

# 洋上風力発電施設に作用する風と波に対する 応力範囲頻度分布解析

STUDY ON THE VIBRATION RESPONSE TO WINDS AND WAVES OF OFFSHORE  
WIND TURBINES

中村慎吾<sup>1</sup>・関田欣治<sup>2</sup>

山下 篤<sup>3</sup>・林 伸幸<sup>4</sup>

Shingo NAKAMURA, Kinji SEKITA

Atsushi YAMASHITA and Nobuyuki HAYASHI

<sup>1</sup>学生会員 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3-20-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科

<sup>3</sup>正会員 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部建設・技術部 (〒100-8071東京都千代田区大手町2-6-3)

<sup>4</sup>正会員 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 建設・技術部

As an offshore wind turbine facility consisted of blades, a nacelle, a supporting tower and base is subjected to strong winds as well as rough waves, so oscillations of it became larger and more complicated than a land facility, thus causing fatigue damage to the structure. Therefore we conducted time domain modal analyses for a blades-nacelle-tower-foundation system against fluctuating wind and wave loadings during twenty years, then stress time histories are analyzed to get cumulative numbers of stress ranges by two kinds of counting methods i.e. rain flow and ordinarily zero up cross. So as to compare the difference of counting methods, the analyzed relation of stress ranges and numbers is fit to a two parameter Weibull distribution. The paper concluded that the counting method such as the rain flow method can be precisely read out high frequency stress ranges piled up a low frequency stress response curve, resulting that fatigue damages of the offshore wind facility may be properly evaluated.

**Key Words:** offshore wind turbine, rain flow counting method, stress ranges, fatigue damage, winds and waves

## 1. はじめに

現在人類は化石燃料による環境問題や資源の有限性など深刻な問題に直面している。発電のうち大半を占める原子力発電は地球環境に影響を与える核廃棄物の処理などの課題が残る。また、石炭・石油・火力発電のように地球温暖化の原因である二酸化炭素を大量に排出しているものもある。そこで地球温暖化を抑制し、且つ再生可能で無尽蔵な新エネルギーである太陽光発電・風力発電・温度差エネルギーなどの石油代替エネルギーの導入が検討されている。1997年の地球温暖化防止京都会議(COP3)以降石油代替エネルギーのひとつとして脚光を浴びている風力エネルギーを利用した洋上風力発電は、「エネルギー問題」と「地球環境問題」という二つの課題を解決する有効な手段として注目されている。

日本では、本格的な沖合の風力発電の導入はまだであるが、海上風が陸上風より適性が高い事<sup>1)</sup>などからも今後風力発電の洋上利用の導入・検討は盛んになると思われる。

しかしながら、海上展開で考えられる代表的な構

造物に関し、変動する外力がタワーにどのような影響を与えるか検討する必要がある。これは、洋上風力発電施設が揺れやすく、耐久性も20年と比較的長期間求められているので、疲労が顕在化する可能性が高いと思われる。

## 2. 研究目的

本研究では、洋上風力発電施設において陸上と違い波浪の影響が問題となる。風や波浪が同時作用する構造物の中で、洋上風力発電施設に作用する応力やひずみの時刻歴応答は低周波数成分(波)と高周波数成分(風)による重畳した形をもつ。したがって、このような応答結果から、応力範囲やひずみ範囲を計数する方法は従来の波浪単独の作用下でのそれらに適用するゼロアップクロス法では読み取り不可能であると考えられる。よって、これを用いて疲労解析を行うと危険となる。ここでは、高周波数成分も読み取れる計数法、すなわち、レインフロー法、レンジペアー法<sup>2)</sup>などをプログラム化し、風と波浪を同時に受ける洋上風力発電装置の応答解析<sup>3)</sup>を行い、従来のゼロアップクロス法による読み取り、応

