複数周波数成分を有する重畳応力条件下における 疲労き裂伝播挙動解析

正会員 後 藤 浩 二* 学生会員 松 田 和 貴**

Numerical Simulation of Fatigue Crack Propagation under Variable Amplitude Loading Containing Two Different Frequency Components

by Koji Gotoh, *Member* Kazuki Matsuda, *Student Member*

Summary

Fatigue crack propagation behaviour under superposed loading histories which contain two different frequency components is highlighted. Numerical simulation of fatigue crack propagation based on an advanced fracture mechanics approach using the RPG (Re-tensile Plastic zone Generating) stress criterion for fatigue crack propagation is improved to enable the extraction of the effective loading history. The critical value of the plastic hysteresis for the stress versus strain relationship occurring in the vicinity of a crack tip is defined as the control parameter for extracting the effective loading history. Comparison of fatigue crack propagation curves obtained from the improved numerical simulations with the measurements under the superposed loading histories is performed. These comparisons show the validity of the proposed procedure for extracting the effective loading history from the superposed loading history containing different frequencies. Besides, the insufficiency of S-N curves approach with the cumulative damage law for the superposed loading history condition containing different frequency components is conducted.

1. 結 言

船体の疲労強度を詳細に評価するには、whipping 等の高周波振動に起因する応力が静水中縦曲げ応力と低周波の波浪縦曲げ応力に重畳した場合（以下、重畳応力条件と称する）の影響を適切に考慮する必要がある。このような重畳応力条件下における疲労強度評価手法は、Rain flow 法¹⁾による応力変動の頻度計数と S-N 曲線から線形累積損傷則により計算される疲労被害度を指標とすることが一般的である。例えば、Fircke ら²⁾は、十字すみ肉溶接継手を用いて規則的な重畳応力履歴を付与した疲労試験を実施し、線形累積損傷則による疲労強度評価の妥当性を示している。しかしながら、線形累積損傷則では、疲労き裂成長挙動に大きな影響を及ぼす応力履歴の影響を定量的に考慮出来ないことが一般的に指摘されていることや、複数周波数成分を有する変動荷重条件下において Rain flow 法と線形累積損傷則を適用するには、複数载荷成分の周波数の影響を考慮するために修正係数の導入が必要であるとの指摘³⁾を考慮すれば、Fircke らの報告は、彼らが疲労試験を実施した応力履歴に限定されるものであり、任意の応力履歴に対する拡張性については、検討の余

地が残されたものと考えられる。また、線形累積損傷則では、構造安全性の評価に必要不可欠な欠陥寸法の成長履歴を定量的に推定できない問題点が残されている。

一方、豊貞ら⁴⁾は、疲労き裂が成長するには、き裂先端近傍で生じる繰り返し塑性仕事なき裂進展のための駆動力源として供給される必要があるとの考え方に立脚し、応力変動 1 サイクル（最大応力→[除荷過程]→最小応力→[再負荷過程]→次ステップの最大応力）中の再負荷過程において、き裂開口応力 S_{op} でき裂先端が開いた後、き裂先端に再び引張塑性域が形成される応力 S_{RPG} に着目した。 S_{RPG} は RPG 応力 (Re-tensile Plastic zone's Generated stress) と定義され、 S_{RPG} から次ステップの最大応力 S_{max} に至る過程で、き裂先端近傍で塑性ヒステリシスが出現し、これが疲労き裂成長のエネルギーを供給することで疲労き裂が成長すると考えられる。そこで、再引張塑性域が形成される応力範囲に対応する応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} を、疲労き裂伝播速度を律するパラメータに採用することで、定量的な疲労寿命評価が可能であると提案し、この疲労き裂伝播則を実装した疲労き裂開閉シミュレーションコード FLARP⁴⁾を開発した。そして、二段ブロック荷重、スパイク荷重や嵐モデル荷重条件下における疲労き裂成長履歴に関する数値シミュレーションを実施して疲労き裂成長履歴を推定し、実測結果と比較することで、同手法の妥当性を示している。しかしながら、本研究を開始する段階での事前検討において、複数周波数成分を有する応力履歴条件下では、上述の数値シミュレーションでは必ずしも精度良く疲労き裂成長履歴を予測できないことが確認された。

