国土技術政策総合研究所 研究報告

 RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

 No.48
 September 2011

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

長尾 毅

A study on the combination method of correlated wave and wind actions

Takashi NAGAO



National Institute for Land and Infrastructure Management Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

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

長尾 毅*

要 旨

性能設計においては各種作用を適切に組み合わせる必要がある.一般的にはTurkstra規則(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を組み合わせを考慮するもの)が用いられるこ とが多く,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.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が,両者には相関性が高いため,Turkstra規則の考え方 は適用しにくいといえる.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,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.

キーワード:作用の組み合わせ,相関,確率分布

*港湾研究部港湾施設研究室 室長 〒239-0826横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所 電話:046-844-5029 Fax:046-844-5029 e-mail:nagao-t92y2@ysk.nilim.go.jp Research Report of NILIM No.48 September 2011 (YSK-R-42)

A study on the combination method of correlated wave and wind actions

Takashi NAGAO**

Synopsis

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

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

^{*} Head of Port Facilities Division, Port and Harbor Department

Phone: +81-46-844-5029 Fax: +81-46-844-5081 e-mail: nagao-t92y2@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	••••• 1
2. 風速と波高の相関関係 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	••••• 1
3. 相関を有する作用の組み合わせ方法の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••••• 2
3.1 基本的考え方	2
3.2 相関を有する作用の組み合わせ方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
3.3 作用の簡易組み合わせ方法の検討	••••• 4
4. 提案法の妥当性の検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	• • • • • 6
4.1 検討条件	••••• 6
4.2 モンテカルロシミュレーションによる検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••••• 6
4.3 各手法による作用の組み合わせの比較 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
謝辞	•••• 10
参考文献 ·····	10

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.また,港湾の施設の技術上の基準・同解説⁸⁾に おいても,作用の組み合わせに関し,「作用の組合せを 考慮する際に,一般に複数の作用は主たる作用と従たる 作用に分類されるが,主たる作用と従たる作用の同時生 起性が高くない場合は,従たる作用の特性値は年超過確 率の比較的大きな設計供用期間中にしばしば起こりうる 程度の値とすることができる.これは同時生起性の低い 作用の特性値をすべて年超過確率の小さな値に設定して 組み合わせることは,合理的ではないと考えられるため である」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.例えば洋上 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^のはそれぞれ風速,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 61400-3⁹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-J101¹⁰⁰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. Dalhoff¹¹⁾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,欧州とわが国とで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¹²⁾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. 風速と波高の相関関係

全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)¹³⁾の間欠観測デ 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¹⁴⁾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.

具体的に図-1を用いて説明する.簡単にx,yの2変数の場合で考える.x,yの何れも作用効果側の変数とする. g=0の曲線が限界状態曲面であり、この曲線より上の領域が破壊領域、下の領域が非破壊領域である.x,yはそれぞれ正規分布に従うとし、x=N(1.0,0.3)、y=N(0.5,0.1)とすると、同時確率密度一定の曲面は図中に示すような楕円で示されることになる.

design point は限界状態曲面において同時確率密度最大 の点であるため、図中に□で示した点になる.いま作用 効果の合計値の再現期間が 50 年となる条件を図中に一 点鎖線で示した条件とすると、この線上の点 A,B,Cの何 れも性能照査で用いる特性値の組み合わせとして候補と



図-1 作用の組み合わせの例

なりえる.しかしながら,最終的には部分係数を乗じた 設計用値は design point に相当する値とする必要がある. このため,A点ではyの部分係数を1.0以下の値とする必 要があり,C点では逆にxの部分係数を1.0以下の値とす る必要がある.更に,例えばA点ではxの特性値は平均 値以下であるにもかかわらず,乗じる部分係数は2程度 と非常に大きな値である必要があるなど,特性値と部分 係数の設定に関して極めて不自然な値とする必要があり, 合理的とはいえない.

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.図-1の条件ではB点がこれに該当する.

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.

$$Z = X + Y \tag{1}$$

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.

$$f_{Z}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X}(x) f_{Y}(z-x) dx$$

=
$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{Y}(y) f_{X}(z-y) dy$$
 (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.

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - \frac{1}{2\rho\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right) + \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2 \right\} \right]$$
(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¹⁵⁾(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.

$$Y_i = \Phi^{-1} \left\{ F_{X_i} \left(X_i \right) \right\} \tag{4}$$

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 (y, p)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.

$$f_{X}(x) = \phi(y, \rho')|J|$$
(5)

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

$$\left|J\right| = \frac{\partial(y_1, \cdots, y_n)}{\partial(x_1, \cdots, x_n)} = \frac{f_{X_1}(x_1)f_{X_2}(x_2)\cdots f_{X_n}(x_n)}{\phi(y_1)\phi(y_2)\cdots\phi(y_n)} \quad (6)$$

以上により、2変数の場合は式(7)の通りとなる.

$$f_{XY}(x, y) = \phi(h, k, \rho')|J|$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{1-{\rho'}^{2}}} \exp\left[-\frac{h^{2}-2\rho'hk+k^{2}}{2(1-{\rho'}^{2})}\right]$$

$$\times \frac{f_{X}(x)f_{Y}(y)}{\frac{1}{2\pi}\exp\left(-\frac{1}{2}h^{2}\right)\exp\left(-\frac{1}{2}k^{2}\right)}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1-{\rho'}^{2}}} \exp\left[-\frac{{\rho'}^{2}h^{2}-2\rho'hk+{\rho'}^{2}k^{2}}{2(1-{\rho'}^{2})}\right]$$

$$\times f_{X}(x)f_{Y}(y)$$
(7)

$$z = kz,$$

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

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 pが積分の中にあるため, pは収束計算により求める必要がある.

