

風波とうねりの混合波浪のスペクトルモデルに関する研究*

A Study on a Spectral Model for the Combined Wave of Wind Wave and Swell

種本 純**

Jun TANEMOTO

石原 孟***

Takeshi ISHIHARA

山口 敦***

Atsushi YAMAGUCHI

1. はじめに

洋上風車の設計においては、平均風速と乱流標準偏差から定められる乱流スペクトルモデル及び有義波高と有義波周期から得られる波浪スペクトルモデルによる風と波の時系列を入力値として、時刻歴応答解析を実施し、風車及びその基礎に作用する荷重を評価する。洋上風車の設計に関する国際規格である IEC61400-3¹⁾ では、波浪スペクトルモデルとして、JONSWAP スペクトルモデルを用いることが推奨されている。このスペクトルモデルは、日本沿岸においても観測された波浪スペクトルと良い一致を示すことが確認されており、例えば広瀬ら²⁾ は強風時において得られた観測値と JONSWAP スペクトルを比較し、両者が良く一致することを示した。

洋上風車の設計においては、強風時の終局荷重のみでなく、通常運転時の疲労荷重も評価する必要がある。波浪スペクトルの形状は風速階級により様々であり、うねりを伴う太平洋側では、銚子における観測事例から、風波とうねりが混在する時刻において二山型のスペクトルが観測されることが明らかになっている³⁾。種本と石原⁴⁾ は、観測値と数値シミュレーションの結果を用いて、有義波周期の時系列変化と二山型の波浪スペクトルの関係を明らかにした。さらに、種本と石原⁵⁾ は、その理論背景と数値シミュレーション結果を基に、風と波の結合確率分布モデルを構築し、観測値の分布を再現することに成功したが、二山型の波浪スペクトルのモデル化には至っていない。

そこで、本研究では、風と波の結合確率分布の平均値の関係をj用いて、風波とうねりを考慮した混合スペクトルモデルを考案する。また、福島沖浮体式洋上風力発電実証研究サイトにおける風速、有義波高、有義波周期の観測値と考案したモデルを用いて混合スペクトルを再現し、直接観測された波浪スペクトルと比較することで、考案したモデルを評価する。さらに、

考案した混合スペクトルモデルと従来の設計で用いられてきた JONSWAP モデルを用いて 1 年分の波浪スペクトルを発生させ、風速ビン別に整理したスペクトルの平均値を直接観測により得られるスペクトルの平均値と比較検証する。

2. 観測データの概要

本研究では、福島沖浮体式洋上風力発電実証研究サイトにおける風と波の観測値を用いて、混合スペクトルモデルを再現及び検証する。波浪スペクトルモデルは、有義波高と有義波周期を入力することでエネルギーを周波数の関数として求めることができるため、ある時刻に観測された有義波高と有義波周期を入力値とし、同時刻に観測された波浪スペクトルと比較することにより、モデルの検証を行うことが可能である。

福島沖浮体式洋上風力発電実証研究サイトの実施場所を Fig. 1 に示す。気象海象観測は、北緯 37 度 18.6486 分、東経 141 度 14.4042 分、離岸距離約 20km、の地点に設置された浮体式サブステーションにおいて実施されている。観測機器設置位置における水深は約 120m であり、浅水域における屈折、回折、浅水変形及び碎波は無視できると仮定した。

本研究では、ライダーによる 10 分平均の風速及び海象計による 20 分統計値の有義波高、有義波周期の観測値を波浪スペクトルモデルの入力値として用いた。風速は本研究で考案する風波とうねりの混合スペクトルの成分分解において、種本と石原⁵⁾ の結合確率分布モデルを適用する際に用いる。結合確率分布モデル

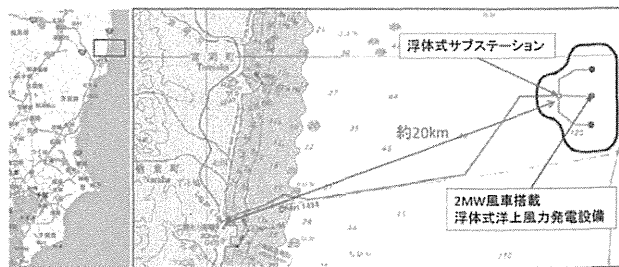


Fig. 1 Location of the Fukushima floating offshore wind farm demonstration site.

