波浪中弾性振動が大型船の疲労強度に与える影響の評価

正会員 飯 島 一 博*

Evaluation of Effects of Wave-induced Vibrations on Fatigue Damage of Large Ships

by Iijima Kazuhiro, Member

Summary

Low frequency response to normal wave loads and high frequency response due to wave-induced vibrations coexist in the ship's structural loads. This paper addresses the effect of the wave-induced vibrations on long-term fatigue damage in various types of ships. A bulk carrier, a VLCC, and a container carrier are employed as subject ships. A weakly nonlinear method proposed by one of the authors is employed for evaluating the load effects. Slamming loads are separately implemented by using momentum theory. The whole ship is represented by using shell FE model. The calculations are performed for various short-term sea states. Stress cycles are counted by using Rainflow counting method. Then, long-term fatigue damage is evaluated by using the Palmgren-Miner rule. A series of sensitivity analysis is also performed to clarify the characteristics of the fatigue damage by the wave-induced vibrations in oblique seas as well as in head seas. It is shown that the amount of the increase in fatigue damage depends on the wave load characteristics of the ships in waves as well as the structural properties such as natural frequencies of flexible mode.

1. 緒 言

スプリングやホイッピングなどの波浪中弾性振動の問題は古くから扱われ、これまで多くの実験的・解析的研究がなされてきた。ところが、この十数年来の船舶の高速化、大型化や高張力鋼の多用に伴う固有周波数の低下によって、再度この問題が注目されている。波浪中弾性振動は、応力範囲を拡大させ、応力変動の繰り返し数も増加させる。その結果、疲労被害度が増加すること、縦曲げ最終強度の点から縦曲げモーメントが増加することへの懸念からである。

近年の大型船について、Storhaug et al.¹⁾やOkada et al.²⁾は実船計測を行い、レインフロー法により応力頻度を求め、さらに S-N 曲線に疲労被害度を算出した場合の、波浪中弾性振動による疲労被害度の増加について言及している。Storhaug et al.³⁾はさらに大型鉱石運搬船の縮尺模型を用いた水槽実験を行っている。実験ではバラスト状態、満載状態を対象とし、さらに疲労強度にとって最も寄与度の大きな海象条件を選

択している。全応力変動は通常の波浪成分の応力と波浪中弾性振動成分の応力からなると考え、全応力変動による疲労被害度から波浪成分の応力による疲労被害度を差し引いた量を波浪中弾性振動成分の応力による疲労被害度分と考えたとき、バラスト状態で、波浪中弾性振動成分の応力による疲労被害度は全疲労被害度のうち 43%を占めることが示された。また、併せて船速など運航条件が結果に影響することも示された。一方、Okada et al.²⁾はポストパナマックス型コンテナ船について三年間の実船計測を行っている。彼らの報告によればホイッピングにより疲労被害度が増加し、波浪中弾性振動による疲労被害度は通常の疲労被害度と同程度の寄与があるとされた。

水槽実験を中心とした研究事例も多数報告されている。Miyake et al.⁴⁾は固有周波数を同一としながら、船型の異なる二船の縮尺模型について、規則波中の応答を比較し、スプリングング応答の特性が船体形状の影響を受けることを示している。Oka et al.⁵⁾はコンテナ船の縮尺模型を用いた水槽実験を行い、極値の統計的性質が波浪中弾性振動を考慮する場合としない場合とで大きく異なることを示している。Iijima et al., 2009⁶⁾は、捩じりモードの弾性振動を対象とした縮尺模型実験を行い、捩じりモード振動から Warping 変形が生じ、その結果、直応力が増加する可能性を指摘している。

これらの研究にも関わらず、波浪中弾性振動が疲労被害度を与える長期的な影響の特性について系統だった研究結果

* 大阪大学大学院工学研究科

が示されていない。本研究では数値シミュレーションにより、大型鉱石運搬船、VLCC、コンテナ船を対象とし、弾性振動が長期の疲労強度に与える影響について検討を行い、さらにパラメトリックスタディを通してその性質を明らかにする。

2. 解析法

2.1 荷重効果解析法

ここで示す方法は Iijima et al., 2008⁷⁾に詳述され、その検証は Iijima et al., 2009⁶⁾で行われているので、ここでは簡単な記述にとどめる。一般に、微小振幅の並進運動と剛体運動を含む運動は重心点まわりに式(1)により表記できる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{a}} = \mathbf{F}(\mathbf{a}, \dot{\mathbf{a}}, \ddot{\mathbf{a}}, t) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ は質量マトリクスで $\mathbf{F}$ は荷重ベクトルである。荷重ベクトルは変位後の位置で時刻 t において評価されたものである。式(1)は剛体運動についてのみならず、モード法を用いることで弾性変形も同様に考慮することができる。このとき $\mathbf{a}$ は6自由度の剛体変位と変形モード変位からなる一般化変位ベクトルである。式(1)を増分型で表記すれば、

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_a)\Delta\ddot{\mathbf{a}} + (\mathbf{B} + \mathbf{C})\Delta\dot{\mathbf{a}} + (\mathbf{K}_r + \mathbf{K}_s)\Delta\mathbf{a} = \mathbf{F}(\mathbf{a}, \dot{\mathbf{a}}, \ddot{\mathbf{a}}, t + \Delta t) - \mathbf{M}\ddot{\mathbf{a}} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{a}} - \mathbf{K}_s\mathbf{a} \quad (2)$$

となる。ここで $\mathbf{M}_a$ は付加質量マトリクス、 $\mathbf{B}$ は造波減衰係数マトリクス、 $\mathbf{C}$ は構造減衰マトリクス、 $\mathbf{K}_r$ は静水圧と重力による復原力を表すマトリクス、 $\mathbf{K}_s$ は剛性マトリクスである。一方、荷重は概念的に次式で表される。

$$\mathbf{f} = -\iint_S p(\mathbf{a}, \dot{\mathbf{a}}, \ddot{\mathbf{a}}, t) \mathbf{n} dS + \iiint_V \rho_s \mathbf{g} dV \quad (3)$$

ここで、 p は圧力であり、 S は圧力 p の作用する表面積、 $\mathbf{n}$ は表面上の外向き法線ベクトル、 $\rho_s \mathbf{g} = (0, 0, -\rho_s g)$ は $\rho_s g$ を比重とするときの重力ベクトル、 V は体積である。荷重は変位後の位置において評価されたものであり、面積分は波面の変動を考慮して行われる。その結果、波浪に対する線形成分と主要な非線形成分が評価される。

