

# 福島沖における気象・海象観測に関する研究\*

## Metocean measurement at Fukushima offshore site

山口 敦\*\*      川竹 拓也\*\*\*      荒川 洋\*\*\*      石原 孟\*\*\*\*  
 Atsushi YAMAGUCHI   Takuya KAWATAKE   Hiroshi ARAKAWA   Takeshi ISHIHARA

### 1. はじめに

日本における洋上風力発電の導入促進のため、浮体式洋上windファーム実証研究事業において、洋上サブステーション上に設置された気象・海象観測機器と波浪ブイにより、気象・海象観測が行われている<sup>1)</sup>。

本研究では、同実証事業において複数機器により観測された気象・海象観測結果の相互検証を行い、補正を行う。さらに、欠測時に他装置によって観測されたデータから補完することによって、整合性の取れた通年のデータセットを作成するとともに、得られた観測結果から、検証サイトにおける気象特性・海象特性を明らかにする。

### 2. 観測システムの概要

洋上観測タワーの設置位置を Fig.1 に示す。設置位置は西側の海岸から約 20km、水深は 120m であり、気象海象観測は、Fig.2 に示す浮体式サブステーション上に設置された観測タワーで実施されている。

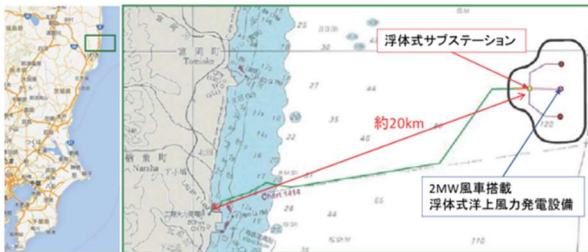


Fig.1 福島沖浮体式洋上風力発電実証検証サイト

Table 1 気象・海象観測機器一覧

(a) 気象観測機器			
項目	観測機器	設置位置	数量
風速	三杯式風速計	マスト上	9
風向	矢羽根式風向計	マスト上	10
風向・風速	ドップラーライダー	上部デッキ	1

(b) 海象観測機器			
項目	観測機器	設置位置	数量
波高・波周期	波浪ブイ	約 500m 海域	1
波高・波周期 流向・流速	海象計	没水ハル上部	1
流向・流速	流速プロファイラー (ADCP)	没水ハル上部	1



Fig.3 気象・海象観測機器

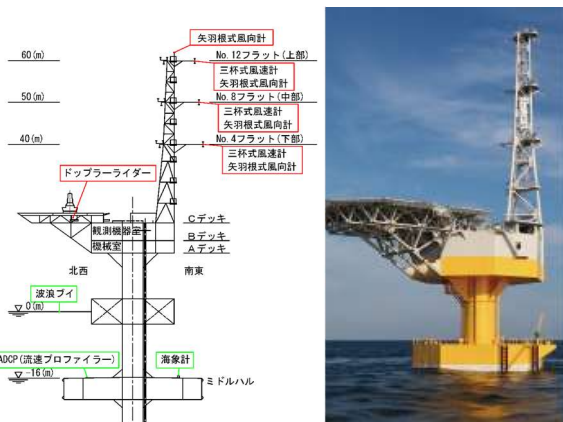


Fig.2 洋上観測タワー外観と観測機器の設置図

本観測システムでは、観測データの信頼性を確保するため、1つの観測項目に対して、複数種類の観測機器を設置することで相互確認を行っている。複数種類の観測機器を設置することで、いずれかの機器に不具合が生じても他の機器で補い、欠損が無くデータを連続取得することができる。観測機器について Table 1 及び Fig.3 に示す。

気象観測については、マスト高度(稼働喫水からの高度)40m, 50m, 60m の3高度に、それぞれ3本のブームを方位角 120 度間隔で平行に張出し、その先端に三杯式風速計と矢羽根式風向計を設置している。また、デッキ上にはドップラーライダーを設置し、設置地点

\* 平成 29 年 12 月 7 日第 39 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演  
 \*\* 会員 東京大学大学院工学系研究科特任准教授 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
 \*\*\* 会員 株式会社水城ネットワーク  
 \*\*\*\* 会員 東京大学大学院工学系研究科教授