*平成 28 年 12 月 1 日第 38 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**会員 (株) 風力エネルギー研究所 〒105-0003 東京都港区西新橋 1-5-

ルは 10m 高度の風速を用いてモデル化されているため、本研究では 40m 高度と 60m 高度におけるライダーの観測値を用いて時々刻々のべき指数を同定し、10m 高度の風速に変換した値を用いた。

波浪スペクトルの評価には、海象計による方向スペクトルの観測値を用いた。方向スペクトルは、0.0078125~0.99219Hz までの約 0.0078Hz 毎、0~360°までの 4°毎の分解能で計測されている。本研究ではそれらの観測値を 360°積分した値を周波数スペクトルの観測値として用いた。

風と波は別々の計測機器で観測されており、それぞれ欠測を含むことがあるが、本研究では 2015 年 6 月 1 日から 2016 年 5 月 31 日までの 1 年間に於いて、風速、有義波高、有義波周期及び方向スペクトルの全ての観測が得られた時刻における観測値を用いて、波浪スペクトルを再現及び評価した。

3. 風波とうねりの混合スペクトルモデル

本研究では、風波とうねりを考慮した混合スペクトル S_C を、式(1)に示す波高及び波周期の風波成分とうねり成分により得られるスペクトルの線形結合により表現する。

$$S_C(f) = S_W(f) + S_S(f) \tag{1}$$

ここで、 f は周波数である。 S_W は風波成分による波浪スペクトル、 S_S はうねり成分による波浪スペクトルであり、ともに式(2)で表される JONSWAP モデルを用いる。

$$S(f) = C(\gamma) S_{PM}(f) \gamma^\alpha \tag{2}$$

ただし、

$$S_{PM}(f) = 0.3125 H_S^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.03(T_p f)^4]$$

$$\gamma = \begin{cases} 5 & ; \frac{T_p}{\sqrt{H_S}} \leq 3.6 \\ \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_S}}\right) & ; 3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_S}} \\ 1 & ; \frac{T_p}{\sqrt{H_S}} > 5 \end{cases}$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & ; f \leq f_p \\ 0.09 & ; f > f_p \end{cases}$$

$$C(\gamma) = 1 - 0.287 \ln \gamma$$

$$\alpha = \exp\left[-\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]$$

上式から分かるように、JONSWAP スペクトルは、ある時刻に観測されたスペクトル有義波高 H_S 及びピーク周期 T_p の 2 つのパラメータから、周波数 f の関数となる波浪スペクトルの形状を表すことができる。ここで、 f_p はピーク周波数であり、ピーク周期 T_p の逆数である。本研究で用いる観測値は、ゼロアップクロス法で処理された有義波高 $H_{1/3}$ 及び有義波周期 $T_{1/3}$ であるため、合田の文献⁹⁾を参考に、次式を用いてスペクトル有義波高 H_S 及びピーク周期 T_p に変換した。

$$H_S = \frac{H_{1/3}}{0.956} \tag{3}$$

$$T_p = \frac{T_{1/3}}{0.88} \tag{4}$$

式(1)から分かるように、混合スペクトルモデルは風波成分とうねり成分により表現されるが、観測値からは 1 組の有義波高と有義波周期しか得られない。そこで、本研究では、種本と石原⁹⁾による風速と有義波高及び風速と有義波周期の平均値を表す関係式の風波成分とうねり成分の割合を用いて分離する。種本と石原⁹⁾によれば、風波とうねりの両方を考慮した風速と有義波高及び風速と有義波周期は、式(5)及び式(6)により表される。

$$\mu_{H_{1/3},C}(U_{10}) = \sqrt{\mu_{H_{1/3},W}^2 + \mu_{H_{1/3},S}^2} \tag{5}$$

$$\mu_{T_{1/3},C}(U_{10}) = \frac{\mu_{T_{1/3},W}^2 \mu_{H_{1/3},W}^2 + \mu_{T_{1/3},S}^2 \mu_{H_{1/3},S}^2}{\mu_{H_{1/3},W}^2 + \mu_{H_{1/3},S}^2} \tag{6}$$