式(3)中の圧力の評価は、線形ポテンシャル理論に基づいた、三次元特異点分布法による。非粘性、非回転、非圧縮、微小動揺など線形ポテンシャル理論に用いられる仮定を設ける。船体は出会い周波数 ω_e の微小波高の波浪場中を一定の速度 U で前進しているものとする。船体は同じ周波数 ω_e

で動揺し、その振幅を微小とみなせるものとする。このとき船体回りのポテンシャルの変動成分は時間変動項 $e^{-j\omega_e t}$ を除いた複素表示により次式で表される。

$$\phi = \phi_0 + \phi_d + \sum_{i=1}^M (-j\omega_e a_i) \phi_i \quad (4)$$

ここで、 ϕ_0 は複素入射波ポテンシャルを表し、 ϕ_d は入射

波に対する散乱ポテンシャル、 ϕ_i は i 番目の単位速度の動揺により生じるラディエーションポテンシャルを表す。上式は $i=1-6$ の剛体運動と $i=7-M$ の弾性変形モードを含んでいる。

これらポテンシャルは、いずれもラプラス方程式を適当な境界条件の下で解いて得られる。境界条件は自由表面における運動学的・動力学的境界条件、無限領域における放射条件、海底における条件と船体表面における表面条件である。前進速度がある場合に厳密に自由表面条件を与えることが困難であることから、Papanikolaou and Shellen⁸⁾にならった簡略化を行う。すなわち、前進速度が出会い周波数に対して十分に小さいと考えると、自由表面条件は前進速度ゼロ、出会い周波数 ω_e のそれと同一とみなすことができる。

このように考えたとき、周波数を出会い周波数に変化させた前進速度ゼロのグリーン関数を拡張的に用いることで、いわゆる特異点分布法が援用できる。一旦、船体回りのポテンシャルが与えられれば、ベルヌーイの定理から、圧力時系列が与えられる。

$$\frac{p}{\rho} = \left[-\frac{\partial \Phi_{tot}}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \Phi_{tot}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{tot}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{tot}}{\partial z} \right)^2 - U^2 \right) \right] - gz \quad (5)$$

ここで、 Φ_{tot} は変動ポテンシャル $\text{Re}[\phi e^{-j\omega_e t}]$ と定常ポテンシャルである。定常ポテンシャルは船体の前進速度から生じる成分を表す。周波数領域で各周波数に対する圧力表現を、動揺の振幅を陽な形で含むように予め得ておき、結果を式(2),(3)に代入することで、流体と構造の連成問題を解く。このようにして、弱非線形の流弾性問題を定式化する。

ところで、波浪中弾性振動の重要な起振力は二次あるいは三次、さらにはより高次の荷重成分である。これらはすでに式(3)の評価時に考慮されている。もうひとつの重要な起振力はホイッピング応答を考慮する際に典型的な衝撃荷重である。衝撃荷重については Th.von Kármán による古典的な運動量理論から導かれる衝撃荷重項 F_I を式(3)に足しこむことで別途考慮する。

$$F_I = \frac{dM_a}{dt} V \quad (6)$$

ここで、 M_a は付加質量を表わし、 V は波面と船体表面との相対速度を表す。三次元形状の付加質量係数を一般的に得ることはコストもかかることから、以下の1)-4)を仮定する。

1) 三次元形状は多数の二次元ストリップ形状に分割され、各ストリップ間の流体力学的な相互の干渉が無視できる。2) 衝撃荷重は波面と物体表面で切り取られる直線に対して直交方向に作用し、作用点は上記直線の中点である。3) 付加質量は上記直線を直径とする半円で代表できる。4) 衝撃荷重は波面を貫入する時にのみ作用する。各ストリップ上で評価された衝撃荷重を長さ方向に積分することで、鉛直、水平、捩じり方向についての全衝撃荷重が得られる。

2.2 疲労被害度評価

前節で紹介した解析手法により得た応力時系列に対して、レインフロー法によって応力変動のカウントを行う。応力時系列には事前に応力集中係数(SCF)を乗じる。得られた応力(RAWと表記)には波浪成分の応力と、波浪中弾性振動成分の応力の両方が含まれている。振動成分が高周波数成分として容易に分離できることに着目して、ローパスフィルタ処理を行った応力を波浪成分の応力とする(LPFと表記)。

Fig.1にRAWとLPFで表される応力時系列の例を示した。Fig.2にはRAWとLPFそれぞれの応力時系列に対して、レインフロー法によって各応力範囲のカウントを行った結果を示した。 N_T を応力カウント総数とするとき、縦軸には N_T -累積頻度を表している。図より弾性振動の影響から、低い応力範囲において頻度が増え、高応力範囲において応力範囲の大きさ自体が増加することがわかる。

得られたヒストグラムを元にS-N曲線を用いる、いわゆるマイナー則を用いて疲労被害度 D を評価する。

$$D = \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (7)$$

ただし、 S は応力範囲のブロック数、 n_i は i 番目のブロックの応力範囲のカウント数、 N_i はS-N曲線から与えられる i 番目のブロックの応力範囲に対する疲労寿命を表す。いわゆるハイバツハ修正を考慮した、S-N曲線は次式で与えられる。

$$N = \begin{cases} C \cdot \Delta\sigma^{-m} & ; \quad \Delta\sigma \geq (10^{-7} \cdot C)^{1/m} \\ C' \cdot \Delta\sigma^{-m'} & ; \quad \Delta\sigma < (10^{-7} \cdot C)^{1/m} \end{cases} \quad (8)$$

ここで $\Delta\sigma$ (MPa)は応力範囲を表す。式(8)中の C, C', m , と m' は例えばUK-HSE(UK-DEn)の資料⁹⁾、あるいは船級協会の発行するガイドラインにより与えられる。本研究では日本海事協会発行のガイドライン¹¹⁾を参考に、Table 1に示す標準的な値を用いた。ハイバツハ修正は応力頻度が 10^7 を超える高い頻度かつ小さな応力範囲に対して適用される。

Table 1 Properties of S-N curve employed for investigation

m	C	m'	C'
4	2.34×10^{15}	7	4.44×10^{21}

次の式のように C_{vib} を定義し、波浪中弾性振動が疲労強度に与える影響を示す指標とする。

$$C_{vib} = \frac{D_{RAW}}{D_{LPF}} \quad (9)$$

D_{RAW} はRAWで表される応力に対して評価された疲労被害度、 D_{LPF} はLPFで表される応力に対して評価された疲労被害度である。式(9)は短期海象における被害度についても長期の被害度についても定義できるので、長期のものについては C_{vib_long} と表記して区別する。

Fig. 1 A sample of time series of RAW stress and LPF stress ($H_{1/3}=8.5\text{m}$, $T_{01}=8.5\text{s}$).