力範囲の頻度分布について考察することを目的とする。

### 3. 応力範囲計算法

#### (1) ゼロアップクロス法

ゼロアップクロス法は、波の峰と谷の応力幅を順次カウントしていく。しかし大きな波に小さな波が重畳した場合などには大きな波のレンジだけをカウントし、小さい波を読まないことになる。つまりゼロアップクロス法は、非常に周期が短く振幅の小さい、いわゆるさざ波が重なっていると、周期成分として検出されない。

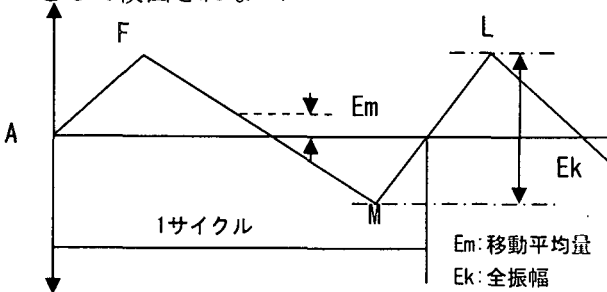


図1 ゼロアップクロス法

#### (2) レインフロー法

高周波数成分も読み取れる計算法には、レインフロー法やレンジペア法などがあるが今回はレインフロー法を用いた。

レインフロー法は、応力、時間波形の時間軸を鉛直方向にとり、応力の大きさを多重の塔の屋根からの雨だれにたとえ、幾つかの約束のもとに雨だれの流れたレンジをもって応力レンジをカウントするものである。このカウント法は変動荷重波形のカウント法としてよく用いられるものであるが、もともとはレンジペアカウント法をもとにして、計算機による処理を容易にするために考え出された方法であり、初めの半波の定義を除いてはレンジペア法と同じカウント法になる。したがって、十分長い時間にわたる大部分の実働荷重波形に対してカウント結果はレンジペア法と一致する。

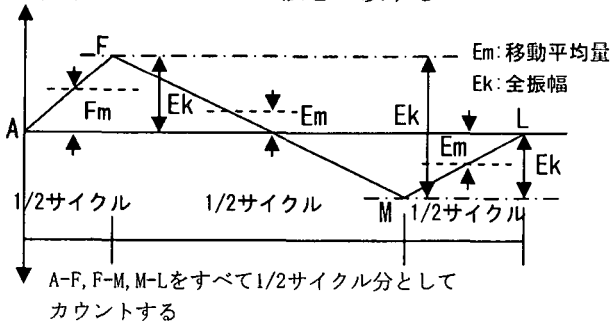


図2 レインフロー法

### 4. 風力発電施設の特徴

タワーの質量、剛性及び減衰定数

本研究で用いる風力発電施設に関する構造体の

モデルを図3に示す。ただし風力発電装置に関しては500kW級の中規模風力発電装置を対象とし、それを水深15m地点にハブ高さ50mで設置する場合を想定する。ブレード・ナセル部、タワー一部、基礎部を4質点のランプトマスに近似し、波力は基礎部に作用させ、風はブレード・ナセル部に加えた。ナセル及びブレードの総質量は32.53t、タワーの質量は17.47t、タワーは鋼で出来ており $E=2.10 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 、密度は $7.85 \text{ t/m}^3$ とした。また、基礎構造は、杭で固定されたジャケットとし、減衰定数 $h$ は、ブレード・ナセル部では風とブレードとの空気力減衰を考慮し5%に、基礎部では流体減衰や地盤による減衰を考慮し同じく5%とした。タワー部の2質点については鋼構造物で一般に使用される0.2%とした。図3中にある $m$ や $EI$ は基礎構造物の付加質量と地盤の影響を含めた曲げ剛性を示している。