* 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

** 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻
博士後期課程

本研究では、上述の疲労き裂成長シミュレーションコード FLARP の解析アルゴリズムを発展させ、重畳応力条件において疲労き裂伝播に有効な応力履歴を抽出する基準を新たに実装した疲労き裂伝播解析コードを構築し、重畳応力履歴条件下で実施された疲労試験結果と比較することで、有効な応力履歴抽出手法の妥当性を検証した。また、重畳応力条件下における疲労強度評価手法としての、線形累積損傷則に関する妥当性検証も実施した。

2. 疲労き裂伝播試験の概要

重畳応力条件下での船体構造の健全性に関して、(一財)日本船舶技術研究協会において共同研究⁹⁾が実施された。この一環として、高周波の応力変動が低周波の応力変動に重畳する複雑な現象を把握することを目的として、中央貫通き裂試験片 (CCT 試験片) を使用した疲労き裂伝播試験が実施された。本研究ではこの疲労き裂伝播試験結果を比較対象として採用する。伝播試験の詳細な内容は文献⁹⁾に紹介されている。

文献⁹⁾に示された試験条件のうち、ここで比較検証を実施したものを Table 1 に示す。試験 ID : L49H00M078 は低周波 (0.2Hz) の一定応力振幅のみを付与した試験である。これに大小の一定振幅の高周波 (5Hz) 成分を重畳させたものが一定振幅重畳波条件 (試験 ID : L49H25M078 と L49H10M078) である。L49H10M078 の最大応力と最小応力を連ねた包絡波を负荷した試験条件が試験 ID : L59H00M078 である。また、実船で生じる whipping 振動を模擬した応力履歴波形として、一定の低周波応力振幅に大小の減衰する高周波成分を重畳させたものが、減衰重畳波条件 (試験 ID : L49H88M137_D と L49H49M137_D) である。负荷した応力波形パターンは、第 4 章において数値シミュレーション結果の考察と共に示しているので参照のこと。

Table 1 Applied stresses and damping conditions (unit: MPa).

Test ID	Stress amplitude		Mean	Damping
	Low	High		
L49H88M137_D	±49.0	±88.2	137.2	Given
L49H49M137_D		±49.0		
L49H00M078		±0.0	78.4	None
L49H25M078		±24.5		
L49H10M078		±9.8		
L59H00M078	±58.8	±0.0		

各試験条件の疲労き裂伝播量とサイクル数の関係を Fig.1 に示すが、以下に述べるような傾向が確認できる。なお、本論文で単に「サイクル数」と称する場合は、低周波成分の応力変動に関するサイクル数を意味することとし、以降に示す実験及び数値シミュレーション結果の整理では、低周波成分

分の応力変動に関するサイクル数を用いる。

- 1) 一定振幅重畳波条件 (試験 ID : L49H10M078, Fig.1 中の黒四角印) と包絡波条件 (試験 ID : L59H00M078, Fig.1 中の白三角印) のき裂伝播速度はほぼ同程度である。
- 2) 高周波成分の振幅が大きい一定振幅重畳波条件 (試験 ID : L49H25M078, Fig.1 中の白四角印) の方が、高周波成分の振幅が小さい一定振幅重畳波条件 (試験 ID : L49H10M078, Fig.1 中の黒四角印) よりき裂伝播速度が大きい。
- 3) 高周波成分の振幅が大きい減衰重畳波条件 (試験 ID : L49H88M137_D, Fig.1 中の白菱形印) の方が、高周波成分の振幅が小さい減衰重畳波条件 (試験 ID : L49H49M137_D, Fig.1 中の黒菱形印) よりき裂伝播速度が大きい。

Fig.1 Measured fatigue crack growth curves under various loading conditions.

