

灯台観測データに基づく海上風鉛直分布の基礎検討

片山 裕之¹・鵜飼 亮行²・三浦 成久³

¹ 正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: hiroyuki.katayama@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² 正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: akiyuki.ukai@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員 五洋建設(株)洋上風力事業本部(〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)
E-mail: naruhisa.miura@mail.penta-ocean.co.jp

沿岸域における洋上風力発電では、発電効率だけでなく施工中また完成施設の安全性の観点でも、波浪や風の特性を把握することは重要である。全国の灯台で観測された風データは40年程度の長期観測が行われており、一般的に観測高度も高く、施工検討の基礎データとして風況の特性を把握する上で有意義であると考えられる。

本研究では、全国の灯台で観測されている風データを用い、洋上風力施工検討の基礎データとするため全国沿岸の海上風の特性を把握した。また年最大風速に対する最適分布関数および確率風速について調べた。さらに海上風の鉛直分布の議論をするため、灯台観測風データとMSMによる推算高度風の比較を行って考察した。

Key Words : light typhoon observation wind data, offshore wind, offshore wind power generation, vertical distribution of wind speed, MSM

1. はじめに

沿岸域において洋上風力発電の検討が進む中、発電効率だけでなく施工中また完成施設の安全性の観点でも、波浪や風の特性を把握することは重要である。

波浪については、観測拠点が整備された全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)¹⁾の観測データに加え、例えばGPV(CWM)²⁾に代表される推算データにより平面的な把握が可能である。一方、風については、推算データを主体に検討されているが、海上観測データがほとんど無いことから、推算精度の確認が難しい。また推算データは、一般的に海上10m換算風速として整理されているが、ナセルレベルの海上100m程度の高度風データも施設利用率の検討に必要不可欠である。

このような中、全国の灯台で観測された風データは、40年程度の長期観測が行われており、一般的に観測高度も高く、洋上風力の施工検討を行う上で、風況特性を把握する基礎データとして有用であると考えられる。

本研究では、山口ら³⁾、合田ら⁴⁾を参考に、全国の灯台観測風データを用い、洋上風力施工検討の基礎データとするため全国沿岸の海上風の特性を把握した。同時に年最大風速に対する極値分布の検討を行うとともに、最適

分布関数についても考察した。また海上風の鉛直分布の形状を確認するため、灯台観測風データとMSM(Meso Scale Model)高度風との比較を行った。

2. 全国灯台観測風データの特性

(1) 収集した灯台観測風データ

本検討で用いた全国の灯台観測風データは、沿岸海上気象データ⁵⁾から収集した。登録されている全国灯台観測データのうち、図-1に示す45地点(観測期間:16~43年間、観測高度:25~260m)を対象とした。また各灯台の観測高度については確認できない灯台もあり、ここでは灯光高⁷⁾を各観測高度として扱った。なお風データは30分毎の観測である。図-2に例として犬吠埼灯台の風データ(1977~2019年、灯光高52m)の時系列を示した。

(2) 灯台観測風データの特性

灯台は、灯光による船舶の航行目標となる施設であることから、岬の先端など、周りに観測障害となる高層物は少ないと考えられる。各灯台によって条件が異なり地形特性を一律に説明できないとは考えられるが、基本的

な特性として、周辺地形による遮蔽の程度を確認するため、代表地点として犬吠埼と妙見埼における風出現特性を確認した(図-3)。なお、比較したCWMは、灯台に最も近い格子のデータを使用した。

図-3に示す灯台とCWMの特性を見ると、観測高度52mの犬吠埼では冬季のN~NEと夏季のSSWが卓越している点や、風速5m/s以下の出現頻度などの特性が類似している。一方、観測高度26mの妙見埼では、S寄りの陸風がCWMでは見られず、CWMに比べ灯台の方が風速が大きめの傾向が見られる。しかしESE~SEとWNW寄

りの卓越風向は一致する傾向が見られ、両者とも風向出現特性は類似しており、犬吠埼と妙見埼の灯台観測風データが特に地形特性により特定の風向が遮蔽を受けているとは考えにくい。山口ら³⁾も灯台風データの均質性を指摘しており、本検討では各灯台観測風データをそのまま用いて特性を把握することとした。

