

18 最悪短期海象に基づく波浪荷重の長期分布の推定手法

構造強度部 河邊 寛

1. 緒言

船体構造部材の強度評価は、想定する航行状態の下において、部材に座屈・大変形および疲労亀裂の発生の有無について検討することである。このときの想定荷重は、座屈・大変形に対しては就航期間に生じる最大荷重を、疲労強度評価に対しては変動する作用荷重の頻度分布を求めることが要求される。両者の想定荷重において支配的な波浪荷重の頻度分布は、その長期分布により推定することができる。筆者は、文献1)、2)において、波浪荷重の長期分布と想定海象との関係を調べ、次のような結論を得た。

(1) 長期分布を構成する短期分布の中で短期分布のパラメータが最も大となる最悪短期海象が、長期分布において超過確率の10⁻⁸付近の極値を支配する。

(2) 長期分布の分布形状をWeibull分布で近似すると、その分布パラメータは想定海象の統計量の中で最悪短期海象の平均波周期ランクの波高頻度分布から決定できる。

この結果によれば波浪荷重の長期分布は最悪短期海象とその短期パラメータが支配的である。船体構造部材の強度評価では、構造部材に生じる応力の頻度分布が問題となる。波浪による応力の長期分布を求めるには、応力の最悪短期パラメータを決定すればよい。しかし、そのためには規則波中の応力の応答関数が必要であり、それには離散化解析法³⁾のように内外圧の変動荷重を有限要素モデル化された船体構造に負荷する計算を相当数回行わなければならない。応力の長期分布の計算は、この課程が工数のほとんどの割合を占めている。応力の最悪短期パラメータが容易に推定できれば、数値計算の工数を減らし長期分布を簡単に求めることができる。

本報告は、最悪短期海象の概念をさらに拡張し、波浪による応力の長期分布を必要最小限の構造解析から推定する手法を開発することを目的とするものである。ストリップ法の計算結果(運動、波浪変動圧、曲げモーメント等の応答関数)から最小限の構造解析を行い、強度評価すべき構造部材の最悪短期海象およびその状態での応力の最悪短期パラメータを推定し、波浪による応力の長期分布を求め最大荷重と疲労被害度を予測する手法を開発する。数値計算例に21000トン型バルクキャリアを取り上げ、2重底構造の応力の長期分布と疲労被害度の簡易推定を行う。

2. 波浪荷重の長期分布の簡易推定法

船体構造には、船体を梁と看做したときの垂直曲げモーメント、水平曲げモーメント、横断面には波浪変動圧、内部貨物の慣性力による荷重など各種荷重成分が異なる振幅、位相で同時に作用し、その結果、生じる応力は複雑な応答をする。本報告では、これらの荷重成分毎に生じる応力を取り扱い、それらの応力の長期分布を簡易に推定する方法を導く。複数の荷重の同時性の問題は最大値および疲労被害度の相関係数⁴⁾によって考慮することとする。

2.1 想定海象と応力の長期分布の分布パラメータの推定

2.1.1 最悪短期パラメータの推定

最大のピーク値を持つ応答関数と波のスペクトルとが、同一の周波数においてそれぞれのピークが一致する広義の同調をする海象を最悪短期海象という。最悪短期パラメータとは、応答のピーク

値の標準偏差の値を言う。
 構造部材の応力の最悪短期パラメータと最悪短期海象を、この応答関数の最大のピーク値とその波周波数とで関係付けることができれば、応力の長期分布の計算工数は最小となる。そこで、最悪短期パラメータの値を R_{max} 、最悪短期海象を（有義波高 H_{max} 、平均波周期 T_{max} 、波との相対角 θ_{max} ）、応力の応答関数の最大のピーク値を $(\sigma/h)_{max}$ 、その時の波長・船長比を $(\lambda / L)_{max}$ とすると、以下の関係が成り立つものと仮定する。

$$R_{max} = C(\sigma/h)_{max} H_{max} \tag{1}$$

ここに、 (σ/h) は波振幅 h 、波長 λ の規則波中において構造部材に生じる応力 σ を割った値である。
 また、短期海象は不規則波の進行方向の広がり方を考慮した短波頂不規則波とする。
 C は荷重、構造の性質によって決まる常数とする。この常数は荷重の種類、構造の形式、解析対象部位によって決定される値で、多数の構造解析結果をフィードバックして求められるものである。
 最悪短期海象の平均波周期 T_{max} は、短期不規則海面の波スペクトルを ISSC スペクトルで近似する時、ピーク円周波数 ω_{max} と平均波周期との関係形式よりは次式より求められる。

$$T_{max} = 0.77 \frac{2\pi}{\omega_{max}} = 0.77 \sqrt{\frac{2\pi L}{g}} \left(\frac{\lambda}{L}\right)_{max} \tag{2}$$