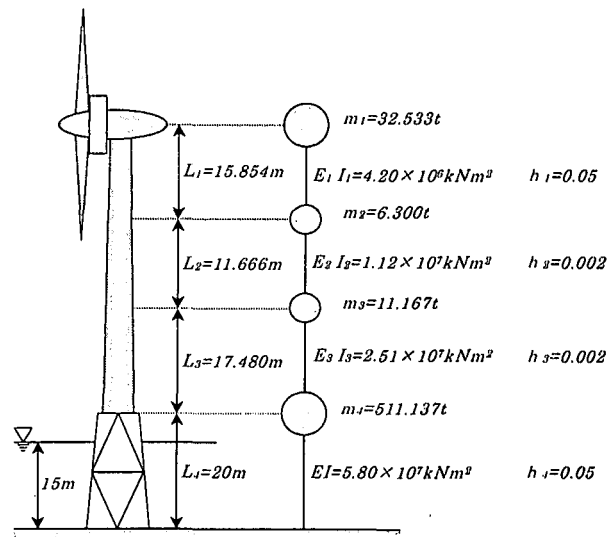


図3 構造体のモデル化

### 5. 解析方法及び理論

#### (1) 多自由度系による解析

構造物の振動解析にあたっては、図4に示すような多自由度系にモデル化して構造物の挙動を解析するプログラムを作成した。ここでは、 $N$ 個の質点上から順番に番号をつけており、その運動方程式は次式のようなになる。

$$[M] \ddot{u} + [C] \dot{u} + [K] u = p \quad (1)$$

$[M]$ : 質量マトリックス

$[C]$ : 減衰マトリックス

$[K]$ : 剛性マトリックス

$p$ : 荷重ベクトル

$u$ : 変位ベクトル

$\dot{u}$ : 速度ベクトル

$\ddot{u}$ : 加速度ベクトル

固有値問題（固有円振動数・モードマトリックス）においてはヤコビ法を用いて $[M]^{-1}[K]$ 、 $[K]^{-1}[M]$ が対称行列でない場合、コレンスキー分解によりヤコビ法のプログラムが使えるようにしている。ヤコビ法

によって求めた固有円振動数  $\omega_n$  とモードマトリックス  $[\Phi]$  を用いて、モーダルアナリシスにより多自由度系の解析を次のように行う。

変位ベクトル  $u$  とモードマトリックス  $[\Phi]$  により

$$u = [\Phi] q \quad (2)$$

上式の形に変換する。ここで  $q$  は時間のみの関数であり、 $u$  はモードの重ね合わせの度合いを意味している。

$$[M] [\Phi] \ddot{q} + [C] [\Phi] \dot{q} + [K] [\Phi] q = p \quad (3)$$

両辺に前から  $[\Phi]^T$  を乗じて、振動モード系の直交性等の関係より

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = P_n(t) \quad (4)$$

が得られる。ここで、 $M_n$ 、 $C_n$ 、 $K_n$ 、 $P_n$  はそれぞれ一般化質量、一般化減衰、一般化剛性、一般化外力と言う。ここで、 $n$  次の固有円振動数や減衰の関係から  $N$  個の独立な微分方程式に分解される。

$$\ddot{q}_n + 2h_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = P_n(t)/M_n \quad (5)$$

風荷重のような任意波形外力に対し、その解は次式となる。

$$q_n = C_n \exp(-h_n \omega_n t) \cos(\omega_n \sqrt{1-h_n^2} t - \phi_n) + \frac{1}{M_n \omega_n \sqrt{1-h_n^2}} \int P_n(\tau) \exp[-h_n \omega_n (t-\tau)] \sin[\omega_n \sqrt{1-h_n^2} (t-\tau)] d\tau \quad (6)$$

