

風と波の結合確率分布モデルの提案*

A model for the joint probability distribution of wind and wave

種本 純**

Jun TANEMOTO

石原 孟***

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上風力発電設備の設計に関する国際基準「IEC61400-3」¹⁾では、疲労荷重の照査のための気象海象条件を、風速、波高及び波周期の結合確率分布を用いて評価することが定められている。この結合確率分布は関数の形で記述されておらず、観測値²⁾や気象・海象シミュレーションの予測値³⁾から直接得られる散布図を用いて出現頻度を計算することにより求められている。しかし、観測期間が短ければ観測期間中に現れない気象擾乱や欠損等により十分なデータが得られないため、風速、波高及び波周期の関係を平均値、標準偏差、相関係数などの簡単なパラメータでモデル化し、これらの関係式から欠損したデータを予測する必要がある。

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として、Sverdrup and Munk⁴⁾及びBretschneider⁵⁾らの研究により定式化された有義波法(SMB法)が一般的に用いられる。この手法では、波浪の風波成分のみしか予測できないが、石原ら⁶⁾はSMB法にうねり成分の予測式を導入した混合モデルを提案し、風波とうねりが混在する太平洋側における風速と波高及び風速と波周期の平均値との関係を精度良く再現した。これらの予測式では、ある風速が求まれば波高及び波周期の値は一意に決まるが、風と波の結合確率分布をモデル化するには、各風速域における波高及び波周期のばらつきや、波高と波周期の相関も考慮する必要がある。

そこで本研究では、風と波の同時観測が行われている銚子沖洋上風力発電設備における1年間の風速、有義波高及び有義波周期の観測値を分析し、風速の関数として有義波高と有義波周期の平均、標準偏差、出現頻度及び有義波高と有義波周期の相関をモデル化することにより、風速、波高及び波周期の結合確率分布モデルを提案する。

2. 観測及び数値シミュレーションの概要

本研究では、2013年2月から2014年1月までの銚子沖洋上風力発電実証検証サイト(以降、本サイト)における観測値を分析し、風速、有義波高及び有義波周期の関係をモデル化する。本研究では、既往研究で提案されてきた風速と波高及び風速と波周期の関係式と同様に、10m高度の風速を用いてモデル化を行う。本サイトにおける洋上風況観測マストでは、10m高度の風速は観測されていないため、本研究では、80m高度及び40m高度における三杯風速計における時々刻々のべき指数を同定し、べき法則により10m高度の値に変換した風速を使用した。

本サイトは、離岸距離3.1kmの地点に位置しており、海風時と陸風時で波浪の特徴が異なる。一般に、吹走距離が短い陸風時には波浪は発達しにくい、台風や前線の通過等の気象現象においては、海風により発達した波浪が風向の急変により陸風に分類されることもあるため、陸風による波浪を明確に定義することは難しい。海風時のみを考えることで、吹走距離に関する議論が無くなるため風と波の関係が理解しやすくなり、また、疲労評価においては安全側となるため、本研究では海風時のみの観測値を使用して風速、有義波高及び有義波周期の関係をモデル化する。海風の定義は、風向78.25°以上、213.75°未満とし、風向の分類には、80m高度に設置された矢羽式風向計の観測値を用いた。

波浪観測値は超音波式波浪観測計の水位の観測値から得られる20分統計値の有義波高及び有義波周期を使用した。尚、風速、風向の観測値は10分平均値であるが、本研究では波浪の観測時刻に合わせた毎20分の値をそのまま使用した。

3. 結合確率分布モデルの提案

本研究では、風速、有義波高及び有義波周期の3つのパラメータ間の関係を、10m高度の風速 U_{10} の関数として有義波高 $H_{1/3}$ 及び有義波周期 $T_{1/3}$ の平均値、標準偏差、出現頻度及び有義波高と有義波周期の相関係

*平成26年11月28日第36回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**学生会員 東京大学工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

