

性能設計における相関を有する波浪・風作用の組み合わせ方法に関する研究

A study on the combination method of correlated wave and wind actions for performance-based design

長尾 毅*, 吉岡 健**

Takashi Nagao and Takeshi Yoshioka

*博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

**修(工) 電源開発 (株) 水力エンジニアリング部 (〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)

It is necessary to combine actions properly in the performance-based design. Turkstra's rule is often applied; however, it may not be appropriate to follow the rule when actions are correlated such as wave and wind actions for offshore wind turbine. This study discusses the combining method of the correlated two actions. The proposed method evaluates the characteristic values of actions for maximum joint probability under the given probability of exceedance of the combined actions.

Key Words: combination of actions, correlation, probability distribution

キーワード: 作用の組み合わせ, 相関, 確率分布

1. はじめに

構造物の性能照査においては各種の作用の組み合わせを考慮する必要がある。その際、各作用の生起する可能性や継続時間などの特性を十分に考慮する必要がある。作用の組み合わせに関する既往の研究は北沢ら¹⁾などの他に幾つかの事例^{2,3)}がある。

作用過程のモデル化としてはB-C過程⁴⁾などが知られており、これにTurkstra規則⁵⁾を適用した例が土木構造物に対する作用の指針⁶⁾において示されている。

Turkstra規則は主たる作用の最大値と従たる作用の任意時点の和として作用の組み合わせを考慮するもので、何か一つの作用が支配的な場合には適用性が高いことが報告されている⁴⁾。各種基準類において採用されている作用の組み合わせについても、概ねこのような考え方が採用されているものが多いといえる。例えば、土木・建築にかかる設計の基本検討委員会が策定した土木・建築にかかる設計の基本⁷⁾においては、荷重の組み合わせの原則として、永続荷重に加えて、支配的な荷重(変動荷重あるいは偶発荷重)が、極大設計値(フラクタイル値, 社会的目標値等)をとるものとして設定し、その他の荷重(変動荷重あるいは偶発荷重)は、支配的な荷重に組み合わせるのに適正なより発生しそうな値とする、としている。

ところで、主たる作用と従たる作用というような作用

の序列付けを行うことが困難な場合もある。本研究で対象とする洋上風力発電設備では波浪作用と風作用が主要な作用である。これらの作用因子⁸⁾はそれぞれ風速, 波高であるが、波浪についても風の作用がもととなって生じるものであり、両者には相関性が高い。このため、Turkstra規則の考え方は適用しにくい可能性があるといえる。また、相関が高い場合においても両者の極大値を組み合わせることは過大設計となる恐れがある。

ここで、洋上風力発電の開発において先行している欧州では、極値風および極値波の組み合わせ方法について、次のような規定や提案がなされている。まず、国際電気標準会議の洋上風車に関する基準であるIEC 61400-3⁸⁾では、極値風条件と極値波条件の組み合わせは、全体的な極値環境が再現期間50年となるようなものであることとしており、さらに、極値風条件及び極値波条件の長期結合確率分布を求めるデータが存在しない場合、再現期間50年の極値海況において再現期間50年の10分平均極値風速が発生すると仮定する、としている。また、洋上風車支持構造の設計指針であるDNV-OS-J101⁹⁾では、50年と5年の再現期待値の組み合わせが提案されている。Dalhoff¹⁰⁾は、極値風と極値波の可能な組み合わせに関する比較表の中で、50年再現期待値どうしの組み合わせは非常に安全側であること、北海では50年と10年の再現期待値の組み合わせが用いられていること、正確にはサイト条件に応じた再現期待値の組み合わせを設定すべ

きであることを示している。

しかしながら、欧州とわが国とは気象擾乱の種類や吹送距離が異なるため、例えば DNV-OS-J101 での提案手法をそのまま適用することは適切ではないと考えられる。特に、わが国の気象擾乱には、台風、熱帯低気圧、日本海低気圧等さまざまな要因がある。さらには、後述するように日本海側と太平洋側で、両作用の相関特性は大きく異なることが考えられる。

以上により本研究では、確率論に基づき波浪作用と風作用の相関性に応じた組み合わせ方法を検討する。その際、IEC 61400-3 の考え方に従い、作用効果の合計値の再現期間が 50 年となる条件における各作用効果の特性値の設定方法を議論する。吉岡ら¹¹⁾はこの問題について予備的な検討を行っているが、本研究では後述するように組み合わせた作用の値が所要の年超過確率となる条件のみならず、各作用の組み合わせの同時確率密度が最大となる組み合わせ方法を議論する。

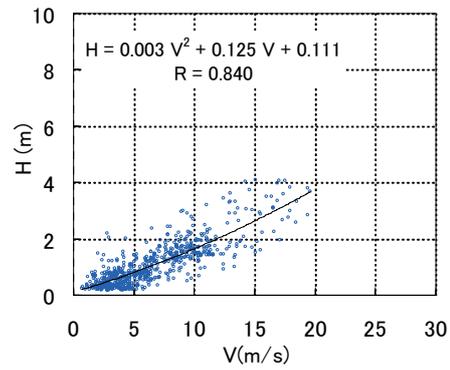
なお、性能照査法に部分係数法が採用される状況が想定されるが、部分係数法において用いられる部分係数自体は、構造物の目標安全性水準や各種パラメータのばらつきなどに応じて設定されるものであるため、本研究で部分係数の設定方法を議論するものではない。また、本研究では time variant な作用の組み合わせによる閾値横断問題的な扱いについては対象外とし、今後の課題とする。

