

うねりと風波の特性を考慮した波高と波周期の 結合確率分布に関する研究*

A study of joint probability distribution of wave height and period
considering characteristics of swell and wind wave

石原 孟** 君塚 貴之** 大森 政則*** 荒川 洋***
Takeshi ISHIHARA Takayuki KIMIZUKA Masanori OHMORI Hiroshi ARAKAWA

1. はじめに

洋上風力発電設備の設計に関する国際基準 IEC 61400-3-1 では、疲労荷重の照査のための気象海象条件を、風速・波高・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。しかし、IEC61400-3-1 には風速・波高・波周期の結合確率分布関数に関する記述がなく、気象・海象の観測値またはシミュレーションの予測値から得られる散布図を用いることになっている。しかし、観測やシミュレーション期間が短い場合には、強風や高波浪の観測データが得られない可能性があるため、風速、波高及び波周期の結合確率分布を平均値、標準偏差、相関係数などのパラメータを用いてモデル化し、結合確率分布により風と波との長期データの作成する必要がある¹⁾。

Yamaguchi と Ishihara¹⁾は 10 年間分の気象海象予測の再解析データから、風速階級別の波高と波周期の平均値、標準偏差、確率密度分布および波高と波周期の相関係数を求め、風と波の結合確率分布を表すモデルを提案した。このモデルではうねりと風波の効果が考慮されている。風と波の結合確率分布のモデルが求まると、モンテカルロシミュレーション (MCS) により、長期間の風速・波高・波周期の組合せを得ることができる。Yamaguchi と Ishihara¹⁾は気象・海象予測結果に基づき作成した結合確率分布を用いて MCS により 30 年間分の風速・波高・波周期のデータを発生し、2015 年 1 年間の観測値と比較した。その結果、MCS により求めた風速と波高、風速と波周期および波高と波周期の散布図には、1 年の観測で得られない高い波高と長い波周期の組み合わせが出現し、1 年観測におけるデータ不足を補うことができることを示した。

しかし、Yamaguchi と Ishihara¹⁾では、風と波の結合確率分布に基づき発生した波高と波周期の散布図に IEC61400-3-1 により定められた波周期の上限値を超える値が多く見られたため、波周期の上限値は、風波

が支配的である高波浪域について IEC61400-3-1 により定める上限値の式を適用し、うねりが支配的である低波浪域について合田の式²⁾を適用することを提案したが、中間域における波周期の上限値の式を定めていない。また、石原ら³⁾は、福島沖の波浪観測結果から、IEC61400-3-1 により定める下限値を下回る値がほとんどないことから、MCS では IEC61400-3-1 が定める下限値を用いることを提案した。

そこで、本研究では、うねりと風波の特性を考慮し、波周期の上限値を与えるうねりの上限値を定める式と風波の上限値を定める式をスムーズにつなげる重み関数を提案し、うねりと風波の特性を考慮した波周期の上限値を定める式を提案する。そして、波高別波周期の確率分布の補正法を提案することにより、波周期の上限値と下限値を超えない波高と波周期の結合確率分布の作成を可能にする方法を提案する。

2. 数値解析モデルと MCS 手法の概要

2.1 数値解析モデルの概要と波周期の上限値の予測

本研究では、気象シミュレーションは WRF version 3.4.1 を用いる。Fig. 1(a)には計算領域を示す。水平解像度は 18 km, 6 km の 2 段階のネスティングを行い、水平方向は 100×100, 151×151 の格子を用い、鉛直方向は 45 層とした。

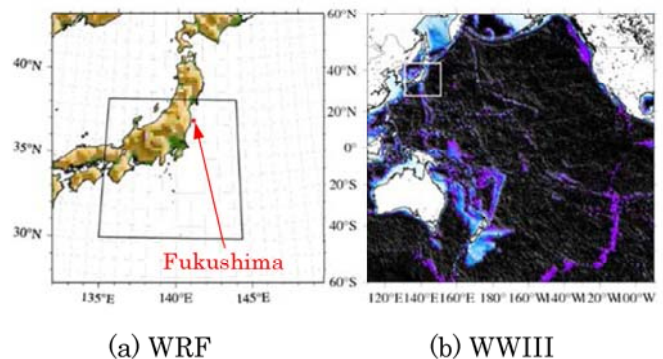


Fig. 1 Analysis model domains for Fukushima

波浪シミュレーションは WWIII ver. 6.07.1 を用いる。Fig. 1(b)には計算領域を示す。水平解像度は 0.5°・0.2°・0.05° の 3 段階のネスティングを行い、太平洋