ここで求められた解を式(3)を用いて重ね合わせるにより最終的な解  $u$  が得られる。

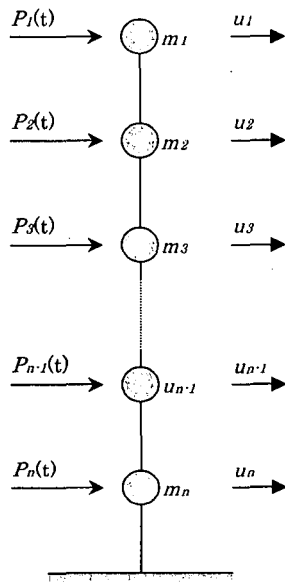


図4 多自由度系モデル

## (2) 変動外力 (波浪荷重)

タワー基礎部に作用する波浪荷重に関しては微小振幅波理論により水粒子速度を計算し以下に示すモリソン式から求める。

$$dF = \frac{\rho}{2} C_D u |u| dA_n + \rho C_M \frac{du}{dt} dV \quad (7)$$

$dF$  : 部材単位長さ当たりの波力 (kN)

$\rho$  : 海水の単位体積重量 (1.03t/m<sup>3</sup>)

$C_D$  : 抗力係数 (1.0)

$C_M$  : 慣性力係数 (2.0)

$u$  : 水粒子の運動速度 (m/s)

$du/dt$  : 水粒子の加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$dA_n$  : 流行方向への投影面積 (m<sup>2</sup>)

$dV$  : 部材単位長さ当たりの体積 (m<sup>3</sup>)

## (3) 変動風のシミュレーションと振動解析

### a) 変動風の時系列

シミュレーションプログラムでは、海上での実験から決定された *Kato et al.*・*Ochi & Shin* の2つのパワースペクトルを用いて、それぞれの変動風の時系列を作成している。今回は *Ochi & Shin* のパワースペクトルを用いる。

*Ochi & Shin* のパワースペクトルは以下に示す周波数範囲ごとに与えられる。

$$S(f_*) = 583 f_* \quad 0 \leq f_* \leq 0.0030$$

$$= \frac{420 f_*^{0.70}}{(1 + f_*^{0.38})^{11.5}} \quad 0.003 \leq f_* \leq 0.1$$

$$= \frac{838 f_*}{(1 + f_*^{0.38})^{11.5}} \quad f_* \geq 0.1 \quad (8)$$

ここで、

$$u_* = \sqrt{C_{10}} U_{10}$$

$$f_* = fh/U_h$$

$$S(f_*) = f S_n(f)/u_*^2$$

$Su(f)$  : スペクトルの密度関数 (m<sup>2</sup>/s)

$u_*$  : 摩擦速度 (m/s)

$f$  : 周波数 (Hz)

$z$  : 海面からの高さ (m)

$U_z$  :  $z$  での平均風速 (m/s)

$U_{10}$  : 高さ10mでの平均風速 (m/s)

$C_{10}$  : 高さ10mの風速により評価された摩擦係数

### b) パワースペクトルから時系列への変換

パワースペクトルに  $Su(f)$  が与えられると、次式により変動風成分  $U(t)$  を作成できる。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2Su(f_i)\Delta f_i} \cos(2\pi f_i t + \varepsilon_i) \quad (9)$$

$f_i$  : スペクトルの計算周波数

$N$  : スペクトルの分割数

$\Delta f_i$  :  $f_i$  周波数での分割周波数幅

$t$  : 時間

$\varepsilon_i$  : 位相

なお、位相はホワイトスペクトルであるので、乱数表を使って決定した。風荷重は平均風速にこの変動成分を加え算定し、 $C_D$  は1.0とした。

応答解析は図4に示したようにランプトマスに近似した振動モデルを用いてモーダルアナリシス法を適用し時刻歴解析を0.1sピッチで、1000ステップ実施した。

## 6. 解析条件

### (1) 風の分布

ワイブルパラメータ ( $k, c$ ) で与えられる北海道の瀬棚町の風頻度分布データ<sup>4)</sup>より、5つの平均風速 (5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s, 25m/s) から応力範囲の値を算出する。

ここで平均風速  $u$  以下の発生累計確率である非超過確率  $Q(u)$  は、(10) 式と表される。

$$Q(u) = 1 - F(u) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right) \quad (10)$$