次に、各地点の年最大風速と年平均風速を図-4に示した。各地点の最大風速は60m/s~30m/s、年最大風速の平均は43.5m/s~20.1m/sの範囲であった。日本海側と太平洋側の違いは見られないが、観測高度が高いほど最大風

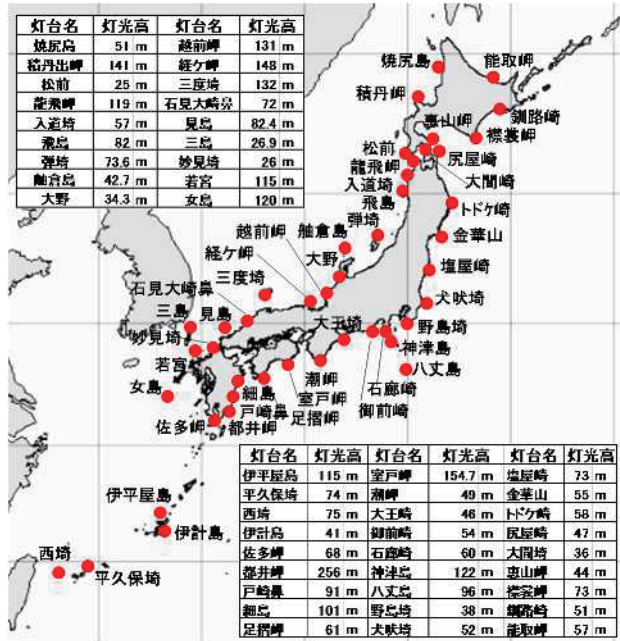


図-1 検討対象灯台位置

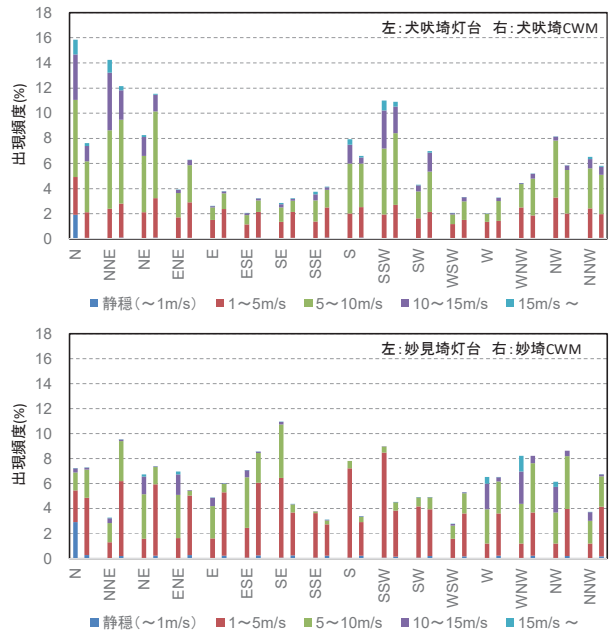


図-3 風出現特性の比較 (上段: 犬吠埼、下段: 妙見埼)

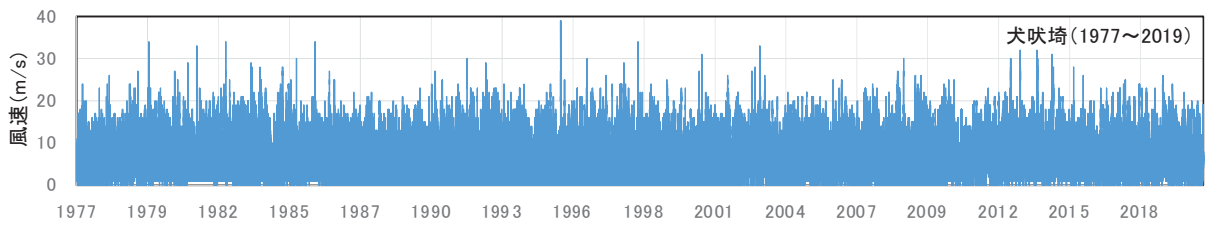


図-2 観測風時系列の例 (犬吠埼: 1977~2019年, 灯光高52m)

