平均応力影響を考慮した疲労強度評価法*

技術研究所　山本　規雄　　松岡　一祥**

Fatigue Assessment Method considering an Effect of Mean Stress

by　Norio Yamamoto　Kazuyoshi Matsuoka

Summary

When fatigue strength of welded joint is evaluated, it has been assumed that the influence of a structural mean stress on fatigue strength is small as the influence can be neglected due to the existence of welding residual stress. However, the experiences of fatigue damages show that the fatigue strength was affected by the structural mean stress.

The influence of structural mean stress on fatigue strength can be evaluated by considering the change in welding residual stress by the shakedown. In this paper, the fatigue assessment method to evaluate the influence of structural mean stress on fatigue strength in design stage is proposed by considering the long-term statistical characteristic of variable stress.

It was confirmed that the tendency of occurred fatigue damages could be explained by applying this method. It was also confirmed that the fatigue assessment could be made effectively based on the design S-N curve which has been used widely by applying this method.

1．緒　　言

構造物の疲労強度評価は、構造健全性の確保及び海洋環境保全の観点から重要であり、近年では、設計時の必須の要件となっている。船体構造における疲労損傷は、溶接継手部から生じる例が殆どであり、応力集中が生じる個所の溶接部の疲労強度評価が必要である。

溶接部には材料の降伏応力に近い大きな溶接残留応力が存在し、積み付け状態により生じる静的な平均応力(以下、構造的平均応力という)の疲労強度へ及ぼす影響は、設計時の疲労強度評価の際に無視できるとされてきた。しかしながら、船舶のように就航中に積み付け条件の変更等により構造的平均応力が変化する場合には、実際に経験される疲労損傷の発生傾向は、構造的平均応力の影響を受けていると考えられる。

著者の一人は溶接継手に対して、溶接残留応力と平均応力を考慮した等価応力を用いた疲労強度評価法を提案[1)]した。この評価法は荷重変動による残留応力変化（シェイク･ダウン）に着目しているので、荷重履歴が問題となる。本論では船体構造の設計時での評価を考え、船体構造の受ける荷重の統計的性質から、構造的平均応力が一定の期間中における平均応力状態を期待値として求めることにより、設計時に平均応力影響を考慮した疲労強度評価を行う手法を検討した。

また、提案手法をこれまで経験した疲労損傷例へ適用することにより、疲労損傷の起こり方の傾向を十分説明できること、及び、従来の実績有る設計線図に対して、溶接残留応力のシェイク･ダウンによる応力変化と構造的平均応力の変化を考慮することにより、十分妥当な疲労強度評価ができることを確認した。

2．疲労強度へ及ぼす平均応力影響

溶接部に作用する応力範囲と溶接残留応力を含む最大応力の効果、溶接残留応力のシェイク･ダウンによる応力変化を考慮した等価応力範囲は以下のように定義[1)]

---

* 本論文は平成 13 年 11 月、日本造船学会秋季講演会において発表されたものである

** 独立行政法人　海上技術安全研究所

される。

$$\Delta\sigma_{eq} = \Delta\sigma^{\alpha}\sigma_{\max}{}^{1-\alpha} = \Delta\sigma^{\alpha}\left(\sigma_{mean} + \frac{\Delta\sigma}{2} + \sigma_{res}\right)^{1-\alpha} \quad (1)$$

$\alpha = 0.6485$

$\Delta\sigma$ ；負荷される応力範囲

σ_{mean} ；構造的平均応力

σ_{res} ；残留応力

ここで、最大応力が降伏応力を超えるとき、シェイク・ダウンを考慮して、以下の取扱いを行う。

$$\sigma^{*}_{\max} = \sigma_{mean} + \frac{\Delta\sigma}{2} + \sigma^{*}_{res} \quad (2)$$

$$\sigma^{*}_{res} = \begin{cases} \sigma_y - \left(\sigma_{mean} + \dfrac{\Delta\sigma}{2}\right) & ;\ \sigma_y \le \sigma_{\max} \\ \sigma_{res} & ;\ otherwise \\ -\sigma_y - \left(\sigma_{mean} - \dfrac{\Delta\sigma}{2}\right) & ;\ \sigma_{\min} \le -\sigma_y \end{cases} \quad (3)$$