Fig. 2 A sample of cumulative frequency vs stress range counted by rainflow counting method ($H_{1/3}=8.5\text{m}$, $T_{01}=8.5\text{s}$).

3. 計算条件

3.1 対象船

大型鉱石運搬船, VLCC, ポストパナマックス型コンテナ船を解析対象として選ぶ. それぞれの主要寸法は $L \times B \times D-d = 318 \times 55 \times 30-21.3(\text{m})$, $320 \times 60 \times 29.4-18(\text{m})$ と $267 \times 40 \times 24-12.5(\text{m})$ である. 貨物については, 質点としてモデル化し, 全船シェル FE モデル上に分布させた. Table 2 中に次数の低いものから順に 10 個の固有周波数を示しており, Figs. 3-5 は固有モード形状を示している. 縦曲げモードに関する限り, バルクキャリアの固有周波数が最も低く, コンテナ船の固有周波数は最も高い. コンテナ船の最低次の変形モードは捩じり変形である. なお, 以降の時系列計算ではこれら 10 個の弾性変形モードを考慮する.

船体は変断面梁と見なされ, その断面は開断面となっている部分があることから, 一般に船体の水平曲げと捩じり変形は連成する. 横断面の大半が開断面で, 各断面のせん断中心位置が図心と大きくかい離しているコンテナ船の固有モードにはこのことが明確に表れている(3, 4, 6, 7, 9 番目のモード). 一方で, 大型鉱石運搬船と VLCC では連成の程度が低く, VLCC の場合では水平曲げモード(2, 5 番目のモード)と捩じりモード(3, 7, 10 番目のモード)が明確に見分けられる.

Fig. 4 Natural modes of VLCC.

Fig. 3 Natural modes of bulk Carrier.

Fig. 5 Natural modes of container ship.

Table 2 Summary of natural frequencies.

Ore Bulk Carrier		VLCC		Container Carrier	
Freq	Mode	Freq	Mode	Freq	Mode
0.502Hz	VB	0.678Hz	VB	0.594Hz	T
0.608Hz	HB	1.119Hz	HB	0.893Hz	VB
0.861Hz	T	1.388Hz	T	1.066Hz	T-HB
1.105Hz	VB	1.519Hz	VB	1.775Hz	T-HB
1.367Hz	HB	2.209Hz	HB	1.886Hz	VB
1.719Hz	VB	2.416Hz	VB	2.415Hz	T-HB
1.808Hz	AX	2.639Hz	T	2.506Hz	T-HB
1.869Hz	T	2.657Hz	VB	2.805Hz	VB
2.117Hz	HB	3.289Hz	VB	3.252Hz	T-HB
2.279Hz	VB	3.335Hz	T	3.442Hz	VB

VB: Vertical Bending, HB: Horizontal Bending, T: Torsion, AX: Axial

3.2 前提条件

解析を行う条件によって異なる結果も導かれうる。本研究で実施するシリアル計算の解析条件を以下にまとめる。

- 1) 波高が高い海象中での減速を考慮し、前進速度は概ねサービス速度の半分で一定であるとする。大型鉱石運搬船と VLCC については 5m/s(10knot)を仮定し、コンテナ船については 6.7m/s(13.5knot)とする。
- 2) 構造詳細が与えられていないので、応力集中係数と疲労被害度を評価する際の S-N 曲線については適当な仮定を設ける。応力集中係数を 1.5 とし、S-N 曲線の中から勾配 $m=4$ とする母材に対する曲線を選んだ。
- 3) 特定の航路と運航条件を与えない。IACS の北大西洋を含む world-wide の波浪頻度表¹⁰⁾を用いる。
- 4) 波向きを予め定めることは困難であるので、波浪中縦曲げ二節振動がより生じやすく疲労被害度への影響も大きめに生じる可能性があるものの、特に断りのない限り常に波状態を仮定する。
- 5) 解析時間の短縮を狙い、常に満載状態を仮定する。大型鉱石運搬船や VLCC では、バラスト状態でスラミングによる弾性振動が発生しやすいと考えられるが、予備検討で通常の波浪成分による疲労被害度を調べたと

ころ、満載状態の方が応力範囲が大きい傾向があり、疲労被害度にも寄与が大きいと判明したためである。

- 6) 短期海象は長波頂の ISSC スペクトルによる。
- 7) 船体の構造減衰は明確ではない。ここでは各モードに対して臨界減衰比 $\gamma=1\%$ の減衰を与える。
- 8) 特に断りのない限り、船体中央のデッキ部を評価対象とする。

4. 結果と考察

4.1 大型鉱石運搬船

大型鉱石運搬船について、弾性振動の疲労被害度への影響を示す短期海象ごとの指標 C_{vib} を Fig. 6 に示す。 C_{vib} は 1.0 から 10 程度までの範囲であることがわかる。有義波高が高い短期海象で C_{vib} の値が大きくなるのは、大波高中では非線形荷重の寄与が相対的に大きく、高次の非線形荷重が振動モードを起振するスプリングが生じるからであると考えられる。さらに、平均周期の短い短期海象においても C_{vib} が大きくなっているが、平均周期の短い海象中で受ける線形あるいは高次荷重の出会い周波数成分と船体の固有周波数が一致して、振動成分が増幅され易くなるためである。

各短期海象での疲労被害度に波浪頻度を乗じて足し合わせ解析を行うと、 C_{vib_long} が得られる。今回の計算条件の下では 1.31 となった。通常の波浪成分応力のみで疲労被害度を評価したときに比較して、波浪中弾性振動成分の応力により 30%ほど疲労被害度が大きいことを表している。

