

観測データに基づく沿岸域風力エネルギーの出現特性

永井紀彦* ・小川英明**・中村 篤***
鈴木 靖****・額田恭史*****

本研究は、全国港湾沿岸域における陸上・洋上の風観測値をもとに、風力エネルギーと時空間的な風の変動特性を検討し、沿岸域風力エネルギーの出現特性の解明をめざしたものである。風速の出現頻度分布をもとに、風速の3乗に比例する風力エネルギーを試算し、想定風車による発電量予測を行った。また、風の変動を変動係数で定量的に整理した。この結果、各沿岸域に共通して洋上風は陸上風よりも風速が大きく変動が小さいことが示された。特に、関西空港や瀬棚港では陸上と洋上の風観測結果を直接比較した。さらに、局所的風況予測シミュレーションによって、瀬棚港周辺の風力出現特性の空間的変動を明らかにした。

1. はじめに

二酸化炭素を排出しないエネルギー源として風力が注目されており、特に、洋上を含む沿岸域は、陸域より風が強く時空間的に安定しているため、今後の風力立地が有望である（(財)沿岸開発技術研究センター，2002）。

しかし、沿岸域における風の出現特性を全国的に比較検討した事例は意外に少なく、欧州においては大型風力発電システムの導入のための観測事例が報告されているものの(Barthelmie ら，1996)，我国の風力発電フィールドテスト事業における風況精査としては、洋上風に関してのデータの体系的な蓄積はない（新エネルギー・産業技術開発機構，1998）。

本稿は、風力発電立地を検討するための基礎資料とすることを目的として、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)によって収集（合田，2001，2002）された風観測記録を整理とりまとめ、洋上風の風速の出現頻度や変動特性を陸上風と比較することによって、風力エネルギーと時空間的な風の変動特性を検討し、沿岸域風力エネルギーの出現特性の解明をめざしたものである。特に、関西空港および瀬棚港では、陸上から洋上にかけての遷移領域における風の局所の変動を観測値と数値計算で検討した。

2. ナウファスで収集される沿岸風観測データ

(1) 沿岸風の観測条件

全国の港湾工事事務所等の、沿岸域の陸上 23 地点および洋上 10 地点の 1996 年から 2000 年にかけての風観測データを、検討対象とした。これらの地点における風観

測データは、毎偶数正時前 10 分間、すなわち 2 時間毎に 10 分間づつ、5 s 間隔でサンプリングしたものである。各観測点における観測条件を表-1 に示す(菅原ら，1999；永井ら，2000)。ただし、関西空港 MT 局における風観測データは、ナウファスとは別枠で、関西空港(株)からご提供いただいたものであり、後述する表-4 に示すように、異なった期間およびサンプリング条件となっている。また、瀬棚港では、ナウファスの一環として収集された陸上観測点のデータに加え、瀬棚町から防波堤上の毎時風観測データ（1999.7-2000.7）をご提供いただいた。