3. 疲労き裂伝播に有効な応力履歴の抽出

複数周波数成分を有する重畳応力条件下における定量的な疲労き裂伝播挙動解析を行うためには、複雑な負荷応力履歴の中から、疲労き裂伝播に寄与する「有効な」履歴を抽出する必要がある。

疲労き裂は繰返し応力履歴下で、開閉口を繰返ししながら伝播する。Fig.2 に模式的に示す応力履歴における疲労き裂伝播解析 1 サイクル ($S_{\max}^{(i)} \rightarrow S_{\min}^{(i)} \rightarrow S_{\max}^{(i+1)}$) 中のき裂先端近傍の塑性挙動について考察する。最大応力 $S_{\max}^{(i)}$ で、き裂先端近傍に引張塑性域が生じる。続く最小応力 $S_{\min}^{(i)}$ ではき裂先端は閉口し、圧縮塑性域が生じる。除荷過程で引張と圧縮の塑性域が重複する領域を除荷過程両振塑性域 $\bar{\omega}_{UL}$ と定義する。その後の再負荷過程では、き裂先端が開口するため、再負荷過程最大応力 $S_{\max}^{(i+1)}$ の段階では、き裂は再び開口し、き裂先端には引張塑性域が生じる。再負荷過程において、圧縮と引張の塑性域が重複した領域を再負荷過程両振塑性域 $\bar{\omega}_{RL}$ と定義する。除荷及び再負荷の両過程で生じる各両

振塑性域内で引張と圧縮の塑性変形が生じる（すなわち、塑性ヒステリシスが発生する）ことで、疲労き裂の伝播駆動力源となる塑性仕事が生供給される。本研究では、この両振塑性域内で消費される単位板厚あたりの塑性仕事量に相当するパラメータ ξ を式（1）で定義する。

Fig.2 Schematic illustration of one cycle during the cyclic loading.

$$\xi = \int_{\tilde{\omega}} \sigma_Y d\varepsilon_p(x) dx \quad (1)$$

ただし、

- σ_Y : 降伏応力
- x : き裂線上に沿って設定した座標
(き裂先端が原点)
- $d\varepsilon_p(x)$: 塑性ひずみ増分
- $\tilde{\omega}$: 両振塑性域

式（1）で定義されるパラメータ ξ の値を除荷過程と再負荷過程の両方において算出し、適切な閾値 ξ_{limit} を両方の過程で上回る応力履歴のみが疲労き裂伝播に有効に寄与すると判断する手法を解析アルゴリズムに導入した。既報の疲労き裂伝播シミュレーション⁴⁾では、Fig.3(a)に模式的に示すように、連続した応力履歴から構成される応力変動履歴の全てが疲労き裂伝播に寄与すると考えて解析していたが、本研究で検討対象とする複数周波数成分が重畳する応力履歴条件下では、連続して変化する応力履歴の中から、疲労き裂成長の駆動源を供給する応力履歴グループのみを抽出する必要がある。そこで、Fig.3(b)~(d)に示すように、左図に示す応力履歴（太破線）において算出される ξ の値が ξ_{limit} より小さい場合は、その応力履歴は疲労き裂進展に寄与しないと見なし、現ステップの応力履歴と以降の応力履歴の各ピーク値を比較し、条件に応じて以前の応力履歴の一部を保持して、新たに右図のような応力履歴（太一点鎖線）を探索するアルゴリズムを構築した。

4. 疲労き裂伝播挙動解析

4.1 試験結果との比較

前述の有効応力履歴抽出方法を実装させた疲労き裂伝播

シミュレーションコードを構築し、数値シミュレーションを実施した。数値シミュレーションの際に設定する必要がある閾値 ξ_{limit} については、始めに試行錯誤的に決定し、その後に物理的意味を考察した。

(a) Previous method

(b) Effective loading sequence extracting method Pattern 1

(c) Effective loading sequence extracting method Pattern 2

(d) Effective loading sequence extracting method Pattern 3

Fig.3 Extraction procedure of the effective loading sequence during the random loading.