σ_y ；降伏応力

上記の等価応力による疲労強度評価では、一定振幅応力負荷下においては降伏応力に近い溶接残留応力を考慮した場合、構造的平均応力の疲労強度への影響は無視できることになり、負荷される応力範囲の大きさが変化する場合或いは構造的平均応力が変化する場合に、残留応力を含む平均応力の疲労強度への影響が現れることになる。

また、異なった平均応力状態における疲労強度は、等価応力を用いることにより１本のS-N線図により評価される。

$$N = C \cdot \Delta\sigma_{eq}{}^{-m} \quad ; \quad R = 0 \quad (4)$$

この平均応力影響の考慮方法は、溶接残留応力が無い場合について、二瓶等が種々の方法について検討[2]した結果、最も精度が良いと結論つけている方法[3]と同義なものである。

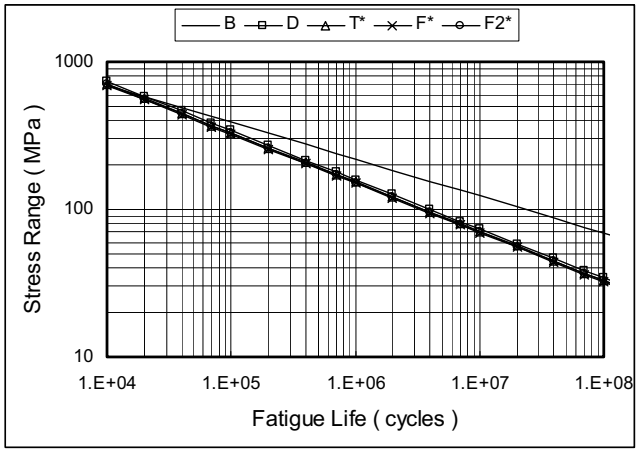
３．平均応力影響を考慮した疲労強度設計法

3.1　適用線図

3.1.1　ホットスポット応力基準の線図

船体構造の疲労強度評価を行う場合、局部の構造不連続による応力集中を考慮して評価を行う統一的な基準応力として、ホットスポット応力が一般的に用いられる。船体構造の疲労強度評価に対して適用されるホットスポット応力基準の設計S-N線図としてこれまで幾つか検討[4,5]されてきた。通常広く用いられているUK-HSEの線図を例にとって、平均S-N線図をまとめて示すとFig.1のようである。

T*は、鋼管継手のホットスポット応力基準の線図を板継手のものに直したもの[4]で、F*及びF2*は、継手形式毎の線図に継手の応力集中係数を乗じてホットスポット応力基準の線図に直したもの[5]である。また、Dは突合せ継手の線図で、参考のため母材に対するB線図も併せて示している。



D、T*、F*及び F2*はほぼ一致し、何れもホットスポット応力基準の線図として適用できると考えられる。また、これらと B 線図との差は、主として溶接残留応力の存在による平均応力の影響と思われる。

Fig.1 Design S-N Curves (mean line)

3.1.2　溶接残留応力影響

通常提示されている設計 S-N 線図には溶接残留応力の影響が含まれている。平均応力影響を考慮した疲労強度評価を行おうとする場合、線図の中に含まれる溶接残留応力影響分を除去した線図を求める必要がある。そこで、降伏応力に相当する溶接残留応力のシェイク・ダウンによる応力変化を考慮した等価応力範囲の定義に則って、応力比 R=0 の線図を求めると Fig.2 のようになる。尚、推定に際して、材料の降伏応力を 350 MPa と想定し、初期の溶接残留応力は降伏応力に等しいとした。

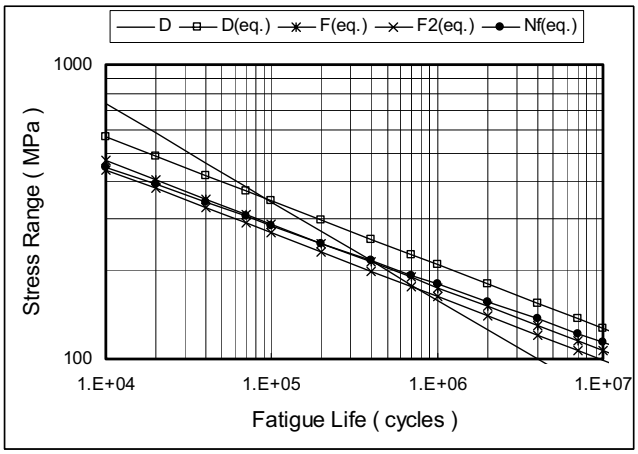


Fig.2 Modified S-N Curves (mean line)