また、平均浪周期 T_{max} と最大有義波高 H_{max} との関係は、例えば、想定海象を北大西洋の海域とすれば文献2) の Table 1 のように与えることができる。

2.1.2 長期分布パラメータ

最悪短期海象と最悪短期パラメータが求められると、波浪荷重の長期分布を次式の Weibull 分布で近似した時の分布パラメータは次のようになる。

$$Q(\sigma) = \exp \left\{ -\left(\frac{\sigma}{\alpha_{\sigma}}\right)^{\beta_{\sigma}} \right\} \tag{3}$$

ここに、 α_{σ} ：尺度パラメータ、 β_{σ} ：形状パラメータ。
 形状パラメータは、All Headings の長期分布の時は、想定海象を北大西洋、北太平洋および日本-ペルシャ湾航路の海象条件では、文献1) の方法を参考に 1000.00 表示の海象頻度表を作成し、各波周期毎の波高頻度分布の Weibull 分布パラメータから、Table 1 のように与えられる。
 尺度パラメータは次式となる。

$$\alpha_{\sigma} = \sigma_{-8} \{ 8 \ln (10) \}^{-1/\beta_{\sigma}} \tag{4}$$

$$\sigma_{-8} = R_{max} \sqrt{2 \ln (1000)} \tag{5}$$

σ_{-8} は、長期分布の超確率 $Q=10^{-8}$ の応力の値であり、最悪短期パラメータから上記の式で近似できる¹⁾。
 以上のように、応力の応答関数の最大ピーク値 $(\sigma/h)_{max}$ とその波周期 $(\lambda / L)_{max}$ 、波との相対角 θ_{max} の3点の値より、Table 1 の各海象のパラメータを用いて応力の長期分布が推定可能となる。

Table 1 各種海象の Weibull 分布形状パラメータ

mean wave period T_{max}	North Atlantic		North Pacific		Japan-Persian Gulf route	
	β_{σ}	H_{max}	β_{σ}	H_{max}	β_{σ}	H_{max}
6.5	0.6935	9.5	0.7310	10.5	0.7918	10.5
7.5	0.8261	11.5	0.7912	11.5	0.8392	10.5
8.5	0.8616	11.5	0.8113	12.5	0.8110	10.5
9.5	0.8930	16.5	0.8132	13.5	0.8221	10.5
10.5	0.8993	17.5	0.8223	13.5	0.8322	9.5
11.5	0.8933	16.5	0.8165	12.5	0.8227	8.5
12.5	0.8727	15.5	0.8178	12.5	0.7901	7.5
13.5	0.7527	13.5	0.8539	11.5		

2.2 船体構造部材の応力応答と荷重の関係

波浪により船体構造部材に生じる応力は成分は、船体梁としたときの垂直曲げモーメント、水平曲げモーメントによる応力成分と、横断面に作用する波浪変動圧と内部貨物の慣性力による応力成分とがある。ここでは、前者を縦荷重成分によ

縦強度応力 σ_v 、 σ_H 、後者を横荷重成分による横強度応力 σ_{out} 、 σ_{in} と言う。なお、縦強度応力のねじりモーメントによる成分は無視する。

縦強度応力および横強度応力のそれぞれの応答関数の最大ピーク値が生じる海象・荷重条件が明らかとなれば、その海象 $((\lambda / L)_{max}$ 、波との相対角 θ_{max}) の荷重を用いて構造解析を実施することによって、応力の応答関数の最大ピーク値 $(\sigma/h)_{max}$ が求められ、前節で述べたように最小限の構造強度解析結果から応力の長期分布が推定できる。

縦強度応力 σ_v 、 σ_H は、ストリップ法によって垂直曲げモーメント、水平曲げモーメントの断面力が計算されると、断面係数からただちに該当箇所の構造部材に生じる応力の値に換算することができるので、応力応答関数は比較的簡単に計算することができる。

