	4.7	<b>13.8</b>	7.4	5.9	7.1	2.4	6.8
WSW	10.2	0.4	2.5	1.9	2.2	3.3	1.3	1.7	1.0	1.9	10.3	3.2	3.3
W	3.6	0.7	1.6	1.0	1.7	2.5	1.6	1.6	1.0	1.1	2.5	1.6	1.7
WNW	2.4	0.6	0.8	0.4	1.5	0.8	0.9	1.2	0.1	0.4	1.3	0.8	0.9
NW	1.3	0.4	0.4	0.6	1.1	0.7	0.9	0.0	0.4	0.1	2.1	0.5	0.7
NNW	2.2	0.7	2.4	1.1	0.3	0.6	1.2	1.0	0.3	0.4	1.5	1.6	1.1

※ 着色部は,月・年の最多出現風向(ベスト2)を示す。

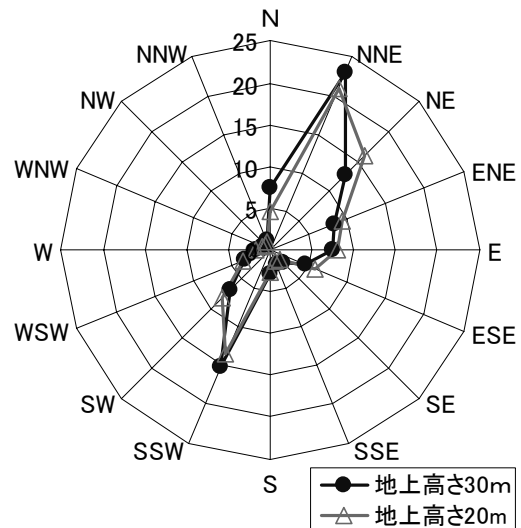


図-3 風配図(年間) (%)

風速の鉛直分布の関係について検討する。風向別の年間平均風速の比から算定した結果を、表-3に示す。

べき指数  $n$  は、地表粗度の状態によって変化し、ばらつきの大いものとなっている。全方位についての平均値は、 $n=4.7$  となり、風車中心高さの風速を推定するために用いることとしているべき指数の値 ( $n=5$ ) とほぼ等しい値となっている。

表-3 風向別べき指数と風向出現頻度(地上高30m)

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	平均
べき指数	1.9	8.1	5.1	6.5	2.2	1.2	1.4	1.8	3.8	9.9	-	-	-	7.3	2.7	4.3	4.7
頻度(回)	591	1931	1089	699	626	385	183	166	236	1183	552	284	143	78	62	89	

※ - : マイナス値もしくは10以上の値

(4) 乱れ強度

風速の乱れ(風速の変動)は、風車の耐久性等に影響を及ぼすので、これの指標となる乱れ強度を、10分間観測値の標準偏差と平均風速を用いて次式により算出した。

$$\text{乱れ強度} = (\text{風速の標準偏差} / \text{平均風速})$$

乱れ強度は、平均風速の大きさおよび地表の条件によって異なることから、10分平均風速が2m/s以上のデータと、4m/s以上のデータに分けて各々について乱れ強度を計算し、これを16方位別に層別して各方位別に平均乱れ強度を計算している。計算結果を表-4と図-4に示す。

表-4 風向別乱れ強度と平均風速(地上高30m)

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	平均
乱れ強度(風速 $\geq 2\text{m/s}$ )	0.22	0.23	0.24	0.23	0.22	0.32	0.39	0.24	0.24	0.14	0.13	0.13	0.19	0.32	0.40	0.38	0.25
乱れ強度(風速 $\geq 4\text{m/s}$ )	0.20	0.21	0.21	0.19	0.16	0.20	0.28	0.16	0.18	0.13	0.12	0.10	0.12	0.21	0.29	0.33	0.19
平均風速	6.1	6.0	4.9	4.0	2.9	2.1	1.4	2.4	3.4	7.4	7.7	8.2	3.8	2.8	2.4	4.1	5.4