図中で(eq)と記しているのが溶接残留応力の影響を除いた修正S-N線図である。DとD(eq)を比較すると、溶接残留応力影響が含まれる線図においては、降伏応力として想定した 350MPa を境として、低い応力範囲では R=0 の状態よりも大きい平均応力状態になっていることが想定される。また図中にはNf(eq)として、SR216 の試験結果を整理して得た縦リブ角回し溶接十字試験体に対する値[1]を示しているが、F及びF2 線図から溶接残留応力影響を除去した線図と比較して、ほぼ良好な位置関係にあると思われる。

3.2 平均応力状態

3.2.1 ランダム荷重下でのシェイク･ダウンモデル

先に記述した等価応力による疲労強度評価は、荷重が負荷されたときに最大応力（構造的平均応力＋残留応力＋変動応力振幅）が降伏応力を超える場合には、シェイク･ダウンにより局所的な残留応力が変化するとしてモデル化している。従って、実際に評価しようとする場合、負荷される荷重の履歴を知る必要がある。

実際に船体構造が受ける荷重履歴はランダムであるため、シェイク･ダウンが生じるときの変動応力の大きさ及びその発生時期は確率変数として取り扱われる。設計時に評価を行う場合には、これらを期待値で表現し、構造的平均応力状態が一定の期間における平均応力状態を期待値として求めることことが簡易な取扱いと考えられる。シェイク･ダウンが生じるときの変動応力の大きさとその発生時期の関係は、模式的に Fig.3 のように表される。

Fig.3 Schematic Chart of Time when Shakedown Occur

ここで、δは、最初の状態における平均応力と降伏応力との差で、$2\delta < \Delta\sigma_1 < \cdots < \Delta\sigma_n$ を条件としてシェイク･ダウンが生じ、初期の平均応力 $\sigma_y - \delta$ はその都度、$\sigma_y - \Delta\sigma_1/2, \cdots, \sigma_y - \Delta\sigma_n/2$ と変化する。シェイク･ダウンが生じるときの変動応力の大きさとその発生時期は、以下のように算定される。

$$\Delta\sigma_i = \frac{\int_{\Delta\sigma_{i-1}}^{\infty} x \cdot f(x)dx}{1 - F(\Delta\sigma_{i-1})} \quad ; \quad i = 1,2,\cdots \tag{5}$$

$$N_i = 1 \big/ 1 - F(\Delta\sigma_i)$$

$$\Delta\sigma_0 = 2\delta$$

$F(\bullet)$ ；応力変動の確率分布関数

従って、構造的平均応力状態が一定の期間中における残留応力状態を平均的に決定するような応力変動幅の期待値は以下のように求められる。

$$\overline{\Delta\sigma}(\delta, N^*) = \begin{cases} \Delta\sigma_0 (= 2\delta) & ; N_0 \geq N^* \\ \dfrac{1}{N^*}\left\{ \Delta\sigma_0 N_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\sigma_i (N_i - N_{i-1}) \right. \\ \qquad \left. + \Delta\sigma_n (N^* - N_{n-1}) \right. & ; N_0 < N^* \end{cases} \tag{6}$$

N^* ；構造的平均応力状態が一定の期間

実際の船舶は、就航前の水圧試験により大きな応力が作用し、残留応力状態が変化する部材がある。しかし、漲水区画の如何に関わらない同一部材の評価、及び、安全側の評価の観点から、設計時での評価を考える、$\delta=0$ とする。また、変動応力が指数分布に従う場合について、(6)式で評価されるシェイク･ダウンが生じるときの変動

応力と、考慮する継続期間中における最大値との比を示すと Fig.4 のようである。考慮する継続期間中で最後にシェイク･ダウンが生じる時期の関係から値は変動するが、変動の平均線を引くと黒丸付きの実線のようになる。