$c$  : ワイブル  $c$  の値

$k$  : ワイブル  $k$  の値

$u$  : 平均風速

ついで、 $u$  以上になる確率である超過確率  $F(u)$  は次式となる。

$$F(u) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right) \quad (11)$$

これを微分し発生分布  $f(u)$  求まる。

$$f(u) = \left(\frac{F(u)t}{du}\right) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right) \quad (12)$$

この式より風速の出現確率を算出し非超過確率  $Q(u)$  は表1のようなになる。

表1 各平均風速に対するワイブル分布の値

u(m/s)	Q (%)
5	24.0
10	71.2
15	94.3
20	99.4
25	99.9

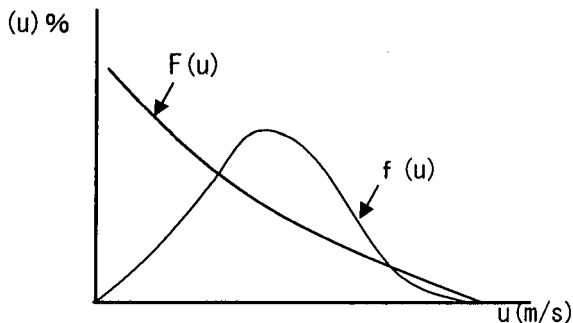


図5  $F(u)$  と  $f(u)$  の関係

これをもとに、出現確率を算出する。計算式は次のようになる。風速  $u(i), u(j)$  間での発生確率は

$$P(u(i) < u < u(j)) = Qu(j) - Qu(i) \quad (13)$$

となり、これらを表2に  $P(\%)$  として示す。

### (2) 風と波の結合

波と風については、相関はあるが、うねりに対しては独立である。したがって、ここでは風と波は強相関であるとして、SMB法にもとづいて行う。即ち、風速に対して十分発達した波として考えられ、各風速に対しての有義波高は次式から算定した。

$$H_{1/3} = \frac{0.3u^2}{g} \quad (14)$$

$u$  : 平均風速

$g$  : 重力加速度

これをもとに各風速に対しての最大波高を求める。

$$H_{\max} = 1.86H_{1/3} \quad (15)$$

より求めた値を表2に  $H_{\max}$  として示す。

このデータをもとに各風速に対する有義周期を求める。

$$T_{1/3} = 3.86\sqrt{H_{1/3}} \quad (16)$$

より求めた値を表2の  $T_{1/3}$  に示す。こうして、瀬棚町での年間の風と波の発生確率は表2のように得られる。ただし、この海象は瀬棚町における波浪よりも大きいと考えられる。ちなみに、瀬棚町における最大波高は周期14.2秒、 $H_{1/3} = 5$ mである。ここでは、安全側の検討ができるこの海象を用いる。

表2 海象条件に対しての値

海象条件	u (m/s)	$H_{1/3}$ (m)	$H_{\max}$ (m)	P (%)	$T_{1/3}$ (s)
1	5	0.75	1.40	24.0	3.34
2	10	3.00	5.58	47.2	6.69
3	15	7.00	13.00	23.1	10.20
4	20	12.00	22.30	5.1	13.40
5	25	16.00	29.80	0.1	15.40

### (3) 応力範囲の分布

計数期間を20年とし、その間ある海象条件が、その出現確率 ( $P$ ) だけ継続し発生するという前提で、それぞれの海象に対する100秒間のシミュレーション結果で代表させ、その結果を20年間の累積回数に換算した。こうして得られた応力範囲累積分布と海洋構造物で従来行われてきたゼロアップクロス法を利用した計数法と比較してみた。