Fig. 7 はそれぞれの短期海象における疲労被害度が全疲労被害度に占める割合、すなわち疲労被害度から見たそれぞれの海象の重要度を示している。重要な海象は有義波高 5.5-8.5m 程度の比較的穏やかなものであることがわかる。これは発現確率 10^{-1} から 10^{-2} の海象に相当する。最も寄与度が大きな短期海象は有義波高 7.5m、平均周期 10.5s のものである。同様に Fig. 8 には波浪成分の応力について疲労被害度を求め、各短期海象の全疲労被害度への寄与度を示す。Fig. 7 とほぼ同様の結果であることがわかる。

Hs/Tz	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
16.5								3.95	2.46	2.06	1.96	1.82	1.77			
15.5							4.05	3.34	2.50	1.91	1.69	1.72	1.42	1.55		
14.5						6.09	3.31	2.82	2.22	1.87	1.57	1.60	1.33	1.41		
13.5						4.91	2.93	2.33	1.98	1.71	1.58	1.49	1.28	1.35	1.46	
12.5					7.85	3.87	2.67	2.07	1.85	1.30	1.29	1.34	1.42	1.25	1.30	
11.5					6.16	3.17	1.99	1.80	1.60	1.50	1.49	1.27	1.24	1.23	1.21	1.08
10.5					4.77	2.67	1.76	1.62	1.42	1.08	1.29	1.17	1.27	1.10	1.11	1.05
9.5				8.09	3.61	2.15	1.51	1.48	1.33	1.24	1.16	1.11	1.13	0.95	1.01	1.19
8.5				6.55	2.71	1.92	1.40	1.32	1.42	1.30	1.13	1.11	1.27	1.15	1.31	1.14
7.5				3.48	1.93	1.58	1.25	1.34	1.15	1.08	1.02	1.14	1.15	1.14	1.02	1.15
6.5			2.89	3.41	1.75	1.50	1.13	1.13	1.09	1.13	1.12	1.06	1.13	1.29	1.37	1.19
5.5			1.79	1.92	1.92	1.41	1.32	1.03	1.01	1.10	1.19	1.10	1.11	1.03	1.09	0.94
4.5			1.91	2.14	1.61	1.15	1.09	1.09	1.01	1.02	1.04	1.09	1.38	1.04	0.98	
3.5		2.34	1.64	1.66	1.49	1.13	0.94	1.08	1.34	1.15	1.29	1.15	1.02	0.94	1.25	
2.5		1.82	1.85	1.47	1.02	1.21	1.02	0.91	1.40	1.04	1.19	0.90	1.01	1.22		
1.5		4.13	2.59	1.28	1.58	1.27	1.07	0.86	0.93	1.61	1.10	1.22	1.04			
0.5																

Fig. 6 C_{vib} value defined in Eq. (9) for the respective short-term sea states. Bulk carrier case.

Hs/Tz	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
16.5								0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000			
15.5							0.000	0.002	0.003	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000		
14.5						0.000	0.001	0.004	0.006	0.005	0.003	0.001	0.000	0.000		
13.5						0.000	0.002	0.008	0.011	0.008	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000	
12.5					0.000	0.001	0.004	0.014	0.018	0.011	0.007	0.003	0.001	0.000	0.000	
11.5					0.000	0.001	0.007	0.024	0.028	0.020	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
10.5					0.000	0.002	0.012	0.037	0.039	0.022	0.013	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
9.5					0.000	0.004	0.019	0.049	0.051	0.030	0.013	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
8.5					0.000	0.005	0.026	0.068	0.051	0.031	0.013	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
7.5					0.000	0.007	0.033	0.070	0.056	0.027	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
6.5				0.000	0.000	0.008	0.031	0.064	0.045	0.020	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
5.5				0.000	0.000	0.007	0.027	0.041	0.028	0.013	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
4.5				0.000	0.000	0.003	0.014	0.023	0.011	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.005	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5																

Fig. 7 Fatigue damage contributions from each short-term sea state, obtained for RAW stress. Bulk carrier case.

Hs/Tz	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
16.5								0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000			
15.5							0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000		
14.5						0.000	0.000	0.001	0.003	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000		
13.5						0.000	0.001	0.003	0.006	0.005	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	
12.5					0.000	0.000	0.002	0.007	0.010	0.009	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000	
11.5					0.000	0.000	0.003	0.013	0.018	0.013	0.007	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
10.5					0.000	0.001	0.007	0.023	0.027	0.021	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
9.5					0.000	0.002	0.013	0.033	0.036	0.024	0.012	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
8.5					0.000	0.003	0.018	0.045	0.040	0.024	0.012	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
7.5					0.000	0.004	0.026	0.052	0.049	0.025	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
6.5				0.000	0.000	0.005	0.023	0.056	0.042	0.018	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
5.5				0.000	0.000	0.005	0.021	0.039	0.028	0.012	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
4.5				0.000	0.000	0.003	0.013	0.021	0.011	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5																

Fig. 8 Fatigue damage contributions from each short-term sea state, obtained for LPF stress. Bulk carrier case.

4.2 VLCC

Figs.9-11 に VLCC の結果を示す。大型鉱石運搬船の場合と同様に、有義波高が大きく、平均周期が短い短期海象において C_{vib} が大きい傾向があり、一部で C_{vib} は 20 を超えてい

る。ところが、最も寄与度の大きな海象は波浪頻度表の中央に位置する海象であり、遭遇頻度を考慮して C_{vib_long} を求めたところ、1.32 が得られた。

Hs/Tz	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
16.5								1.95	1.86	1.56	1.34	1.44	1.37			
15.5							2.39	1.75	1.59	1.52	1.23	1.37	1.30	1.42		
14.5						3.32	2.44	1.94	1.56	1.48	1.42	1.35	1.30	1.30		
13.5						2.96	2.25	1.66	1.50	1.41	1.24	1.33	1.30	1.27	1.16	
12.5					5.71	2.45	1.78	1.71	1.31	1.36	1.30	1.25	1.28	1.08	1.29	
11.5					5.22	2.47	1.67	1.37	1.43	1.27	1.33	1.19	1.30	1.11	1.15	1.15
10.5					4.95	2.48	1.56	1.48	1.54	1.33	1.25	1.21	1.16	1.15	1.07	1.08
9.5					21.05	4.82	2.01	1.50	1.42	1.33	1.23	1.15	1.18	1.10	1.13	1.04
8.5					16.43	4.61	2.07	1.48	1.38	1.37	1.17	1.13	1.11	1.12	1.17	1.08
7.5					12.64	3.38	1.58	1.52	1.30	1.28	1.12	1.14	1.11	1.13	1.11	1.00
6.5					10.08	10.46	2.82	1.86	1.41	1.18	1.21	1.09	1.08	1.11	1.03	1.05
5.5					5.52	6.16	2.11	1.68	1.38	1.16	1.21	1.14	1.13	1.03	1.04	1.01
4.5					5.55	4.12	2.20	1.28	1.38	1.00	1.18	1.14	1.10	1.01	0.99	1.03
3.5		7.13	3.59	2.63	1.35	1.25	1.27	1.09	0.99	1.03	1.06	0.98	1.18	1.02	0.86	
2.5		2.54	2.27	1.59	1.37	1.31	1.16	1.17	1.15	0.84	0.97	1.11	1.01	1.33		
1.5		2.16	2.32	1.43	1.17	1.04	0.90	1.14	0.95	1.01	1.20	1.24	0.80			
0.5																

Fig. 9 C_{vib} value defined in Eq. (9) for the respective short-term sea states. VLCC case.