これに対して横強度応力 σ_{out} 、 σ_{in} は、波浪変動圧および内部貨物の慣性力を有限要素でモデル化された構造に負荷して応力の値を求めなければならない。波浪変動圧、貨物の慣性力は作用する位置ごとに振幅、位相が異なり、喫水線付近での接水位置の変化による波浪変動圧の非線形性などのため、波との出会い周波数毎に構造の有限要素モデルの時刻歴応力解析をして応力応答関数を計算しなければならない。

深澤⁵⁾ は波浪変動圧と横強度応力の σ_{out} の応力応答関数について、バルクキャリアの広範な計算結果から考察をおこない、簡易的に精度の良い応力応答関数の推定法を導いている。それによると、「一つの規則波の出会い周期の間において、波上側の喫水線の波浪変動圧が最大になる瞬間の荷重を負荷した時が構造各部材の応力の最大値、それから位相を 180° ずらした瞬間の荷重が応力の最小値となり、両者の波浪変動圧の差の荷重を負荷した時の応力が σ_{out} の応力振幅を与える。(最大-最小法と称している)」との結論を導き、時刻歴応力解析を省略して計算の工数を減らすことに成功している。さらに、 σ_{out} の応力応答関数の最大振幅を与える波浪状態は、船体運動の Roll 振幅が最大となる時もしくは波上側の喫水線の波浪変動圧が最大となる時であることも示している。

本研究においても、後に示す数値計算例から同様の結果が得られ、 σ_{out} の推定は深澤の提案する方法が支持される。

内部貨物の慣性力によって生じる横強度応力の σ_{in} の応力応答関数の最大振幅は、深澤の波浪変動圧の推定を基に次のように求める。一つの条件としては Roll 同調時に最大値が生じ得る。他方の条件としては、波浪変動圧の最大圧力が生じる喫水線の変動圧がキーワードとすれば、内部貨物の最大慣性力が生じる箇所はホッパー斜板部であるので、この箇所の慣性力が Roll 同調以外の波周期でピークを持つ時が σ_{in} の応答関数の最大ピークを生じることになる。

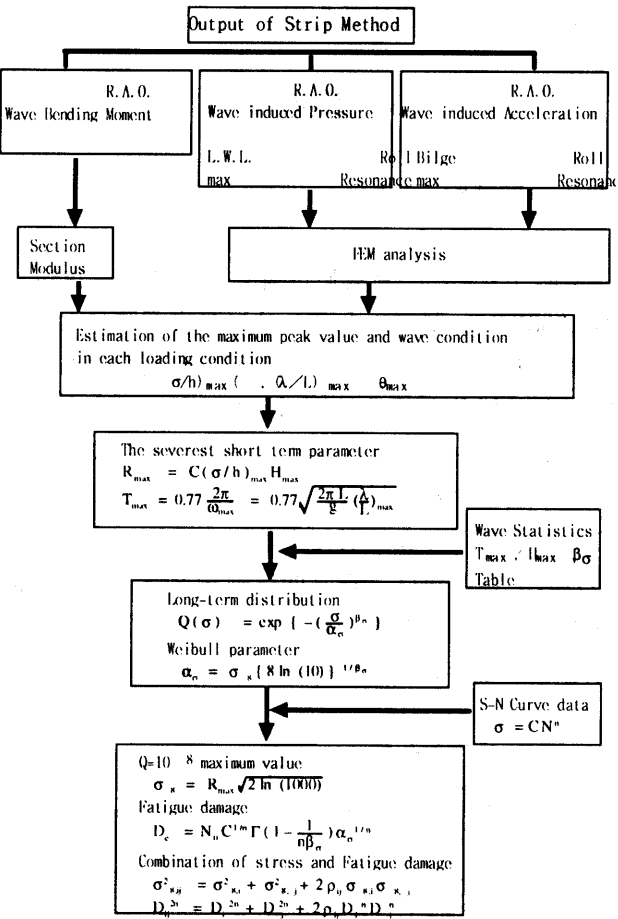


Fig.1 応力の最大値、疲労被害度の簡易推定

2. 3 応力の最大値、疲労被害度の簡易推定

以上より、船体運動の計算結果から構造の応力の長期分布を簡易的に計算する流れを Fig. 1 のように書くことができる。

縦強度応力は、運動計算の断面力の応答関数からそのまま応力の最大ピーク値を求める。横強度応力の波浪変動圧による成分は、静止喫水線位置の応答関数に注目し、Roll 同調時およびそれ以外でピーク値が生じる2つの状態の荷重を構造に負荷して大となる方を応力の最大ピークとする。内部貨物の慣性力による応力成分は、ビルジ部の圧力に注目して、Roll 同調時とそれ以外の波周期でピークとなる波周期の荷重を負荷して大となる方を応力の最大ピークとする。