2. 暴風・高波作用の相関出現特性

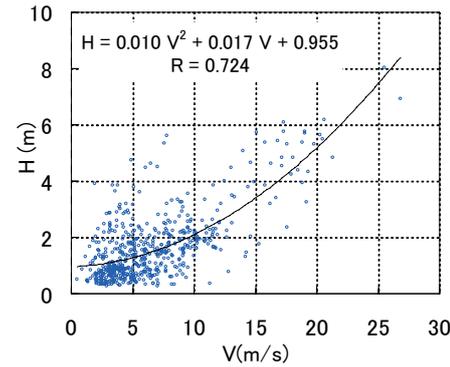
全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)¹²⁾のうち、九州北部沿岸に位置する藍島および玄界灘における風観測、波観測データに基づき、暴風・高波作用の相関出現特性を調べた。

観測データを取得した 1997 年～2007 年の期間中に発生した時化のうち、高波上位 5 回の時化について、10 分平均風速 V と有義波高 H の相関を図-1 に示す。使用したデータは、毎偶正時（2 時間毎）のいわゆる間欠観測データである。また、時化の開始時刻と終了時刻の判定波高は 2.0m とし、高波の順位は 1 時化中の最大有義波高によって判断して、風と波のデータが存在する上位 5 回の時化（藍島 652 データ、玄界灘 576 データ）を対象とした。図には波高の 2 次近似式およびその適合度 R （波高の近似値と実測値との相関係数）を付記している。図から、風速と波高の明確な相関が見受けられること、やや西側の外洋に位置する玄界灘の方が、藍島よりも相関係数が低くなっていることがわかる。

NOWPHAS では 2005 年以降より順次連続観測に切り替えている。そこでこの連続観測データを用い、より詳細な相関出現特性を調べた。図-2 は、時化の発生時のうち、連続観測データが存在する期間における風速 V と波高 H の経時変化を見たものである。図より、藍島では高風速と高波高がほぼ同時に発生しているのに対し、玄

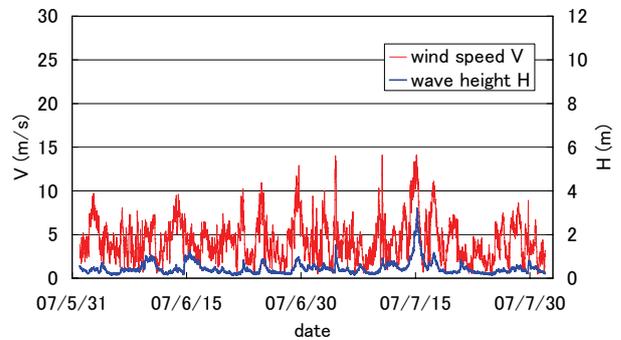


a) 藍島

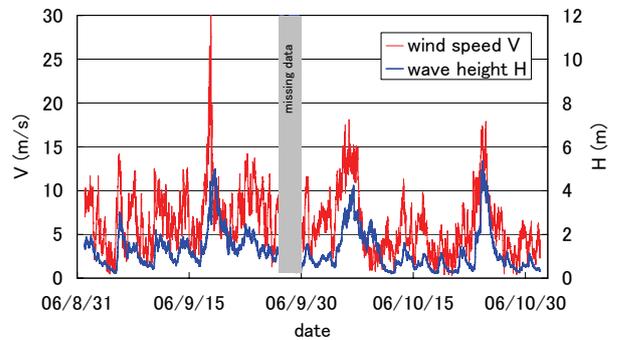


b) 玄界灘

図-1 風速と波高の相関



a) 藍島



b) 玄界灘

図-2 風速と波高の経時変化

界灘では、高風速が生じた後に高波高が来襲する時期が見受けられる。この要因として、玄界灘では低気圧の通過後に、外洋からうねり性波浪が伝播したことが推察される。図-1 に示した玄界灘の相関係数が低かったのは、このような高風速と高波高の時間的位相差に起因していると考えられる。

全国のNOWPHAS 間欠観測データ(1996年～2000年)を用いて風速と波高の関係を調べた報告書¹³⁾によると、秋田、留萌などの日本海側に位置する観測点では相関係数が0.8程度と高く、釜石、鹿島などの太平洋側に位置する観測点では、相関係数が0.3～0.5程度と低い値であることが示されている。今後、より詳細な議論が必要であるものの、吹送距離が短く風波性波浪が卓越する日本海側の海域では相関が高く、吹送距離が長くうねり性波浪が卓越する太平洋側の海域では相関が低いという傾向にあるものと考えられる。以上のことから、日本近海では、北海とは違って極値風と極値波の相関係数を唯一つに決定することは困難であり、したがって、相関係数に応じた両作用の組み合わせを考える必要があると言える。

3. 相関を有する作用の組み合わせ方法の検討

3.1 基本的考え方

性能照査法として信頼性設計法、特に部分係数法が採用された場合を想定すると、作用効果や耐力の特性値に部分係数が乗じられ、得られた耐力の設計用値が作用効果の設計用値を上回ることが照査項目となる。この設計用値は設計点 (design point) に対応した値であり、設計点とは限界状態曲面 (構造物の安定性がちょうど損なわれる状態の曲面) において同時確率密度が最も高い点である。換言すれば限界状態曲面の中で最も生じる可能性の高い状態である。

ここで、仮に作用効果の特性値の合計値が妥当な値であったとしても、各々の作用効果の値の組み合わせが生じる可能性が非常に低い状態に各特性値を設定してしまうと、設計用値を設計点に設定するためには部分係数を非常に大きい値と非常に小さな値に設定する必要があるほか、例えば主たる作用に対する部分係数が1.0以下の値になる可能性があるなど、不自然な設計体系となってしまう恐れがある。

従って、特性値の段階においても、組み合わせた合計値が妥当であるとともに、組み合わせた状態が生じる可能性が最も高い条件に設定しておくことが望ましいと考えられる。

3.2 相関を有する作用の組み合わせ方法

式(1)に示すように、複数の変数 X, Y の和として表現される変数 Z の確率密度関数について議論を行う。

$$Z=X+Y \quad (1)$$

変数 X, Y の確率密度関数がそれぞれ $f_X(x), f_Y(y)$ であるとき、 Z の確率密度関数は、たたみこみ積分により得られる。

$$\begin{aligned} f_Z(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x)f_Y(z-x)dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_Y(y)f_X(z-y)dy \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、変数 X, Y が相関を有している場合、たたみこみ積分は同時確率密度関数を用いた条件付確率密度関数を用いた積分となる。