ここで、 $\mu_{H_{1/3},W}$ 及び $\mu_{T_{1/3},W}$ は SMB 法で表される有義波高及び有義波周期の風波成分であり、10m 高度の風速 U_{10} の関数で表される。 $\mu_{H_{1/3},S}$ 及び $\mu_{T_{1/3},S}$ は定数で表される有義波高及び有義波周期のうねり成分である。詳細は種本と石原⁹⁾の文献を参照されたい。式(5)及び式(6)は、1m/s 毎の風速ビンにおける有義波高及び有義波周期の平均値をモデル化した式であるが、本研究においては、任意の値の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期

$T_{1/3}$ に対しても、風波成分とうねり成分の割合が式(5)及び式(6)の関係を満たすと仮定する。すなわち、観測値の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ は、10m 高度における風速 U_{10} の関数として、式(7)から式(10)により風波成分 $H_{1/3,W}$ 、 $T_{1/3,W}$ 及びうねり成分 $H_{1/3,S}$ 、 $T_{1/3,S}$ に分解できる。

$$H_{1/3,W} = H_{1/3} \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_{H_{1/3},S}}{\mu_{H_{1/3},C}} \right)^2} \quad (7)$$

$$H_{1/3,S} = H_{1/3} \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_{H_{1/3},W}}{\mu_{H_{1/3},C}} \right)^2} \quad (8)$$

$$T_{1/3,W} = \frac{T_{1/3} H_{1/3}^2}{H_{1/3,W}^2} \left(1 - \frac{\mu_{T_{1/3},S} \mu_{H_{1/3},S}^2}{\mu_{T_{1/3},C} \mu_{H_{1/3},C}^2} \right) \quad (9)$$

$$T_{1/3,S} = \frac{T_{1/3} H_{1/3}^2}{H_{1/3,S}^2} \left(1 - \frac{\mu_{T_{1/3},W} \mu_{H_{1/3},W}^2}{\mu_{T_{1/3},C} \mu_{H_{1/3},C}^2} \right) \quad (10)$$

Fig. 2 に、式(7)から式(10)で表される、混合スペクトルにおける風波とうねりの割合を示す。ここでは、有義波高 $H_{1/3}$ 及び有義波周期 $T_{1/3}$ で無次元化された値を示している。なお、本研究では種本と石原⁵⁾の結合確率分布の定数として、 $\mu_{H_{1/3},S} = 1.41\text{m}$ 、 $\mu_{T_{1/3},S} = 8.50\text{s}$ 、

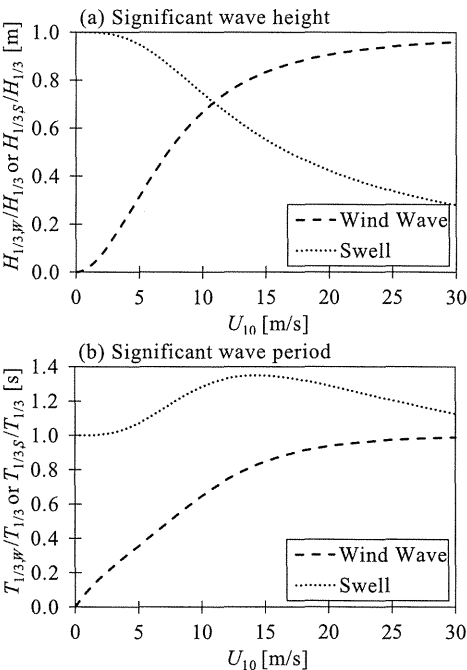


Fig. 2 Wind wave and swell component normalize by measurement used in combined wave spectral model.