表-1 観測点における観測条件

地点名	機種	地上高 または 海面高(m)	緯度	経度	備考
留萌	超音波	13.35	43°56'17"	141°37'48"	陸上
瀬棚	超音波	15.00	42°27'06"	139°51'02"	陸上
秋田	風車型	10.00	39°45'00"	140°02'59"	陸上
酒田	風車型	19.20	39°00'31"	139°46'43"	海上
新潟沖	風車型	17.60	38°00'18"	139°06'55"	海上
伏木富山	風車型	10.00	36°46'27"	137°06'39"	陸上
輪島	風車型	10.00	39°24'19"	136°53'53"	陸上
黒島	超音波	10.00	33°59'55"	130°48'38"	陸上
玄界灘	超音波	24.60	33°54'38"	130°27'30"	海上
伊王島	超音波	8.00	32°42' "	129°51' "	陸上
名瀬	超音波	13.17	28°22'54"	129°29'44"	陸上
那覇	超音波	14.50	26°14'32"	127°41'15"	陸上
紋別	超音波	15.00	44°21'09"	143°21'46"	陸上
十勝	超音波	10.50	42°18'06"	143°19'10"	陸上
むつ小川原	風車型	12.00	40°55'33"	141°23'13"	陸上
八戸	風車型	12.00	40°33'31"	141°24'07"	陸上
久慈	超音波	15.00	40°13' "	141°50' "	陸上
釜石	超音波	20.00	39°16'07"	141°53'05"	陸上
石巻	超音波	11.00	38°24'40"	141°15'48"	陸上
仙台新港	風車型	12.00	38°16'00"	141°01'31"	陸上
常陸那珂	超音波	29.50	36°23'29"	140°36'47"	陸上
鹿島	超音波	10.00	35°55'59"	140°41'23"	海上
第二海堡	風車型	7.00	35°18'43"	139°44'28"	海上
アスカ島	超音波	13.50	35°12'44"	139°44'10"	海上
MT 局	超音波	18.00	34°25'54"	135°11'52"	海上
神戸	風車型	14.00	34°38'51"	135°16'36"	海上
小松島	風車型	15.40	34°02'24"	134°38'37"	海上
室津	風車型	16.90	33°18'10"	134°08'47"	陸上
高知	風車型	10.00	33°31'12"	133°35'46"	陸上
上川口	風車型	10.00	33°02'22"	133°03'26"	陸上
刈田	風車型	9.00	33°48'02"	131°04'37"	海上
宮崎	超音波	35.50	31°49'13"	131°34'55"	海上
中城	超音波	10.70	26°20' "	127°50' "	陸上
平良	超音波	14.00	24°48'29"	124°16'39"	陸上
石垣	超音波	16.00	24°20' "	124°09' "	陸上

* 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究室長
** (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究室
*** 国土交通省北海道開発局函館開発建設部瀬棚港湾建設事業所副所長
**** 理博 (財) 日本気象協会調査部調査業務課長
***** 工修 (財) 沿岸開発技術研究センター波浪情報部主任研究員

(2) 風力発電量の推定

風速の鉛直分布として1/7乗則を仮定し、観測風速を、洋上風力発電システムの建設にあたって想定されている地上高60 mへの換算を行い、単位面積当たりの風力エネルギー密度を算定した。風力発電の想定発電量は、風力発電機の出力曲線(パワーカーブ)と設置地点のタワー高における風速出現分布を用いて、毎時観測結果の通年合計値として求めた。図-1に示すパワーカーブは、定格出力1750 kWを想定したものである。