2つの確率変数がそれぞれ正規分布や対数正規分布であれば、同時確率密度関数は定式化が容易である。特に正規分布の2変数の場合は式(3)となる。

$$\begin{aligned} f(x,y) &= \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left\{\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right.\right. \\ &\quad \left.\left.-2\rho\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)+\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right\}\right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 ρ : 相関係数であり、 μ, σ はそれぞれ添字に関する平均値および標準偏差である。

確率変数が正規分布や対数正規分布以外の場合は、同時確率密度関数を定式化することは比較的困難を伴う。ここでは Nataf 変換¹⁴⁾ (Nataf transformation) を用いる方法について述べる。これは上述した正規分布の同時確率密度関数をベースとして任意の確率分布の同時確率密度関数の概略値を求める方法である。

まず、元となる任意の確率分布に従う確率変数 X を、標準正規確率変数 Y に変数変換する。

$$Y_i = \Phi^{-1}\{F_{X_i}(X_i)\} \quad (4)$$

ここに、 $F_X(X_i)$: 確率変数 X_i の確率分布関数、 Φ : 標準正規確率分布関数である。

相関を有する標準正規同時確率密度関数 $\phi(y,\rho)$ を用いて、変数変換の法則に従い、同時確率密度関数は以下の式により得られる。

$$f_X(x) = \phi(y,\rho')|J| \quad (5)$$

ここに、 ρ' : 相関係数の補正值(後述する式(8)による)、 $|J|$: ヤコビアン (Jacobian) であり、下式により定義される。

$$|J| = \frac{\partial(y_1, \dots, y_n)}{\partial(x_1, \dots, x_n)} = \frac{f_{x_1}(x_1)f_{x_2}(x_2) \cdots f_{x_n}(x_n)}{\phi(y_1)\phi(y_2) \cdots \phi(y_n)} \quad (6)$$

以上により、2変数の場合は式(7)の通りとなる。

$$\begin{aligned} f_{XY}(x, y) &= \phi(h, k, \rho') |J| \\ &= \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho'^2}} \exp\left[-\frac{h^2 - 2\rho'hk + k^2}{2(1-\rho'^2)}\right] \\ &\quad \times \frac{f_X(x)f_Y(y)}{\frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}h^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2}k^2\right)} \quad (7) \\ &= \frac{1}{\sqrt{1-\rho'^2}} \exp\left[-\frac{\rho'^2 h^2 - 2\rho'hk + \rho'^2 k^2}{2(1-\rho'^2)}\right] \\ &\quad \times f_X(x)f_Y(y) \end{aligned}$$

ここに、

$$h = \Phi^{-1}[F_X(x)], \quad k = \Phi^{-1}[F_Y(y)]$$

ここでの注意点は、オリジナルの確率変数から標準正規確率変数へ変数変換しているため、変数変換した標準正規同時確率密度関数の評価においてはオリジナルの確率変数の相関係数をそのまま用いることはできないという点にある。

式(5)、式(7)に用いる相関係数は、式(8)の二重積分を実行して求める必要がある。求める相関係数 ρ が積分の中にあるため、 ρ は収束計算により求める必要がある。

$$\begin{aligned} \rho_{ij} &= \frac{\text{cov}(X_i, X_j)}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} = E(Z_i Z_j) = \\ &\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z_i z_j \phi(y_i, y_j; \rho'_{ij}) dy_i dy_j \quad (8) \end{aligned}$$

ここに、 cov ：共分散、 $Z_i = (X_i - \mu_{X_i}) / \sigma_{X_i}$ である。

簡単で実用的な方法として、Liu and Der Kiureghian¹⁵⁾は、 ρ と ρ' の関係を下式で定義し、様々な確率変数の組み合わせに対して補正係数を示している。

$$R = \frac{\rho'}{\rho} \quad (9)$$

ここで、 R は式(10)により求められる。

$$\begin{aligned} R &= a + bV_i + cV_i^2 + d\rho + e\rho^2 + f\rho V_i + gV_j \\ &\quad + hV_j^2 + k\rho V_j + lV_i V_j \quad (10) \end{aligned}$$

ここに、 V は添字に関する変動係数である。また、 $a \sim l$ は係数であり、本研究で扱う波浪作用や風作用のように確率変数の従う確率分布がワイブル分布であるとき、各係数は以下の通りである。

$$a=1.063, b=-0.200, c=0.337, d=-0.004, e=-0.001, f=0.007, g=-0.200, h=0.337, k=0.007, l=-0.007$$

以上により、 Z の確率密度関数は式(11)により得られる。

$$\begin{aligned} f_Z(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) f_{Y|X}(z-x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) \frac{f_{XY}(x, z-x)}{f_X(x)} dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-\rho'^2}} \exp\left[-\frac{\rho'^2 h^2 - 2\rho'hk + \rho'^2 k^2}{2(1-\rho'^2)}\right] \right. \\ &\quad \left. \times f_X(x) f_Y(z-x) \right\} dx \quad (11) \end{aligned}$$

よって、式(11)の積分を数値的に実行し、さらに得られた確率密度関数を数値的に積分することにより変数の和としての確率変数の確率分布関数が得られるため、50年再現期待値が必要な場合は、各確率密度関数を年超過確率に対するものに設定した上で、確率分布関数の値が $1-1/50=0.98$ となる値に対応する Z の値を求めればよい。そして、各特性値は、合計値が求められた値となる条件で同時確率密度関数の値が最大となる状態を探索して設定すればよいといえる。