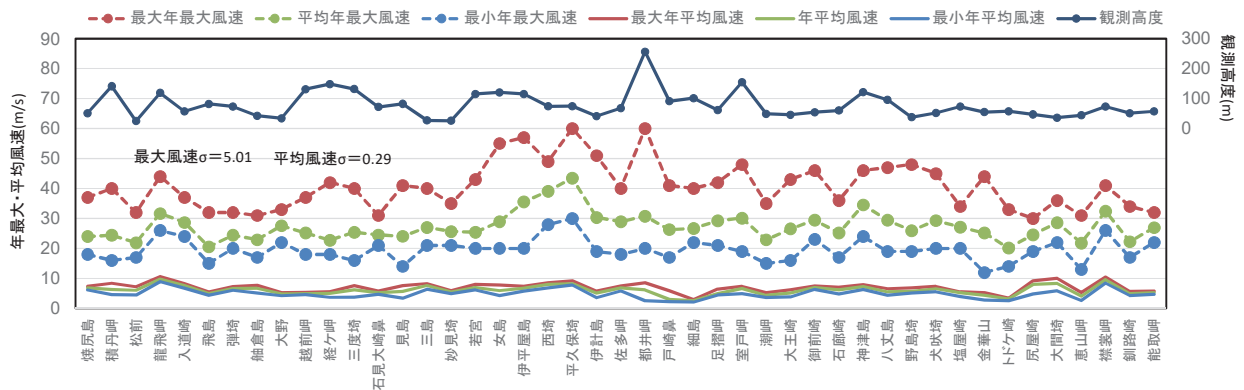
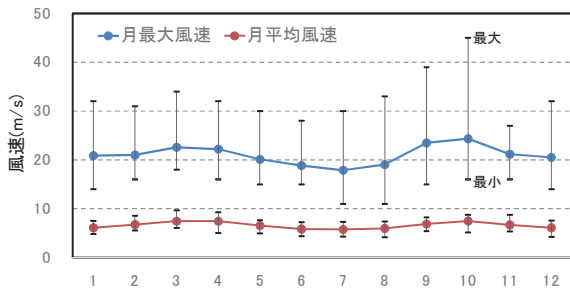


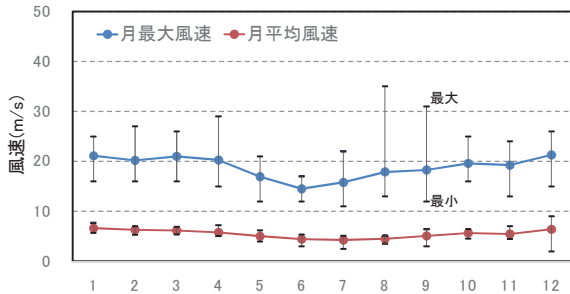
図-4 各地点の年最大風速・平均風速 (最大・平均・最小)

速が大きい傾向が見られる。また台風が頻繁に来襲する九州南部から沖縄エリアでは、観測高度に依らず最大風速が大きくなる傾向にある。平均風速については各地点で変動が少なく($\sigma = 0.29$), 最大風速は年変動($\sigma = 5.01$)がやや大きかった。平均風速は最大9.7 m/s, 最小2.6 m/sであった。