風車の受風面積に風力エネルギー密度と年間出現回数に乗じると、年間の風力エネルギー量が算定される。想

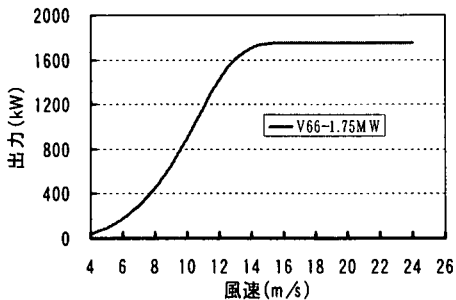


図-1 パワーカーブの仮定

表-2 各観測点の想定年間発電量

地点名	地上高 (m)	平均風速 (m/s)	換算平均 風速 (m/s)		エネルギー密度 (W/m ²)		想定 発電量 (MWh)	エネル ギー 取得率	備考
			60 m	観測高	60 m	60 m			
留明	13.40	6.06	7.50	266	506	4,888	0.32	陸上	
潮棚	15.00	5.25	6.40	187	339	3,424	0.34	陸上	
秋田	10.00	6.36	8.21	407	877	5,210	0.20	陸上	
酒田	19.20	7.42	8.73	521	849	6,094	0.24	海上	
新潟沖	17.60	5.92	7.05	368	622	4,131	0.22	海上	
伏木富山	10.00	5.21	6.72	161	348	3,533	0.34	陸上	
輪島	10.00	3.92	5.06	115	248	1,996	0.27	陸上	
藍島	10.00	3.31	4.27	95	205	1,415	0.23	陸上	
玄界灘	24.60	6.28	7.13	275	402	4,062	0.34	海上	
伊王島	8.00	4.36	5.82	162	383	2,858	0.25	陸上	
名瀬	13.20	4.76	5.91	197	378	3,273	0.29	陸上	
那覇	14.50	4.95	6.06	158	291	2,703	0.31	陸上	
紋別	15.00	3.79	4.62	84	153	1,567	0.34	陸上	
十勝	10.50	2.38	3.06	21	44	404	0.31	陸上	
むつ小川原	12.00	4.71	5.93	136	270	2,858	0.35	陸上	
八戸	12.00	4.21	5.30	102	203	2,177	0.36	陸上	
久慈	15.00	3.99	4.86	99	180	1,841	0.34	陸上	
釜石	20.00	3.70	4.33	82	131	1,217	0.31	陸上	
石巻	11.00	3.61	4.60	69	142	1,437	0.34	陸上	
仙台新港	12.00	4.47	5.62	113	226	2,445	0.36	陸上	
常陸那珂	29.50	4.20	4.65	93	126	1,342	0.35	陸上	
鹿島	10.00	3.95	5.11	69	148	1,620	0.37	陸上	
第二海堡	7.00	5.75	7.82	276	693	5,133	0.25	海上	
アシカ島	13.50	6.57	8.13	349	661	5,442	0.27	海上	
MT局	18.00	5.06	6.01	187	313	3,074	0.33	海上	
神戸	14.00	4.87	5.99	143	267	2,824	0.35	海上	
小松島	15.40	5.66	6.88	245	439	4,094	0.31	海上	
宍津	16.90	2.06	2.47	20	35	311	0.30	陸上	
高知	10.00	2.17	2.81	16	34	307	0.30	陸上	
上川口	10.00	2.27	2.93	17	37	331	0.30	陸上	
河田	9.00	5.27	6.91	200	450	4,136	0.31	海上	
宮崎	36.80	6.70	7.18	374	461	4,298	0.31	海上	
中城湾	10.70	3.78	4.84	79	166	1,616	0.32	陸上	
平良	14.00	4.18	5.15	118	221	1,634	0.25	陸上	
石垣	16.00	3.78	4.57	71	124	1,120	0.30	陸上	

定発電量をこの値で割ったものをエネルギー取得率とする。エネルギー取得率によって、風のエネルギーをどの程度電気エネルギーに変換できるかが分かる。

表-2は、上記の推定を各風観測点に適用した結果である。陸上観測点に比べて洋上観測点の想定発電量は大きいことがわかる(永井, 2001; 永井ら, 2001a, 2001b)。

(3) 風の時空間的変動

風車の疲労(耐用年数)や発電効率に重要な風の時空間的な変動について、主軸方向および主軸直角方向の変動係数として整理した。図-2は、関西空港における整理結果の例を示すものであり、横軸に平均風速を、縦軸にその時の風速の標準偏差を示し、関西空港近傍の各観測点における風の変動特性を示している。左の図は時間変動を示す風の主軸方向の変動、右の図は空間変動を示す風の主軸直角方向の変動である。図中の回帰直線の傾きAは、各観測点における代表的変動係数と考えることができる。すなわち、Aが大きいほど、風の時空間的な変動が大きい(永井, 2002a, b, c)。