から 290m の高度までの風向風速が観測されている。

海象観測については、ミドルハルに設置された海象計と ADCP 流速計及び周辺海域に係留設置されたブイ式波浪計により実施されている。

### 3. 風況データの整理

観測タワーに設置された三杯式風速計によって計測された風速は、タワー本体の影響を受けているため、数値流体(CFD)解析を用いて観測タワーが周囲の風況に与える影響を評価した。Fig.4には解析結果の一例を示す。タワーの風下側では風速が大幅に減速しているとともに、タワーの両側では風速の増速が見られる。また、タワーの上流でも風速の減速が見られる。これらのことから、どの風速計を用いる場合でも、観測結果の補正が必要であることが分かる。CFDによる解析結果の妥当性を検証するために、タワー中段における左舷位置の風速と船首位置の風速との比の観測値と解析結果を Fig.5 に示す。船首がタワーの風下になる 270 度付近で比が大きくなり、左舷がタワーの風下になる 120 度付近で比が小さくなるが、CFD により風速比が精度よくシミュレーションできていることが分かる。

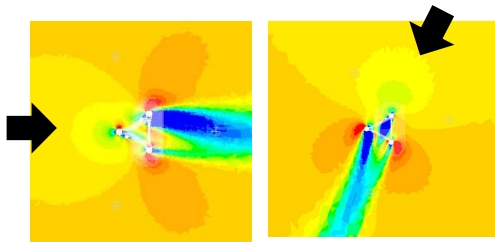


Fig.4 CFD 解析結果

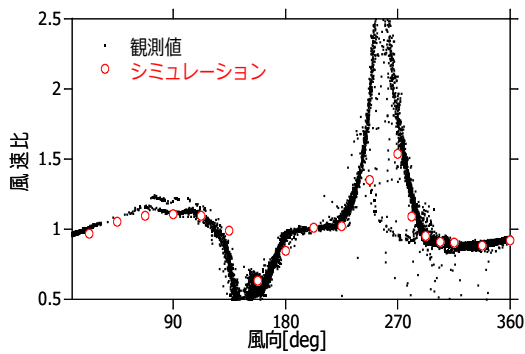


Fig.5 左舷位置と船首位置での風向別風速比

そのため、本研究では、数値流体解析の結果を用いて三杯式風速計の計測値を補正した。なお、風速計がタワーの風下に入る場合は、風速計測の信頼性が低いと考えられるため、原則的に風速計がタワーの風上側となる風向を用いた。

このようにして補正したうえで、上段の三杯風速計による観測値(海面高度 60m)と同高度のドップラーライダーによる風速及び風向の比較を Fig.6 に示す。風速

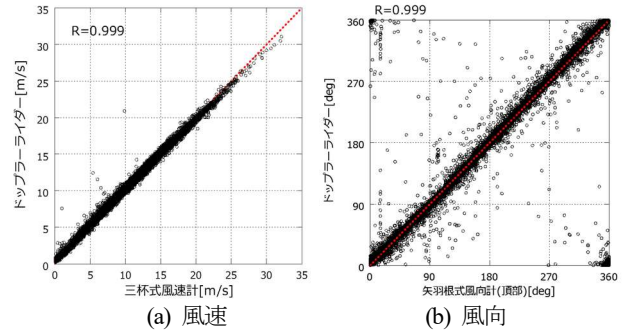


Fig.6 タワー観測値とドップラーライダーとの比較

及び風向ともによく一致していることが分かる。本研究では、ドップラーライダーによる観測値を真値とし、ドップラーライダーによる風速が欠測の場合は、Fig.6 の結果から式(1)で補正した三杯式風速計の値を用いた。

$$u_{Lidar} = au_{cup} + b \quad (1)$$

ここで、 $a = 0.99, b = 0.3$ である。

### 4. 波浪データの整理

波浪ブイによって観測されたデータには、エネルギー周期に不自然なピークが含まれていた。Fig.7には不自然なエネルギー周期が観測された時刻のスペクトルを示すが、低周波にピークがある不自然なスペクトル形状となっており、何らかの観測の問題が発生していると考えられる。このため、ピーク周期が 24.9 秒以上のデータは欠測とした。