* 令和 5 年 12 月 1 日 第 45 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
*** 会員 株式会社水城ネットワーク

を伝播するうねりの影響を精度良く再現するために、境界端を(90° W, 60° S)に設定した。

IEC 61400-3-1 では波周期の下限値と上限値は有義波高 H_s に対して次式により与えられている。

$$11.1\sqrt{H_s/g}\leq T_s$$

(1)

$$T_s\leq 14.3\sqrt{H_s/g}$$

(2)

しかし、この式により定められている上限値は、うねりの影響が大きい太平洋沿岸において低波高域において適用できないことが指摘されている¹⁾。

そこで、本研究では、まず低波高域においてうねりの影響を考慮した波周期の上限値 $T_{s,lim}$ はパラメータ χ を用いて IEC61400-3-1 における波周期と波高の関係式と同じ形で定式化し、次式により表す。

$$T_{s,lim}=\chi\sqrt{H_s/g}$$

(3)

χ は、波高と波周期の予測値 $H_{s,cal}$ と $T_{s,cal}$ から、超過確率が 1.0%以下となるように決定した。

次に、風波とうねりが混合する際の波周期の上限 $T_{mix,lim}$ を決める式を提案する。

$$T_{mix,lim}=\{14.3\alpha+\chi(1-\alpha)\}\sqrt{H_s/g}$$

(4)

ここで、 α は風波とうねりの波周期の重み関数であり、有義波高 H_s の値により変化する。 H_s が小さいときに α は 0 となり、うねりの上限値を表す式(3)の右辺に漸近し、 H_s が大きいときに α は 1 となり、風波の上限値を表す式(2)の右辺に漸近する。 H_s の増加に伴い滑らかに増加し、風波が支配的な領域に 1 になるように変曲点

のある 3 次関数により α をモデル化した。

$$\alpha=\begin{cases} 0 & (H_s\leq H_{SS}) \\ \left(aH_s^3+bH_s^2+cH_s+d\right)^{\gamma} & (H_{SS}<H_s\leq H_{SH}) \\ 1 & (H_{SH}<H_s) \end{cases}$$

(5)

ここで、 H_{SS} 、 H_{SH} は、それぞれうねりと風波の混合域の下限値と上限値を表す。 γ はうねりと風波の寄与の度合を表すパラメータであり $\gamma=0$ の時には風波の寄与のみとなる。本研究では $\gamma=0.6$ とした。

本研究における H_{SS} は、うねりの代表値として風速 0 ~1m/s の平均波高と定義し、 H_{SH} は、検討地点における 1 年再現期待値の 1.4 倍程度に相当する値であると定義した。 H_{SS} 、 H_{SH} が決まると、係数 a 、 b 、 c 、 d は、次式により一意に定まる。

$$\alpha(H_{SS})=0, \quad \alpha(H_{SH})=1, \quad \frac{d\alpha}{dH_s}|_{H_{SS}}=0, \quad \frac{d\alpha}{dH_s}|_{H_{SH}}=0$$

(6)

本研究では波周期の上限値の超過確率は、うねりの代表値とした H_{SS} の 2 倍の値 $H_{SL}=2H_{SS}$ までの波高帯 0.0 から H_{SL} の間で 1.0%以下、 H_{SL} から H_{SH} の間で最大波周期を包絡するように決定し、波周期の下限値は、石原ら³⁾に従い、式(1)をそのまま用いる。

2.2 風速・波高・波周期の結合確率分布のモデル

Table 1 には既往研究⁴⁾により提案された風と波の結合確率分布モデルを示す。このモデルでは SMB 法^{4),5)}により規定される風波とうねりを合成し、有義波高と有義波周期の平均、標準偏差、確率分布および相関係数を風速の関数としてモデル化する。

Table 1 Joint probability distribution function of wind and wave (Yamaguchi and Ishihara (2018))