数値シミュレーションに必要な RPG 応力基準の疲労き裂伝播則の材料定数 C , m は、本供試材に対して測定されていないため、一定振幅試験（試験 ID : L49H00M078）のき裂成長曲線実測結果が良好に推定できる値として与えた。解析に用いた材料定数 C , m の値は以下の通りである。（ K 値の単位 $[\text{MPa m}^{0.5}]$, き裂長さの単位 $[\text{m}]$ ）

$$C = 7.733 \times 10^{-11}, m = 2.614 \quad (2)$$

Fig.4 Comparison of measured crack growth curves with estimated ones under variable loading sequences.

疲労き裂伝播曲線の実測値と推定結果の比較を Fig.4 に示す。なお、同図の横軸は低周波成分が载荷されたサイクル数である。閾値を $\xi_{\text{limit}} = 0.3[\text{N/mm}]$ と設定すれば、いずれの実験条件に対しても、疲労き裂伝播挙動を良好に推定できた。また、提案手法の有効性を検証する目的で、有効応力振幅履歴を本研究で提案するアルゴリズムには従わず、単純に応力変動の極値を包絡する波形を採用した解析結果を Fig.4 中の破線（図中に *Peak* と表記）で示す。推定結果は提案アルゴリズムによる結果と一致している場合もあるが、大きく異なる疲労き裂成長挙動の推定を与えた結果もあった（L49H10M078 では実線と破線が一致している）。しかしながら提案シミュレーション手法と応力変動の極値を包絡する波形を採用する手法の間で、疲労き裂伝播速度の大小関係が逆転（L49H88M137_D では提案手法の方が早い）、L49H49M137_D では包絡波を採用した方が、伝播速度が速い）する場合もあることから、単に応力振幅のピークを包絡する波形を用いた疲労き裂伝播挙動の評価は不十分な手法であると考えられる。

次に、本研究で提案する手法により抽出された、疲労き裂

伝播に有効に寄与する応力履歴について検討する。Fig.5 は疲労き裂が初期状態から 5mm 程度伝播した段階において抽出された、疲労き裂伝播に有効に寄与すると判断された応力履歴である。Fig.5 において太線が疲労き裂伝播に有効に寄与するとして抽出された応力履歴であり、このピーク位置に白丸を付している。また白黒丸印は有効な応力履歴中の各段階における RPG 応力であり、RPG 応力から再負荷過程最大応力までの応力範囲が RPG 基準の疲労き裂伝播則における有効応力範囲に相当する。Fig.5(a)に示すように、一定振幅重畳波条件（振幅：大）L49H25M078 では、多くの高周波成分が疲労き裂伝播に有効な成分として抽出された。この負荷条件では、疲労き裂が伝播するに伴い、疲労き裂伝播に有効に寄与するとして抽出された高周波成分が徐々に増加したことを確認している。この理由は、疲労き裂長が増加すると高周波成分の応力振幅が小さくても両振塑性域が形成されやすくなるためと考えられる。一方、Fig.5(b)は一定振幅重畳波条件（振幅：小）L49H10M078 の結果であるが、高周波振幅を無視し、低周波変動のみを疲労き裂伝播に有効応力履歴として抽出している。Fig.1 に示した疲労き裂伝播曲線（実

測値)において、この条件と包絡波条件 L59H00M078 のき裂伝播挙動がほぼ同様であったことから、この程度の小振幅高周波成分は疲労き裂伝播に対して有効に寄与しないと判断した提案アルゴリズム及び設定した閾値は妥当であると判断できる。なお、疲労き裂伝播量の増加に伴う有効応力抽出挙動の変化は、L49H25M078 と同様になると考えられたが、最終段階に至るまで、Fig.5(a)と同様の抽出結果であった。この理由は、高周波成分の振幅の絶対値が小さいためであると推察される。

Fig.5(c), (d)は減衰重畳波条件に対する結果であるが、比較的大きな高周波振幅を抽出し、微小な高周波振幅が無視されたことが確認できる。Fig.4 に示すように、減衰重畳波条件下における疲労き裂伝播挙動の推定結果が実測結果とも良好な一致を示していることから、減衰重畳波条件下においても、本研究で提案した有効応力抽出手法の有用性が確認できたと考えられる。

(a) L49H25M078

(b) L49H10M078

(c) L49H88M137_D

(d) L49H49M137_D

Fig.5 Examples of the extracted effective loading sequences under variable loading.