$g = 9.81\text{m/s}^2$ 及び $F = 5,9000\text{m}$ を用いた。これらの定数はいずれも 2 章で説明した観測値を用いて同定された値である。

Fig.2-(b)に示す有義波周期のうねり成分は、風波成分がなくなることによって 1 より大きい値をとる。この理由は、高周波側の風波成分が除かれることによる。このメカニズムの詳細は種本と石原⁴⁾の文献を参照されたい。

4. 混合スペクトルモデルの検証

本章では、波浪スペクトルの観測値及び既存の設計で用いられてきた JONSWAP モデルと比較することにより、3 章で説明した混合スペクトルモデルを評価する。4.1 節では二山型スペクトルが観測された事例について、4.2 節では風速階級別のスペクトルの平均値について比較検証する。

4.1 事例解析

3 章で説明した混合スペクトルモデルを、事例解析により評価する。Fig. 3 に、二山型スペクトルが観測された一例について、JONSWAP モデル及び混合モデルにより再現されたスペクトルと観測値との比較を示す。本事例は、2015 年 12 月 14 日午前 5 時 40 分に観測された波浪スペクトルであり、スペクトルモデルの入力値として用いた 10m 高度に変換した風速、有義波高及び有義波周期の観測値はそれぞれ 10.31m/s 、 2.14m 及び 6.50s である。

Fig. 3 から、1 つの波周期の値でピークが決定される JONSWAP モデルでは、観測値に見られる二山のピークを再現できていないことがわかる。一方、本研究で考案した混合スペクトルモデルは風波成分とうねり

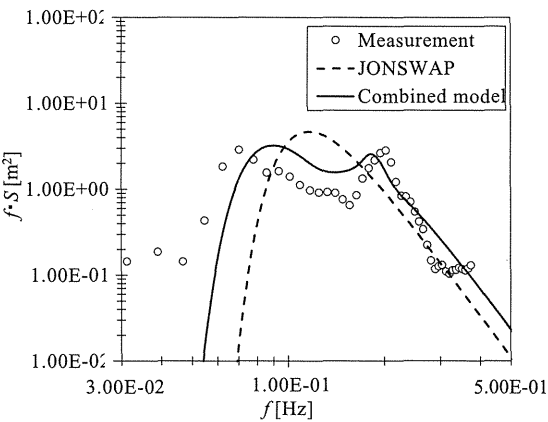


Fig. 3 Comparison of measured and reproduced spectra by using JONSWAP and combined model (at 5:40 on Dec. 2015.).

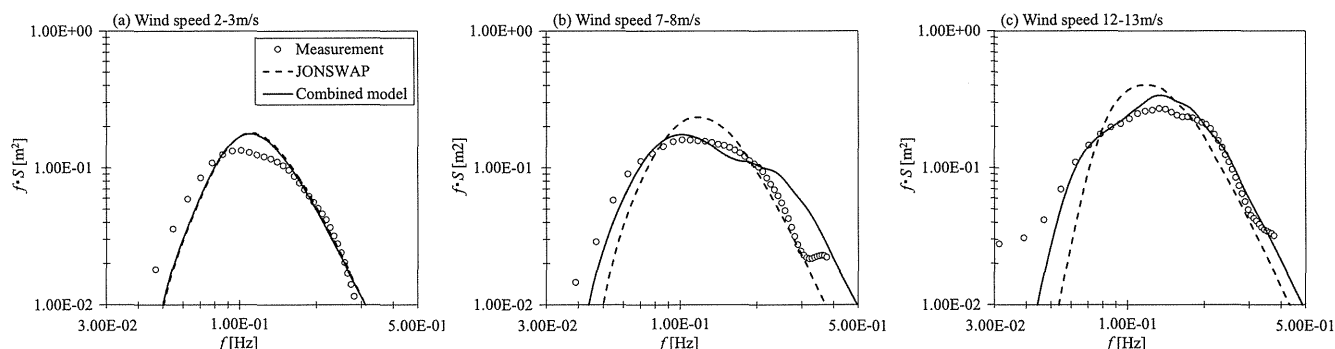


Fig. 4 Comparison of average spectra in 1m/s wind speed bin obtained from measurement, JONSWAP and combined model.

