

風と波の結合確率分布モデルに関する研究

A study on the joint probability distribution of wind and wave

種本 純^{*1}

Jun TANEMOTO

石原 孟^{*2}

Takeshi ISHIHARA

^{*1} Graduate Student, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo Tokyo, 113-8656, Japan, Fax: +81-3-5841-1147, E-mail: tanemoto@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

^{*2} Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

Abstract

A model for joint probability distribution of wind and wave is proposed and relations between wind speed, wave height and wave period at deep water near the Choshi offshore wind demonstration site are derived by using 10 years simulation data, which are obtained from mesoscale and third generation wave models. Mean values, standard deviations, probability distributions of wave height and wave period are expressed as functions of wind speeds and modeled by combined models of wind wave and swell, linear functions and log-normal distributions, respectively. The correlation coefficient between wave height and wave period is also modeled as a function of wind and expressed by a hyperbolic tangent function. Monte Carlo simulation is conducted, and wind speeds, wave heights and wave periods are generated based on proposed models. Predicted joint probability distributions show satisfactory agreement with observations.

キーワード：風と波の結合確率分布，波高と波周期の相関係数

Key Words：Joint probability distribution of wind and wave, Correlation coefficient between wave height and wave period

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算出することになっている。しかし、観測期間が短い場合には、強風及び高波高の観測がほとんど得られず、また、欠測などによりデータが欠落するという問題があるため、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によりモデル化し、結合確率分布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関係を表すモデルとして、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、波浪の風波成分しか予測できないが、石原ら⁶⁾はSMB法にうねり成分

を加えた混合モデルを提案し、風波とうねりが混在する地点における風速と有義波高及び風速と有義波周期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及び波高と波周期の相関関係を考慮する必要がある。

そこで、本研究では、10年分の波浪シミュレーションによる予測値を分析し、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。また、提案したモデルを用いたモンテカルロシミュレーションにより風速、有義波高、有義波周期の結合確率分布を再現するとともに、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と比較検証する。

2. シミュレーションと観測データの概要

2.1 気象・波浪シミュレーション

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実証検証サイト(以降、本サイト)における風と波を分析し、結合確率分布モデルを構築す

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科大学院生
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: tanemoto@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

^{*2} 東京大学大学院工学系研究科教授
(原稿受付：2015年11月4日)

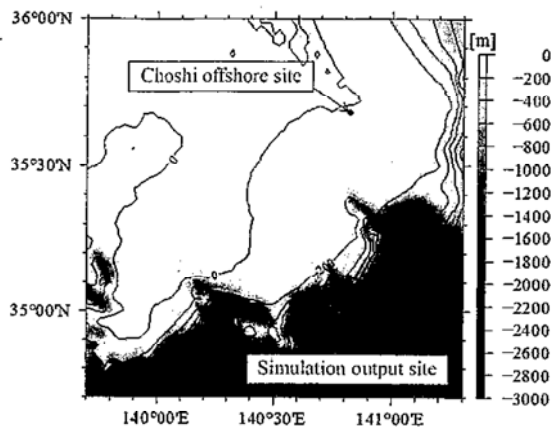


Fig. 1 Location of the simulation output and observation site.

る。ただし、本サイトは水深 11m であり、観測された波浪は海底地形による屈折、回折、浅水変形及び砕波の影響を受けている。従って本研究では、メソスケールモデル WRF による気象シミュレーション及び第三代波浪モデル WW3 による波浪シミュレーションの予測値を用いて、波浪が海底地形の影響を受けない沖波の有義波高及び有義波周期と風速の関係をモデル化する。モデル化には北緯 35.12°, 東経 140.82°, 波浪モデルの計算格子において水深 470m の地点における予測値を用いた。本研究でモデル化に用いた地点と本サイトの位置関係を Fig. 1 に示す。

本研究では既往研究で提案されてきた式と同様に、10m 高度の風速と有義波高及び有義波周期を用いてモデル化する。ただし、波浪シミュレーションでは周波数 f と方向 θ の関数で表されるエネルギースペクトル $E(f, \theta)$ のモーメントにより波高及び波周期を算出しているため、本研究では次式⁷⁾を用いて、ゼロクロス法で処理された有義波高 $H_{1/3}$ 及び有義波周期 $T_{1/3}$ と関係付けた。

$$H_{1/3} = 0.956 H_{m0} = 0.956 \times 4 \sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$T_{1/3} = T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2)$$