4.2 有効応力履歴抽出に際して設定した閾値に関する考察

本解析に際して設定した有効応力履歴抽出基準の閾値 ξ_{limit} について考察する。有効応力履歴抽出基準は、式 (1) に示すように、き裂先端近傍で 1 サイクル中に生じる単位板厚当たりの塑性仕事に相当する値であるため、これを両振塑性域寸法で除すことで、単位体積当たりの値 (両振塑性域内の平均値) に変換できる。また、単位体積当たりの塑性仕事量は、繰り返し載荷時の応力~ひずみ線図に描かれるヒステリシスの面積で表される。これを $\xi / \omega t$ とする (ω : き裂先端に形成される両振塑性域寸法, t : 板厚)。今、一つの目安として、明確な降伏現象を示さない材料において 0.2% 耐力を降伏の目安とする取り扱いも勘案して、弾完全塑性体の塑性ひずみが 0.2% となる時の単位体積当たりの塑性仕事量 W_{p0} をヒステリシス曲線の面積から求め、解析において各荷重グループから算出される $\xi / \omega t$ の値と比較した。その結果、疲労き裂進展に有効に寄与したとして抽出された荷重履歴

では, ξ/α の値が W_{p0} を上回っていた. 数値シミュレーションでは材料の応力~ひずみ関係を等方硬化弾完全塑性体と理想化していることに對し, 供試材料は加工硬化挙動を示すことを考慮すれば, 本論文で提案する有効荷重履歴の抽出手法は, き裂先端近傍で両振塑性挙動が生じる荷重履歴を抽出することに対応している.

また, 先に著者の一部ら⁴⁾が実施した応力拡大係数範囲漸減試験に対して疲労き裂伝播挙動解析を行い, 同試験中の有効荷重抽出基準値 ξ の推移を調査した. この結果を Fig.6 に示す. Fig.6 より, 本研究の解析で設定した $\xi_{\text{limit}}=0.3$ という値は, 応力拡大係数範囲漸減試験における ξ の最小値とほぼ同程度であった. ここで参照した応力拡大係数範囲漸減試験では, 疲労き裂伝播速度 da/dN が 1.0×10^{-11} (m/cycle) という極低伝播速度領域まで, $\Delta K_{\text{RPG}}-da/dN$ 関係に下限界値は生じていなかったことから, ξ_{limit} 値は ΔK_{RPG} 値の下限界値に対応する訳ではなく, $\Delta K_{\text{RPG}}-da/dN$ 関係には下限界値が存在しないという考え方⁴⁾に矛盾するものではないと考えられる.

Fig.6 The relationship between parameter ξ and loading cycles.

5. 線形累積損傷則による疲労寿命評価

本章では, 第 2 章で紹介した疲労試験に対して Rain flow 法を用いて波数計測し, この結果と線形累積損傷則により疲労寿命推定を行い, 重畳波荷重条件に対しての疲労強度評価手法としての有効性を検証した. なお, 試験条件により平均応力が一部異なっていたため, 修正 Goodman 線図を用いて波数計測を行った全ての波形の平均応力をゼロに補正している. 修正 Goodman 線図による補正に必要な両振載荷条件下の疲労限は, 引張強さの半分と仮定した.