	Significant wave height	Significant wave period
Mean	$\mu_{H_s}=\sqrt{\mu_{H_{s,W}}^2+\mu_{H_{s,S}}^2}$ $\mu_{H_{s,W}}=\frac{0.30U_{10}^2}{g}\left[1-\left\{1+0.004\left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right\}^{-2}\right]$ $\mu_{H_{s,S}}=\left(\mu_{H_s}\right)_{0-1}, \quad g=9.81m/s^2$	$\mu_{T_s}=\frac{\mu_{T_{s,W}}\mu_{H_{s,W}}^2+\mu_{T_{s,S}}\mu_{H_{s,S}}^2}{\mu_{H_{s,W}}^2+\mu_{H_{s,S}}^2}$ $\mu_{T_{s,W}}=C_{T_{s,W}}\frac{2.74\pi U_{10}}{g}\cdot\left[1-\left\{1+0.008\left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{\frac{1}{3}}\right\}^{-5}\right]$ $\mu_{T_{s,S}}=\left(\mu_{T_s}\right)_{0-1}$
Standard deviation	$\sigma_{H_s}=\sqrt{\sigma_{H_{s,W}}^2+\sigma_{H_{s,S}}^2}$ $\sigma_{H_{s,W}}=R_{H_{s,W}}\mu_{H_{s,W}}, \quad \sigma_{H_{s,S}}=\left(\sigma_{H_s}\right)_{0-1}$	$\sigma_{T_s}=\sqrt{\sigma_{T_{s,W}}^2+\sigma_{T_{s,S}}^2}$ $\sigma_{T_{s,W}}=R_{T_{s,W}}\mu_{T_{s,W}}, \quad \sigma_{T_{s,S}}=\left(\sigma_{T_s}\right)_{0-1}$
Probability density	$f(H_s)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{H_s}H_s}\cdot\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln H_s-\lambda_{H_s}}{\zeta_{H_s}}\right)^2\right\}$ $\lambda_{H_s}=\ln\mu_{H_s}-\frac{1}{2}\zeta_{H_s}^2, \quad \zeta_{H_s}^2=\ln\left\{1+\left(\frac{\sigma_{H_s}}{\mu_{H_s}}\right)^2\right\}$	$f(T_s)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{T_s}T_s}\cdot\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln T_s-\lambda_{T_s}}{\zeta_{T_s}}\right)^2\right\}$ $\lambda_{T_s}=\ln\mu_{T_s}-\frac{1}{2}\zeta_{T_s}^2, \quad \zeta_{T_s}^2=\ln\left\{1+\left(\frac{\sigma_{T_s}}{\mu_{T_s}}\right)^2\right\}$
Correlation coefficient	$R_{H_s-T_s}=\tanh\left(\alpha U_{10}+\beta\right)$	

長期間の風速・波高・波周期のデータセットを得るため、風と波の結合確率分布のモデルに基づき、MCSにより生成する。ここで、まずワイブル分布に従う風速の年間出現頻度を満たすように、乱数により風速のデータセットを生成する。次に Table 1 に示す式に基づき風速毎の有義波高と有義波周期の平均値、標準偏差および相関係数を求める。そして、算出された平均値と標準偏差をもつ対数正規分布に従い、かつ有義波高と有義波周期の相関を満たすように、Touran and Wisser⁶⁾の方法より、有義波高と有義波周期を生成する。

3. 数値解析結果と考察

3.1 数値解析の結果と波周期の上限値の予測

Fig.2 には 2015 から 2017 年の 3 年間ににおける福島沖の WRF および WWIII による数値シミュレーションの結果と観測値の比較を示す。3 年間の風速階級別の風速、波高、波周期の発生頻度および風、波の方向の数値シミュレーションの結果は観測値とよく一致することが分かる。なお、本研究では予測されたスペクトル有義波高に 0.961 を乗じ、予測されたスペクトル有義波周期から 0.363 を引いた値を用いている。