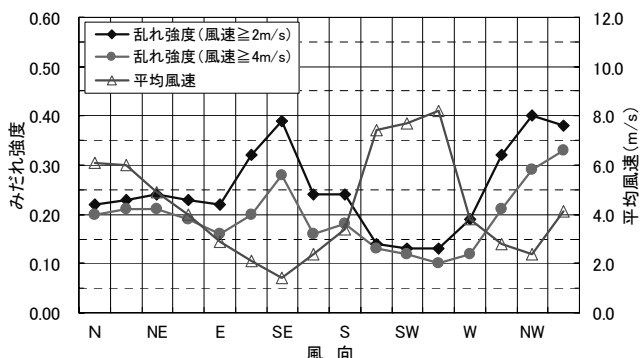


図-4 風向別乱れ強度と平均風速(地上高30m)

乱れ強度は周囲の地形条件により異なるものであるが、安定した発電量を得るために風力開発には0.3以下程度が好ましいとされている。地上高30mについて、風向別に見るとESE, SE, WNW, NW, NNWの風向で0.3を越えているが、これらの風向はいずれも出現率が小さく、この4方位合計で出現率は9.4%しかなく実質的な影響は小さいと考えられる。また、全方位で平均した乱れ強度は、0.25と良好な値になっている。

(5) 最大瞬間風速

期間中の最大瞬間風速は、29.8m/s(2003/11/3 12:54, 風向:SW)であった。月毎の最大瞬間風速を、表-5に示す。風速センサーのサンプリング時間は1秒である。なお、最寄りの気象官署(千葉測候所)における10年間の観測値は、表-6の通りである。

観測期間中の最大瞬間風速は、風車の耐風速(60m/s以上)に対して余裕のあるものであったが、過去10年間の気象官署の記録を見ると台風の影響で40m/sを越える記録がある。風力発電設備の設計に際しては、台風の接近ないしは上陸ということを考慮して、十分な耐風速を検討する必要がある。

表-5 月毎の最大瞬間風速(地上高30m)(m/s)

	'03												年間
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
最大瞬間風速	29.4	19.8	25.4	25.9	23.3	19.1	24.0	28.8	25.3	22.1	29.8	22.3	29.8
風向	WSW	SW	SSW	SSW	SW	SSW	SSW	SSW	NNE	SW	SW	SSW	SW

表-6 千葉測候所の最大瞬間風速(m/s)

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
最大瞬間風速	31.2	28.0	37.5	37.3	32.2	40.3	40.2	35.5	34.3	40.6
風向	NW	NNW	SSW	NW	SSW	WSW	SSW	SSW	SSE	WSW

(6) 風速の出現率

観測された風速値を、1m/sきざみの風速階級に分け、各風速階級別の出現率を求めた。

風速の発生確率分布は、Weibull関数で近似できることが知られている。この分布の形は、2つのパラメータ  $k$  と  $c$  により決まる。上記の風速出現率を風速の小さい階級から順に累積した累積出現率データから、次式にもとづき最小二乗法でWeibullパラメータ  $k$  と  $c$  を求めた。

$$F(V < V_x) = 1 - \text{Exp}(- (V_x/c)^k)$$

F: Weibull 関数の分布関数(風速 V が V<sub>x</sub> 以下になる確率を示す。)

k: 形状パラメータ, c: 尺度パラメータ

月毎および年間で算出したワイブルパラメータを表-7 に示す。また、年間の風速出現率の分布を図-5 に示す。図より、風速 1m/s で出現率が高くなっているが、これは風向によって風速出現率の特性が異なることの影響と、風速計の最低感度(0.5m/s)付近のデータ処理方法の影響が複合したものと考えている。風向別の評価とデータ処理方法の改善は、今後の課題と考えている。

表-7 月別・年間ワイブルパラメータ

	'03.1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	'02.11月	12月	年間
形状パラメータ k	1.37	2.15	1.99	1.86	1.60	1.57	2.22	2.31	1.99	2.48	1.40	1.80	1.75
尺度パラメータ c	5.84	5.80	6.91	7.67	4.84	5.35	4.94	7.71	6.36	5.90	6.61	5.86	6.05