ここで、 m_n は n 次モーメントであり、式(3)で表される。

$$m_n = \iint f^n E(f, \theta) df d\theta \quad (3)$$

本研究において対象とした地点は、周辺に陸があり、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予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°未満とした。

シミュレーション期間は 2000 年 1 月 1 日から 2009 年 12 月 31 日までの 10 年間とし、毎 20 分の予測値を用いた。但し、風速 22m/s 以上の風速域においては 1m/s の風速ビン内におけるデータ数が 30 未満と少なく、統計値が不安定となるため、本研究では用いないこととした。

その他、シミュレーションの詳細は種本と石原⁸⁾を参照されたい。

2.2 観測データ

本研究では、銚子沖洋上風力発電実証検証サイトにおける 2013 年 2 月から 2014 年 1 月までの 1 年間の観測値を用いて、結合確率分布モデルを検証する。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 10 分平均風速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。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、ゼロアップクロス法で処理された 20 分統計値の有義波高及び有義波周期を使用した。風速、風向の観測値については波浪の観測時刻に合わせた毎 20 分の 10 分平均値を使用した。

その他、観測システム等の詳細については福本ら⁹⁾¹⁰⁾の文献を参照されたい。

3. 沖波における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 2.1 節で述べた通り、22m/s 以上の風速域において得られる予測値が少なく統計値が安定しないため、風速 22m/s 未満で得られた値のみ

Table 1 Proposed joint probability distribution model of wind and wave.

	Significant wave height	Significant wave period
Mean values	$\mu_{H_{1/3}} = \sqrt{\mu_{H_{1/3,W}}^2 + \mu_{H_{1/3,S}}^2}$ $\mu_{H_{1/3,W}} = \frac{0.30U_{10}^2}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right]$ $\mu_{H_{1/3,S}} = 1.24\text{m}$ where, $g = 9.81\text{m/s}^2$, $F = 235,000\text{m}$	$\mu_{T_{1/3}} = \frac{\mu_{T_{1/3,W}}^2 \mu_{H_{1/3,W}}^2 + \mu_{T_{1/3,S}}^2 \mu_{H_{1/3,S}}^2}{\mu_{H_{1/3,W}}^2 + \mu_{H_{1/3,S}}^2}$ $\mu_{T_{1/3,W}} = \frac{2.74\pi U_{10}}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right]$ $\mu_{T_{1/3,S}} = 7.75\text{s}$ where, $g = 9.81\text{m/s}^2$, $F = 235,000\text{m}$
Standard deviation	$\sigma_{H_{1/3}} = aU_{10} + b$ where, $a = 0.0323\text{s}$, $b = 0.318\text{m}$	$\sigma_{T_{1/3}} = cU_{10} + d$ where, $c = -0.0210\text{m}^{-1}$, $d = 1.56\text{s}$
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	$R_{H_{1/3}-T_{1/3}} = \tanh(\alpha U_{10} + \beta)$ where, $\alpha = 0.0484\text{s/m}$, $\beta = 0.643$	

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⁶⁾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予測値の平均値をそれぞれ使用した。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、定数 a , b , c 及び d を最小二乗法により同定した。

Fig. 2に、風速と有義波高の平均値及び標準偏差の関係を示す。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、シミュレーション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、風速が高くなるにつれて大きくなり、1次関数で概ね近似できることがわかる。

Fig. 3に、風速と有義波周期の平均値及び標準偏差の関係を示す。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、風速が高くなれば再び増加する。この理由は、有義波周期が波浪スペクトルのマイナス1次のモーメントで表現されるためである。

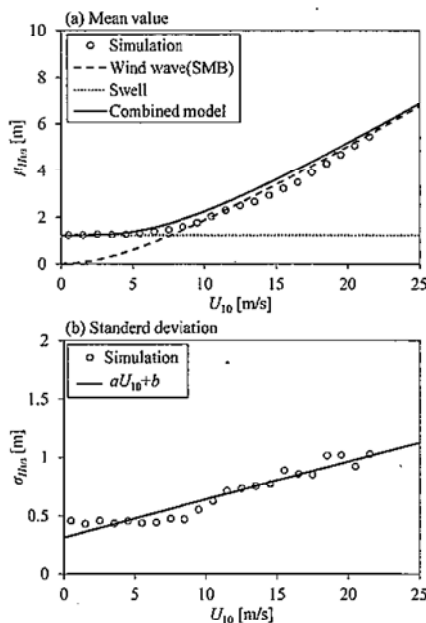


Fig. 2 Mean values and standard deviations of wave heights as functions of wind speeds.