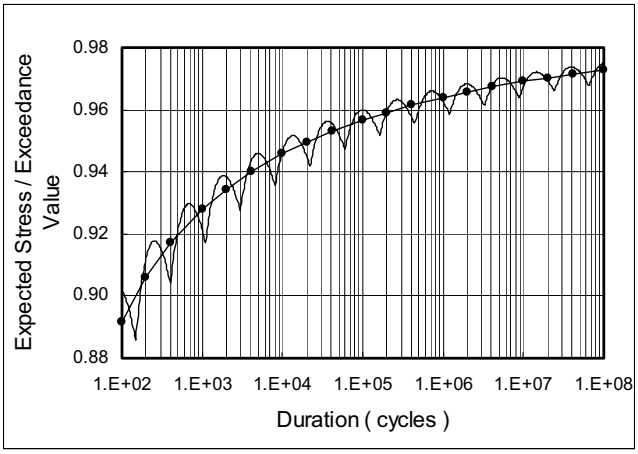


Fig.4 Expected Stress which determine Mean Stress Condition

3.2.2 構造的平均応力の変動

初期に降伏応力相当の残留応力があった場合でも、変動応力が負荷される場合には、シェイク･ダウンにより残留応力状態が変化し、更に、積み付け条件の変更等により就航中に構造的平均応力状態が変化する場合、疲労強度へ及ぼす平均応力の影響が現れる。ここでは、各構造的平均応力状態での就航継続期間が大差ない場合（オーダーが同じ）について取り扱うものとする。

最初の就航時における平均応力状態は、前節より以下にあると期待される。

$$\sigma_{m1} = \sigma_{mean1} + \sigma^*_{res1} = \sigma_y - \frac{\overline{\Delta\sigma}\left(\delta = 0, N_1^*\right)}{2} \qquad (7)$$

σ_{mean1}；最初の状態での構造的平均応力

σ^*_{res1} ；最初の状態での残留応力

次の就航において構造的平均応力が増える場合には(7)式が再度適用される。一方、構造的平均応力が減る場合については、平均応力状態は以下のように期待される。

$$\sigma_{m2} = \sigma_{mean2} + \sigma^*_{res2}$$

$$= \begin{cases} \sigma_{m1} - \left(\sigma_{mean1} - \sigma_{mean2}\right) & ; \quad \delta^* > \dfrac{\Delta\sigma_2^*}{2} \\ \dfrac{\overline{\Delta\sigma}\left(\delta^*, N_2^*\right)}{2} - \sigma_y & ; \quad \delta^* \le \dfrac{\Delta\sigma_2^*}{2} \end{cases} \qquad (8)$$

$$\delta^* = \sigma_y + \sigma_{m1} - \left(\sigma_{mean1} - \sigma_{mean2}\right)$$

$$\Delta\sigma_2^* = F^{-1}\left(1 - 1/N_2^*\right)$$

設計時評価の取扱いとしては、対象個所における構造的平均応力が引張り側に厳しい状態を最初の状態と考えれば良い。また、構造的平均応力状態が一定と考えられる期間を 1～2 週間程度とすると､オーダー的に 10^5 回の繰り返しとなり、構造的平均応力状態が一定の期間中における残留応力状態を平均的に決定するような応力変動幅の期待値は、Fig.4 から超過確率 10^{-5} に対する応答値の約 0.96 倍の値となる。

4．適用例

以上の手順により、設計時に疲労強度への平均応力影響を考慮した評価を行うことができる。そこで、過去に経験した SHVLCC の船側縦通肋骨疲労損傷の評価へと適用することにより、評価手法の妥当性について検討する。

4.1 評価対象

評価対象として第 1 世代及び第 2 世代の SHVLCC 夫々9 隻及び 24 隻の計 33 隻について、船側縦通肋骨の横桁貫通部の疲労損傷状況を確認した船齢時までの累積疲労被害度を、以上に記述した手法により評価することとした。評価対象船について、建造年、状況確認時の船齢、横隔壁貫通部及び横桁貫通部における疲労亀裂の発生の有無をまとめて Table1 に示す。尚、表中の” -- “は疲労亀裂が発見されなかったことを意味し、” C”は疲労亀裂が発見されたことを意味する。疲労損傷は COT 内に発見され WBT 内には発見されなかった。また、亀裂を発見したときの船齢を疲労亀裂発生寿命と考えることとし、満載喫水線近傍から下方の 13 本の船側縦通肋骨を評価範囲とした。