図-3は、同様な整理を全国各観測点で行なった結果を示したものである。関西空港旧MT局では、通年の主軸方向変動係数は0.10、主軸直角方向変動係数は0.09

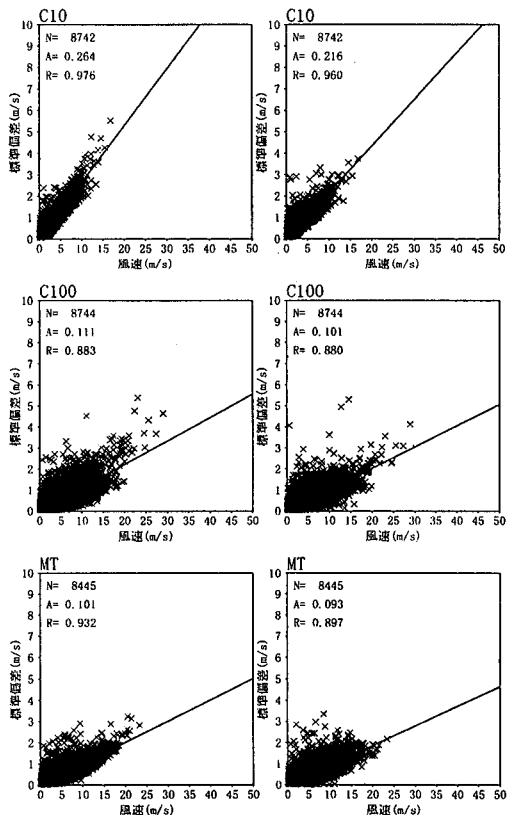


図-2 主軸(左)と主軸直角(右)方向の風速変動

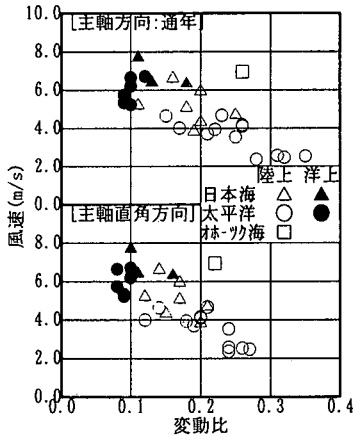


図-3 平均風速と変動係数

であるが、この値は全国の他のナウファス洋上観測点でも、ほぼ同様の値となっている。これに対して、沿岸域陸上における観測点では、平均風速が低く、変動係数が大きい値となっている。関西空港 C 局の 10 m 高度で得られた、主軸方向の 0.26、および主軸直角方向の 0.22 は、ほぼ全国の平均的な値となっている。

すなわち、図-2 で示した陸上風に対する洋上風の時間的・空間的な安定性は、全国の沿岸洋上においても、ほぼ同程度の変動係数の値として、定量的に確認された。

3. 関西空港における沿岸風の時空間変動の詳細検討

(1) 陸上 C 局と洋上 MT 局における風観測

関西空港(株)から、表-3 に示すデータのご提供を得て、陸上風と洋上風の比較を行った。

大阪湾沿岸における風の出現特性は、過去に、(財)日本気象協会 (1983) や清宮ら (1984) によって研究されている。しかし、陸上観測風と洋上観測風との比較検討は十分とは言えず、年間を通じた統計値としての陸上風と洋上風の比較は、風力エネルギーという観点からは行われていない。

空港の第 1 期工事中の 1991 年の 1 年間における、南海電鉄樽井駅の近くに設置された C 局と呼ばれる陸上観測局における観測結果と、空港島の西約 500 m の洋上に

表-3 C 局と MT 局の観測条件

地点名	設置高(m)	機種	対象年	サンプリング
C 局低層	10(陸上)	超音波	1991	0.5/s/10 min/毎時
C 局高層	100(陸上)	超音波	1991	0.5/s/10 min/毎時
旧 MT 局	15(海上)	超音波	1991	0.5/s/10 min/毎時
新 MT 局	17(海上)	超音波	1991	0.5/s/10 min/毎時
			2000	5/s/連続

位置する旧 MT 局と呼ばれる洋上の観測施設におけるデータは、毎正時前 10 分間の超音波式風向風速計による 0.5 s 間隔のサンプリングで観測されたものである。第二期工事の着工に伴い、旧 MT 局は新 MT 局に移設されたが、新 MT 局では切れ目のない連続観測が風観測にも適用されるようになったので、2000 年通年の 5 s 間隔のサンプリングに変換した連続観測記録も検討に用いた。

(2) 発電量に換算した風力の比較

図-4 は、平均海面上 15 m の旧 MT 局における検討対象期間中の風速の出現分布を、C10 (C 局の地盤上 10 m の高さにおける観測結果) および C100 (C 局の地盤上 100 m の高さにおける観測結果) と比較したものである。

洋上の旧 MT 局における出現分布は、C10 よりも右側に (すなわち風速が大きい) ずれており、C100 のものときわめて近い分布となっていることがわかる。すなわち、海面上 15 m における風速は、沿岸部陸上の地盤高 100 m の風速にほぼ等価であった。