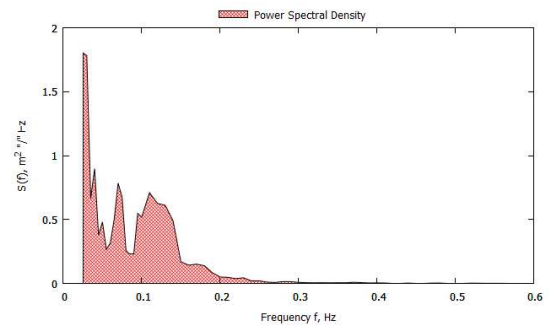
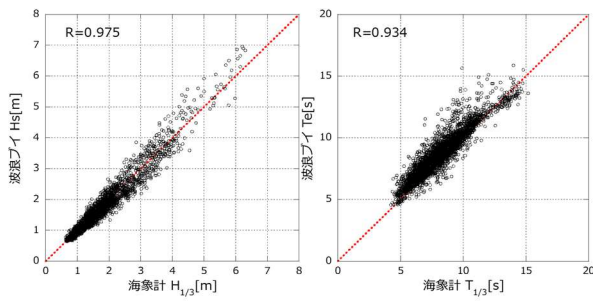


Fig.7 波浪ブイの異常値の例(2015/06/25 5:42)

また、波浪ブイでは波浪の統計値の評価時間として 30 分が、海象計では評価時間 20 分が用いられているが、洋上風力発電設備の設計に関する国際標準である IEC61400-3<sup>3)</sup>においては、評価時間 1 時間の有義波高を用いる必要がある。そのため、本研究では、波浪ブイ及び海象計の計測値を 1 時間値に変換した。波浪ブイによって観測されたスペクトル有義波高及びエネルギー周期と、海象計によって観測された 1/3 有義波高及び有義波周期の比較を Fig.8 に示す。波浪スペクトルから求めたスペクトル有義波高とエネルギー周期は、1/3 有義波高と 1/3 有義波周期と相関が高いことが分



(a) 波高 (b) 波周期  
Fig.8 波浪ブイと海象計との比較

かる。そのため、本研究では、1/3 有義波高と 1/3 有義波周期がスペクトル有義波高とエネルギー周期に等しいとした。波浪データは最も欠測の少ない波浪ブイを優先的に使用し、波浪ブイが欠測時には海象計を用いて補完した。また、両者が欠測している期間については、福島沖 NOWPHAS データに波向別の補正係数を考慮して補完することで欠測の無いデータセットを作成した。Table 2 には、整理した波高と波周期の結合確率分布を示す。波高 1.00~1.25m、波周期 8~9 秒の出現頻度が最も高く、データ群から外れた値がないことが分かる。

Table 2 波高と波周期の結合確率分布

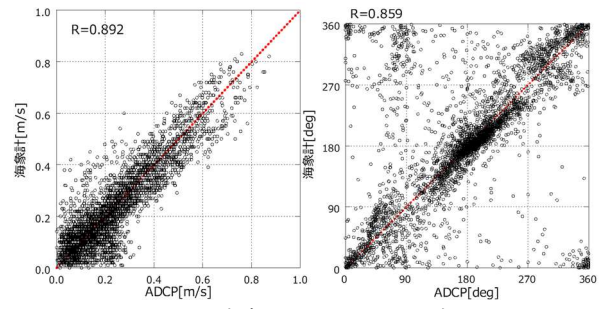
波高階級	3.0~	4.0~	5.0~	6.0~	7.0~	8.0~	9.0~	10.0~	11.0~	12.0~	13.0~	14.0~	15.0~	16.0~	出現回数	出現率[%]
7.00~											2	5			7	0.0
6.50~7.00															7	0.1
6.00~6.50									1		2	1	1		5	0.1
5.50~6.00										1	5	2	1		10	0.1
5.00~5.50							2	3	1	4	4	4			18	0.2
4.50~5.00							3	6	1	1	15	2	1		29	0.3
4.00~4.50					1	4	21	10	5	8	12	1			62	0.7
3.50~4.00				4	22	44	43	25	25	18	2		1		186	2.1
3.00~3.50				7	39	66	76	39	17	13					239	2.7
2.50~3.00				23	85	115	154	76	16	16	5				460	5.3
2.00~2.50			7	94	180	317	331	81	63	23					894	10.2
1.75~2.00			14	76	208	238	169	69	21	3					798	9.1
1.50~1.75			41	140	338	338	187	138	28	10					1228	13.9
1.25~1.50			4	72	210	423	360	297	89	36	6				1497	17.1
1.00~1.25			8	119	223	526	450	230	27	8					1591	18.2
0.75~1.00			17	110	247	419	418	153	9	2					1375	15.7
0.50~0.75			2	36	98	149	73	7	1						366	4.2
0.25~0.50							1								1	0.0
~0.25															0	0.0
出現回数	0	31	399	1111	2310	2366	1466	628	238	114	76	17	4	0	8760	100.0
出現率[%]	0.0	0.4	4.6	12.7	26.4	27.0	16.7	7.2	2.7	1.3	0.9	0.2	0.0	0.0	100.0	