## 7. 解析結果

### (1) 応答解析結果 (図6~9参照)

#### a) 変位応答

波浪と風が同時作用する場合の変位応答は、特に周期の短い波浪の場合、波の応答と風による高振動成分が重畳された波形となる。

長周期波浪と風が混在する海象では波浪応答が卓越する。

#### b) 応力応答

応力応答は2質点間の相対となり、変位応答が、よりスムーズな波形となる。

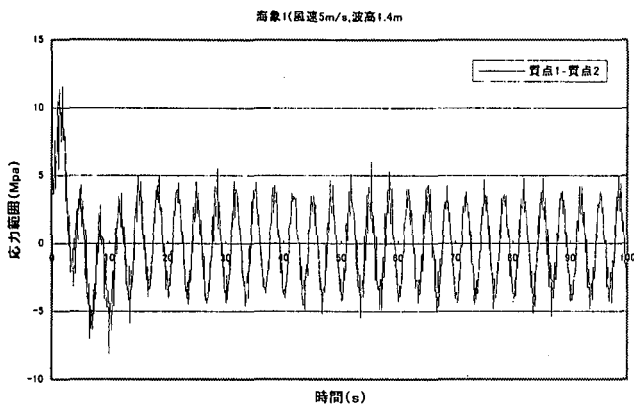


図6 海象1における応力範囲の時刻暦解析結果

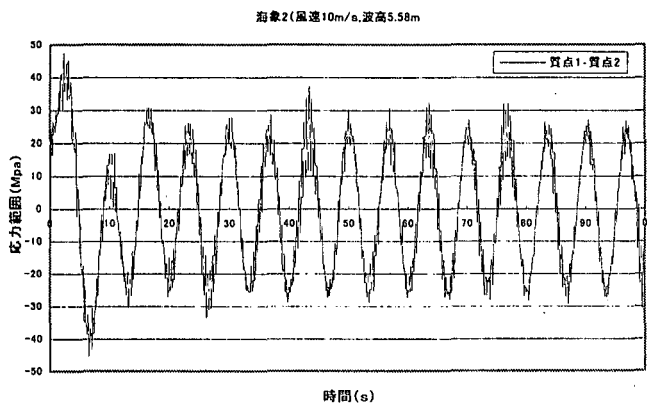


図7 海象2における応力範囲の時刻暦解析結果

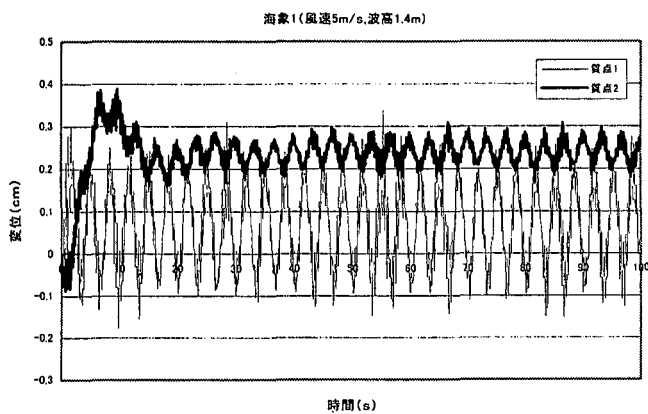


図8 海象1における変位の時刻暦解析結果

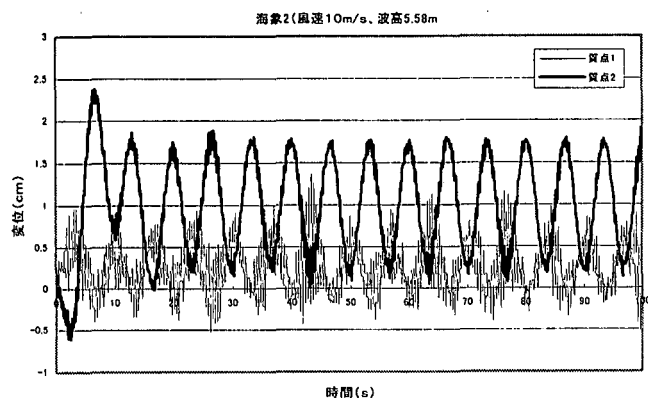


図9 海象2における変位の時刻暦解析結果

## (2) 20年間最大応力範囲と総回数

解析した結果を表3に示す. この表からレインフロー法ではゼロアップクロス法より一桁大きな総回数となる. したがって疲労予測としては, 回数が高周波数成分も計数されるレインフロー法が適している. なお, 最大応力範囲は各部分での20年に1度発生する最大値であり, ナセル直下のタワー部(L<sub>1</sub>区間)と風と波浪を同時に受ける底部(L<sub>3</sub>区間)が大きく, 1本の等価な梁に置き換えた基礎部(L<sub>4</sub>区間)は剛性も大きく断面係数も大きいので最大応力範囲(S<sub>0</sub>)は小さい.

表3 20年間最大応力範囲(S<sub>0</sub>)と総回数(n<sub>0</sub>)

タワー部		ゼロアップクロス法	レインフロー法
直下 (L <sub>1</sub> 区間)	n <sub>0</sub>	1.99 × 10 <sup>8</sup>	1.63 × 10 <sup>9</sup>