観測風の月変動および年変動について、図-3と同様に代表地点として犬吠埼と妙見埼について整理した(図-5,

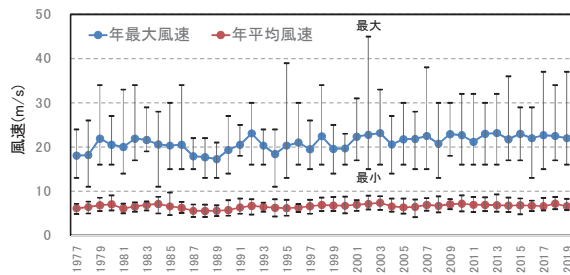


(1) 犬吠埼

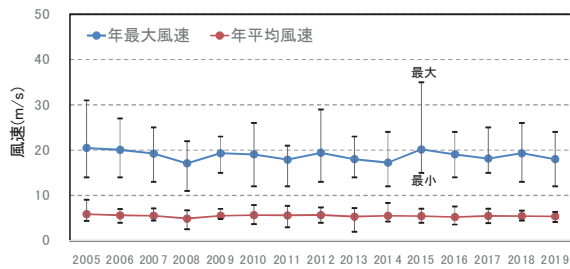


(2) 妙見埼

図-5 最大風速と平均風速の月変動



(1) 犬吠埼



(2) 妙見埼

図-6 最大風速と平均風速の年変動

図-6). なお図中の青丸と赤丸は各月・年の最大値の平均および平均値を、縦棒はそれぞれの最大と最小を示している。両地点とも月変動、年変動とも平均風速に比べ最大風速の方が大きく、最大風速の変動は犬吠埼の方が大きい。また犬吠埼の月変動では3~4月頃と台風期の9~10月にピークが見られ、妙見埼では日本海特有の冬季に風速が大きくなる傾向が見られる。年最大風速は両地点とも平均年最大風速で15~25 m/s程度の範囲だが、変動幅は犬吠埼の方が大きい。

次に観測高度の特性について、各地点の鉛直分布特性が不明なため、実測の最大風速との関係性を調べた(図-7)。ばらつきはあるが観測標高が高いほど最大風速は大きくなる傾向が見られた。また平均最大風速と平均風速との比率と観測高度との関係(図-8)をみると、細島、戸崎鼻の2地点を除いて概ね3.1~6.4倍であった。

(3) 各灯台風データの確率風速

各地点の年最大風速に対して合田の方法⁴⁾による最適極値分布関数の検討を行った。山口ら³⁾は極値の非現実的な増大を防ぐためFT-II型(形状母数 $k=2.5, 3.33, 5.0, 10.0$)を除外しているが、ここではREC基準、DOL基準で棄却されない限りFT-II型を含めGumbel、Weibull分布の中から最適分布関数を選択した。最適極値分布の例として犬吠埼の結果を図-9に示した。

各分布関数に対するあてはめ結果および最適分布関数による確率風速(10年, 30年, 50年)を整理した(表-1, 図-10)。各エリアで共通的な分布関数までは見いだすのは難しいが、比較的Gumbel、Weibull($k=0.75, 1.0, 1.4, 2.0$)分布が多くなっている。風速1位が突出して大きいためFT-II型になっている地点が見られるが、統計年数が長く