3.3 作用の簡易組み合わせ方法の検討

前節で相関を有する2つの作用の組み合わせ方法を検討したが、実務において上記の数値積分を標準的な方法として位置付けることは困難であると言える。このため、本節では、作用の簡易な組み合わせ方法を検討する。

提案方法は次の手順によった。

- ① たたみ込み積分の問題を任意の確率分布の問題として扱うのではなく、まず標準正規確率変数のたたみ込み積分の問題として扱う。このため式(11)に示した組み合わせ後の確率変数 Z の確率密度関数を、標準正規確率変数 h, k を対象として、相関係数をパラメトリックに変化させて数値積分によって求める。
- ② 得られた Z の確率密度関数を数値積分して確率分布関数とし、確率分布関数が所要の値(例えば0.98)となる Z の値を求める。
- ③ 必要な Z の値を相関係数(ρ)を引数とする関数によって近似する。
- ④ Z の値から同時確率密度関数が最大となる h, k の値を求める。この場合は標準正規変数を用いているので、 $h=k$ ($=Z/2$)がその解となる。
- ⑤ h, k の値から確率分布関数の逆演算を用いて x, y の

値を求める。

この方法によれば、確率変数 x, y の相関係数 ρ から ρ' を求め、 ρ より h, k の値を簡易に推定し、最後に x, y の値を逆演算により求めればよい。実務への適用性も高いと考えられる。

まず、標準正規確率変数のたたみ込み積分による Z の確率密度関数は、式(12)により得られる。相関係数が 0.3, 0.8 の場合を例として確率密度関数を図-3 に、確率分布関数を図-4 に示す。

$$f_z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho'^2}} \times \exp \left[-\frac{h^2 - 2\rho'h(z-h) + (z-h)^2}{2(1-\rho'^2)} \right] \right\} dh \quad (12)$$

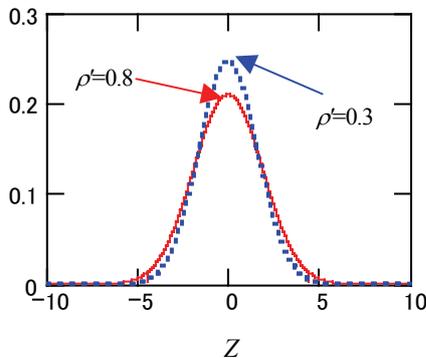


図-3 Z の確率密度関数

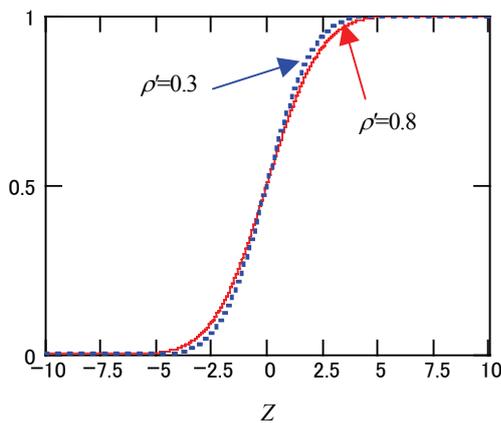
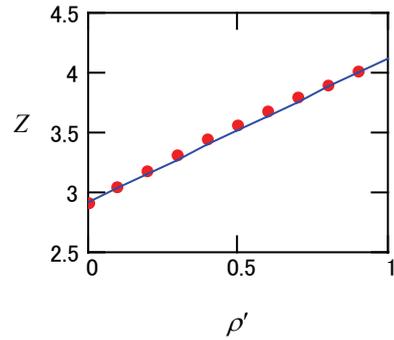
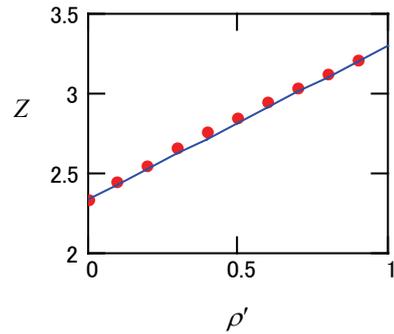


図-4 Z の確率分布関数

次に、必要となる再現期間に対応する値として、10, 20, 30, 50, 100 年再現期間に対応する Z の値を読み取った。再現期間が 50 年, 20 年の場合を例として結果を図-5 に示す。相関係数は 0~0.9 の範囲で 0.1 刻みで変化させている。図より、相関係数の増加に対応して Z の値は線形的に増加していることがわかる。よって、本研究では相関係数に対して 1 次の関数で両者の関係を近似



(a)再現期間 50 年



(b)再現期間 20 年

● : calculated — : estimated

図-5 相関係数に対する Z の値

する。

まず、相関係数がゼロの場合は、互いに独立な標準正規確率変数 h, k の和がある値 (Z) を超えない確率が年超過確率に等しい値を求める問題であるため、一次信頼性理論を用いて Z の値を求めることができる。同様に、相関係数が 1 の場合は $h=k$ の条件で同じ問題を扱えばよい。以上により、 Z の値はそれぞれ式(13), 式(14)により得られる。

$$Z = c \{ \Phi^{-1}(-p_e) \} \quad (13)$$

$$c = \sqrt{2} \quad ; \quad \rho' = 0 \\ = 2 \quad ; \quad \rho' = 1 \quad (14)$$