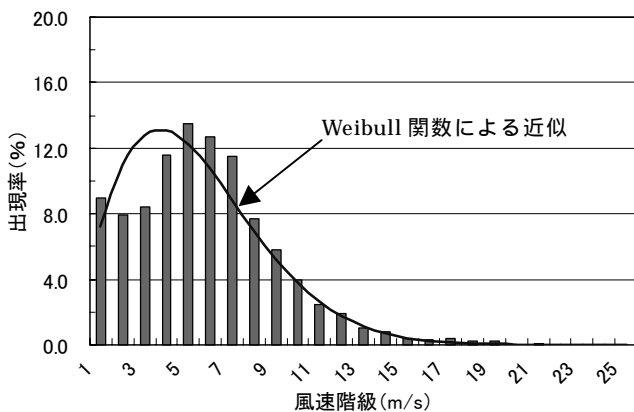


図-5 風速出現率の分布

(7) 観測期間中の気象状況

観測地点の最寄りの気象官署(千葉測候所)と地域気象観測所(木更津)の過去 10 年間の月平均風速、年平均風速と観測年の月平均風速、年平均風速を調べ、観測期間中の気象状況が過去 10 年間の観測結果に対して差がないことを確認した。千葉測候所における観測値を表-8 に示す。また、過去 10 年の平均値と観測年の平均値の比較を表-9 に示す。

過去 10 年と観測年を比較すると、若干観測年の値が小さい傾向があるが、いずれも平年値の 15%以内であり、一般的な観測値のばらつきの範囲内と言える。従って、観測年の風況条件は平年的なものであり、今回の観測データは観測地点の

表-8 千葉測候所における平均風速 (m/s)

年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
1993	3.6	4.6	3.8	4.5	4.1	3.9	4.2	4.2	3.8	3.7	3.3	4.3	4.0
1994	3.7	5.2	3.7	4.2	4.6	3.4	3.8	3.9	3.9	3.9	3.2	3.8	3.9
1995	4.0	4.1	4.2	4.9	4.3	3.6	4.3	4.1	4.1	3.8	4.1	4.4	4.2
1996	4.6	4.3	4.5	3.9	4.0	4.4	4.2	4.0	3.5	3.4	3.6	3.6	4.0
1997	4.6	4.7	4.7	4.3	4.8	4.5	4.7	4.6	4.3	3.7	3.7	3.6	4.4
1998	3.6	4.3	4.8	4.5	4.9	4.2	3.8	4.0	4.5	3.9	3.7	3.5	4.1
1999	3.7	4.2	4.3	4.8	4.9	4.6	5.4	4.7	4.8	4.1	3.5	3.8	4.4
2000	3.8	4.7	5.1	4.9	4.4	4.4	5.1	3.9	4.0	3.4	3.6	3.7	4.3
2001	4.2	3.9	4.8	4.6	4.4	3.6	4.7	3.7	3.8	3.4	2.9	3.7	4.0
2002	4.6	3.6	4.6	4.7	4.1	4.1	5.3	4.9	3.3	3.9	4.0	3.3	4.2
観測年	4.3	3.4	4.6	5.1	4.0	4.1	3.7	4.3	4.0	3.5			4.0

(注)・千葉測候所の位置: N 35° 36.1' E 140° 06.2'  
 ・標高: 4m  
 ・風向風速計の地上高: 47.9m  
 ・観測年の平均は、2002/11~2003/10 の平均を示す。

表-9 過去 10 年と観測年の比較 (m/s)

	千葉測候所	木更津観測所
過去 10 年の平均風速 (m/s)	4.1	2.5
観測年の平均風速 (m/s)	4.0	2.4

平年的な風況特性を表すものと考えられる。また、観測年の値が小さめであることから、将来的には観測値に比べて高い風速が期待できる。

2. 数値シミュレーションとの比較

風況シミュレーションソフトとして広く使用されている WAsP を利用して、観測地周辺の局所を対象とした風況の数値シミュレーションを行った。

WAsP は、デンマークの RISO 研究所が開発した、風況の数値シミュレーションソフトである。

風力発電の計画では、観測地点と風車建設地点が一致しない場合が多い。また多数の風車建設地点に対して、数箇所の観測で発電量などを予測して計画する場合もある。このような場合に、周辺地形および風車相互の影響を考慮して、観測データから風車建設地点の風況を予測するために、局所風況の数値シミュレーションが実施される。