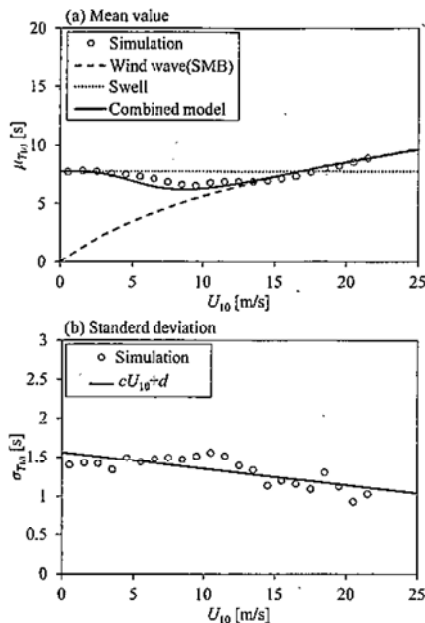


Fig. 3 Mean values and standard deviations of wave periods as functions of wind speeds.

風速の増大に伴い波浪スペクトルの高周波側に風波によるエネルギーがもたらされるため、式(2)の $m_{1,0}$ と m_0 の関係が変化し、ある風速域において、低周波側のうねり成分のみでスペクトルが形成されていた低風速時に比べて有義波周期は小さくなる。この現象についての詳細は種本と石原⁸⁾により解説されている。うねりを考慮した混合モデルでは上記の有義波周期の変化を良く再現できている。また、標準偏差は負の傾きを持つが、1次関数で概ね近似できている。

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. 4 に、シミュレーションによる予測値の 4-5m/s 及び 12-13m/s の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、年間の有義波高の出現頻度はレーリー分布によりよく再現されることが示されている（例えば、合田¹⁰⁾）。しかし、本研究では、1m/s の風速ビンにおける出現頻度の再現を目的としており、この場合、Fig. 4(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。また、有義波周期については、本研究における対象海域のよ

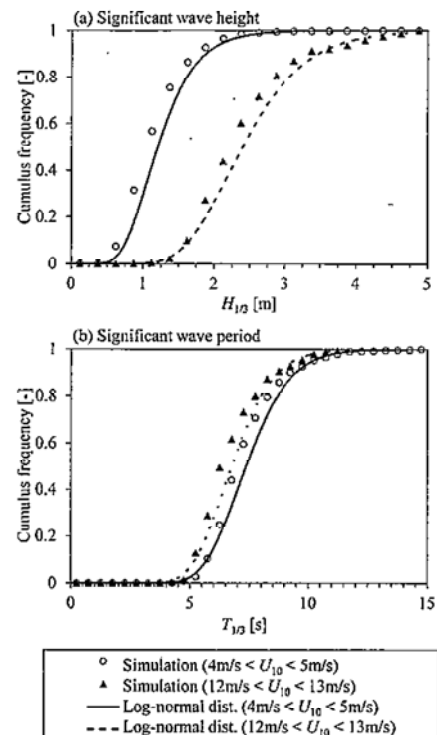


Fig. 4 Cumulus frequencies of wave heights and periods for 4-5 and 12-13m/s wind speed bin.

うにうねりがある海域では、5s 以下の有義波周期の出現頻度はほぼ 0 となり、ある周期帯に出現頻度が集中する。従って、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ための確率分布として、ともに対数正規分布を用いた。

対数正規分布を用いることにより、Fig. 4 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 に示す双曲線正接関数によりモデル化した。ここで、定数 α 及び β は最小二乗法により同定した。Fig. 5 に、シミュレーションによる予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

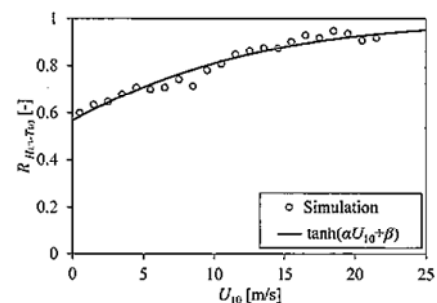


Fig. 5 Correlation coefficients between wave heights and periods as a function of wind speed.