Hs/Tz	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
16.5								0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000			
15.5							0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000		
14.5						0.000	0.001	0.003	0.005	0.004	0.003	0.001	0.000	0.000		
13.5						0.000	0.002	0.005	0.005	0.008	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000	
12.5					0.000	0.001	0.003	0.013	0.015	0.013	0.007	0.003	0.001	0.000	0.000	
11.5					0.000	0.001	0.007	0.019	0.028	0.019	0.011	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
10.5					0.000	0.002	0.012	0.036	0.041	0.028	0.014	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
9.5					0.000	0.004	0.020	0.051	0.055	0.033	0.015	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
8.5					0.000	0.001	0.006	0.029	0.065	0.063	0.035	0.014	0.004	0.001	0.000	0.000
7.5					0.000	0.001	0.008	0.036	0.074	0.063	0.030	0.012	0.003	0.001	0.000	0.000
6.5				0.000	0.000	0.001	0.009	0.034	0.062	0.050	0.021	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000
5.5				0.000	0.000	0.000	0.005	0.021	0.041	0.030	0.011	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
4.5				0.000	0.000	0.000	0.002	0.008	0.013	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
3.5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5																

Fig. 10 Fatigue damage contributions from each short-term sea state, obtained for RAW stress. VLCC case.

Hs/Tz	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
16.5								0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000			
15.5							0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000		
14.5						0.000	0.000	0.002	0.003	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000		
13.5					0.000	0.000	0.001	0.004	0.006	0.006	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000	
12.5					0.000	0.000	0.002	0.007	0.011	0.010	0.006	0.003	0.001	0.000	0.000	
11.5					0.000	0.001	0.004	0.014	0.019	0.015	0.008	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
10.5					0.000	0.001	0.008	0.024	0.027	0.021	0.011	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000
9.5					0.000	0.000	0.003	0.013	0.036	0.041	0.027	0.013	0.005	0.001	0.000	0.000
8.5					0.000	0.000	0.004	0.019	0.047	0.046	0.030	0.013	0.005	0.001	0.000	0.000
7.5					0.000	0.000	0.007	0.024	0.052	0.049	0.027	0.010	0.004	0.001	0.000	0.000
6.5					0.000	0.000	0.006	0.024	0.053	0.042	0.020	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000
5.5					0.000	0.000	0.004	0.015	0.035	0.025	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
4.5					0.000	0.000	0.002	0.006	0.013	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
3.5					0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.5					0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5					0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5					0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fig. 11 Fatigue damage contributions from each short-term sea state, obtained for LPF stress. VLCC case.

4.3 コンテナ船

Fig. 12 にコンテナ船の場合の指標 C_{vib} の分布を示す。有義波高が大きい短期海象と平均周期が短い短期海象に加えて、平均周期が 13.5s 程度かそれ以上の短期海象において C_{vib} が大きくなっている。これはバウフレアスラミングによるホイッピング応答が影響しているからであると考えられる。Fig. 15 には大型鉱石運搬船, VLCC, コンテナ船の船首部分の拡大図が示されている。コンテナ船の船首部分は他の二船と比較して、バウフレア角が大きく、その結果ピッチ応答が大きくなる 13.5s 以上の長周期側でバウフレアスラミング荷重が大きくなっているものと推測される。 C_{vib} の値はこれらの海象の一部で、10 をはるかに超えている。

この特性の差は、各短期海象の全疲労被害度に対する寄与度に違いも生じさせている (Fig. 13)。図から、周期 13.5s 以上の有義波高の大きな短期海象の寄与が大きくなっていることがわかる。それでも依然として、他二船と同様に波浪頻度表の中央付近に位置する短期海象で最も寄与が大きく、この性質は波浪成分の応力(LPF)に対する検討結果でも共通

に見られる (Fig. 14)。

2 章でコンテナ船の縦曲げモードの固有周波数は大型鉱石運搬船や VLCC と比較して大きいことを指摘した。固有周波数が低いと荷重の周波数と同調しやすいと考え、コンテナ船の場合に、波浪中弾性振動が最も生じにくいと予測される。ところが、実際に長期の影響係数 C_{vib_long} を計算したところ、他の二船よりも大きな 1.42 という結果が得られた。このことは波浪中弾性振動の程度が単に固有周波数によらず、船体形状の違いから生じる荷重特性にもよっているためであると考えられる。具体的には低ブロック係数に表されるスレンダーな船体形状、大きなバウフレア、船速などである。

コンテナ船に関しては機関室前のハッチコーナー部についても評価を行ったところ、 $C_{vib_long}=1.19$ という結果が得られた。波浪中弾性振動は向い波中では特に二節モードが顕著であり、二節振動モードの影響は船体中央部で最も大きく生じることを示している。