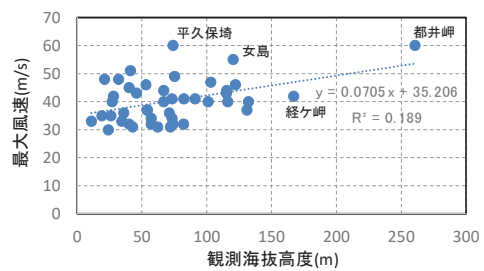


図-7 観測高度と最大風速の関係

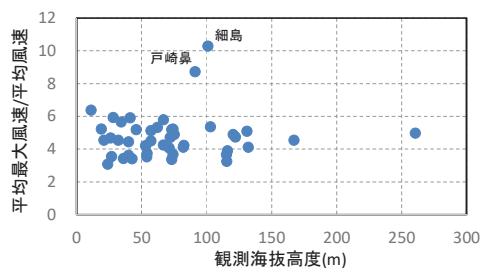


図-8 観測高度と平均最大風速と平均風速との比

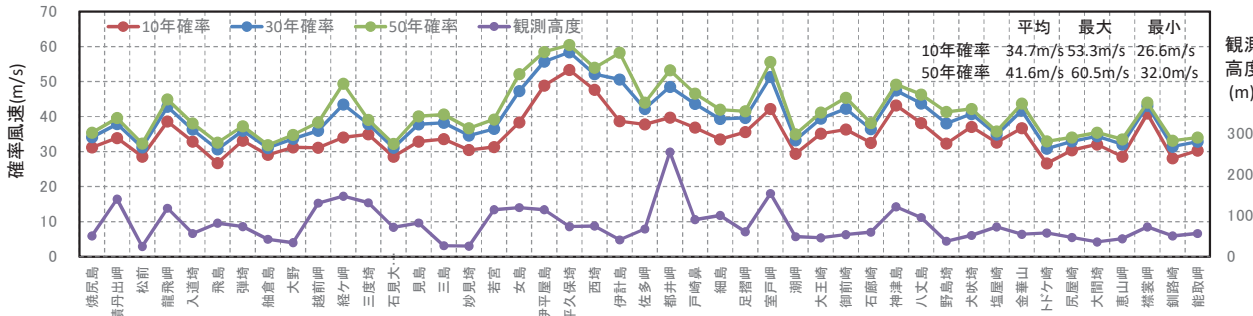


図-11 各地点の確率風速 (10年・30年・50年) と観測高度

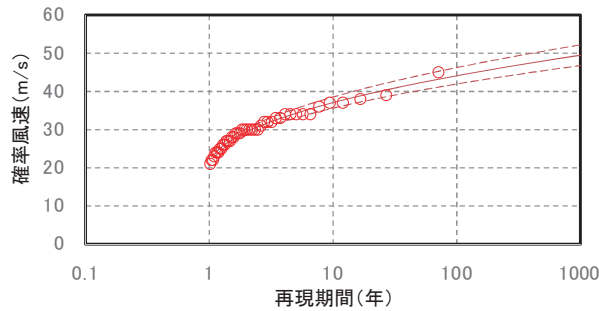


図-9 最適分布関数の一例 (犬吠埼)

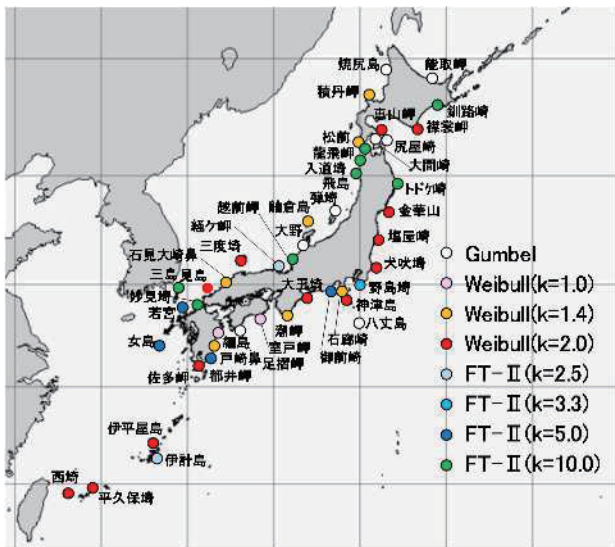


図-10 各地点の最適分布関数

なれば、あるいは今回は年最大値統計としたが擾乱別の極大値統計を実施すれば、更にGumbel, Weibull分布が多くなると考えられる。

各地点の確率風速 (10年, 30年, 50年) と観測高度を図-11に示した。観測高度が高いと確率風速が大きくなる傾向は見られるが、高度値と線形関係ではない。また最大風速同様、台風来襲頻度の高い九州南部から沖縄エリアは観測高度に依らず確率風速が特に大きくなっている。高度が違うため単純な比較はできないが、50年確率風速は32 m/s~60 m/s、平均で42 m/sであった。

表-1 灯台年最大風速に対する極値解析結果

	データ数		適合・棄却検定									確率風速		
	N	B	C	D	E	A	F	G	H	I	10年	30年	50年	
焼尻島	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	31.20	34.09	35.41	
積丹岬	32	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	33.90	37.87	39.58	
松前	42	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	28.59	31.21	32.35	
龍飛岬	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	38.59	42.80	44.89	
入道埼	34	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	32.89	36.32	38.02	
飛島	19	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	26.70	30.63	32.58	
弾埼	38	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	33.16	35.97	37.26	
船倉島	43	■	■	■	■	■	■	■	■	▲	29.07	31.06	31.88	
大野	14	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	31.23	33.68	34.79	
越前岬	18	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	31.13	35.97	38.36	
経ヶ岬	31	◎	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	34.08	43.47	49.39	
三度埼	40	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	34.91	37.89	39.11	
石見大崎鼻	18	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	28.52	31.11	32.23	
見島	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	32.85	37.83	40.10	
三島	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	33.55	38.26	40.59	
妙見埼	15	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	30.45	34.61	36.67	
若宮	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	31.35	36.45	39.19	
女島	42	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	38.34	47.29	52.11	
伊平屋島	19	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	48.83	55.68	58.49	
西埼	22	■	■	■	■	▼	■	■	■	▼	53.31	58.40	60.49	
平久保埼	22	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	47.68	52.13	53.94	
伊計島	11	◎	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	38.64	50.63	58.19	
佐多岬	28	■	■	■	▼	▼	■	■	▼	▼	37.77	42.18	43.98	
都井岬	42	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	39.76	48.51	53.21	
戸崎鼻	18	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	36.83	43.64	46.58	
細島	18	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	33.53	39.31	41.99	
足摺岬	41	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	35.55	39.62	41.48	
室戸岬	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	42.22	51.36	55.61	
湖岬	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	29.40	33.25	34.91	
大王崎	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	35.15	39.43	41.17	
御前崎	22	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	36.29	42.24	45.44	
石廊崎	42	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	32.50	36.43	38.13	
神津島	21	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	43.23	47.44	49.16	
八丈島	41	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	38.18	43.75	48.30	
野島埼	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	32.29	38.01	41.34	
犬吠埼	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	37.08	40.73	42.22	
塩屋崎	16	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	32.59	34.83	35.75	
金華山	41	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	36.76	41.69	43.71	
トドケ崎	41	◇	◇	◇	◇	◎	◇	◇	◇	◇	26.62	30.85	32.94	
尻屋崎	42	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	30.40	32.92	34.07	
大間埼	42	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	32.06	34.39	35.46	
恵山岬	42	■	■	■	■	■	■	■	■	▼	28.57	32.09	33.52	
襟裳岬	43	■	■	■	■	■	■	■	■	▲	40.84	43.07	43.99	
鋼路崎	43	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	28.11	31.45	33.11	
能取岬	16	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	30.32	32.85	34.01	