## 5. 海流データの整理

海象計と ADCP による流速及び流向の比較を Fig.9 に示す。ただし、海象計は水深 11m において観測された 20 分平均値、ADCP は水深 11.78m において観測された 10 分平均値の毎 20 分の観測値を用いた。流速・流向ともよく一致していることが分かる。ADCP より安定した測得率が得られた海象計を優先的に使用し、海象計が欠測時には ADCP を用いることとした。

## 6. 福島沖における気象・海象特性

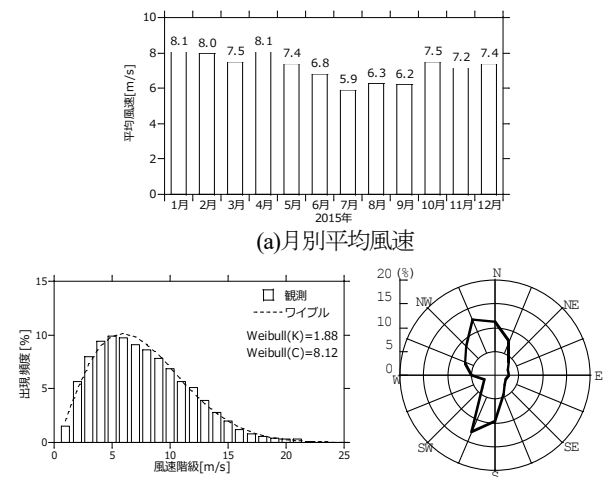
前述のようにして作成した、2015 年 1 月~12 月の気象・海象データセットに基づき、福島沖における気象・海象特性を明らかにした。



(a) 流速 (b) 流向  
Fig.9 海象計と ADCP との比較

## (a) 風況

風況データの統計分析結果を Fig.10 に示す。海面上 60m 高さにおける月別平均風速は、5.9m/s から 8.1m/s の範囲であり年平均風速は 7.2m/s である。風向は南北方向の風が卓越しており、南南西の風が 12.9%、北北西の風が 12.6%の出現頻度である。風速階級別の出現頻度は、ワイブル分布で近似した場合に形状係数(K)は 1.88、尺度係数(C)は 8.12 である。

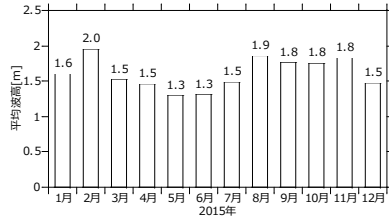


(a) 月別平均風速 (b) 風速の階級別出現頻度 (c) 風向の出現頻度分布

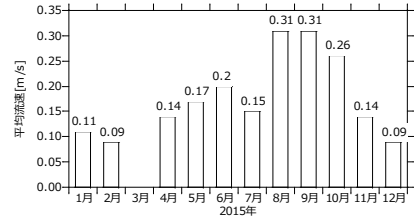
Fig.10 風況データの統計分析結果(60m 高度)

## (b) 波浪

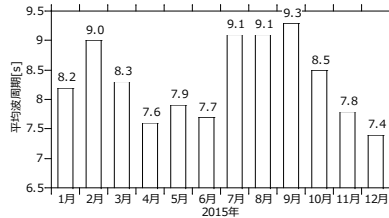
波浪データの統計分析結果を Fig.11 に示す。月別の平均波高は、1.3m~2.0m の範囲であり、年平均値は 1.6m である。平均波周期は、7.4~9.3 秒であり年平均値は 8.3 秒である。当該サイトは、太平洋の強いうねりの影響を受けるため、年間を通して波周期が長い傾向にある。西側に本州があるため、波向は陸地と反対方向の、南東から東にかけて卓越している。波高の階級別出現頻度は、1.00~1.25m が 18.2%と最も高く、次いで 1.25~1.50m が 17.1%であり、0.50m 以下はほとんどない。波周期の階級別出現頻度は、8~9 秒が 27%と最も高く、その前後を含めると全体の約 70%を占める。波周期 5 秒以下の出現頻度は 0.4%と非常に少ない。