これらの荷重成分の応力応答の最大ピーク値から、式(4)、(5)およびTable 1の想定海象より長期分布パラメータを求め、応力および疲労被害度の合成は相関係数を用いる。

3. 数値計算例

3.1 供試船

文献1)、2)で数値計算に用いた L=285m、210,000DWT 型バルクキャリアの満載時における船体中央部付近のホールド内応力の長期分布を推定した。対象とする箇所は、Fig. 2 に示すように①二重底センターラインロースツール交差部、②二重底中央船底外板、③二重底左舷ホッパーとの交差部応力の3箇所である。

応力の応答関数は、垂直曲げモーメント、水平曲げモーメント、波浪変動圧および内部貨物の慣性力をそれぞれ個別に作用させて求めた。

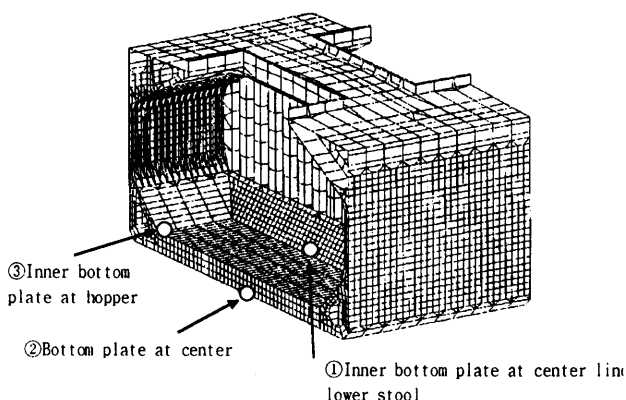


Fig. 2 210,000DWT バルクキャリアの応力解析箇所

3.2 応力の長期分布の簡易推定の精度

2.1 節の方法をから、3ヶ所の σ_v 、 σ_H 、 σ_{out} 、 σ_{in} の4成分の応力の All headings の長期分布を Table 1 に示す北大西洋、北大平洋、日本-ペルシャ湾航路の海象毎に求めた。さらに、波浪変動圧および内部貨物の慣性力が同時に作用した時の応力 σ_{in+out} 、縦曲げモーメントと水平曲げモーメントが同時に作用した時の応力 σ_{v+H} 、および4成分の荷重が全て同時に作用した時の応力 σ_{Total} の長期分布を文献6)の方法による相関係数によって合成した。

長期分布の分布形状の推定精度の検証として、式(3)の形で推定される長期分布から、構造部材の疲労被害度を計算した結果 D_e と、厳密に短期海象の疲労被害度を想定海象の頻度表にわたって積分した疲労被害度 D_0 とを比較することによって行う。すなわち、応力の全作用回数を N_0 、構造物の S-N 線図を次のように与えると、

$$\sigma = C N^n$$

応力の長期分布を式(3)の Weibull 分布で表した時の疲労被害度 D_e は次式となる。

$$D_e = N_0 C^{1/n} \Gamma\left(1 - \frac{1}{n\beta_\sigma}\right) \alpha_\sigma^{-1/n} \quad (6)$$

また、短期海象の疲労被害度を想定海象の頻度表にわたって積分した疲労被害度 D_0 は次式となる²⁾。

$$D_0 = N_0 C^{1/n} 2^{-\frac{1}{n}} \Gamma\left(1 - \frac{1}{2n}\right) \int_0^\infty R(H, T, \theta)^{-\frac{1}{n}} p_R(R(H, T, \theta)) dR(H, T, \theta) \quad (7)$$

S-N 線図の値として、リブ付荷重非伝達十字継ぎ手の値⁷⁾を参考に次の値とした。

$$\begin{aligned} C &= 7.0525 \times 55.0 \text{ kgf/mm}^2 \\ n &= -0.30 \quad (\text{文献7)の値は}-0.2564) \end{aligned}$$