ここに、 Φ : 標準正規確率分布関数, p_e : 年超過確率である。

これにより、任意の再現期間と相関係数に対する Z の推定値 E_Z は、式(15)により得られる。

$$E_Z = Z(p_e, 0) + \rho \{ Z(p_e, 1) - Z(p_e, 0) \} \quad (15)$$

ここに、 $Z(p_e, \rho)$ は、年超過確率 p_e , 相関係数 ρ に対応する Z の値である。

図-5 にはこの方法により得られた Z の推定値を実線で示しているが、推定精度は良好であることが分かる。

なお、相関係数がゼロ、1 以外の条件についても上述したものと同様の方法で解くことが可能であるが、ここでは簡易評価法の構築を目標としているため、2 つの相関係数に対する値をもとに近似するものである。いま、再現期間 50 年の問題の場合は、推定値 E_Z は式(16)の通りとなる。

$$E_Z = 2.904 + 1.203\rho' \quad (16)$$

次に推定値 E_Z から標準正規確率変数 h, k の値を求めるが、ここでは同時確率密度関数の値が最大となる条件で h, k の値を求めることとなるため、相関係数によらず、 $h=k=E_Z/2$ が求める値となる。

最終的に、必要となる確率変数への変換は、式(17)に示す確率分布関数の逆演算によればよい。

$$x = F_X^{-1}\left(\Phi\left(\frac{E_Z}{2}\right)\right), \quad y = F_Y^{-1}\left(\Phi\left(\frac{E_Z}{2}\right)\right) \quad (17)$$

4. 提案法の妥当性の検証

4.1 検討条件

ここでは、本研究による方法の妥当性の検証を行う。2 章で述べた洋上風力発電施設の設計を行う際に必要となる風荷重と波荷重の組み合わせの問題を議論する。

NOWPHAS 玄界灘での観測値に加え、気象シミュレーション、波浪推算結果を援用し、極値統計解析によって設定した風速と波高の極値分布形を表-1 に示す。極値分布形の最適母分布関数はいずれもワイブル分布としており、その確率密度関数 $f_X(x)$ および確率分布関数 $F_X(x)$ を式(18)に示す。なお、風速と波高の相関係数 ρ については、図-1 に示した適合度 R に同値としている。

表-1 極値分布形モデル

	風速 V (m/s)	波高 H (m)
極値変数	x_V	x_H
極値分布形	ワイブル	ワイブル
形状母数 k	1.4	2.0
尺度母数 A	11.850	3.645
位置母数 B	8.105	0.000
相関係数 ρ	0.724	

$$f_X(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right\} \quad (18)$$

$$F_X(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right\}$$

なお、この相関係数は前述の通り 10 分間平均風速と有義波高という、それぞれの作用の代表値どうしの相関係数であり、極大値としての相関係数ではない。実際の作用の組み合わせを検討する際には極大値としての相関係数を検討する必要があるが、ここでは手法の妥当性を検証することが目的であるため、相関が高い条件として相関係数 0.724、さらに相関が比較的低い条件として 0.4 さらにほとんど相関がない条件として相関係数 0.1 の 3 つの条件について検討した。

また、波浪作用と風作用の作用効果の割合は、構造物の設置条件、構造部材や破壊モードなどで様々に異なる。図-6 に洋上風力発電施設のイメージ図を示すが、ある条件で 2 つの作用効果の値を概算した結果、外部安定の照査に必要な水平力では波浪作用と風作用の比は 7:1 であったが、構造部材の照査に必要な基部モーメントでは 1:1.2 であった。よって、両作用の割合が 1:3, 1:1, 3:1 の 3 の条件を設定した。

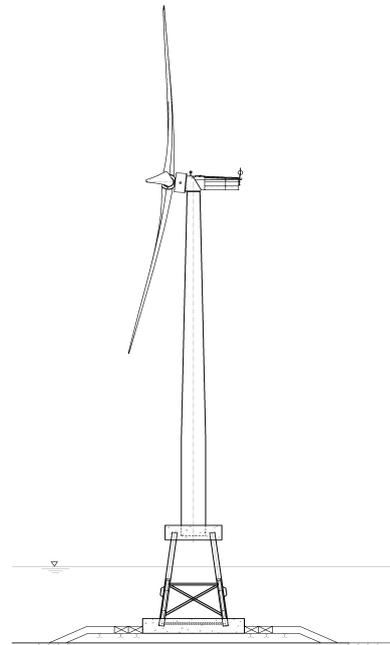


図-6 洋上風力発電施設

4.2 モンテカルロシミュレーションによる検討

モンテカルロシミュレーション (以下、MCS と記述) によって波浪作用と風作用を算出し、両作用の和の確率分布を調べた。

MCS による、相関を有する 2 組の乱数列の発生方法は以下のとおりである。

- ① 2 組の一樣乱数列を発生させる。
- ② 一樣乱数から標準正規乱数に変換する。
- ③ 独立な 2 組の標準正規乱数列をもとに、必要な相関係数 (ρ) を有する標準正規乱数列に変換する。これには固有ベクトルの問題として取り扱う方法と、コレスキー分解を用いる方法がある。詳細は、

例えば文献 16)に紹介されている。

- ④ 正規乱数から任意の確率変数へ、確率分布関数の逆演算を用いて変換する。

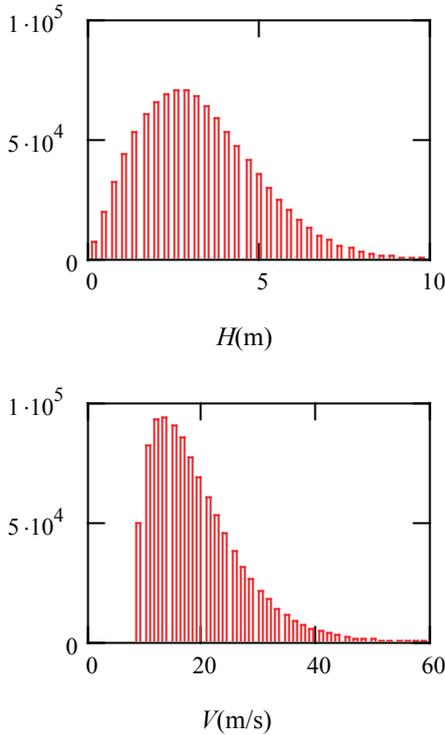


図-7 波高と風速の頻度分布

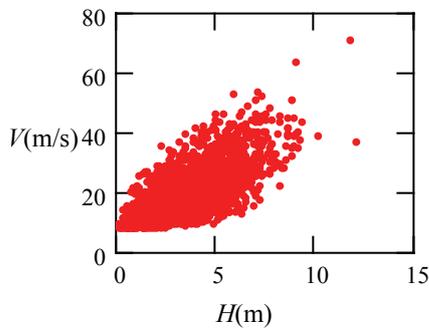


図-8 波高と風速の相関 (相関係数 0.724)