A: FT-II型(k=2.50), B: FT-II型(k=3.33), C: FT-II型(k=5.00), D: FT-II型(k=10.00), E: FT-I型分布
 F: ワイブル分布(k=0.75), G: ワイブル分布(k=1.00), H: ワイブル分布(k=1.40), I: ワイブル分布(k=2.00)
 ◎: MIR基準最適, ○: MIR基準次点, ▲: REC基準棄却, ▼: DOL基準棄却, ■: 両基準棄却

3. 海上風鉛直分布の基礎検討

(1) 検討概要

洋上風力発電では、設備利用率や完成施設の安全性の確認に高度風は必要不可欠である。しかしながら観測デ

ータはほぼ無いと言ってよく、実プロジェクトでは実施時には観測を行うことが可能であるが、事前検討で使える海上風の鉛直分布に関する観測情報は少ない。

通常は海面上10m換算風速の推算値から、 $1/n$ 乗則を仮定し高度風を予測する。MSMには300~1000hPaまでのジオポテンシャル高度推算風があるが、海面上10mの次の高度は約100mになるため、 $1/n$ 乗則による鉛直分布を推定するためには中間高度の風データが望まれる。灯台観測高度は地点により異なるが、多くは高度100m以下であり、鉛直分布推定に有効な可能性がある。ここではいくつかの代表地点において、灯台観測風データの鉛直分布推定への有効性を確認した。

(2) 検討対象地点と用いたデータ

風の鉛直分布観測データのある地点は希少なため、着床式洋上風力発電プロジェクトの検討で海上風鉛直分布を観測している銚子沖と北九州沖⁸⁾について、近隣の灯台風データと比較検討を行った。また鉛直分布観測のない地点として石廊崎と飛島の2地点でも検討を行った。

検討では、MSMによる推算風データ（海上10m換算風および推算高度風）および近隣の灯台観測風データの他に、NeoWins⁹⁾で公開している海上風鉛直分布データも比較検証した。なお、NeoWinsは、開発過程において北九州沖、銚子沖、波崎、能代の4地点のみで観測鉛直風データと比較検証が行われている¹⁰⁾。

(3) 代表地点の海上風鉛直分布

a) 観測鉛直風データがある地点の整理

鉛直分布を調べるため、銚子沖を例にMSMジオポテンシャル高度風速データをプロットした(図-12)。図中の点線は各高度の平均を示しており、最下層の水色は海面上10m換算風速に相当する。高度が大きくなる程風速レンジが広くなり、また平均風速の傾向が高度2000m付近を境に変わっていることが確認できる。