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高風速時に比べ低い値を示す。風速が高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。具体的には、風速 25m/s において 0.95、風速 42m/s においては 0.99 という値をとる。双曲線正接関数により、各風速ビンにおける有義波高と有義波周期の相関係数を精度良く近似できている。

4. 結合確率分布の検証

3章では、風速、有義波高及び有義波周期の関係を、平均値、標準偏差、確率分布、相関係数によりモデル化した。本章では、これらのモデル式を用いたモンテカルロシミュレーションを実施し、風速、有義波高、有義波周期を乱数により発生させることで、観測値から得られる風と波の結合確率分布モデルを再現する。

4.1 モンテカルロシミュレーションの概要

Fig. 6 に、風と波の結合確率分布を予測するモンテカルロシミュレーションのフローを示す。

まず、年間の風速の出現頻度を満たすように、乱数により風速を生成する。本研究では IEC61400-3¹⁾ に従い、風速の出現頻度を次式に示すワイブル分布で近似する。本研究では 10m 高度の風速の出現頻度にワイブル分布を適用した。

$$f(U_{10}) = \frac{k}{c} \left(\frac{U_{10}}{c} \right)^{k-1} \exp \left\{ - \left(\frac{U_{10}}{c} \right)^k \right\} \quad (4)$$

ここで、 k は形状係数、 c は尺度係数である。本研究ではこれらのパラメータを、観測地点におけるシミュレーション結果から得られた 10 年間の 10m 高度の海風時の風速の平均 (6.08m/s) 及び標準偏差 (3.51m/s) からモーメント法により求め、形状係数 $k = 1.79$ 及び尺度係数 $c = 6.18$ を得た。Fig. 7 に、2013 年 2 月から 2014 年 1 月までの 1 年間のシミュレーション結果から求めたワイブル分布と、同時期の海風時の観測値から得られたワイブル分布の比較を示す。シミュレーションから求めたワイブル分布は、観測値から求めたワイブル分布と一致することがわかる。

次に、Table 1 に示す有義波高と有義波周期の平均値、標準偏差及び有義波高と有義波周期の相関係数を風速の関数として求める。

そして、計算した平均値と標準偏差を持つ対数正規分布に従い、且つ有義波高と有義波周期の相関を満た

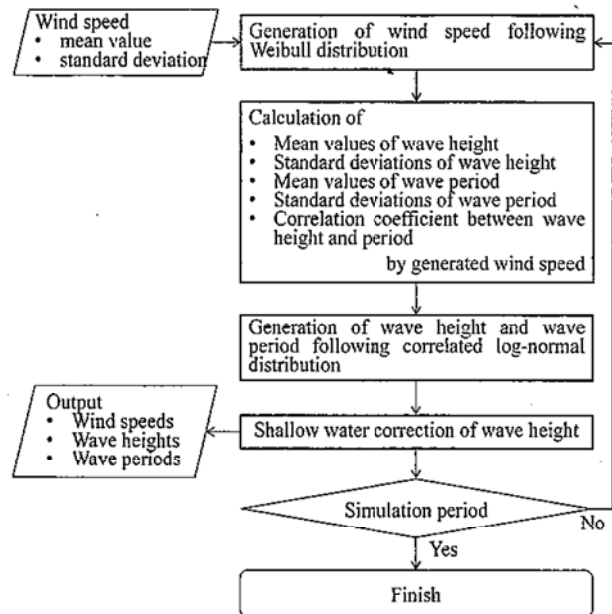


Fig. 6 Flowchart of the Monte Carlo simulation for the generation of wind and wave.

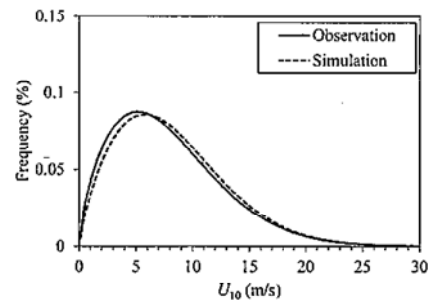


Fig. 7 Wind speed distributions obtained from observation and Weibull distribution.