図-7に MCS による V と H の頻度分布を, 図-8に両者の相関散布図を示す. MCS の試行回数は 100 万回としており, 図-8にはこのうち 3000 回分の結果を示している。

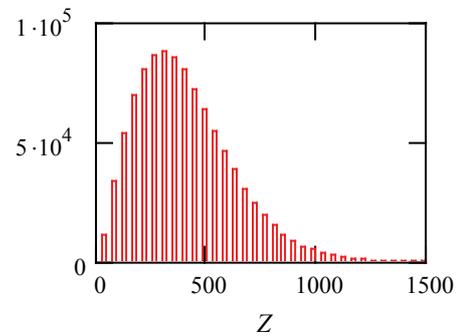
次に, 波浪作用効果は波高の 1 乗, 風作用効果については, 風速の 2 乗に比例することから, 作用の値 Z を波浪作用の値 Z_1 と風作用の値 Z_2 の和として式(19)に示すとおり定義し, Z_1 については波高 H , Z_2 については風速の 2 乗 V^2 に各々に比例定数を乗じたものとして設定した。さらに, 両作用効果の比が上述した割合になり, かつ両作用の和の 50 年再現期間に対する値が 1000 となる様に

比例定数 c_1, c_2 を調整した。比例定数 c_1, c_2 の値は表-2 に示すとおりである。図-9 に, 波浪と風作用の割合が 3:1, 1:1, 1:3 の 3 の条件における組み合わせ後の作用の頻度分布を示す。

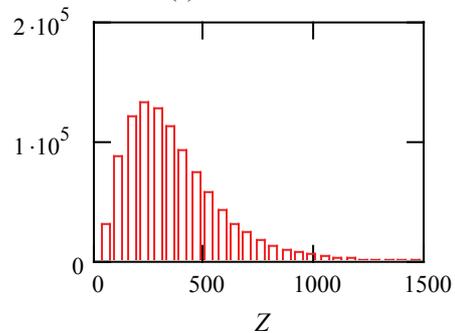
$$\begin{aligned} Z &= Z_1 + Z_2 \\ Z_1 &= c_1 H \\ Z_2 &= c_2 V^2 \end{aligned} \quad (19)$$

表-2 比例定数

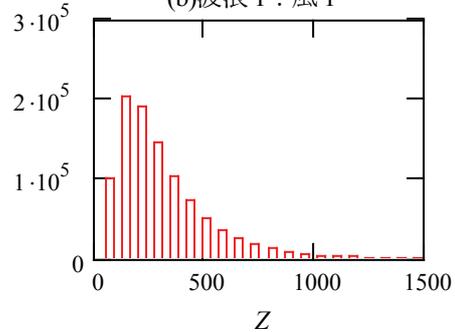
	c_1	c_2
波浪 3 : 風 1	104.03	0.16
波浪 1 : 風 1	69.35	0.32
波浪 1 : 風 3	34.68	0.48



(a)波浪 3 : 風 1



(b)波浪 1 : 風 1



(c)波浪 1 : 風 3

図-9 作用の組み合わせの頻度分布

更に、作用の組み合わせが再現期間 50 年相当に近い値となる組み合わせを 200 組抽出した結果について、波浪作用の頻度分布を図-10 に示す。波浪作用と風作用の比が 3:1, 1:1, 1:3 の順に、波浪作用の出現頻度が高いのは、それぞれ 730~750, 480~500, 220~250 程度である。また、相関係数を 0.4, 0.1 とした場合の相関散布図をそれぞれ図-11, 図-12 に示す。

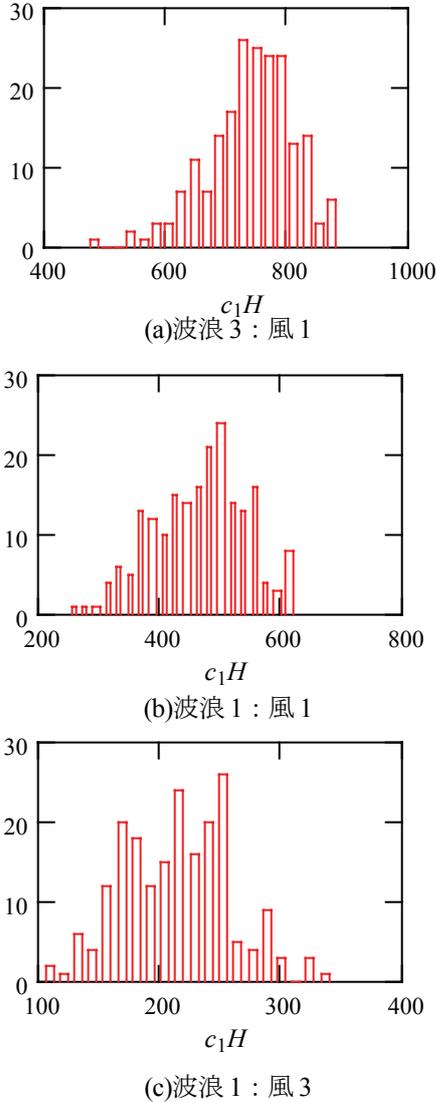


図-10 波浪作用の頻度分布

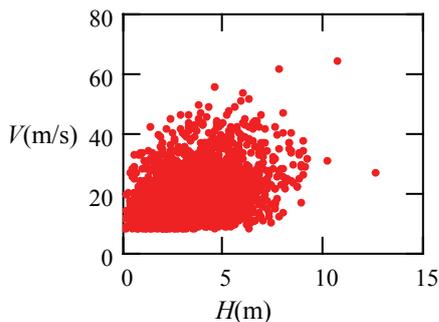


図-11 波高と風速の相関 (相関係数 0.4)