***学生会員 東京大学工学系研究科

数をモデル化することにより得られる，風と波の結合確率分布モデルを提案する．それぞれの統計値及び出現頻度は 1m/s 幅の風速ビンを用いて算出し，適合する関数を選択した．本研究で提案する風と波の確率分布モデルを Table 1 にまとめる．各モデルにはいくつかの定数があるが，本研究では 15m/s 以上の風速域において得られる観測値が少なく統計値が安定しないため，風速 15m/s 以下で得られた値のみを用いてこれらを同定した．以下，3.1 節から 3.3 節では各風速ビンにおける統計値の特徴と，それらのモデルについて説明する．

3.1 風速別の波高及び波周期の平均値と標準偏差

風速と有義波高及び有義波周期の平均値の関係は石原ら⁶⁾により提案された風波とうねりの混合モデルを用いる．Table 1 における $\mu_{H_{1/3,W}}$ 及び $\mu_{T_{1/3,W}}$ は風波による有義波高及び有義波周期の平均値である． F は吹走距離であり，本研究では石原らと同様に 235,000m とした．また， $\mu_{H_{1/3,S}}$ 及び $\mu_{T_{1/3,S}}$ はうねり性波浪による有義波高及び有義波周期の平均値であり，本研究では 0-1m/s の風速ビンにおける平均値それぞれを使用した．また，風速と有義波高及び有義波周期の標準偏差の関係は，1 次関数でモデル化し，最小二乗法により定数

a , b , c 及び d を同定した．

Fig. 1 に，風速と有義波高の平均値，標準偏差及び変動係数の関係を示す．風波モデルでは，低風速時の有義波高の平均値を過小評価しているが，混合モデルを用いることで，うねりによる平均値が再現され，観測値から求めた各風速ビンにおける有義波高の平均値と良く一致していることがわかる．また，標準偏差については，風速が大きくなるにつれてほぼ線形的に大きくなっているが，その傾きは平均値に比べて小さい．変動係数に着目すると，風波成分は風速と乱流強度の関係と類似しており，風速が大きくなるにつれて変動係数が減少するが，低風速域ではうねり成分によりその関係が崩れていることがわかる．

Fig. 2 に，風速と有義波周期の平均値，標準偏差及び変動係数の関係を示す．有義波周期の平均値は，5-10m/s の風速域で低風速時に比べ減少し，風速が大きくなれば再び増加する．これは，低風速時にうねりが存在するためであり，混合モデルではその変化を良くよく再現できている．標準偏差は負の傾きを持つが，その傾きは小さく，変動係数は有義波高と同様に，風波のみでは風速と乱流強度の関係と類似するが，低風速時にはうねりの影響により異なる傾向を示す．

Table 1 Proposed joint probability distribution model of wind and wave

	Significant wave height	Significant wave period
Mean values	$\mu_{H_{1/3}} = \sqrt{\mu_{H_{1/3,W}}^2 + \mu_{H_{1/3,S}}^2}$ $\mu_{H_{1/3,W}} = \frac{0.30U_{10}^2}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right],$ $\mu_{H_{1/3,S}} = 0.943\text{m}, \quad g = 9.81\text{m/s}^2, \quad F = 235,000\text{m}$	$\mu_{T_{1/3}} = \frac{\mu_{T_{1/3,W}} \mu_{H_{1/3,W}}^2 + \mu_{T_{1/3,S}} \mu_{H_{1/3,S}}^2}{\mu_{H_{1/3,W}}^2 + \mu_{H_{1/3,S}}^2}$ $\mu_{T_{1/3,W}} = \frac{2.74\pi U_{10}}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right]$ $\mu_{T_{1/3,S}} = 8.00\text{s}, \quad g = 9.81\text{m/s}^2, \quad F = 235,000\text{m}$
Standard deviation	$\sigma_{H_{1/3}} = aU_{10} + b, \quad a = 0.031\text{ls}, \quad b = 0.352\text{m}$	$\sigma_{T_{1/3}} = cU_{10} + d, \quad c = -0.00842\text{m}^{-1}, \quad d = 1.3\text{ls}$
Probability distribution Function	$f(H_{1/3}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{H_{1/3}}H_{1/3}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_{1/3} - \lambda_{H_{1/3}}}{\zeta_{H_{1/3}}} \right)^2 \right]$ $\lambda_{H_{1/3}} = \ln \mu_{H_{1/3}} - \frac{1}{2} \zeta_{H_{1/3}}^2, \quad \zeta_{H_{1/3}}^2 = \ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_{H_{1/3}}}{\mu_{H_{1/3}}} \right)^2 \right]$	$f(T_{1/3}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{T_{1/3}}T_{1/3}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln T_{1/3} - \lambda_{T_{1/3}}}{\zeta_{T_{1/3}}} \right)^2 \right]$ $\lambda_{T_{1/3}} = \ln \mu_{T_{1/3}} - \frac{1}{2} \zeta_{T_{1/3}}^2, \quad \zeta_{T_{1/3}}^2 = \ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_{T_{1/3}}}{\mu_{T_{1/3}}} \right)^2 \right]$
Correlation coefficient	$R_{H_{1/3}-T_{1/3}} = \min \left[\tanh(\alpha U_{10}) + \beta, 1 \right], \quad \alpha = 0.060\text{ls/m}, \quad \beta = 0.254$	