すように乱数を発生させ、有義波高と有義波周期を生成する。この過程では、Touran and Wiser¹¹⁾ の方法に従い、2つの正規分布により相関を考慮する。本研究では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は対数正規分布に従うと仮定しているため、 $\ln H_{1/3}$ 及び $\ln T_{1/3}$ は正規分布に従い、これらの平均値は Table 1 に示す $\lambda_{H_{1/3}}$ 及び $\lambda_{T_{1/3}}$ 、標準偏差は $\zeta_{H_{1/3}}$ 及び $\zeta_{T_{1/3}}$ により表すことができる。また、正規分布に従う $\ln H_{1/3}$ と $\ln T_{1/3}$ の相関係数 $R_{\ln H_{1/3} - \ln T_{1/3}}$ は、対数正規分布に従う $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の相関係数 $R_{H_{1/3} - T_{1/3}}$ を次式のように変換することにより得られる¹²⁾。

$$R_{\ln H_{1/3} - \ln T_{1/3}} = \frac{1}{\zeta_{H_{1/3}} \zeta_{T_{1/3}}} \ln \left(1 + R_{H_{1/3} - T_{1/3}} \frac{\sigma_{H_{1/3}} \sigma_{T_{1/3}}}{\mu_{H_{1/3}} \mu_{T_{1/3}}} \right) \quad (5)$$

最後に、標準正規分布に従い互いに相関の無い2つの乱数 $x_{H_{1/3}}$ 及び $x_{T_{1/3}}$ を発生させ、次式により平均値 $\lambda_{H_{1/3}}$ 及び $\lambda_{T_{1/3}}$ 、標準偏差 $\zeta_{H_{1/3}}$ 及び $\zeta_{T_{1/3}}$ 、互いの相関係数 $R_{\ln H_{1/3} - \ln T_{1/3}}$ を満たす正規分布に従う2つの値を得る。これらの値は $\ln H_{1/3}$ 及び $\ln T_{1/3}$ となる。

$$\begin{Bmatrix} \ln H_{1/3} \\ \ln T_{1/3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_{H_{1/3}} & 0 \\ \zeta_{T_{1/3}} R_{\ln H_{1/3} - \ln T_{1/3}} & \zeta_{T_{1/3}} \sqrt{1 - R_{\ln H_{1/3} - \ln T_{1/3}}^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{H_{1/3}} \\ x_{T_{1/3}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \lambda_{H_{1/3}} \\ \lambda_{T_{1/3}} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで、右辺第一項の行列は、有義波高と有義波周期の相関を表す分散共分散行列の下三角成分である。式(6)の右辺の指数をとることで、有義波高と有義波周期の値が得られる。

以上により、1組の風速、有義波高及び有義波周期の値が得られる。ただし、本研究で提案した結合確率分布は沖波の条件下でモデル化しているため、浅水域における波高変形を考慮する必要がある。本研究では乱数で発生した個々の沖波有義波高 $H_{1/3}$ について、土木学会の設計指針¹²⁾の手法に従い、式(7)により浅水変形及び碎波に伴う波高の修正を行った。

$$H_{1/3, \text{shallow}} = \begin{cases} K_s H_{1/3}, & (h/L_0 \geq 0.2) \\ \min[(\beta_0 H_{1/3} + \beta_1 h), \beta_{\max} H_{1/3}, K_s H_{1/3}], & (h/L_0 < 0.2) \end{cases} \quad (7)$$

ただし、

$$\beta_0 = 0.28 (H_{1/3}/L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \theta)$$

$$\beta_{\max} = \max[0.92, 0.32 (H_{1/3}/L_0)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \theta)]$$