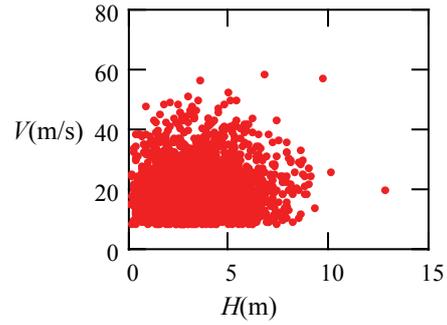


図-12 波高と風速の相関 (相関係数 0.1)

4.3 各手法による作用の組み合わせの比較

MCS による結果と本研究による方法および DNV による方法の比較を行う。

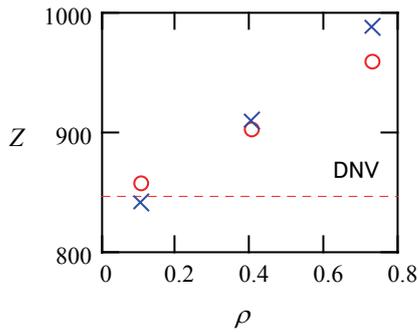
本研究による方法では、3 章で述べたとおり、まず式(10)を用いて ρ から ρ を算出する。 $\rho=0.724$ において $R=1.024$ となるため、 $\rho=0.741$ となる。次に式(16)を用いて $E_Z=3.80$ が得られる。最後に、確率分布関数の逆演算を用いて各作用の値を求める。ここではワイブル分布を用いているので、式(20)、式(21)を用いて波浪作用 P_H 及び風作用 P_V の値を得る。ここで、風作用については風速の二乗に比例するため、逆演算においては平方根を用いていることに注意が必要である。

$$P_H = c_1 \left\{ A \left(-\ln \left(1 - \frac{E_Z}{2} \right)^{\frac{1}{k}} \right) + B \right\} \quad (20)$$

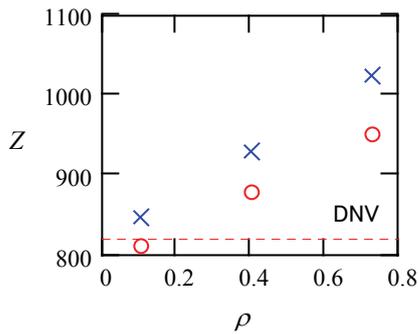
$$P_V = c_2 \left\{ A \left(-\ln \left(1 - \sqrt{\frac{E_Z}{2}} \right)^{\frac{1}{k}} \right) + B \right\}^2 \quad (21)$$

各手法による作用の組み合わせ値の比較を図-13 に示す。DNV による組み合わせ作用は相関係数によらず一定の値をとるため、DNV による値は図中に値一定の点線で示している。

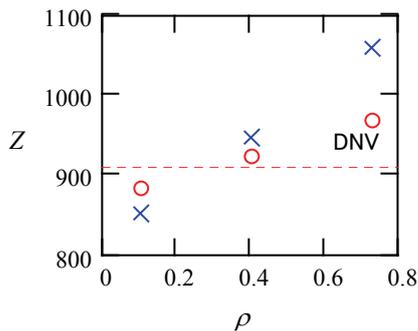
図より、相関係数が 0.724 の条件では DNV による組み合わせ値は MCS よりも小さく、過少評価となっていることが分かる。なお、DNV による値は 50 年再現期間による値と 5 年再現期間による値を組み合わせるものであるため、2 種類の組み合わせ作用が得られる。ここではこのうち、MCS による値に近い結果を与える条件を採用している。本研究による組み合わせ値は MCS よりも大きく、特に波浪作用と風作用の比が 1:3 の条件では過大な結果となった。これは、本研究では風速と波高の相関係数を用いて波浪と風の作用効果の相関係数を評価しているためである。風の作用効果は風速の 2 乗に比例す



(a) 波浪 3 : 風 1



(b) 波浪 1 : 風 1



(c) 波浪 1 : 風 3



図-13 作用の組み合わせの比較

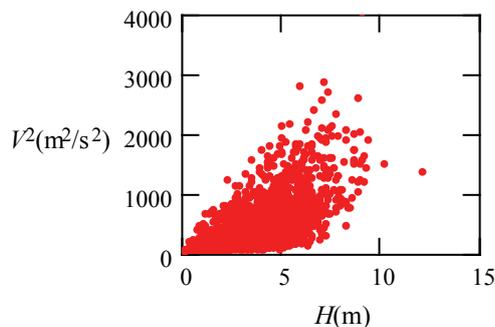


図-14 波高と風速二乗の相関

るため、波浪と風の作用効果の相関係数は MCS による評価では 0.676 となり (図-14)、風速と波高の相関係数 0.724 よりも低下している. 特に波浪と風の作用効果の比が 1:3 の条件では、他の条件と比較して、風速の 2 乗に比例する風作用効果の影響が強く、相関係数の誤差の影響が強く現れる. 波浪と風の作用効果の比が 1:3 の条件で過大評価の傾向が強いのはこのためである. 本研究では実務における負荷を考慮して簡易評価法の構築を目的としたが、特に風の作用効果が波浪の作用効果に比して大きい場合や相関係数が高い場合はあらかじめ波高と風速の 2 乗の相関係数を用いるなど、相関係数の評価を工夫する必要がある. この点については今後の課題とする. ただし、本研究による推定値は DNV による評価値と比較して安全側の結果を与える. また、波浪の作用効果が卓越する場合にはよい精度で 50 年再現期間の組み合わせ作用を評価できるといえる.