Hs/Tz	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
16.5								2.13	3.51	4.17	9.51	13.24	13.58			
15.5							1.72	1.80	2.77	2.72	8.40	10.81	7.43	75.11		
14.5						2.02	1.74	1.29	1.85	2.72	5.16	7.25	7.72	59.10		
13.5					1.53	1.29	1.43	1.94	1.89	4.55	4.66	4.13	37.67	28.76		
12.5					1.97	1.22	1.59	1.41	1.30	1.82	2.79	2.32	3.12	20.19	17.66	
11.5					1.52	1.15	1.19	1.27	1.52	1.49	1.84	2.12	2.04	11.52	8.62	6.06
10.5					2.01	1.44	1.22	1.33	1.28	1.45	1.67	1.99	1.48	6.54	3.81	3.82
9.5					6.24	2.08	1.49	1.14	1.20	1.37	1.34	1.28	1.26	1.40	3.05	2.05
8.5					7.38	1.87	1.64	1.20	1.04	1.27	1.26	1.51	1.30	1.35	1.91	1.50
7.5					7.12	1.85	1.04	1.28	1.41	1.30	1.21	1.43	1.00	1.13	1.26	1.38
6.5					95.00	5.50	2.21	1.59	1.25	1.13	1.21	0.81	1.07	1.13	1.16	1.55
5.5					61.39	4.76	1.58	1.13	1.04	1.25	1.24	1.07	1.09	1.22	1.21	1.07
4.5					51.60	6.51	1.99	1.16	1.14	1.24	1.27	1.13	1.08	1.38	1.11	1.13
3.5					404.60	34.11	4.87	1.94	1.43	1.37	1.20	1.35	1.22	1.39	1.45	1.11
2.5					145.35	14.08	4.12	1.66	1.47	1.38	1.13	0.98	1.16	1.30	1.54	1.10
1.5					48.81	44.75	1.77	1.33	1.16	1.02	1.40	1.71	1.13	1.15	1.32	1.25
0.5																

Fig. 12 C_{vib} value defined in Eq. (9) for the respective short-term sea states. Container ship case.

Hs/Tz	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
16.5							0.001	0.003	0.003	0.003	0.007	0.004	0.003			
15.5							0.000	0.002	0.005	0.006	0.011	0.006	0.001	0.017		
14.5						0.000	0.001	0.004	0.007	0.010	0.012	0.008	0.002	0.008		
13.5						0.000	0.002	0.007	0.014	0.013	0.018	0.008	0.002	0.008	0.002	
12.5					0.000	0.001	0.005	0.015	0.018	0.019	0.018	0.008	0.002	0.005	0.001	
11.5					0.000	0.001	0.009	0.021	0.030	0.022	0.014	0.005	0.001	0.003	0.000	0.000
10.5					0.000	0.003	0.015	0.035	0.039	0.025	0.015	0.005	0.001	0.002	0.000	0.000
9.5					0.000	0.000	0.006	0.025	0.047	0.050	0.029	0.015	0.004	0.001	0.001	0.000
8.5					0.000	0.001	0.010	0.035	0.054	0.051	0.027	0.012	0.003	0.001	0.000	0.000
7.5					0.000	0.001	0.013	0.048	0.074	0.058	0.024	0.008	0.002	0.000	0.000	0.000
6.5					0.000	0.000	0.001	0.015	0.040	0.058	0.034	0.013	0.004	0.001	0.000	0.000
5.5					0.000	0.000	0.001	0.011	0.027	0.032	0.020	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000
4.5					0.000	0.000	0.001	0.005	0.011	0.011	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
3.5					0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.5					0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5					0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5					0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fig. 13 Fatigue damage contributions from each short-term sea state, obtained for RAW stress. Container ship case.

Hs/Tz	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
16.5								0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000			
15.5								0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000		
14.5							0.000	0.001	0.003	0.004	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000	
13.5							0.000	0.002	0.005	0.007	0.007	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
12.5						0.000	0.000	0.003	0.011	0.014	0.012	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000
11.5						0.000	0.001	0.007	0.017	0.020	0.015	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000
10.5						0.000	0.001	0.012	0.026	0.031	0.017	0.009	0.002	0.000	0.000	0.000
9.5						0.000	0.000	0.002	0.022	0.039	0.037	0.022	0.011	0.002	0.000	0.000
8.5						0.000	0.000	0.003	0.029	0.052	0.040	0.021	0.008	0.001	0.000	0.000
7.5						0.000	0.000	0.007	0.038	0.056	0.039	0.020	0.006	0.001	0.000	0.000
6.5				0.000	0.000	0.000	0.005	0.032	0.050	0.028	0.014	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000
5.5				0.000	0.000	0.000	0.004	0.024	0.031	0.016	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
4.5				0.000	0.000	0.000	0.003	0.009	0.009	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.5			0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.5			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5																

Fig. 14 Fatigue damage contributions from each short-term sea state, obtained for LPF stress. Container ship case.

Fig. 15 Bow shapes of the respective ships. Bulk carrier (left), VLCC (centre), Container ship (right).

5. 感 度 解 析

5.1 不確定性

前章での結果を得るために様々な前提条件を与えた。ところが、運航条件、疲労被害度評価法、数値モデル、環境条件など前提条件には様々な不確定性が存在する。これらの様々な不確定性を Table 3 にまとめた。同表中に与えた不確定性に関して感度解析を行った結果を以下に述べる。

Table 3 Summary of uncertainties.

Category	id	Item	Description
Operational Profile	1	Vessel Speed	50% Service Speed
	2	Loading	Full Load
	3	HWA*	Not considered
	4	Trade	World Wide
Numerical Model	5	Structural damping	1.0%
	6	Impact Load	von Karman's
Wave cond.	7	Wave Direction	Head Waves
	8	S-N Curve	Curve B
Fatigue Evaluation	9	SCF	1.5
	10	StressCounting method	Rainflow counting
	11	Evaluation Point	Deck
	12	Mean Stress	Not considered

*Heavy Weather Avoidance

なお、前章での検討から、支配的な短期海象が概ね特定できることが分かった。そこで、ここでは特に言及しない限り、有義波高 7.5m, 平均周期 10.5s の短期海象を選んで検討を行う。計算の前提条件が異なれば、支配的な短期海象も若干変わる可能性があるが、支配的な一つの海象の下での特性が全海象での結果を代表していると考ええるものとする。

5.2 船速

大型鉱石運搬船と VLCC の船速を四段階に変化させた。コンテナ船については船速を二段階に変化させた。波浪中弾性振動が疲労に与える影響を指標 C_{vib} により評価した結果を Table 4 に示す。船速が大きいほど波浪中弾性振動の影響が大きいことがわかる。これは、船速が増加すると出会い周波数が増加し、波浪中荷重の線形成分あるいは非線形成分と固有周波数との同調が生じやすくなることによる。この傾向は固有周波数が最も低い大型鉱石運搬船で顕著である。

Table 4 Effect of ship's speed on fatigue damage C_{vib} (H_{1/3}=7.5m, T₀₁=10.5s).