想定海象を北大西洋、北太平洋および日本-ペ

ルシャ湾航路の海象とした時の、長期分布の超確率が $Q=10^{-8}$ の値 σ_{λ} と疲労被害度 D_e の推定結果を Fig. 2、3 に示す。それぞれの横軸は厳密に長期分布を計算して求めた値、縦軸は本研究で提案する最悪短期海象に基づく応力の応答関数の最大ピーク値 $(\sigma/h)_{\max}$ とその波周期 $(\lambda/L)_{\max}$ 、波との相対角 $\theta_{\max}$ の3点の値より推定した値である。

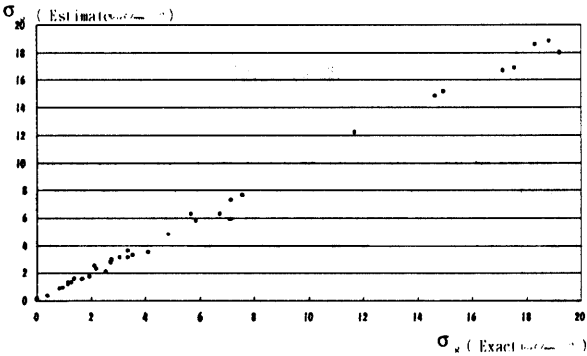


Fig.2 a $Q=10^{-8}$ の最大値の推定（北大西洋）

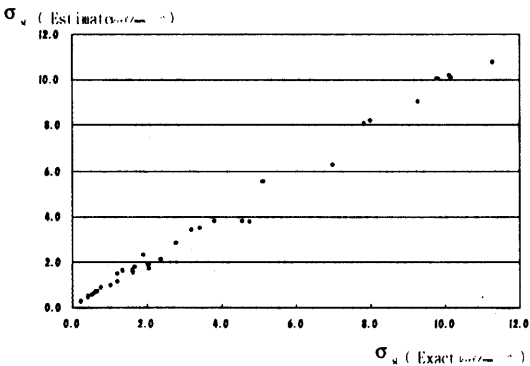


Fig.2 b $Q=10^{-8}$ の最大値の推定（日本－P G 航路）

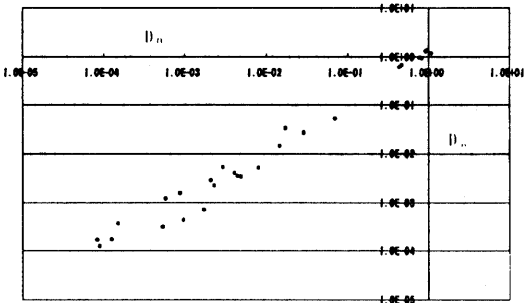


Fig. 3 a 疲労被害度の推定（北大西洋）

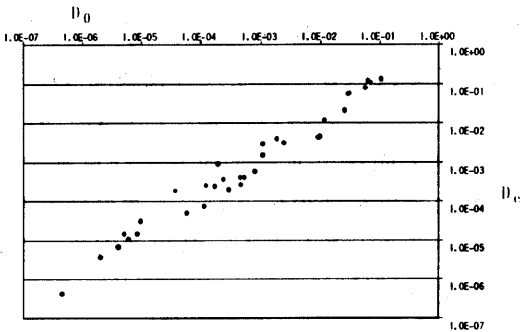


Fig. 3 b 疲労被害度の推定（日本－P G 航路）

図に見られるように、本研究で提案する応力の応答関数の最大ピーク値のみの情報から推定された値は厳密に計算した値と良い一致をすることが確かめられる。しかし、想定海象によっては一部の推定値が厳密値から若干外れることもある。その原因として以下のようなことが考えられる。

「最も大きいピークを持つ波向きの応答関数のピークと波スペクトルのピークとが一致する広義の同調」が理論上の最悪短期海象を与える。しかし、この理論上の波向きとピーク周波数から計算される波周期が、応答関数の形状と想定海象によっては厳密に計算した結果から得られる長期分布の最悪短期海象の波向き、波周期と一致しないことがある。

この原因は、2つの要因が考えられる。

- (1) 応答関数の形状と短期パラメータとの関係。
- (2) 数値計算に用いた北大西洋、北大平洋、日本-ペルシャ湾航路の海象頻度表において、波周期ごとの最大有義波高がそれぞれ異なった特性を有している。