$$\rho_{ij} = \frac{\operatorname{cov}(X_i X_j)}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} = E(Z_i Z_j)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z_i z_j \phi(y_i, y_j; \rho'_{ij}) dy_i dy_j$$
(8)

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

簡単で実用的な方法として、Liu and Der Kiureghian¹⁶⁾ 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.

$$R = \frac{\rho'}{\rho} \tag{9}$$

ここで, Rは式(10)により求められる.

$$R = a + bV_{i} + cV_{i}^{2} + d\rho + e\rho^{2} + f\rho V_{i} + gV_{j}$$

$$+ hV_{j}^{2} + k\rho V_{j} + lV_{i}V_{j}$$
(10)

ここに、Vは添字に関する変動係数である.また、a~ 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.

$$f_{Z}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X}(x) f_{Y|X}(z-x) dx$$

=
$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{X}(x) \frac{f_{XY}(x, z-x)}{f_{X}(x)} dx$$

=
$$\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-\rho'^{2}}} \exp\left[-\frac{\rho'^{2}h^{2}-2\rho'hk+\rho'^{2}k^{2}}{2(1-\rho'^{2})}\right] \times f_{X}(x) f_{Y}(z-x) \right\} dx$$
 (11)

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(p')を引数とする関数によっ

て近似する.

 ④Z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pからp'を求め, p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ため,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-2に,確率分布 関数を図-3に示す.





図-2 Zの確率密度関数



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-4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



図-4 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.

$$Z = c \left\{ \Phi^{-1} \left(-p_{e} \right) \right\}$$
(13)

$$c = \sqrt{2}$$
; $\rho' = 0$
= 2; $\rho' = 1$ (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.

$$E_{Z} = Z(p_{e}, 0) + \rho \{ Z(p_{e}, 1) - Z(p_{e}, 0) \}$$
(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-4 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.

$$E_z = 2.904 + 1.203\rho' \tag{16}$$

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.

$$x = F_X^{-1}\left(\Phi\left(\frac{E_Z}{2}\right)\right), \quad y = F_Y^{-1}\left(\Phi\left(\frac{E_Z}{2}\right)\right)$$
(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¹⁷⁾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、相関の高い条件として 0.724 としている.

	1-1-2.	
	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	0.7	/24

表-1 極値分布形モデル

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

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

なお、この相関係数は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-5 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¹⁷⁾.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.なお,図-5には例として着底 式の構造を示したが,本研究の手法は浮体式等のその他 の構造形式にも適用可能である.



図-5 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 組の一様乱数列を発生させる.
- ②一様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(p)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18)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.



5

10

15

0

0

図-7 波高と風速の相関(相関係数 0.724)

H(m)

図-6に MCS による Vと Hの頻度分布を, 図-7 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-76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Z1と風作用の値Z2の和として式(19)に示すと おり定義し、Z1については波高H、Z2については風速の 2乗 V²に各々に比例定数を乗じたものとして設定した.

$$Z = Z_1 + Z_2$$

$$Z_1 = c_1 H$$

$$Z_2 = c_2 V^2$$
(19)

表-2 比例定数

	<i>c</i> ₁	<i>c</i> 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



(c)波浪1:風3 図-8 作用の組み合わせの頻度分布



(c)波浪1:風3図-9 波浪作用の頻度分布

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 c₁, c₂を調整した.比例定数 c₁, c₂の値は**表** -2 に示すとおりである.図-8 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.

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-9 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-10,図-11 に示す.



図-10 波高と風速の相関(相関係数 0.4)



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. ρ =0.724 において R= 1.024 となるため、 ρ =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. Φ (3.80/2)=0.971 などとなる. 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.

$$P_{H} = c_{1} \left\{ A \left(-\ln\left(1 - \Phi\left(\frac{E_{Z}}{2}\right)\right)^{\frac{1}{k}} \right) + B \right\}$$
(20)

$$P_{V} = c_{2} \left\{ A \left(-\ln\left(1 - \sqrt{\Phi\left(\frac{E_{Z}}{2}\right)}\right)^{\frac{1}{k}} \right) + B \right\}^{2}$$
(21)

各手法による作用の組み合わせ値の比較を図-12 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-12 作用の組み合わせの比較



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-13),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.

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

表-3 波浪作用の値の比較

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-9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 0.7 程度以上の場合は、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-9 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-14).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で,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-14 波浪作用の頻度分布(波浪3:風1, p=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.

(平成23年8月31日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり,電源開発・吉岡健氏より風速 と波高の相関関係などについて教示頂きました.ここに 記して感謝します.

参考文献

- 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.

- Turkstra, C. J. : Theory of Structural desgin 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.
- 国土交通省港湾局監修,日本港湾協会:港湾の施設の 技術上の基準・同解説,2007.
- International Electrotechnical Commission : Wind turbines - Part 3, Design requirements for offshore wind turbines, IEC 61400-3, 2009.
- 10)Det Norske Veritas : Design of offshore wind turbine Structures, DNV-OS-J101, 2007.
- 11)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.

12)吉岡 健, 鷲尾朝昭, 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

- 13)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/
- 14)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.
- 15)Nataf, A. : determination des distribution don' t les Marges sont Donnes, Comptes Rendus de l' Acamemie des Sciences, 225, pp.42-43, 1962
- 16)Liu, P. -L. and Der Kiureghian, A. : Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances, Prob. Engineering Mechanics, 1 (2) pp.105-112, 1986
- 17)長尾 毅,吉岡 健: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,構造 工学論文集 Vol.56A, pp.217-226, 2010
- 18) 星谷 勝,石井 清:構造物の信頼性設計法, 鹿島 出版会, 1986

国土技術政策総合研究所研究報告 RESEARCH REPORT of NILIM No. 48 September 2011

編集·発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
 管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018