	2.5m/s	5.0m/s	7.5m/s	8.9m/s
Bulk Carrier	1.19	1.36	2.82	3.19
VLCC	1.26	1.30	1.48	1.68
Container Ship	6.7m/s	8.9m/s		
	1.41	1.74		

5.3 衝撃荷重

2 章で紹介した手法で得られた衝撃荷重は近似的なものである。そこで、修正係数を乗じて得られた衝撃荷重を用いて、波浪中弾性振動が疲労被害度と与える影響を再評価した。 C_{vib} の指標を用いた結果を Table 5 に示す。衝撃荷重の振幅が大きくなるほど、波浪中弾性振動の影響が大きくなり、特にコンテナ船の場合に最も感度が高いことがわかる。

Table 5 Effect of impact loads on fatigue damage C_{vib}

$(H_{1/3}=7.5\text{m}, T_{01}=10.5\text{s})$			
	$\times 0.0(\text{no impact})$	$\times 0.5$	$\times 1.0$
Bulk Carrier	1.22	1.25	1.36
VLCC	1.16	1.20	1.30
Container Ship	1.11	1.24	1.41

5.4 出合い角

次に、大型鉱石運搬船について、出合い角を 0 度から 330 度まで 30 度刻みで変更した(向い波を 180 度と定義する). 指標 C_{vib} により評価した結果を Table 6 に示す. 波浪中弾性振動の影響は向い波あるいはそれに準ずる波向きで最大化されることがわかる. ただし、波浪中成分と弾性振動成分の位相差によっては応力範囲を低下させる場合があるために、指標 C_{vib} が 1 を若干下回ることもあった(出合い角 300 度).

Table 6 Effect of wave heading angles on fatigue damage C_{vib} .

$(H_{1/3}=7.5\text{m}, T_{01}=10.5\text{s})$					
0deg	30deg	60deg	90deg	120deg	150deg
-	1.17	1.00	1.21	1.40	1.32
180deg	210deg	240deg	270deg	300deg	330deg
1.36	1.17	1.09	1.19	0.86	1.01

5.5 評価位置

計算された応力を FFT によりスペクトル解析すると、向い波中の応答で寄与が最も大きいのは、固有周波数が低い縦曲げの二節振動である. さらに、縦曲げの二節モードによる縦曲げモーメントは船体中央部で最大であるから、弾性振動の影響は船体中央部で顕著であると考えられる. そこで、評価位置をコンテナ船の機関室前のハッチコーナー部に変更して評価を行ったところ、指標 $C_{vib}=1.15$ が得られた. Fig. 12 によれば船体中央部では指標 $C_{vib}=1.41$ となっているから、予想された通りといえる.

一方で、斜め波中では状況が異なってくる. 斜め波中では捩りモードの寄与があり、特に機関室前のハッチコーナー部でそり応力が最大になると考えられるからである. 出合い角を 120 度として、コンテナ船の機関室前のハッチコーナー部に評価を行ったところ指標 $C_{vib}=1.47$ が得られた. この値は向い波中の船体中央デッキ部での指標と同程度となっている. 同じ場所についてねじりモードを無視して評価した場合には、指標 $C_{vib}=1.12$ であった. コンテナ船の場合には捩りモードの波浪中弾性振動を無視しえない. 今後、より詳細な検討が必要であろう.

5.6 S-N 曲線

ここまでの検討では、ハイバツハ修正を施した S-N 曲線を用いて疲労被害度の評価を行った. ハイバツハ修正を考慮しない S-N 曲線を用いて疲労被害度を計算し、 C_{vib_long} の指標により波浪中弾性振動が疲労被害度に与える影響を再評価したところ、大型鉱石運搬船、VLCC に対して、それぞれ $C_{vib_long}=1.25, 1.24$ という結果が得られた. ハイバツハ修正を取りこんだ S-N 曲線による結果(それぞれ 1.31, 1.32)と比較すると、弾性振動の疲労被害度に与える影響はほぼ同程度であるといえる. これは、ハイバツハ修正の対象となる高周波の応力範囲の応力変動が疲労に与える影響が小さいと分析され、言い換えると波浪中弾性振動成分による応力周波数の増加と応力範囲の拡大の効果のうち、応力範囲の拡大の方が疲労被害度の増加に対して寄与が大きい.

また、本研究では勾配 $m=4$ の S-N 曲線を用いた. ところが、溶接部については $m=3$ 程度の値を採用するのが通常である. $m=3$ でかつ、ハイバツハ修正を考慮しない S-N 曲線によって波浪中弾性振動が疲労被害度に与える影響を評価したところ、 C_{vib_long} は鉱石運搬船、VLCC それぞれについて 1.15, 1.19 が得られた. 上で得られた、それぞれ 1.25, 1.24 に比較すると小さな値が得られていることがわかる. このことは、以下のように説明される.

S-N 曲線の勾配 m が小さい場合には、相対的に高応力範囲において式(8)中の N が大きくなり、低応力範囲において N が小さくなる. すると、低応力範囲からの寄与が大きくなり、その結果、より穏やかな海象条件が波浪周波数表中の最も寄与が大きな海象条件として選ばれる. そして、より穏やかな海象条件においては、波浪中弾性振動の影響は小さくなる.

5.7 その他の不確定性

Table 3 に示した不確定性について、これまでに示したものを含め、id3, 10, 12 を除く全てについて検討を行った結果を Table 7 にまとめる. 表中、Range の項目中の下線で示される場合に、波浪中弾性振動の疲労被害度に与える影響が多く生じることを示している. また、最後の BC, CT の文字列は検討を行った船種を示し、それぞれ大型鉱石運搬船、コンテナ船を指している.

id2 の検討で Full の場合に指標 C_{vib} が大きくなるのは、満載状態では固有周波数が低く、波浪中弾性振動が励起されやすいためである. id4 で示される検討では、IACS の波浪周波数表の代わりに、日本—ブラジル間の航路を仮定した上で、各海象の遭遇波浪周波数を定めた. 今回の検討を行った範囲においては、航路設定の影響は小さい. 疲労被害度にとって最も支配的となる海象が比較的穏やかなものであり、日本—ブ

ラジル間/world wide で支配的な海象近傍で頻度に大きな差がないためであると考えられる。

id9 の検討ではハイバツハ修正を考慮した $m=4$ の S-N 曲線を用いて長期の疲労被害度を検討した。同じ海象条件を考えたときに、応力集中係数 SCF が低いほど、ハイバツハ修正の対象範囲となる応力範囲が増え、疲労被害度の絶対値は低下する。その結果として、やや厳しい海象条件が支配的な海象となる。そして、厳しい海象条件下では波浪中弾性振動による疲労被害度の割合が増加する。