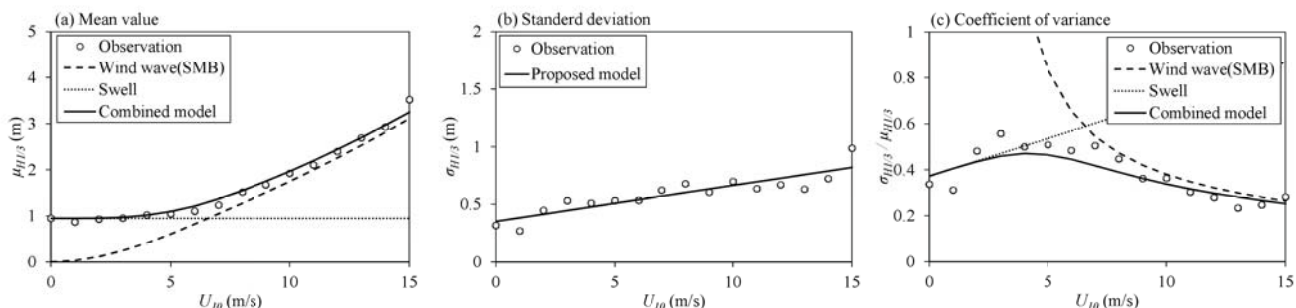


Fig. 1 Mean values, standard deviations and coefficient of variances of wave heights as functions of wind speeds.

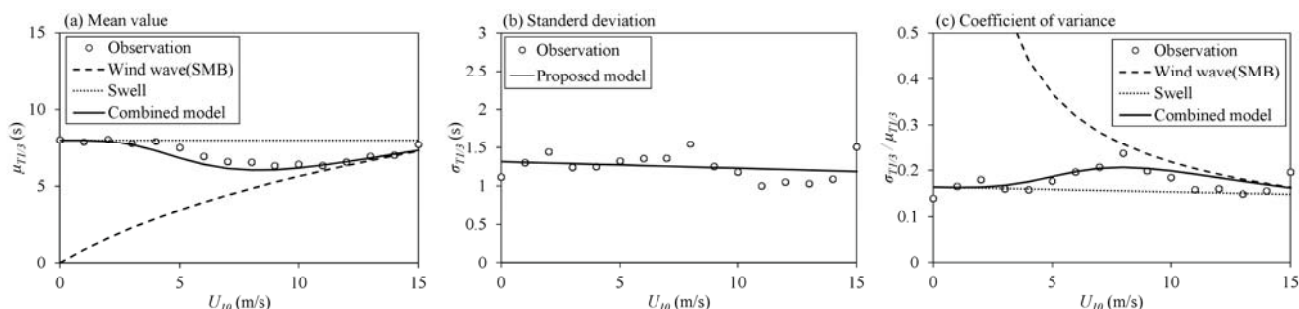


Fig. 2 Mean values, standard deviations and coefficient of variances of wave periods as functions of wind speeds.