ここで、 $H_{1/3, \text{shallow}}$ は水深 h における有義波高、 L_0 は沖波の波長である。 θ は海底勾配であり、本研究では 0.002° とした。また、 K_s は次式により表される浅水係数である。

$$K_s = \left[\tanh \frac{2\pi}{L} h + \frac{2\pi}{L} h \left(1 - \tanh^2 \frac{2\pi}{L} h \right) \right]^{-1/2} + 0.0015 \left(\frac{h}{L_0} \right)^{-2.87} \left(\frac{H_{1/3}}{L_0} \right)^{1.27} \quad (8)$$

$$L = 2\pi h / \sqrt{P(P+1/Q)}$$

$$P = (2\pi)^2 h / (g T_{1/3}^2)$$

$$Q = 1 + P \left[0.6522 + P \{ 0.4622 + P^2 (0.0864 + 0.0675 P) \} \right]$$

ただし、 L は水深 h における波長である。なお、式(7)は本来ならば換算沖波波高に適用されるが、本研究では屈折係数及び回折係数は1と仮定し、沖波波高と換算沖波波高を同じ値として扱った。

以上の過程を必要回数分繰り返すことで、風速、有義波高、有義波周期の関係が再現できる。本研究では1時間毎に得られる100年分のデータ数に相当する、876,000組の風速、有義波高、有義波周期を発生させ、結合確率分布をモンテカルロシミュレーションにより再現した。

4.2 結合確率分布モデルの検証

Fig. 8 に、結合確率分布をモンテカルロシミュレーションにより再現した値 (MCS) と本サイトにおける観測値の、1m/s の風速ビンにおける有義波高の平均値と標準偏差を示す。観測値については1m/s の風速ビン内に30以上のデータ数が得られた風速域のみ統計値を算出した。Fig. 8 から、浅海域における観測値では、高風速になるにつれて有義波高の標準偏差が小さくなることがわかる。これは、ある波高より高い波が碎波し、確率分布の高波高側で波高が一定となることにより、有義波高のばらつきが小さくなると考えられる。3章では沖波の標準偏差を1次関数でモデル化しているが、このモデルでは風速の増加に対して標準偏差は単調増加するため、観測値の傾向を再現できていない。一方、モンテカルロシミュレーションにより再現した

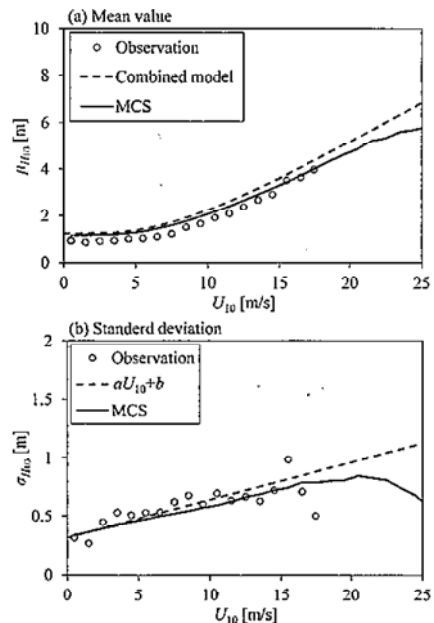


Fig. 8 Mean values and standard deviations of wave height as a function of wind speeds obtained from observations and Monte Carlo simulation (MCS).

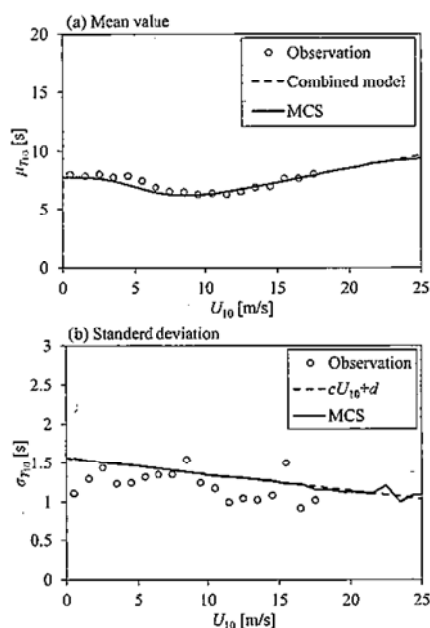


Fig. 9 Mean values and standard deviations of wave period as a function of wind speeds obtained from observations and Monte Carlo simulation (MCS).