Table 7 Summary of results of sensitivity study.

id	range of parameters	Effect	
1	$U=2.5\text{m/s}-8.7\text{m/s}$	$C_{vib}=1.19-3.19$	BC
2	Full/Ballast	$C_{vib}=1.23, 1.36$	BC
3	-	-	
4	Japan-Brazil/world wide	$C_{vib_long}=1.35, 1.38$	BC
5	$\gamma=0.5, 1, 1.5\%$	$C_{vib}=1.36-1.47$	BC
6	$\times 0.5, 1.0, 1.5$	$C_{vib}=1.22-1.44$	BC
7	30,60,...,120,...,330 deg	$C_{vib}=0.86-1.41$	BC
8a	Slope $m=3, 4$	$C_{vib_long}=1.13, 1.25$	BC
8b	Correction Yes/No	$C_{vib_long}=1.25, 1.31$	BC
9	SCF= $1, 1.5, 3$	$C_{vib_long}=1.29-1.35$	BC
10	-	-	
11a	Midship, E/R, head sea	$C_{vib_long}=1.42, 1.19$	CT
11b	E/R, oblique sea	$C_{vib}=1.47$	CT
12	-	-	

6. 結 言

本研究では、波浪中弾性振動が大型鉱石運搬船、VLCC、大型コンテナ船の疲労強度に与える長期的な影響について、数値シミュレーションに基づいて、比較検討を行い、以下の結論を得た。

- 検討を行った大型鉱石運搬船、VLCC、大型コンテナ船に共通して波浪中弾性振動が見られた。
- 波浪中弾性振動の程度は船体弾性変形モードの固有周波数だけではなく、船体形状の違いに起因する荷重の特性にも依っている。コンテナ船の方が波浪中弾性振動の程度が大きい傾向が見られた。
- さらに、船速が波浪中弾性振動の大きさを決定する大きな要因となっており、船速が大きい場合に波浪中弾性振動も大きくなる。
- 波浪中弾性振動には、応力範囲を拡大する効果と応力変動の頻度を増加させる効果があるが、疲労被害度に

は応力範囲拡大の効果の寄与が大きい。

- 弾性振動のあるなしに関わらず、疲労被害度に与える寄与の大きな海象は遭遇確率 10^{-1} から 10^{-2} 程度の比較的穏やかな海象である。
- 常に向い波、満載状態という波浪中弾性振動が生じやすい極端な条件を仮定した場合で、波浪中弾性振動による疲労被害度の増加は 20-40% 程度であった。
- 向い波中では船体中央部において弾性振動の影響が最も大きく見られた。これは縦曲げの最低次モードである二節振動が卓越するからである。一方で、コンテナ船のハッチコーナー部では斜め波中でねじりモードの振動の大きな寄与のために疲労被害度の有意な増加が推定された。

繰り返しになるが、今回の評価結果は、計算の前提条件に左右されることに留意する必要がある。また、構造設計への取り込みの際にはさらなる検討が必要と考える。特に、S-N 曲線とレインフロー法による応力カウントを用いる疲労評価法が今回のような問題にも適用できるかどうかについては実験的・理論的な検討が必要である。また、今回の検討は向い波を主な対象海象としたが、コンテナ船については振りモードの弾性振動によるそり応力の増幅が懸念され、その特性を調べるためには様々な斜め波のケースの検討が必要である。

最後に、構造設計への取り込みの際に、得られた結果について二つの解釈がありうることが指摘されよう。一つは、波浪中弾性振動は大型船の疲労被害度を増加させるので、設計基準の強化あるいは現行船の補強が必要であるという解釈と、もう一つは波浪中弾性振動を考慮した場合に、安全な船に対しても疲労被害度が大きく計算され、従来の波浪成分応力のみを考慮したクライテリアでは不十分であるので、弾性振動を考慮した疲労被害度の評価結果に対する合理的なクライテリアを別途用意すべき、という解釈である。今後の基準化にあたっては慎重、合理的かつ迅速な判断が必要であらう。

参 考 文 献

- 1) Storhaug, G, Moe E, and Holtsmark, G: Measurements of wave induced hull girder vibrations of an ore carrier in different trades, Proc. 25th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany, 2006, OMAE2006-92284.

- 2) Okada T., Takeda Y., Maeda T.: On board measurement of stresses and deflections of a Post-Panamax containership and its feedback to rational design, *Marine Structures*, Vol. 19, 2006, pp. 141-172.
 - 3) Storhaug G., Moan T.: Springing/Whipping Response of a Large Ocean-Going Vessel – Investigated by an Experimental Method, *Proc. 10th Int. Symp. on Practical Design of Ships and Other Floating Structures PRADS*, Houston, USA, 2007, pp. 419-427.
 - 4) Miyake, R., Matsumoto, T., Zhu, T., Usami, A., and Dobashi, H., Experimental studies on the hydroelastic response using a flexible mega-container ship model, *Proc. Hydroelasticity in Marine Technology*, University of Southampton, UK, 2009.
 - 5) Oka, Y., Oka, S., and Ogawa, Y.: An experimental study on wave loads of a large container ship and its hydroelastic vibration, *Proc. Hydroelasticity in Marine Technology*, University of Southampton, UK, 2009.
 - 6) Iijima, K., Hermundstad, O.A., Zhu S., and Moan, T.: Symmetric and Antisymmetric Vibrations of a Hydroelastically Scaled Model, *Proc. Hydroelasticity in Marine Technology*, University of Southampton, UK, 2009.
 - 7) Iijima, K., Yao, T., Moan, T.: Structural Response of a Ship in Severe Seas Considering Global Hydroelastic Vibrations, *Marine Structures*, 2008, Vol. 21, 420-445.
 - 8) Papanikolaou AD and Schelling TE.: A three-dimensional panel method for motions and loads of ships with forward speed, *Ship Technology Research*, 1992, Vo. 39, 145-156.
 - 9) UK Department of Energy, Offshore Installation: Guidance on Design, Construction, and Certification, Fourth Edition, London, HMSO, 1990.
 - 10) IACS Recommendation No.34, Standard Wave Data, 2001.
 - 11) タンカーの構造強度に関するガイドライン, 日本海事協会, 2001.
-