こうした風速の出現頻度分布から、風力エネルギーの算定を、前述の方法を用いて行った。表-4 に、C10 の風、C100 の風および旧 MT 局の風の出現頻度分布を前提とした、発電ポテンシャルと発電推定量を示す。ここに、算定に用いた風車機種は、図-1 のパワーカーブを仮定している。ただし、表中の数値は、実測風に基づくものであり、高度補正を行っていない。C100 と旧 MT 局を比較すると、年間発電電力ポテンシャルは C100 の方が若干大きいものの、発電総量では旧 MT 局の方が逆にわずかに大きく、旧 MT 局のエネルギー取得率が若干大きい。すなわち、洋上 MT 局の想定風車断面あたりの通年風力エネルギーは、C 局高度 10 m の約 5 倍であり、C 局高度 100 m とほぼ等しいことが示された。

(3) 風の時空間的変動

図-5 は、2000 年通年における新 MT 局 (平均海面上 17 m) で観測された 5 s 間隔の風速記録を、年間を通じてスペクトル解析したものである。周波数スペクトル密度 $S(f)$ を縦軸横軸とも対数軸上で示すとともに、支配的な周波数帯を得るために地震学などで用いられている

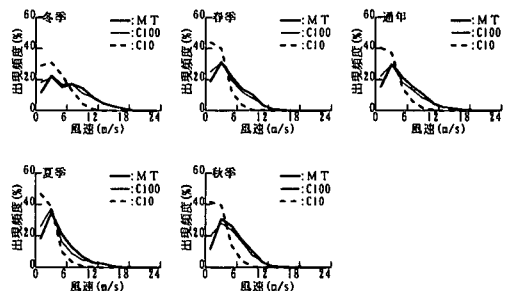


図-4 C 局と MT 局の風速分布

表-4 C局とMT局の風力エネルギー

地点	総エネルギー(MWh)			年間発電量(MWh)			エネルギー取得率		
	C10	C100	MT	C10	C100	MT	C10	C100	MT
通年	1,160	6,035	6,009	383	1,963	2,112	0.33	0.33	0.35
冬季	532	2,537	2,544	199	830	871	0.37	0.33	0.34
春季	192	1,072	1,064	55	363	390	0.29	0.34	0.37
夏季	193	1,139	1,185	58	376	414	0.30	0.33	0.35
秋季	242	1,284	1,191	71	393	429	0.29	0.31	0.36

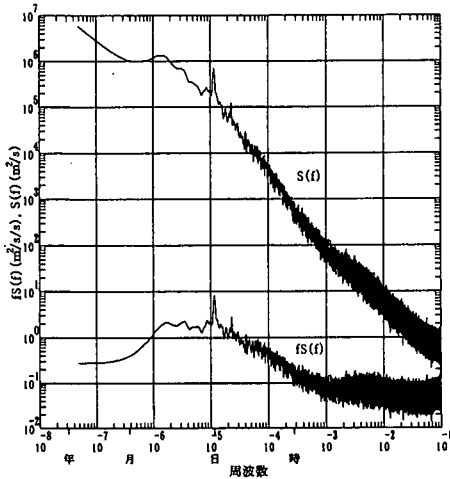


図-5 通年スペクトル解析による風の変動

概念である、 $S(f)$ に f を乗じた応答スペクトル $fS(f)$ を、併せて示している。

風速の変動は、幅広いさまざまな周波数成分から構成されているが、応答スペクトル $fS(f)$ の形状を見ると、 10^{-5}Hz (約1日)よりも高周波側は右下がりであり、変動パワーは相対的に、高周波領域ほど小さくなっている。応答スペクトル $fS(f)$ の値を、オーダ毎に見ると、最も変動エネルギーが大きい周波数帯は、 10^{-5}Hz から 10^{-6}Hz の範囲、すなわち、1日から10日程度の周期帯である。また、応答スペクトルでは、1日と半日に対応する周期で鋭敏な顕著なピークが現れていることも注目に値する。

4. 瀬棚港における沿岸風の時空間変動の検討

(1) 瀬棚町における洋上風力計画と予備調査

瀬棚港の防波堤上の観測点(水面高27m)と港湾建設事業所屋上の観測点(地盤高15m)の、各通年観測結果を整理するとともに、新たに開発した局所的風況予測モデル(鈴木ら, 2003)による試計算結果を実施した。

(2) 観測値に基づく洋上風と陸上風の比較

図-6左は、瀬棚港における洋上観測点と陸上観測点との月平均風速(2時間毎の10分間平均風速の月平均値)を示したものである。月変動の傾向は両者よく一致しており、6-8月に風速が低く12-3月に高い顕著な