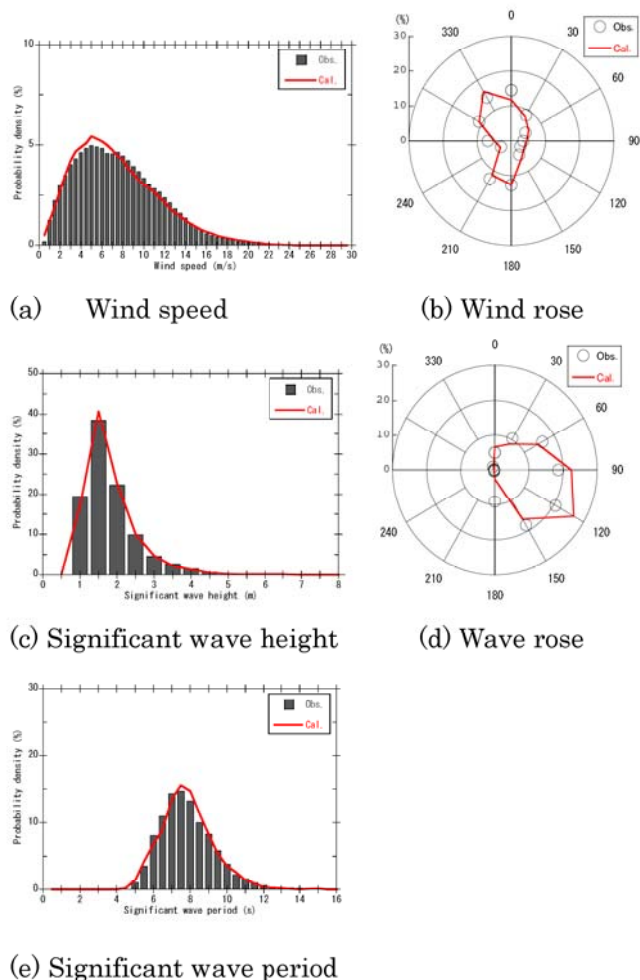


Fig. 2 Comparison of frequency distributions

2015～2017 年の 3 年間ににおける福島県沖での予測値を用いて、式(3)の χ を同定し、 $\chi=33.0$ が得られた。次に、うねりと風波を考慮した波周期の上限値 $T_{mix,lim}$ を表す式(4)の α を決めるために、式(5)の H_{SS} と H_{SH} を同定し、 $H_{SS}=1.29\text{m}$ と $H_{SH}=8.93\text{m}$ が得られた。

Fig.3 には、本研究で提案したうねりと風波の上限値を表す式(4)と波周期の観測値との比較を示す。 $H_{SL}=2H_{SS}$ である波高 2.58m まではうねりの周期の上限値を示し、波高 8.93m 以上は IEC 61400-3-1 に示す風波の周期の上限値を示すととともに、その間の領域では観測値の上限値を表していることが分かる。

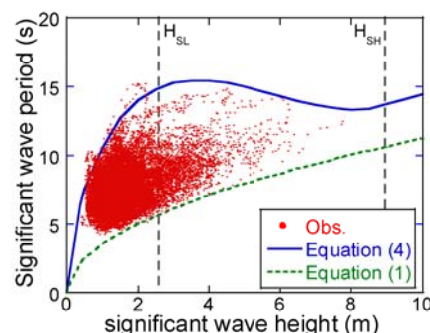


Fig.3 Proposed lower and upper limits of significant wave periods and observation

波高と波周期は各風速階級において波高と波周期の確率分布に基づき作成するため、波周期の上限値と下限値を超える組み合わせの発生が生じる。本研究では、有義波高階級のビン幅を 0.2m とし、ビン毎に有義波周期の累積頻度分布を求め、補正した。Fig.4 には波高 0.4～0.6m における波周期の累積頻度分布の例を示す。

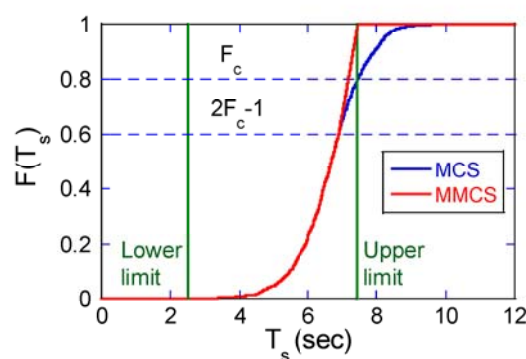


Fig.4 Cumulative distribution of significant wave period with significant wave height of 0.4 – 0.6m

青い線は MCS により得られた波周期の累積頻度分布を示し、赤い線は、波周期の上限値を超過しないように補正した波周期の累積頻度分布 (MMCS と呼ぶ) を示す。この補正は直線関数を用いて、超過点 F_c を中心に F_c から 1 までおよび F_c から $2F_c-1$ までの範囲