洋上風力に必要な海面上から高度100m付近までについて、MSM高度風、近隣の灯台観測風、銚子沖と北九州沖の高度風観測値、NeoWinsのそれぞれのデータをプロットした(図-13)。なおMSMと灯台については観測と同じ期間の平均値とした。図中に示した $1/n$ 乗則の点線はMSM海面上10m換算風速を起点にし、観測データにフィットした曲線(橙色)とMSMと灯台風データにフィットした曲線(青色)の2本を示した。鉛直分布については高層と海面近くでnが変わるとの報告¹¹⁾もあるが、ここでは簡単に海面上高度10mを起点にした $1/n$ 乗則とした。両地点とも灯台風データがMSMによる鉛直分布上にあり精度向上に役立っている。観測データとNeoWinsは検証された地点で非常に整合している。MSMと灯台データは、銚子沖では観測値と良く合っているよ

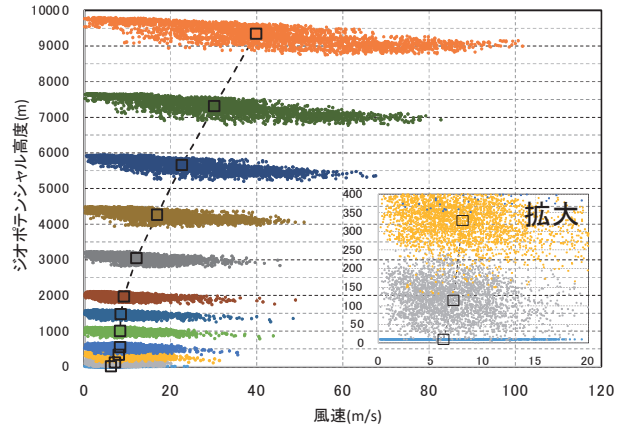


図-12 MSM高度風の例(銚子沖, 2013年)

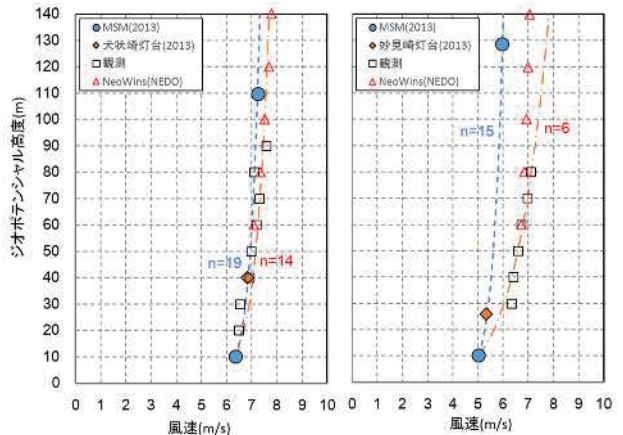


図-13 海上風の鉛直分布比較(左: 銚子沖, 右: 北九州沖)

うに見えるが、nは観測データフィット14に対し19と僅かながら異なっている。北九州沖では観測データとNeoWinsフィットラインでn=6に対して、MSMと灯台データフィットではn=15と異なり、100m高度では1.5m/s程度の差異が見られる。しかしながら、MSMと灯台データによる鉛直分布は、灯台データを追加したことで近似精度を高めており、また観測データによる鉛直分布との乖離も海上風鉛直分布の予測精度を考えると十分参考になる程度と考えられる。

b) 観測鉛直風データがない地点の整理

通常は海上風の鉛直分布観測データはないため、推算風速またはNeoWinsのような公開情報を参考に推定せざるを得ない。観測鉛直風データが無い場合として、石廊崎と飛島の2地点で比較検証を行った(図-14)。なお、観測風がない場合はなるべく長期間のデータから傾向を把握すると想定し、ここでは2012~2019年の年平均風速値を使用することとした。なお図中の橙色はNeoWinsへのフィット、青線はMSMのばらつき幅を示した。

石廊崎では灯台データはMSMのばらつき範囲に位置し、MSMデータの鉛直分布の信頼性を高めると考えられるが、NeoWinsの方が大きめの風速を予想している。飛島ではMSMとNeoWinsの整合が良い反面、灯台データが過