成分からそれぞれ形成される，二山のピークを再現できている。

4.2 風速ビン別の平均スペクトルの検証

時々刻々の波浪スペクトル様々な形状をとるが，荷重解析においては，ある風速，波高，波周期において形成される代表的なスペクトルを用いる．本研究では1年分の風速，有義波高及び有義波周期の観測値を用いて時々刻々のスペクトルを再現し，それらを1m/s毎の風速ビン別に平均することで，風速ビンにおける代表的なスペクトル（以降，平均スペクトル）とした．また，発生させたスペクトルと同時刻の波浪スペクトルの観測値を同様に平均することでモデルにより得られたスペクトルと比較した．

混合モデル及びJONSWAPモデルと観測値との風速ビン別の平均スペクトルの比較の一例をFig. 4に示す．Fig. 4-(a)に示す風速2~3m/sの低風速時には，図中のJONSWAPモデルと混合モデルによる平均スペクトルは重なっており，殆ど同じ値を示していることが分かる．この理由は，低風速域であるため，混合スペクトルモデルにおいて風波成分が殆ど寄与しないためである．両モデルにより再現されたスペクトルは，ともに観測値とよく一致している．Fig. 4-(b)及びFig. 4-(c)においては，混合スペクトルは幅が広いスペクトルとなっており，低周波側を精度よく再現している．これは，二山のピークを持つ波浪スペクトルを再現できるためである．風速ビンにおける平均スペクトルは二山型にはならないため，JONSWAPスペクトルを用いても，観測値を概ね再現できることがわかる．

5. まとめ

本研究では，風波とうねりの混合スペクトルモデルを考案し，福島沖浮体式洋上風力発電実証検証サイトにおける風速，有義波高及び有義波周期の観測値を用

いて波浪スペクトルを再現するとともに，観測された波浪スペクトル及び既存の設計で用いられてきたJONSWAPモデルと検証し，以下の結論を得た．

1. 風速と有義波高及び有義波周期の平均的な関係を表す式を用いて，観測された風速，有義波高及び有義周期から風波成分とうねりを分離することにより得られる，混合スペクトルモデルを考案した．事例解析の結果から，混合モデルを用いることにより，JONSWAPモデルでは再現できない二山型のスペクトルを再現できることが明らかになった．
2. 1年分の風速，有義波高及び有義波周期の観測値を用いて，風速ビン別の平均スペクトルを観測値から得られた値と比較した．JONSWAPモデルによる波浪スペクトルも観測値を概ね再現できるが，混合モデルによる風速ビン別の平均スペクトルは観測値により近い値を示した．

謝辞

本研究は，経済産業省の委託業務「福島復興・浮体式洋上ウィ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．

参考文献

- 1) IEC61400-3: Wind Turbine - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, pp.128, 2009.
- 2) 広瀬宗一・立花祐二・菅原一晃，日本沿岸の波浪のスペクトル型について．港湾空港技術研究所 報告，Vol.22, No.3, 1983, pp.83-124.
- 3) 福本幸成・前田修・宇佐美栄治・林田宏二・石原孟，洋上風力発電設備基礎周辺の波浪の観測（その2），第35回風力エネルギー利用シンポジウム，2013, pp.248-251.
- 4) 種本純・石原孟，波浪推算モデルと合成風速場を用いた風波とうねりの数値予測，風力エネルギー学会論文集，Vol.38, No.4, 2014, pp.124-131.
- 5) 種本純・石原孟，風と波の結合確率分布モデルに関する研究，風力エネルギー学会論文集，Vol.39, No.3, 2015, pp.44-51.
- 6) 合田良實，耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，2008.