WAsP は、ヨーロッパでは広く使用されてきた実績があり、日本でも実施例が多い。風況観測データ、地形条件、地表粗度、障害物(建物)、風車仕様などの条件を入力して、任意の地点の風況や風力エネルギー取得量を予測することができる。

今回、シミュレーションのためのモデル化は、次の条件で行った。

- ・解析範囲: 観測地点を中心とした 20km 四方

をモデル化。

- ・地形条件：国土地理院の数値地図を利用して標高を含めてモデル化。
- ・地表面粗度：地形図より土地の利用状況を推定して設定。
- ・観測地点周辺の障害物：当社工場の建屋と隣接工場の建屋を設定。

シミュレーション結果から，年間平均風速の分布図を図-6に，また月毎の平均風速の観測値との比較を表-10に示す。

図より，海側へ行くほど色が白くなり，年平均風速が高くなっていることが分かる。

また，観測値との比較では，シミュレーション結果は観測値に良く一致しているが，全体的に高めの数値を示している。これは，観測データから上空の地衡風を推定する過程，またこの地衡風から周囲の地形条件を考慮して目標地点の風速を推定する過程での，地表面粗度や近隣の建造物等のモデル化に起因する誤差の影響と考えている。

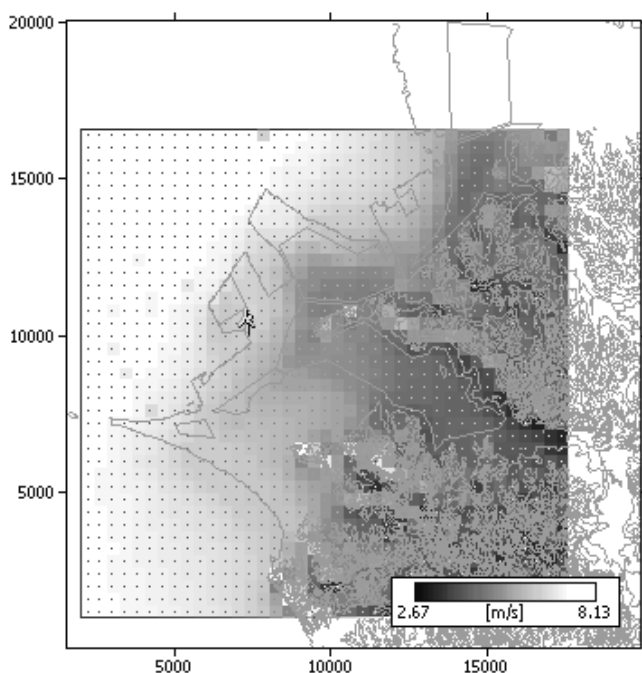


図-6 平均風速分布シミュレーション結果

表-10 平均風速の比較

	'03	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	'02	11月	12月	年 平均
WAsP 平均風速 (m/s)	5.6	5.2	5.5	6.8	4.5	4.7	4.4	6.8	5.7	5.3	5.9	5.3	5.5		
観測 平均風速 (m/s)	5.4	5.1	6.1	6.7	4.3	4.7	4.4	6.5	5.3	5.1	5.6	5.0	5.4		

以上から，地表粗度など条件設定による多少の誤差が含まれる可能性はあるものの，今回の解析対象地域のように比較的平坦な地形条件では，精度良くシミュレーションが出来ることが確認できた。

あとがき

1年間の風況精査を実施した結果について報告した。この間，観測機器のトラブル等による欠測も発生したが，風力発電の可能性を検討するための貴重なデータと，今後の業務に生かせる貴重な経験を得ることが出来た。この観測については，超音波風向風速計を使用した観測システムとの比較観測を継続して行っており，今後観測機器の特性に関するデータ分析を実施する予定である。

参考文献

- 1) 早田大希・木場和義：富津工場における風況精査の紹介，駒井技報，Vol.22，pp.87-88，2003.4.