疲労き裂半長 a が 15mm (初期欠陥を含めて 35mm ; リガメント幅の 35%に相当) に達した時点でのサイクル数を破断寿命と定義し, 一定振幅荷重条件 (L49H00M078, L59H00M078, 及び他 2 つの実験値は文献⁶⁾参照) の破断サ

イクル数 N と応力範囲 $\Delta\sigma$ の関係から, 最小二乗法により S-N 曲線を与えた. なお $10^7 < N$ の範囲の S-N 曲線については, S-N 曲線の同定に利用した実験データの破断サイクル数が 10^7 回未満であったことを考慮し, 最小二乗近似結果に対して Haibach 修正⁷⁾を施して与えることにした. 同定した S-N 曲線を式 (3) に示す.

$$\Delta\sigma = \begin{cases} 6.346 \times 10^3 N^{-0.357} & (N \leq 10^7) \\ 6.686 \times 10^2 N^{-0.217} & (N > 10^7) \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) の S-N 曲線と試験毎に計測された応力範囲の頻度計測結果を線形累積損傷則に適用して疲労被害度 D を算出した. また, Fig.5 に例示した, 疲労き裂伝播に有効と判断された荷重履歴のみをカウントして算出した疲労被害度 (D_{eff}) も計算した. 結果を Table 2 に示す.

Table 2 Results of accumulated damage sums D and D_{eff} (Applied S-N curve is Eq. (3)).

	Specimen ID			
	L49 H25 M078	L49 H10 M078	L49 H88 M137 _D	L49 H49 M137 _D
D	1.579	1.150	1.180	1.267
D_{eff}	1.332	0.998	1.172	1.249
D_{eff}/D	0.844	0.868	0.993	0.986

Table2 に示す結果より, 重畳条件下での疲労被害度 D は全て 1 を上回っており, 線形累積損傷則は安全側の推定結果を与えていることが確認できる. また, 疲労き裂伝播に有効な荷重履歴に対応する疲労被害度 D_{eff} の値は, いずれの条件に対しても D より小さい. この結果は, 重畳する高周波成分の全てが疲労被害度を大きく見積もることに寄与すると考えられる. 一方, 試験条件 L49H10M078 における D_{eff} の値が 1 を下回ったことは, 重畳する高周波振幅がき裂伝播を遅らせる働きに寄与したことを示唆している. Fig.4(b) に示すように, 重畳する高周波振幅の中にはき裂伝播の遅延に寄与する場合もあることや, 減衰重畳試験条件 (L49H88M137_D, L49H49M137_D) における D の値と D_{eff} の値の相違が大きいことも勘案すると, 高周波振幅がき裂伝播に及ぼす影響を, 単純に従来の線形累積損傷則的に考慮することは, 適切ではないと考えられる. なお, S-N 曲線の設定 (破断と定義したき裂長さ) が計算結果に影響を与えた可能性が考えられたため, 複数の破断き裂長さを定義して上述と同様な検討を実施したが, D の値と D_{eff} の値には Table 2 に示した程度の相違が生じることを確認している.

また, S-N 曲線の勾配を設計線図としての使用実績が比較的多い UK-HSE の B curve⁸⁾と一致させ, もう一つの係数を先と同様に疲労き裂半長 a が 15mm に達した時点で破断と定義して, D 及び D_{eff} の値を計算した. 計算に用いた S-N 曲

線を式 (4) に、得られた疲労被害度 D 及び D_{eff} を Table 3 に示す.

$$\Delta\sigma = \begin{cases} 1.970 \times 10^3 N^{-0.250} & (N \leq 10^7) \\ 5.141 \times 10^2 N^{-0.167} & (N > 10^7) \end{cases} \quad (4)$$

Table 3 Results of accumulated damage sums D and D_{eff} (Applied S-N curve is Eq. (4)).

	Specimen ID			
	L49 H25 M078	L49 H10 M078	L49 H88 M137 _D	L49 H49 M137 _D
D	1.457	1.109	2.650	2.160
D_{eff}	1.367	1.096	2.648	2.154
D_{eff}/D	0.938	0.988	0.999	0.997

S-N 曲線の傾斜が緩くなったため、相対的に $\Delta\sigma$ の小さい一定振幅重畳試験条件においては D が増加し、 $\Delta\sigma$ の大きい減衰重畳試験条件は D が減少している. しかしながら、 D の値は全て 1 を上回り、重畳する高周波成分の全てが疲労被害度を大きく見積もるという傾向や、 D に対する D_{eff} の減少割合は、Table 2 に示した結果と同程度である.