Table 1 List of Assessed SHVLCCs

Ship	Built	Age	T.Bhd.	T.Ring
1-A	1973	18.9	--	--
1-B	1976	14.4	C	--
1-C	1974	16.8	C	--
1-D	1972	18.4	C	C
1-E	1972	19.2	C	C
1-F	1973	16.8	C	--
1-G	1974	17.7	--	--
1-H	1974	17.1	C	--
1-I	1975	15.8	C	--
2-A	1986	3.8	C	C
2-B	1987	2.7	C	--
2-C	1987	2.9	--	--
2-D	1985	4.8	C	C
2-E	1986	4.7	--	--
2-F	1989	1.7	C	--
2-G	1988	2.5	C	C
2-H	1989	1.8	--	--
2-I	1988	2.3	--	C
2-J	1986	3.8	C	--
2-K	1987	3.0	C	--
2-L	1986	4.4	C	--
2-M	1989	1.8	C	--

2-N	1985	4.8	C	--
2-O	1989	1.5	--	--
2-P	1984	5.9	--	--
2-Q	1988	2.2	C	--
2-R	1986	3.9	C	--
2-S	1986	2.0	--	--
2-T	1986	4.0	--	--
2-U	1989	1.8	--	--
2-V	1986	3.9	--	--
2-W	1987	3.7	C	--
2-X	1990	2.1	C	--

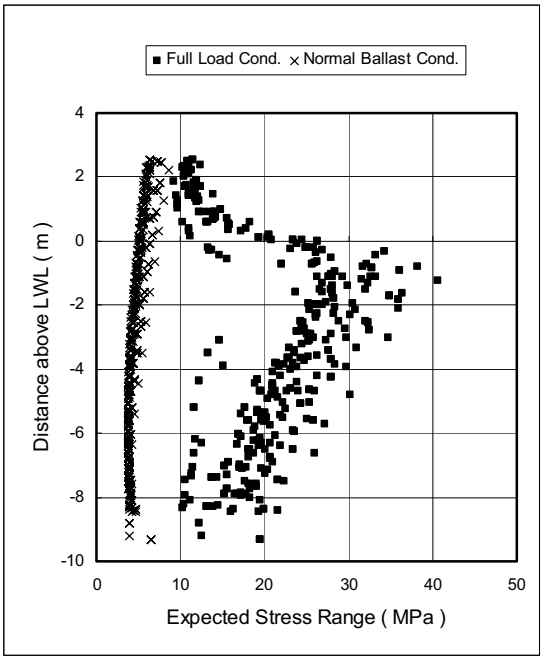
4.2 評価手順

累積疲労被害度の評価は以下の手順に従って行った。

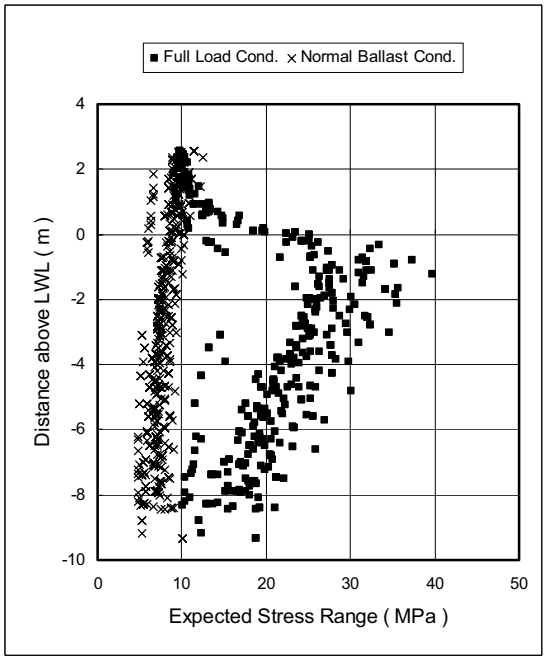
(1) 荷重評価

変動荷重の評価は、Strip法にる荷重成分（波浪変動圧力、変動内圧、船体縦及び水平曲げモーメント）の応答関数及びそれらの合成により行った。変動内圧の評価は、SR216A/B法[6]の適用により、タンク中心の垂直･水平加速度による圧力変動を合成して行った。

静荷重の評価は、小骨の板側及びフェイス側からの静的な圧力差により求めた。この際の液体比重は、海水に対して 1.025 を用い、原油に対しては 0.874 を用いた。



(1) COWT



(2) WBWT

Fig.5 Expected Stress Range

(2) 応力評価

公称応力を圧力による応力及び船体曲げによる応力夫々について梁理論の適用により求め、圧力による面外曲げ及び船体曲げによる軸力の荷重負荷形式の違いに応じて、応力集中係数を乗じることによりホットスポット応力の評価を行った。