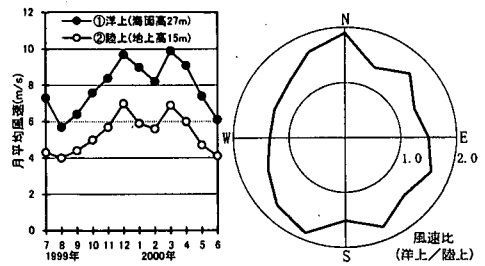


図-6 月平均風速と方位別風速比

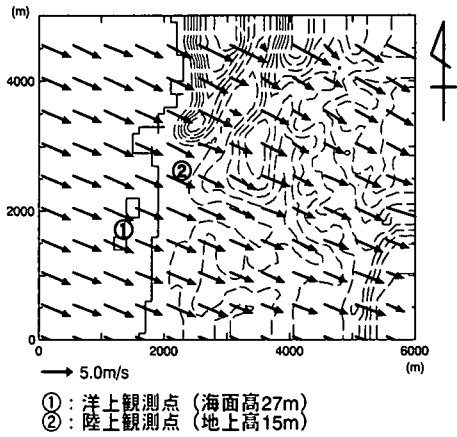
年変動が見られる。両者の平均風速の比は、毎月ほぼ一定であり、洋上風速は、陸上風速の約150%、すなわち風速の3乗に比例するエネルギーでは3倍強であった。図-6右は、16方位別に両者の風速比の平均値を示したものであり、立象山の影響を受ける南北方向には比が相対的に大きく、比較的勾配の緩い東西方向には比が小さい。

(3) 局所的風況予測モデルによるシミュレーション

上記で紹介した陸上観測風と洋上観測風との相違を検討するため、局所的風況予測モデルによるシミュレーションを実施した。図-7に、風況数値計算の一例として、瀬棚港周辺地形を再現し海側WNWから洋上境界高度20mで風速5m/sの風を与えた結果を示す。図中の①および②は、それぞれ洋上と陸上の風観測点である。計算格子としては、水平2方向には100mの一定間隔、鉛直方向には、地盤(水面)上、5mから1500mまでの各層を不等間隔で21層に分割して計算を実施した。タイムステップは1sとし、計算結果が定常に安定するまで計算を行なった。

表-5は、シミュレーション結果を示したものである。地形による風力の減衰は、シミュレーション上では粗度係数の効果として再現される。ここでは、洋上の粗度係数は過去の実績に基づいて0.0001m(一定)としたが、陸上部を0.05mから0.4mに変化させて、その影響を確認した。陸上部の粗度係数は、都市や森林で1.0-6.0m、低木の果樹園等で0.5-1.0m、草地や農地で0.04-0.2m、といった値が想定されている。検討対象範囲には、市街地、住宅地、森林、草原などが含まれており、本来であればメッシュ毎に粗度係数が設定されるべきであるが(鈴木ら, 2003)、現地の詳細な情報がなかったため、ここでは陸上部はすべて一定の粗度係数を与えて、その値による結果への影響を検討し、その結果を実測値で検証することとした。20m高度における風速5m/sという設定値は、年間を通じた平均的な風速であり、図-6右で述べた洋上観測点①と陸上観測点②との通年平均風速比でシミュレーションを検証するために選定した。

海側からの代表的な風向であるWNWからの風に対



図一7 瀬棚港風況シミュレーション

表一5 シミュレーションによる陸上粗度係数と風速比

風向	シミュレーション					観測
	陸上粗度 (m)	境界風速 (m/s) ^{a)}	①洋上風速 (m/s)	②陸上風速 (m/s)	風速比 (①/②)	
WNW	0.05	5.0	5.25	4.26	1.23	1.36
WNW	0.1	5.0	5.25	4.07	1.29	1.36
WNW	0.2	5.0	5.24	3.82	1.37	1.36
WNW	0.4	5.0	5.23	3.50	1.49	1.36
ESE	0.2	5.0	5.83	4.18	1.39	1.66

^{a)} 20 m 高度で 5.0 m/s を与え、鉛直プロファイルは 1/7 乗則を適用

棚町から貴重な風観測資料の提供を受けた。全国沿岸の風観測データは、国土交通省港湾局関係機関の方々の日々のご努力の下に蓄積されているものである。また、図表の整理に当たって(株)エコーのご助力をいただいたことを最後に述べ、ここに謝意を表する。

参 考 文 献

清宮 理・西澤英雄・上田 茂 (1984): 海上風の実測記録, 港湾技研資料, No. 496, 72 p.