値は浅水変形及び砕波を考慮しており、風速の増加に伴う有義波高の標準偏差の減少傾向を再現できている。

Fig. 9 に、結合確率分布をモンテカルロシミュレーションで再現した値と本サイトにおける観測値の風速別の有義波周期の平均値と標準偏差の比較を示す。本研究では、有義波周期については沖波と浅海域で変化しないと仮定しているため、Table 1 に示すモデル式とモンテカルロシミュレーションで再現した値は同じになる。本研究でモデル化した風速別の有義波周期の平均値と標準偏差は、観測値を概ね再現できている。

Fig. 10 には結合確率分布をモンテカルロシミュレーションにより再現した値と本サイトにおける観測値の風速別の有義波高と有義波周期の相関係数の比較を示す。観測値と Table 1 に示すモデル式との比較から、低風速時に波浪モデルにより求めた相関係数が高く評価されている。この原因については、今後波の分散などを調べ、相関係数が高く評価される理由を明らかにする予定である。ここで、観測値に合うように α 及び β

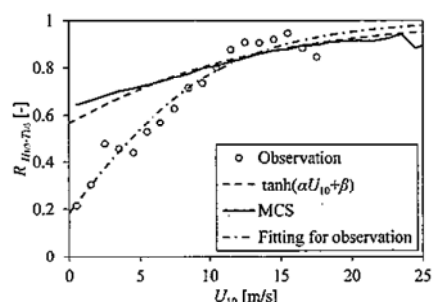


Fig. 10 Correlation coefficients between wave heights and periods as a function of wind speeds obtained from observations and Monte Carlo simulation (MCS).

の値を求めると、 $\alpha = 0.0835/\text{m}$ 及び $\beta = 0.186$ の値を得る。図の一点鎖線は修正した係数によるものを示す。

有義波高と有義波周期の相関係数についても同様に、浅海域における観測値では風速の増加とともに減少するが、浅水変形と砕波を考慮したモンテカルロシミュレーションで再現した値は、観測値に見られる相関係数の減少傾向を再現できている。

4.3 散布図の比較

Fig. 11 に、モンテカルロシミュレーション及び観測値から求めた風速と有義波高、風速と有義波周期及び有義波高と有義波周期の結合確率分布の比較を示す。本研究では、出現頻度を、風速 1m/s、有義波高 0.25m、有義波周期 0.5s のビンで評価し、各ビン内における出現頻度を図に示した。Fig. 11-(a), (c)及び(b), (d)において、観測値から得られた出現頻度は風速 10~15m/s 且つ有義波高 4m 及び有義波周期 9s 付近で出現頻度が 0 となり、不自然な欠損が生じている。また、観測値では 20m/s 以上の強風時において、十分なデータが得られず、有義波高及び有義波周期の値が分布していないことがわかる。一方、本研究で提案した結合確率分布モデルを用いてモンテカルロシミュレーションで再現した結果はこれらの欠損を補うことができおり、観測値よりも幅広い分布が得られている。また、観測値において出現頻度が高くなる箇所を概ね再現できている。

Fig. 11-(c)及び(f)の図中の線は、発達した風波に見られる有義波高と有義波周期の平均的な関係⁷⁾を表している。観測値における出現頻度の分布から、この線より高い波高は殆ど存在しないことがわかる。本研究で構築したモデルは、風速階級別の有義波高と有義波周期の相関係数を考慮することにより発達した風波に見られる関係を概ね再現できている。なお、本研究で構築したモデルではこの線より若干大きい有義波高が見られ、その出現頻度の合計は 3.7%程度である。本研究では、浅海域における有義波高の計算において屈折係数及び回折係数を 1 としたため、観測値の有義波高より若干大きな値となったが、これらの係数を数値計算により求めることで、さらに観測値に近い分布が得られる可能性がある。

5. 結論

本研究では風と波の結合確率分布モデルを提案し、以下の結論を得た。

- 1) 10 年分の気象・波浪シミュレーションによる予測値を分析し、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