	S <sub>0</sub>	109.3Mpa	
中間 (L <sub>2</sub> 区間)	n <sub>0</sub>	3.11 × 10 <sup>8</sup>	1.64 × 10 <sup>9</sup>
	S <sub>0</sub>	80.6Mpa	
底部 (L <sub>3</sub> 区間)	n <sub>0</sub>	9.13 × 10 <sup>7</sup>	9.32 × 10 <sup>8</sup>
	S <sub>0</sub>	83.8Mpa	
基礎部 (L <sub>4</sub> 区間)	n <sub>0</sub>	3.93 × 10 <sup>8</sup>	2.21 × 10 <sup>9</sup>
	S <sub>0</sub>	9.2Mpa	

## (3) 応力範囲のワイブル分布へのフィット

次に, 2つの計数法で読み取ったS/S<sub>0</sub>と回数(n)の関係を図10と図11に示す. 縦軸は表3に示す最大応力範囲(S<sub>0</sub>)で無次元化した値である.

この場合, ワイブル関係は(11)式を展開して次式で与えられる.

$$\frac{S}{S_0} = \left(1 - \frac{\log n}{\log n_0}\right)^{1/h} \quad (17)$$

表3と図10, 図11からわかるようにいずれもレインフロー法は回数が大きく, ワイブルパラメータはナセル直下のタワー部(L<sub>1</sub>区間)では, h=1.0を示し風と波浪を受ける基礎部(L<sub>4</sub>区間)でh=1.6程度である. なお, 波浪を受ける我が国における海洋構造物ではh=0.85程度である.

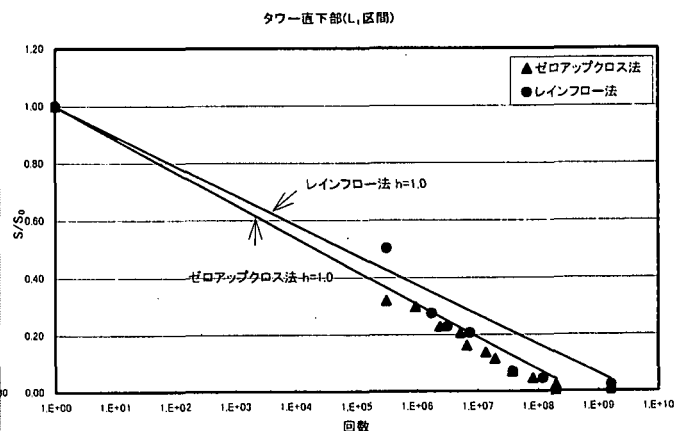


図10 タワー直下部におけるS/S<sub>0</sub>と回数(n)の関係

タワー基礎部(L<sub>1</sub>区間)