合田良実監修, 海象観測データの解析・活用に関する研究会編集 (2001): 波を測る (沿岸波浪観測の手引き), (財)沿岸開発技術研究センター, 212 p.

合田良実監修, 海象観測データの解析・活用に関する研究会編集 (2002): 潮位を測る (潮位観測の手引き), (財)沿岸開発技術研究センター, 188 p.

(財)沿岸開発技術研究センター (2002): 洋上風力発電基礎工法の技術 (設計・施工) マニュアル, 216 p.

(財)日本気象協会 (1983): 港湾気象海象要覧大阪湾, 港湾気象海象シリーズ②, 223 p.

新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO) (1998): 風力発電導入ガイドブック, 122 p.

菅原一晃・永井紀彦・佐藤和敏・川口浩二 (1999): 全国港湾海洋海象観測施設台帳 (ナウファス施設台帳III), 港湾技研資料, No. 941, 49 p. (付録 339 p.)

鈴木 靖・宇都宮好博・三嶋宣明・橋本典明・永井紀彦 (2003): 局所的風況予測モデル LAWEPS による海上風推定, 海洋開発論文集第 19 巻, 土木学会, pp. 49-52.

永井紀彦・橋本典明・横井博志・鈴木善光・魚崎耕平 (2000): 観測データに基づく沿岸域および海上の風出現特性の検討, 第 27 回土木学会関東支部技術研究発表会講演集, pp. 374-375.

永井紀彦 (2001): ナウファスによる我国沿岸域の洋上風力の推定, 第 23 回風力エネルギー利用シンポジウム, 日本風力エネルギー協会, pp. 49-53.

永井紀彦・菅原一晃・佐藤和敏・川口浩二 (2001a): 我が国沿岸の風観測結果に基づく風力エネルギーの試算, 港湾技研資料, No. 999, 59 p.

永井紀彦・勝海務・岡島伸行・隅田耕二・久高将信 (2001b): 我が国沿岸の風観測結果に基づく風力エネルギー, 海洋開発論文集第 17 巻, 土木学会, pp. 19-24.

永井紀彦 (2002a): 日本沿岸の洋上風力ポテンシャルとその変動特性, 第 2 回風力エネルギー利用総合セミナーテキスト, 足利工業大学総合研究センター・日本風力エネルギー協会共催, pp. 11-16.

永井紀彦 (2002b): 観測データに基づく洋上風の特徴, 風力エネルギー第 26 巻第 3 号 (通巻 63 号), 日本風力エネルギー協会, pp. 22-31.

永井紀彦 (2002c): 風力エネルギー活用の観点から見た沿岸域洋上風力の特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1034, 34 p.

Barthelmie, R. J., M. S. Courtney, J. Hojstrup, and S. E. Larsen, Meteorological aspects of offshore wind enrgy: Observation from the Vindeby wind farm (1996), Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 62, pp. 191-211.

しては、粗度係数を 0.2 m 程度に設定すれば、実測値から得られた風速比 1.36 が概ね再現できることが明らかになった。しかし、陸上からの代表的な風向 ESE からの風に対しては、同じ粗度係数では風速比が 1.39 となり、実測値から得られる 1.66 よりは若干小さい値であったので、より大きな係数の設定が必要なようである。

今後は、詳細な地形情報を入手し、より適切な粗度係数の設定による再現性の向上をはかるとともに、洋上と陸上との風速や乱れや鉛直分布の相違に関しても検討を行ない、より適切・合理的に風力立地の検討ができるシステムの構築・改良をめざしたい。

5. ま と め

以上、洋上風は陸上風に比べて風速が大きく変動が小さく風力エネルギー活用に適していること、局所的風況予測モデルは空間的な風況変動を概ね適切に再現し、風車の適切な配置計画策定に有効な手法であることが、明らかにされた。

本稿のとりまとめにあたって、関西空港(株)および瀬