3.2 風速別の波高及び波周期の確率分布モデル

本研究では、風速別の有義波高及び有義波周期の出現頻度を再現する確率分布モデルとして、対数正規分布を用いる。

Fig. 3 に、観測値の 2-3m/s、7-8m/s 及び 12-13m/s の

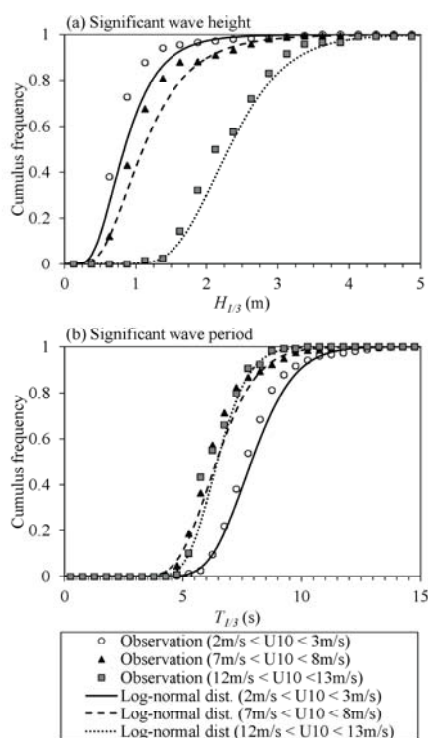


Fig. 3 Cumulus frequencies of wave heights and periods for 2-3, 7-8 and 12-13m/s wind speed bin.

各風速ビンにおける有義波高及び有義波周期の出現頻度と、観測値の平均及び標準偏差から求めた対数正規分布の比較を示す。出現頻度の算出においては、有義波高 0.25m 及び有義波周期 0.5s のビン幅を用いた。

一般に、有義波高の出現頻度はレーリー分布により再現されるが、Fig. 3-(a)にからわかるように、低風速時には高波高、高風速時には低波高の出現頻度は明らかに低くなり、風速域によって出現頻度が集中する波高域が異なるため、風速別の有義波高の出現頻度は 1 つのパラメータのみで分布が決まるレーリー分布で近似することはできない。対数正規分布を用いることにより、Fig. 3 に示す各風速ビンにおける有義波高及び有義波周期の出現頻度を概ね再現できている。

3.3 風速別の有義波高と有義波周期の相関

本研究では、風速別の有義波高と有義波周期の相関を、相関係数を用いて評価する。相関係数は Table 1

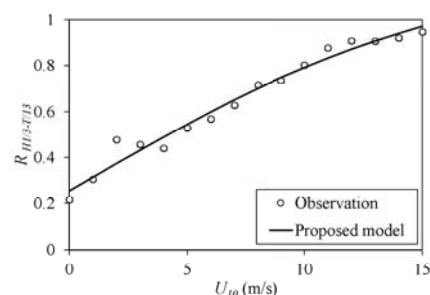


Fig. 4 Correlation coefficients between wave heights and periods as a function of wind speed.