第一の短期パラメータと応答関数-波スペクトルとの関係は、横強度応力 σ_{out} 、 σ_{in} において、深澤が指摘しているように、応力の応答関数で最大のピークが発生する状態が2種類あることによって生じる問題である。すなわち、横強度応力の応力の応答関数が、Roll 同値時と波上側の静止時の喫水線位置の波浪変動圧が最大となる状態において、それぞれピークを有すること場合がある。そのため、最大の応答関数のピーク値に対応する波周期が必ずしも最悪短期パラメータを与えない場合がある。

第二の想定海象と最悪短期海象の問題は、最悪短期パラメータの値 R_{max} を決定する平均波周期に対応する式(3)の最大有義波高 H_{max} が想定海象によってその特性が異なるためである。Fig. 6は、北大西洋、北太平洋および日本-ベルシャ湾航路の海象統計の各平均波周期の最大有義波高の関係を示す。これから、各想定海象から計算される最悪海象の特徴が次のように言える。

(I) 北大西洋

最大有義波高 H_{max} は、平均波周期が $T=10.5$ sec をピークに2次曲線状になっている。このため、理論上の最悪短期海象が $T=10.5$ sec より低い時は、例えば、応答関数から $(\lambda/L)_{max}$ を式(2)に代入して $T_{max}=7.2$ sec と計算となると、厳密に数値計算をした長期分布では、8.5sec くらいに1 sec 程度大きい平均波周期が最悪短期海象になる。逆に 10.5sec 以上の時は1 sec 程度短い平均波周期が最悪短期海象になる。

(II) 北大平洋

概ね北大西洋と同様に、最大有義波高 H_{max} が $T=9.5 \sim 10.5$ sec でピークとなる。また、短波長側の波高が北大西洋よりも高い傾向にある。最悪短期海象の傾向は北大西洋とはほぼ同様に 9.5-10.5sec に集まる。

(III) 日本-ベルシャ湾航路

平均波周期 $T=6.5 \sim 9.5$ sec の範囲で最高有義波高が一定の値となって、10.5sec 以上では平均波周期とともに減少していく。そのため、理論上の最悪短期海象が 10.5sec 以上となった場合は、実際の最悪短期海象は短周期側にピークを持つ応答関数が与えることになる。

このように、想定海象の最大有義波高の特徴によって、最悪短期海象が理論上の値より微妙に変化をするが、Fig. 2、3のように、本研究の値は大きく厳密計算値を外れることなく良い推定結果を与えている。

4. 結論

本報告は、波浪荷重により船体構造に生じる応力の長期分布を最小限の構造解析結果から推定す

る方法を開発するものである。最悪短期海象の概念を拡張し、応力の応答関数の最大ピーク値とその時の波長/船長比、および想定海象から長期分布の分布を Weibull 分布で近似した時の分布パラメータを推定する方法を開発した。この手法を用いてバルクキャリアの二重底の応力の長期分布の超過確率が 10^{-4} の最大値と疲労被害度の推定を行い、厳密に長期分布の計算した値と比較をし満足できる結果を得た。

参考文献

- 1) 河辺寛他：波浪荷重の長期分布と遭遇海象との関係(第1報 波浪荷重の最大値と想定海象)、日本造船学会論文集、第186号、(1999)、pp.319-339
- 2) 河辺寛他：波浪荷重の長期分布と遭遇海象との関係(第2報 疲労被害度と想定海象)、日本造船学会論文集、第187号、(2000)、pp.253-263
- 3) 倉本美男他：波浪中の船体局部応力のシミュレーション手法に関する研究、日本造船学会論文集、第170号、(1991)、pp.425-437
- 4) 船木俊彦他：波浪により船体構造に生じる各種荷重間の相関について、日本造船学会論文集、第180号、(1996)、pp.575-589、および、河辺寛他：(第2報)縦荷重と横荷重により構造に生じる応力間の相関、日本造船学会論文集、第182号、(1997)、pp.541-549
- 5) 深澤塔一他：波浪変動圧によって生じる応力の応答関数と長期発現頻度の簡易推定法に関する研究、日本造船学会論文集、第187号、(2000)、pp.241-251
- 6) 河辺寛他：各種波浪荷重により生じる船体構造部材の疲労被害度の相関係数による合成法、日本造船学会論文集、第188号、(2000)、pp.241-251
- 7) 熊野 厚：疲労強度と海象条件、日本造船学会誌、第774号、(平成5年)、pp.20-23