圧力による面外曲げに対する応力集中係数は、貫通部の詳細構造形式に応じた応力集中係数に非対称断面肋骨の横倒れにより生じる２次曲げ応力の影響を考慮した応力集中係数[7]を用いた。船体曲げによる軸力に対する応力集中係数は 1.3 を用いた。

また、異なる荷重成分による合成応力の評価は、位相差を考慮した応答関数の合成により行った。

(3) 変動応力の統計解析

求めた応力の応答関数に線形理論を適用した短期･長期予測を行い、Weibull近似を行うことにより変動応力の長期分布を求めた。短期予測を行うに際し、波の方向性分布は$\cos^2$分布を用いた。長期予測はAll Headings に対する予測を行い、長期波浪頻度はBMTのPG-Japan航路通年のものを用いた。Weibull近似は、最小二乗法により行った。

喫水線近傍の肋骨の評価に際して、波浪変動外圧の変動幅と静水圧の大きさとの関係から波高に対する非線形影響を考慮して長期分布の修正を行った。

(4) 平均応力の考慮

累積疲労被害度を算定する際に用いる S-N 線図は、UK-HSE の D 線図から、降伏応力相当の 350MPa の溶接残留応力を想定して線図に含まれる溶接残留応力影響を除去した R=0 の線図を用いた。

平均応力影響の考慮は、残留応力、構造的平均応力、変動応力変動幅の長期分布の関係から、シェイク･ダウンにより変化する局所的な平均応力状態を推定し、等価

応力を評価することにより行った。

構造的平均応力を考える際に、満載状態とバラスト状態の 2 状態を考え、各状態の継続時間を同じとした。

(5) 疲労被害度の算定

疲労被害度の算定は、満載状態とバラスト状態毎に単位時間中の疲労被害度を計算し、損傷状況確認時までの期間を考慮して、それらの線形和として算定した。累積疲労の積算方法は、Miner の線形被害則により行い、低応力域で Heibach 修正を行った。

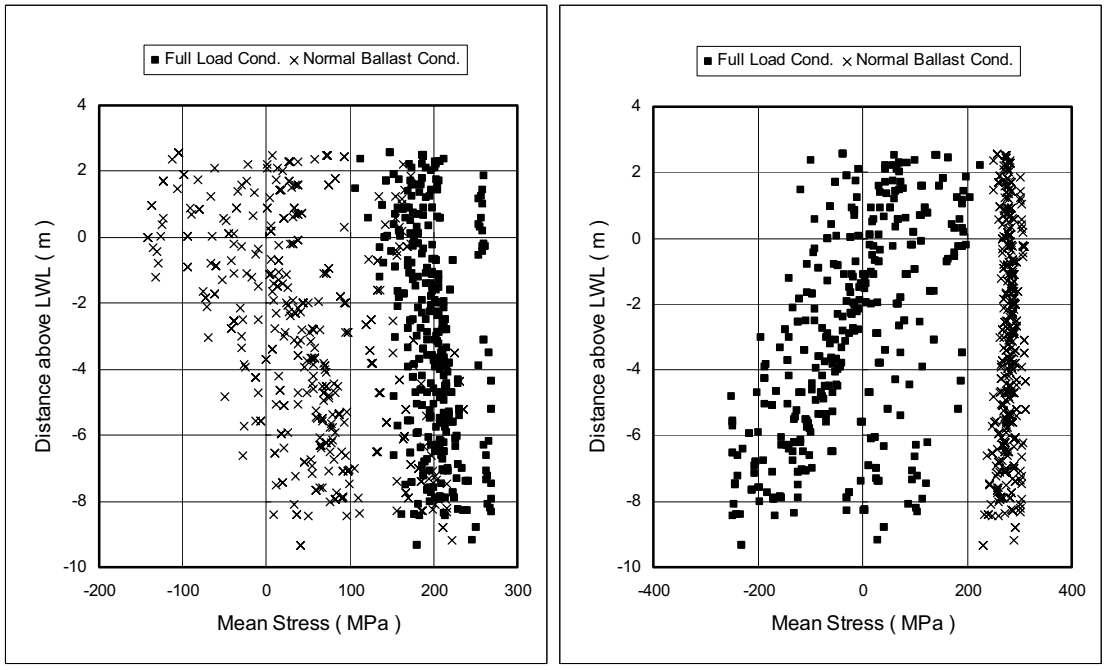
4. 3 評価結果

4. 3. 1 応力評価結果

評価した変動応力について、満載状態とバラスト状態毎に長期分布を考慮した期待値として示すと Fig.5 のようである。Fig.5(1)は Wing Tank が COT である場合を示し、Fig.5(2)は WBT である場合を示している。