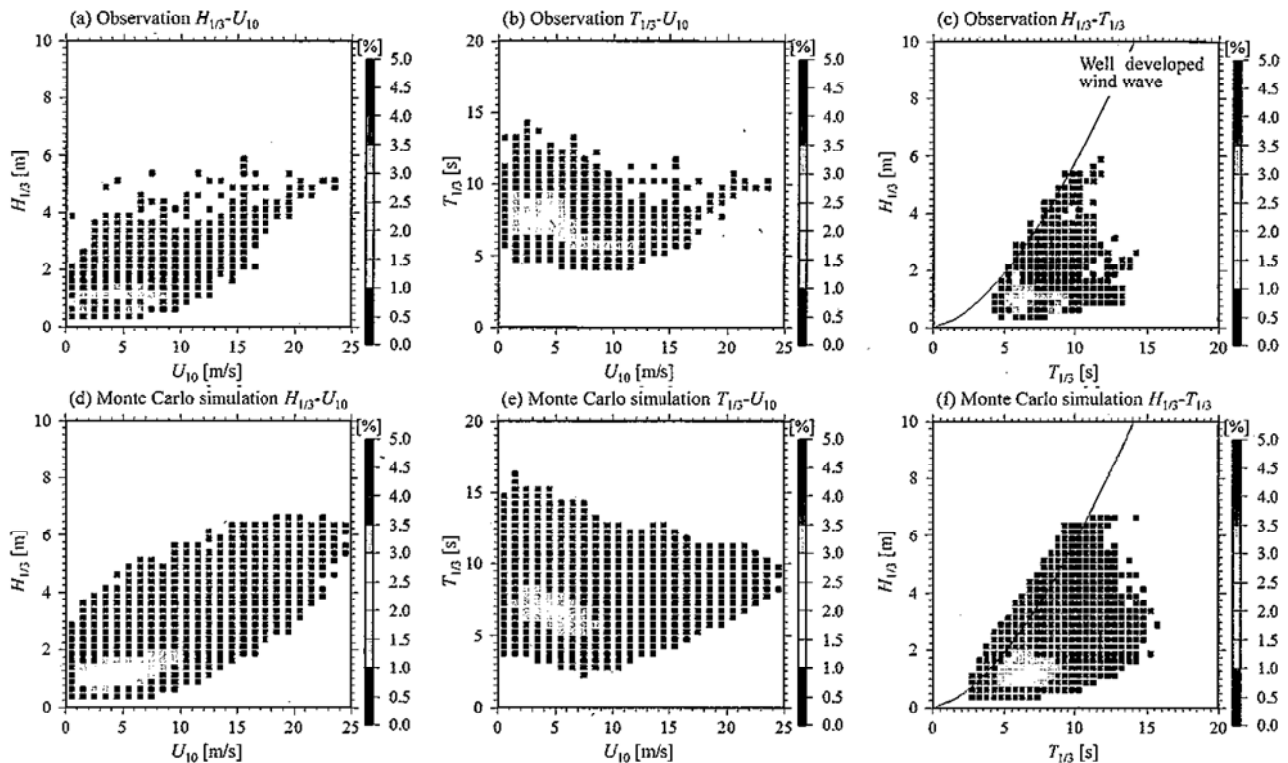


Fig. 11 Joint distributions of wind speeds, wave heights and wave periods obtained from observations and Monte Carlo simulation.

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することにより、風と波の結合確率分布モデルを提案した。

- 2) 本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。

今後は、日本海側や他海域における本提案モデルの検証を行い、パラメータの海域依存性を明らかにする。また、観測値及び本提案モデルを気象海象条件として用いた風車の荷重解析を実施し、疲労等価荷重等の計算値に及ぼす影響を明らかにする予定である。

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, 2008, pp.S77-95.
- 3) 間瀬肇・平尾博樹・国富将嗣・高山知司, SWANによる波浪推算システム-閉鎖性湾内における波浪推算への適用-, 京都大学防災研究所年報, No.44 B-2, 2001,

pp.333-351.

- 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, 1952, pp.381-389.
- 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, 2012, pp.199-202.
- 7) 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.
- 8) 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, 日本風力エネルギー学会論文集, No.112, 2015, (印刷中).
- 9) 福本幸成・大窪一正・山中徹・石原孟, 銚子沖における洋上風況観測結果, 第36回風力エネルギー利用シンポジウム, 2014, pp.225-228.
- 10) 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.
- 11) Touran, A. and E. Wiser, Monte Carlo technique with correlated random variables, J. Constr. Eng. Manage., Vol.118-2, 1992, pp.258-272.
- 12) 土木学会, 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 (2010年度版), 2011.