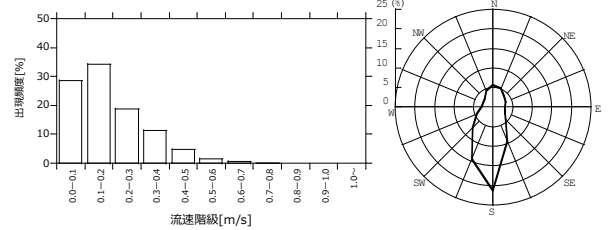
(a)月別平均波高



(a)月別平均流速



(b)月別平均波周期



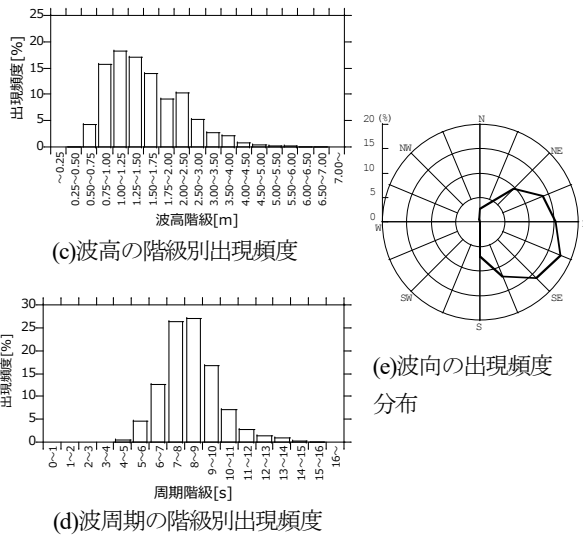
(b)流速の階級別出現頻度

(c)流向の出現頻度分布

Fig.12 海流データの統計分析結果(海面下11m)

観測された風速とほぼ等しいことを明らかにした。

- 2) 波浪スペクトルから求めたスペクトル有義波高とエネルギー周期は1/3 有義波高と1/3 有義波周期と相関が高いことを明らかにした。
- 3) 福島沖の風向は南北方向が卓越し、海面高度60mの年平均風速は7.2m/sである。また、波向きは陸地と反対の東から南東方向が卓越する。また、スペクトル有義波高の年平均値は1.6mであり、エネルギー周期の年平均値は8.3秒である。流向は南向きが卓越であり、年平均流速は0.18m/sである。



(c)波高の階級別出現頻度

(e)波向の出現頻度分布

(d)波周期の階級別出現頻度

Fig.11 波浪データの統計分析結果

### (c)海流

海流データの統計分析結果を Fig.12 に示す。海面下11mにおける月別の平均流速は、0.09~0.31m/sの範囲にあり、年平均流速は0.18m/sである。流向は南向きであり、南南西と南の二つの流向が全体の35.8%を占める。海面下11mにおける流速階級別の出現頻度は、0.0~0.3m/sの範囲において全体の約81.6%を占めている。

### 7. まとめ

本研究では、福島沖洋上風況観測タワーにおいて複数機器により観測された気象・海象データの相互検証を行うとともに、必要な補正を行い、通年の気象・海象特性を明らかにし、以下の結論が得られた。

- 1) 数値流体解析を用いて観測タワーの影響を受けない風速を求めることができることを明らかにした。補正された風速はドップラーライダーにより

### 謝辞

本研究は、経済産業省の委託業務「福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業」で得られた研究成果である。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。福島沖における気象・海象の観測データ(2015年)は福島洋上風力コンソーシアムのホームページ(<http://www.fukushima-forward.jp/>)に公開している。

### 参考文献

- 1) 川東龍則, 山口敦, 石原孟: 福島県沖浮体式洋上ウインドファームの気象・海象・浮体動揺の観測について, 第36回風力エネルギー利用シンポジウム, 2014.
- 2) IEC61400-3: Wind Turbine - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, 2009