表-3 波浪作用の値の比較

	MCS	本研究	DNV
(a) 波浪 3 : 風 1			
$\rho=0.724$	730~750	714	750
$\rho=0.4$	680~740	668	
$\rho=0.1$	760~830	627	
(b) 波浪 1 : 風 1			
$\rho=0.724$	480~500	476	321
$\rho=0.4$	390~450	446	
$\rho=0.1$	350~420	418	
(c) 波浪 1 : 風 3			
$\rho=0.724$	220~250	238	160
$\rho=0.4$	160~220	222	
$\rho=0.1$	100~140	209	

次に、組み合わせられる各作用の値のうち波浪作用について、各方法の値を表-3 に示す. ここで、MCS の結果は、図-10 に示した再現期間 50 年相当の値に近い値となる組み合わせの中で頻度の高い領域を示している. DNV の値は相関係数によらないため一定値となる. 表より、相関係数が低い場合は本研究による値は MCS による頻度の高い領域との一致度が悪いが、相関係数が高い場合は MCS による結果と比較的よく一致している. DNV による値は相関係数が低い場合は MCS とよく一致しているが、相関が高い場合は一致度があまり良くないと言える.

以上の検討結果より、本研究による作用の組み合わせ方法は、相関が高い場合には適用性が高いと判断できる. ただし、相関係数が非常に高い場合は、風速と波高の相関係数と波浪と風の作用効果の相関係数が大きく異なるため、相関係数の取り扱いに対して更に検討が必要であるといえる.

なお、表-3 に示したように MCS による値は相関係数の低下に伴い減少する傾向があるが、波浪と風の作用効果の比が 3 : 1 の条件では相関係数が 0.1 の条件で逆転している。これは、図-10 に示したように、波浪と風の作用効果の比が 3 : 1 の条件では波浪の値が高い領域の頻度が高い頻度分布になる。相関係数が 0.1 の条件ではこの傾向が極端になる (図-15)。これは、相関係数が低ければ 2 つの作用効果がどちらも高い値が組み合わせる可能性が低くなるため、相関係数が 0.1 の条件で逆転しているのはこのためである。

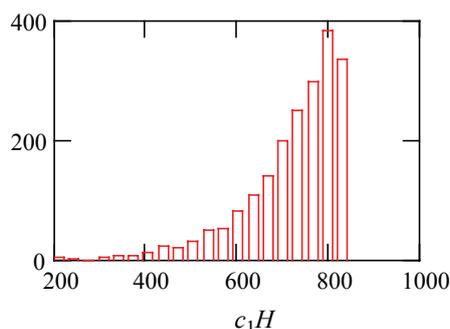


図-15 波浪作用の頻度分布 (波浪 3 : 風 1, $\rho=0.1$)

5. まとめ

本研究では、相関の強い波浪作用と風作用の組み合わせ方法を議論した。その際、IEC 61400-3 の考え方に従い、作用効果の合計値の再現期間が 50 年となる条件における作用効果を対象に、同時確率密度が最大となる条件を設計実務の便を考慮して、簡易に評価する方法を検討した。既往の方法として DNV の方法があるが、DNV の方法は相関係数が高い場合には危険側の評価となることが分かった。本研究による方法は、DNV による方法と比較して、相関係数が高い場合には適用性が高いといえる。ただし、風速と波高の相関係数と波浪と風の作用効果の相関係数が異なる点について更に検討が必要である。

参考文献

- 1) 北沢正彦, 久保雅邦, 白木 渡, 亀田弘行: 鋼製橋脚における荷重組み合わせの解析と荷重係数の試算, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.761-773, 1987.
- 2) 河野 守, 坂本 順, 青木和雄: 荷重の組み合わせに

おける超過確率の理論解とその応用に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 405 号, pp.31-41, 1989.

- 3) 森 保宏, 村井一子: 荷重の時間変動を考慮した組み合わせ荷重効果の確率モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 525 号, pp.33-39, 1999
- 4) P.トフ・クリステンセン, M.J.ベイカー著, 室津義定監訳: 構造信頼性—理論と応用—, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1986.
- 5) Turkstra, C. J. : Theory of Structural design Decisions, Study No.2, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1970.
- 6) 性能設計における土木構造物に対する作用の指針, (社)土木学会, 2008.
- 7) 国土交通省: 土木・建築にかかる設計の基本, 2002.
- 8) International Electrotechnical Commission : Wind turbines - Part 3, Design requirements for offshore wind turbines, IEC 61400-3, 2009.
- 9) Det Norske Veritas : Design of offshore wind turbine Structures, DNV-OS-J101, 2007.
- 10) P. Dalhoff, K. Argyriadis : Comparison of certification rules for offshore wind turbines and introduction of new GL wind offshore guideline, Proc. of EWEC 04, pp. 1-11, 2004.
- 11) 吉岡 健, 鷺尾朝昭, 片山 勝: 確率論に基づく暴風・高波荷重の組合せ方法に関する研究, 第 64 回土木学会年次学術講演会, 2009
- 12) 国土交通省港湾局: 全国港湾海洋波浪情報網, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 13) 港湾・沿岸域における風力発電推進研究会: 港湾・沿岸域における風力発電推進に関する研究報告書, 2005.
- 14) Nataf, A. : determination des distribution don' t les Marges sont Donnes, Comptes Rendus de l' Academie des Sciences, 225, pp.42-43, 1962
- 15) Liu, P. -L. and Der Kiureghian, A. : Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances, Prob. Engineering Mechanics, 1 (2) pp.105-112, 1986
- 16) 星谷 勝, 石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986

(2009 年 9 月 24 日受付)