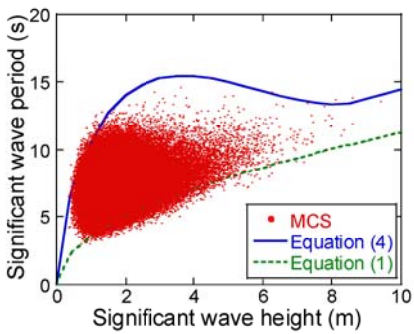
において行った。波周期の下限値を超過した場合には同様な方法で補正した。

3.2 波周期の上下限を考慮した風と波浪データ生成

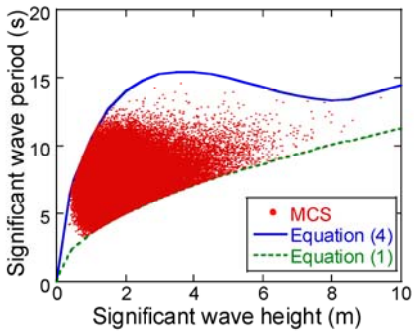
Table 1 に示す風・波の結合確率分布関数のパラメータは 2015～2017 の 3 年間の予測値を用いて求めた。予測値により同定したパラメータを Table 2 に示す。Fig.5(a)には、制限を設けずに同定した風・波の結合確率分布モデルを用いて、MCS により発生した 30 年間の波高・波周期の散布図を示す。Fig.3 に示した観測値と比較して、高い波高域のデータが増えたが、波周期の上限値と下限値を超える値が多く含まれている。一方、Fig.5(b)には本研究により提案した方法により、波周期の上限と下限を満足するように確率分布を補正した MCS の結果を示す。Fig.5(b)から、設定した波周期の上限と下限の制約が反映されていることが分かる。

Table 2 List of identified parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
F	143,000m	$\sigma_{H_s,S}$	0.40m
$\mu_{H_s,S}$	1.29m	$R_{T_s,W}$	0.14
$C_{T_s,W}$	1.07	$\sigma_{T_s,S}$	0.98s
$\mu_{T_s,S}$	8.26s	α	0.051
$R_{H_s,W}$	0.27	β	0.346



(a) Before correction



(b) After correction

Fig.5 Joint probability distribution of wave height and period by MCS

紙面の関係で、図を省略したが、生成された有義波高・有義波周期の風速階級別の平均値、標準偏差および相関係数は使った確率モデルの値とよく一致し、波周期の上限と下限値を考慮した補正を行うことにより、変改していないことを確認している。

4. まとめ

本研究では、うねりと風波の特性を考慮した波周期の上限値を定める式を提案した。また、波高別波周期の確率分布の補正法を提案することにより、波周期の上限値と下限値を超えない波高と波周期の結合確率分布の作成を可能にし、以下の結論を得た。

- (1) 日本沿岸においてうねりの影響により、観測された波周期は IEC 61400-3-1 に設定されている波周期の上限値を上回ることが分かった。
- (2) うねりと風波の影響を考慮する波周期の上限値を表す関数を示すとともに、波周期の観測値によりパラメータを同定する方法を提案した。
- (3) 波周期の上限と下限を考慮した MCS の方法を提案し、それにより観測値に整合する長期における風・波高・波周期の散布図を作成した。

謝辞

本研究は NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）浮体式基礎製造・設置低コスト化技術開発事業（大型スパー浮体）の一部として行われた。ここに関係者各位に謝意を表する。

参考文献

1) A. Yamaguchi, T. Ishihara, Numerical prediction of Normal and Extreme Waves at Fukushima Offshore Site, Journal of Physics: Conference Series 1037 (4), 042022, 2018

2) Y. Goda, Random Seas and Design of Maritime Structures 3rd Edition, 2009

3) 石原孟, 大森政則, 荒川洋, 山口敦: 福島沖における波浪の数値予測に関する研究, 第 40 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.175-178, 2018

4) H. Sverdrup, W. H. Munk, Wind, Sea, and Swell: Theory of relations for forecasting, U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, No.601. 1947

5) C. L. Bretschneider, The generation and decay of wind waves in deep water, Trans, A.G.U., 33(3), 381-389, 1952

6) Touran, E. Wisser, Monte Carlo technique with correlated random variables, Journal of Construction Engineering and Management., 18(2), 258-272, 1992