以上の検討結果から、現状の線形累積損傷則を用いた疲労強度評価手法を単純に適用して、重畳応力条件下における疲労強度評価を定量的に行うことは問題であると考えられる.

6. 結 言

複数周波数成分を有する重畳応力条件下における疲労き裂伝播挙動解析手法として、疲労き裂の進展に有効な負荷履歴を抽出する手法を提案し、疲労き裂伝播試験結果と比較することで、同手法の妥当性を検証した. また、応力拡大係数範囲漸減試験に対して疲労き裂伝播解析を行い、有効負荷抽出基準値の推移を調べることで、設定した閾値が実際のき裂伝播の駆動力の指標として妥当であることを確認した.

さらに、線形累積損傷則による疲労寿命評価を行った結果、本手法では重畳応力条件下における疲労強度評価を定量的に実施できないことを確認した.

今後の課題としては、本研究で採り上げた負荷履歴では平均応力が一定の問題に限定されているため、平均応力変動が生じる場合での適用性検証が挙げられる. また、多軸応力変動の各成分が異なる周波数を有する場合や、表面・埋没き裂が重畳応力を受ける場合の定量的なき裂成長履歴予測への拡張も必要である. 更には、重畳応力履歴条件下での疲労き裂発生に対する有効応力履歴抽出手法の検討も挙げられる.

一方、船殻の耐疲労設計実務の観点に立つと、線形累積損傷則の適用を可能とすることも必要であろう. そこで、本研

究で提案した手法を活用し、種々の設定海象・載荷条件及び whipping 等の高周波振動に起因する応力変動の発現状況を考慮した数値シミュレーションを積み重ねることで、疲労被害度に対する適切な安全率の設定、荷重履歴モデルや簡便な有効荷重履歴または頻度の抽出手法を検討することも重要な将来課題である.

謝 辞

本稿は、2009～2010 年度の期間で、(一財)日本船舶技術研究協会をプラットフォームとして、横浜国立大学、九州大学、(一財)日本海事協会、(独)海上技術安全研究所、(株)IHI、(株)アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド、川崎重工業(株)、三菱重工業(株)、(株)神戸製鋼所、JFE スチール(株)、新日本製鐵(株)、住友金属工業(株)からなる「大型コンテナ船極厚板研究委員会(委員長: 横浜国立大学 角洋一教授)」が実施した研究成果に基づいている. 関係者に感謝申し上げます.

参考文献

- 1) 遠藤達雄, 松石正典, 光永公一, 小林角市, 高橋清文: Rain Flow Method の提案とその応用, 九州工業大学研究報告, No.28, 1974, pp.33-62.
- 2) Fricke, W. and Paetzold, H.: Experimental Investigation of the Effect of Whipping Stresses on the Fatigue Life of Ships, Proceedings of IMDC 2012, 2012.
- 3) Wirsching, P.H. and Shehata, A.M.: Fatigue under Wide Band Random Stresses Using the Rain-Flow Method, J. of Eng. Mat. Tech., ASME, 1977, pp.205-211.
- 4) Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T.: Fatigue crack propagation for a through thickness crack: a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip, Int. J. Fatigue, Vol.26, No.9, 2004, pp.983-992.
- 5) (一財)日本船舶技術研究協会 大型コンテナ船極厚板研究委員会: 大型コンテナ船の極厚板溶接継手からの脆性破壊発生防止に関する調査研究報告書, 2011.
- 6) 北村欧, 杉村忠士, 中山伸, 廣田一博: 高一低周波重畳応力作用下における疲労き裂伝播試験の一考察, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol.14.
- 7) Haibach, E.: The Allowable Stresses under Variable Amplitude Loading of welded Joints, Proc. Conf. Fatigue Welded Structures 2, The Welding Institute, 1971, pp.328-339.
- 8) Health and Safety Executive (UK-HSE): Status of technical guidance and information on design, construction and operation of offshore installations, 2012.