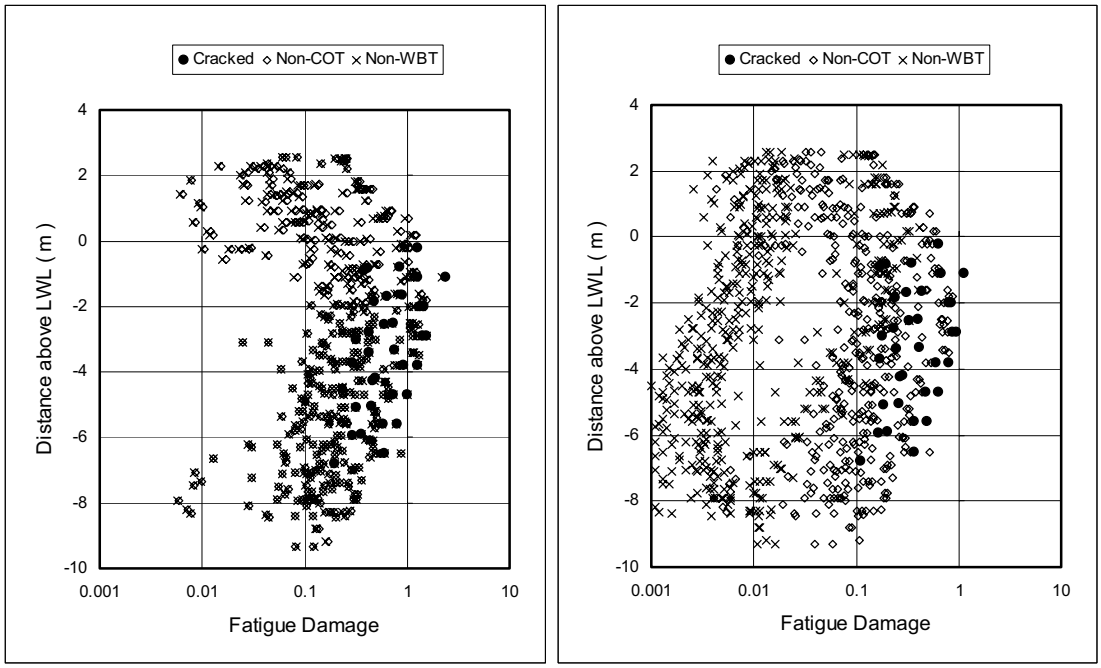
評価対象部材の位置が満載喫水近傍であることから、バラスト状態での変動応力値はほぼ船体曲げ成分による応力だけになり、総じて低い値を示している。

満載状態における評価 Tank が COT であるか WBT



(1) COWT (2) WBWT

Fig.6 Expected Mean Stress



(1) Not Considering the Effect of Mean Stress　(2) Considering the Effect of Mean Stress

Fig.7 Assessed Cumulative Fatigue Damages

であるかの違いについては、内圧変動による応力の差が考えられるが、これら対象部材については波浪変動外圧が支配的であることから、疲労に影響を及ぼす変動応力の値についての顕著な差は認められなかった。

次いで、(7)式及び(8)式から求められた満載状態及びバラスト状態での期待平均応力は Fig.6 のようである。Wing Tank が COT であるか WBT であるかにより、引張り側に大きな平均応力状態となる積付け状態が逆転していることがわかる。すなわち、変動応力状態が厳しい満載状態において、COT ではより大きな平均応力状態となっていることが伺える。

4.3.2　累積疲労被害度評価結果

変動応力の長期分布に基づき、各船について損傷状態を確認した時点までの累積疲労被害度を算定した。算定に当っては、平均応力影響を考慮しない場合と考慮する場合の 2 通りの方法で行った。結果を Fig.7 に示す。

平均応力影響を考慮しない疲労被害度の評価結果からは、COT 内に疲労損傷が集中し WBT 内には損傷が無かったという事実を説明することはできないが、考慮することによりその発生傾向を十分説明することが可能であることが分かる。