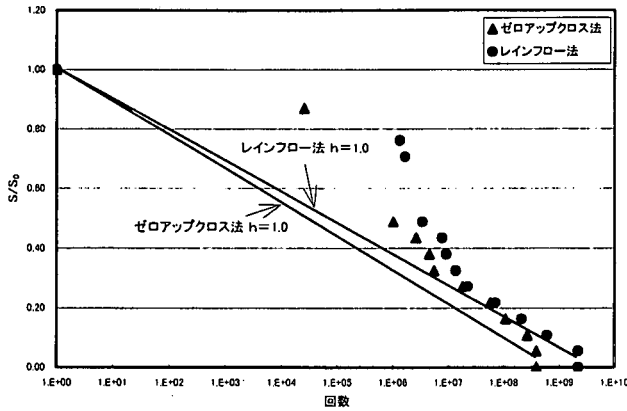


図11 タワー基礎部における $S/S_0$ と回数(n)の関係

#### (4) 疲労損傷度の比較

2つの計数法で得られたワイブル分布で表した応力範囲と回数の関係からここでは20年間の疲労損傷度を推定してみる。

疲労損傷度(D)<sup>5)</sup>は(18)式で与えられる。

$$D = \frac{n_0}{a} \cdot \frac{S_0^m}{(\ln n_0)^{m/h}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right) \quad (18)$$

ここで $\bar{a}$ , mは疲労曲線を示すパラメータでありNSデザインルール<sup>6)</sup>のF2では $\bar{a} = 10^{11.63}$ , m=3.0である。 $\Gamma$ はガンマ関数を示している。

タワー直下部で疲労損傷度(D)を推定してみると、表7-1に示されたようにレインフロー法では、最大応力範囲( $S_0$ )=109.3Mpa, 総回数( $n_0$ )= $1.62 \times 10^9$ である。これを計算すると疲労損傷度(D)=1.22となり、20年間の寿命としては16.4年となる。一応、風力発電施設の供用期間より長い、この場合は少し安全性が低いという結果となった。

一方、ゼロアップクロス法でカウントした場合には、疲労損傷度(D)=0.52となり、20年間の寿命としては38.5年となる。

したがって、高周波数成分を読み取る必要がある、従来のゼロアップクロス法では、疲労予測が不十分である。

## 8. おわりに

本研究より得られた結論を以下のように整理し示す。

- (1) 波浪と風が同時作用する場合の応力応答は変位応答と類似するが、高周波数成分が短周波数応答に重畳した波形となる。
- (2) 計数期間を20年とし、その間ある海象条件下にさらされると仮定して、ゼロアップクロス法とレインフロー法により応力の時刻歴応答から、応力範囲と回数の関係を求め、ワイブル近似し、そのパラメータを得た。これより疲労寿命を推定した結果、2つの計数法では、寿命に約2.35倍の差が出る事が判明した。このように、洋上風力発電施設の疲労設計には、レインフロー法のような高周波数成分が読み取れる計数法が不可欠である。

#### 参考文献

- 1) 井口高志ほか：海上風力発電の優位性の研究，海洋開発論文集，Vol. 16, pp. 141-146, 2000.
- 2) (社)日本鋼構造協会：指針・解説／設計例／資料編，鋼構造物の疲労設計指針同解説，技報堂出版，pp. 261~273.
- 3) 関田欣治ほか：基礎構造が異なる海上風力発電施設の波浪及び風に対する振動特性の解析，海洋開発論文集，Vol. 17, pp. 55~60, 2001.
- 4) 北海道瀬棚町：瀬棚町新エネルギービジョン策定一洋上風力車建設事業化調査一報告書，p. 144, 2001.
- 5) Almar-Næss, Fatigue Handbook, Offshore structures, Tapir, pp. 412-413, 1985
- 6) NS 3472 Design rules for steel structure, Norges Standardiseringsforbund, 1984