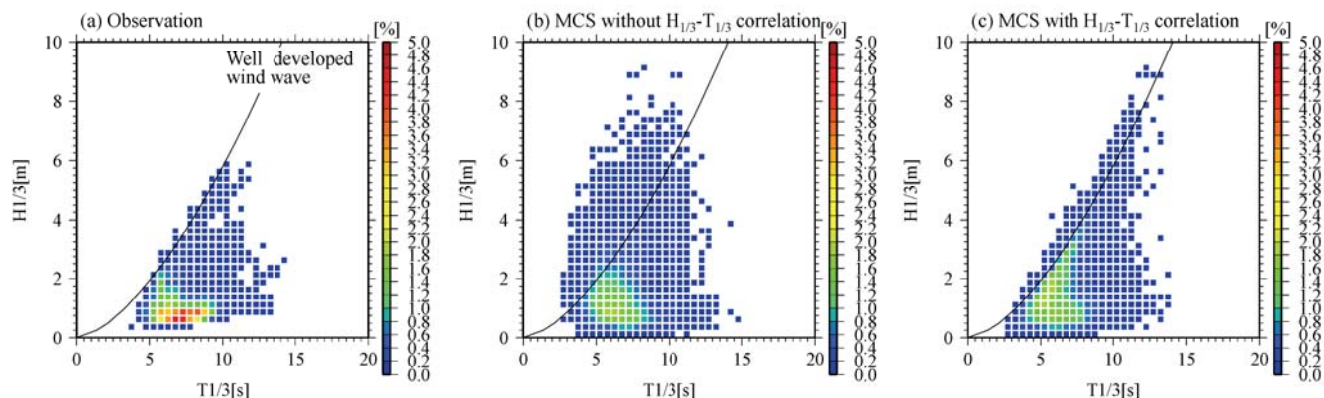


Fig. 5 Joint distributions of wave heights and periods obtained from observations and monte carlo simulations (MCS).

に示す双曲線正接関数によりモデル化した。

Fig. 4 に、観測値から求めた各風速ビンにおける有義波高と有義波周期の相関係数と、観測値からパラメータを同定したモデル式を示す。低風速域では、うねり性の波浪であるため有義波高と有義波周期の相関は低い、風速が大きくなるにつれて風波が支配的となるため、有義波高と有義波周期の相関が高くなり、相関係数は 1 に漸近する。

4. 結合確率分布の再現

3 章で提案した結合確率分布モデルを用いて 2 年分のモンテカルロシミュレーションを行い、観測値の風速、有義波高及び有義波周期の散布図を再現した。Fig. 5 に、一例として、観測値から得られた有義波高と有義波周期の出現頻度とモンテカルロシミュレーションにより再現した出現頻度の比較を示す。風速の出現頻度は、10m 高度に変換した観測値の海風時の平均風速 (7.9m/s) を用いて、レーリー分布で近似した。風速別の有義波高と有義波周期の相関を考慮していないシミュレーション (Fig. 5-(b)) では、Fig. 4 に示す相関係数が低い低風速時 (低波高時) には観測値の分布を概ね再現できているが、高波高時の有義波高と有義波周期の関係を再現できていないことがわかる。一方、相関を考慮したシミュレーション (Fig. 5-(c)) により、発達した風波に見られる波形勾配が概ね再現できる。また、観測値では、有義波高 4m、有義波周期 10s 付近で出現頻度が 0 となっているが、モンテカルロシミュレーションにより、欠損部分が予測できていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、風速、有義波高及び有義波周期の結合

確率分布を提案した。主要な結論を以下に示す。

1. 銚子沖洋上風力発電実証検証サイトにおける観測値を分析し、風速別の有義波高及び有義波周期の平均値を混合モデル、標準偏差を 1 次関数、出現頻度を対数正規分布、有義波高と有義波周期の相関係数を双曲線正接関数を用いてモデル化し、風と波の結合確率分布モデルを提案した。
2. 本研究の提案モデルを用いてモンテカルロシミュレーションを実施し、観測された風速、有義波高、有義波周期の出現頻度を概ね再現できることを示した。

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務「洋上風況観測システム技術の開発」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, 2009.
- 2) 杉本悟史・近澤昌寿, 気象庁沿岸波浪観測に基づく日本沿岸の波浪特性の調査, 測候時報, Vol.75, pp.S77-95, 2008.
- 3) 間瀬肇・森信人・中條壮太・安田誠宏・S. Dong・池本藍, 気象・海象の再解析値と予測値を利用した洋上風力発電施設の設計外力算定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_1226-I_1230, 2011.
- 4) Sverdrup H. and W. H. Munk, Wind, Sea, and Swell: Theory of relations for forecasting. U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, No.601, 1947.
- 5) Bretschneider C. L., The generation and decay of wind waves in deep water. Trans. A.G.U., Vol. 33, No.3, pp.381-389, 1952.
- 6) 石原孟・小川豪・林賜銘・嶋田健司, モノパイル式洋上ウィンドファームのフィージビリティスタディー その 1 気象・海象条件の評価, 第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.199-202, 2012.