総評価対象個所中の損傷個所の占める割合は 3.6%であり、ほぼ寿命分布の左の裾野辺りにおける損傷事象の発生と考えられることから、COT 内における損傷・非損傷の区分を明瞭に見ることはできないが、損傷個所の被害度は概ね比較的大きい値を示している。

4.3.3　疲労強度評価時の基準

以上のように評価される累積疲労被害度に基づいて疲労強度の判定を行うための基準値は、損傷実績を説明できる必要がある。そこで、対象部材についての損傷発生と非発生を確率的に妥当なように評価・分類できるよう、損傷実績に基づき寿命分布を推定した。推定に当り、寿命分布を Weibull 分布と仮定し母数の値を最尤推定法により求めた。但し、累積被害則による場合は疲労被害度と寿命は線形関係にあるので、これらの結果は寿命時における累積疲労被害度の値の分布として評価した。平均応力影響を考慮する場合としない場合について結果を Table2 に示す。表中には D 線図における確率特性の値も併せて示している。

表中の mean、std.dev.は推定分布における疲労寿命時の累積疲労被害度の平均及び標準偏差を示し、97%は 97% survival limit に対応する値を、cov は変動係数をそれぞれ示す。また、Likelihood は推定した分布の損傷実績への当て嵌まりの程度を示す指標で、算定寿命及び推定分布を平均値周りで正規化したときの確率エントロピーの値を示し、この値が大きいほど当て嵌まりの程度が良いことを意味している。推定結果から、疲労強度へ及ぼす平均応力影響を考慮に入れた評価では、推定される寿命分布は設計線図の基となった寿命分布とほぼ良好な関係を示し、設計線図として D 線図に本手法を適用することにより十分有効な評価ができるものと考えられる。

Table 2.　Estimation of Fatigue Life

	Effect of Mean Stress		UK-HSE D curve
	not account	account	
mean	1.85	1.05	1.00
std.dev.	0.62	0.35	0.31
97%	0.70	0.40	0.42
cov(%)	33.80	33.90	30.96
Likelihood	65.49	76.24	---

5．結　　言

従来、溶接部には材料の降伏応力に近い大きな溶接残留応力が存在するので、構造的平均応力の疲労強度へ及ぼす影響は無視できるとされてきた。しかし、実際に経験される疲労損傷の発生傾向は、構造的平均応力の影響を受けていると考えられる。

そこで、修正 MIL-HDBK-5D 法に基づく等価応力により、設計時に平均応力影響を考慮に入れた評価が行えるよう定式化を行った。この評価手法を、過去に経験された SHVLCC の船側縦通肋骨の疲労損傷に対する評価に適用した結果、以下の知見が得られた。

(1) 平均応力影響を考慮することにより、COT には損傷があったが WBT には無かったという損傷の発生傾向の差を説明することができる。

(2) 損傷実績から推定される寿命分布は、従来広く用いられてきた UK-HSE の D 線図の基となった寿命分布ととほぼ似通た特性を有している。

(3) 修正 MIL-HDBK-5D 法に基づく等価応力による平均応力影響の考慮は、損傷実績への適用から、有効な手法であることが確認された。

(4) 設計時に平均応力影響を考慮に入れた疲労強度評価を行う場合には、溶接残留応力影響を含む設計 S-N 線図からその影響分を除去して、シェイク・ダウンによる残留応力変化を考慮した平均応力状態を求め、更に、積付け条件の変化に応じた構造的平

均応力の変化を考慮することにより、有効に行うことができる。

参 考 文 献

1) 松岡　他、「鋼溶接継ぎ手の疲労亀裂発生寿命の一評価法」、日本造船学会論文集　第 178 号、1995
2) 二瓶　他、「疲労損傷パラメータを用いた寿命予測」、日本造船学会論文集　第 156 号、1984
3) Erdogan F. et.al., “The Effect of Mean Stress on Fatigue Crack Propagation in Plate under Extension and Bending”, Trans.ASME, J. of Basic Eng., 89, 1967
4) 金田、「リブ十字隅肉溶接部の応力集中」、第５回東京大学工学部技術発表会報告、1990
5) 川野　他、「疲労強度精査手法に関する基礎的研究」、日本造船学会論文集　第 176 号、1994
6) SR216 研究部会、「大型船縦通肋骨材の強度に関する研究」総合報告書、(社)日本造船研究協会、1994
7) 日本海事協会、「鋼船規則検査要領 C 編」、2000