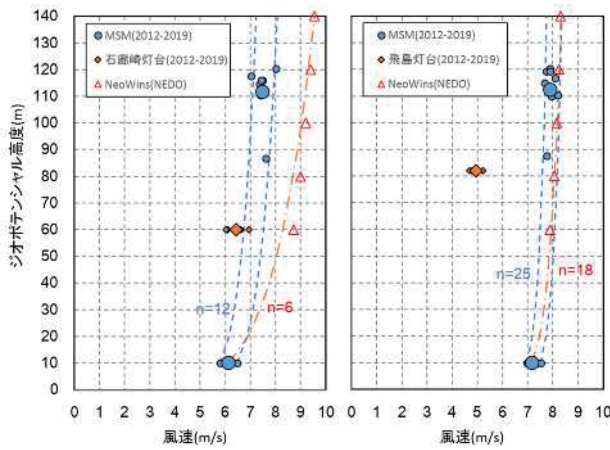


図-14 海上風の鉛直分布比較 (左：石廊崎，右：飛島)

小である。石廊崎灯台は海岸沿いの岬上にあるが、飛島灯台は島の中央高台に位置し、全方位からの風に対し陸の植生粗度の影響を受け海上風より小さい風速を観測していると思われる。

4. おわりに

全国の灯台観測風データを用い、全国沿岸の海上風の特徴を把握した。また海上風の鉛直分布について、灯台観測風データと MSM の推算高度風との比較を行って考察したところ、以下のことが明らかとなった。

- 灯台観測風データは、観測高度は灯台により異なるが、統計期間も比較的長く、沿岸の海上風の特徴を把握するのに十分なデータである。
- MSM高度風に灯台観測風データを追加することで海上風鉛直分布の推定精度が高まると考えられる。

ただし灯台における風観測が周辺地形の影響を受けていないかを吟味して使用する必要がある。

なお、各地点における海上風の鉛直分布形状は異なることが確認されたことから、必要に応じMSM高度風だけでなく、近隣に灯台観測風データがあれば利用して検討することが望ましい。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：リアルタイムナウファス，<https://nowphas.mlit.go.jp/pastdata/>.
- 2) 気象庁：沿岸波浪実況格子点資料，https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/cgi-bin/catalogue/make_product_page.cgi?id=SuchiHar.
- 3) 山口正隆，畑田佳男，大福学：わが国沿岸における気象・海象要素の極値の推定，自然災害科学，15-4，pp.303-314，1997.
- 4) 合田良實：「増補改訂 港湾構造物の耐波設計」，鹿島出版会，pp.267-322，1990.
- 5) 合田良実，小長谷修，永井紀彦：極値波浪統計の母分布関数に関する実証的研究，海岸工学論文集，第45巻，pp.211-215，1998.
- 6) 日本海洋データセンター：沿岸海上気象データ，https://jdoss1.jodc.go.jp/vpage/wave_j.html.
- 7) 日本の灯台：<https://lighthouse-japan.com/index.html>.
- 8) NEDO：洋上観測施設公開データ（銚子沖，北九州市沖），<https://www.nedo.go.jp/fuusha/public/index.html>
- 9) NEDO：NeoWins（洋上風況マップ），https://appwdc1.in-foc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/top.html.
- 10) NEDO：洋上風況観測システム実証研究（洋上風況マップ）平成27~29年度成果報告書，2018.
- 11) 内田孝紀：洋上風況調査における風速の高度補正に関する新しい提案 その1，九州大学応用力学研究所所報，第151号，pp.40-46，2016.

(Received February 4, 2021)

(Accepted April 23, 2021)

BASIC STUDY ON VERTICAL DISTRIBUTION OF OFFSHORE WIND BASED ON LIGHTHOUSE OBSERVATION DATA

Hiroyuki KATAYAMA, Akiyuki UKAI and Naruhisa MIURA

It is important to understand the characteristics of wave and wind conditions for offshore wind power generation in coastal areas, not only for the efficiency of power generation but also for the safety of the completed facilities during construction. The wind data observed at the lighthouses in Japan are long-term observations of about 40 years, and the observation altitude is generally high, which is significant for understanding the characteristics of wind conditions as basic data for construction studies.

In this study, the wind data observed at lighthouses in Japan were used to understand the characteristics of the offshore wind along the coast of Japan in order to provide basic data for the study of offshore wind power construction. The optimum distribution function and the probability wind speed for the annual maximum wind speed were investigated. In order to discuss the vertical distribution of the offshore wind, a comparison between the observed wind data of lighthouses and the estimated altitude wind by MSM is made and discussed.