インヒビター添加清水中における Cr-Mo 铸鋼の 重畳疲労強度と疲労寿命の推定[†]

三 浦 健 蔵* 大 井 利 継* 田 中 孝 雄**

Superposed Fatigue Strength and Fatigue Life Estimation of Cr-Mo Cast Steel in Fresh Water with Added Inhibitor

by

Kenzou MIURA*, Toshitugu OHI* and Takao TANAKA**

Fatigue tests under superposed stress were carried out in air and in fresh water containing sodium nitrite inhibitor (NaNO_2) at 80°C using a relatively large Cr-Mo cast steel specimen. The applicability of the equivalent frequency method (ELF method) and the range pair mean method (RPM method) was investigated. The modified Goodman's method (RPM method I) and Yamada's method (RPM method II) were used to evaluate the effect of mean stress on stress amplitude.

The best estimation of fatigue life among those three methods was RPM method II. The ratio of the experimental life, N to the estimated life, $\bar{N}_{es}$ tended to become low at the high life side for all the three methods. However, when RPM method II was applied on the basis of the completely reversed (stress ratio $R=-1$) $S-N$ curve, in which the values under the fatigue limit were corrected, $N/\bar{N}_{es}$ became within the range of $1/3 \leq N/\bar{N}_{es} \leq 5$. It was found that NaNO_2 was effective in the prevention of corrosion fatigue. However, the experimental life in fresh water containing NaNO_2 at 80°C became a little bit lower than that in air. The relation between $\bar{N}_{es}$ and the cumulative damage, D was represented as follow.

$$\bar{N}_{es} = C/D$$

$$C=1.00 \text{ (in air)}$$

$$C=0.80 \text{ (in fresh water containing } \text{NaNO}_2 \text{ at } 80^\circ\text{C)}$$

キー・ワード：腐食疲労，インヒビター，重畳疲労，寿命推定

1 ま え が き

船用ディーゼル機関燃焼室構成部材には，機関の発停によって生ずる熱応力（低周波成分）とこれに重畳した燃焼ガス圧の繰返しに伴う機械的応力（高周波成分）が作用する。このような重畳波形疲労条件下では，単一波形疲労条件下で見られるような疲労限度は存在しないと言われている。ディーゼル機関のシリンダカバーでは，冷却面での腐食生成物付着による冷却効率の低下や腐食疲労損傷を防止するため，冷却水中へ亜硝酸塩系インヒビター添加が行われている。しかしながら，重畳疲労条件下における亜硝酸塩系インヒビターの防食効果やインヒビター添加溶液中における部材の疲労寿命については，実用上非常に重要であるにもかかわらず，未だ研究により明確にされていない。

そこで本研究では，実機シリンダカバーの肉厚に近い直径を有する比較的大型の丸棒試験片を用いて重畳疲労試験を実施し，重畳疲労寿命について検討した。

さらに亜硝酸塩系インヒビターを添加した溶液中における重畳疲労試験から，その疲労寿命とインヒビターによる腐食疲労防止効果について検討したので，その結果について報告する。

2 実 験 方 法

2・1 供試材

供試材はディーゼル機関の燃焼室壁部材に広く用いられている Cr-Mo 铸鋼で， 1050°C ，2時間保持油焼入れ後， 690°C ，2時間焼もどしの熱処理を施した。供試材の化学組成と機械的性質を Table I, II に示す。

Table I. Chemical composition of specimen (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.17	0.54	0.81	0.012	0.008	0.72	0.38

[†] 原稿受理 昭和59年10月9日 Received Oct. 9, 1984

* 正 会 員 三井造船(株)玉野研究所 玉野市玉原, Tamano Laboratory, Mitsui Engineering and Shipbuilding Co. Ltd., Tamahara, Tamano

** 正 会 員 三井造船(株)ディーゼル事業部 玉野市玉, Diesel Engine Department, Mitsui Engineering and Shipbuilding Co. Ltd., Tama, Tamano

Table II. Mechanical properties of specimen.

Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	True strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Brinell hardness
471	618	1059	25	60	187

2.2 試験方法

疲労試験片は試験部の径が $\phi 50$ mm の砂時計型試験片で、試験片形状、疲労試験機および腐食水と腐食水循環系は前報³⁾と同じである。今回用いた応力波形を Fig. 1 に示す。Fig. 1 (a), (b) は完全両振り (最大応力に対する最小応力の比 $R = -1$) および完全片振り ($R \approx 0$) 正弦波の単独波で、繰返し速度は 600 cpm である。Fig. 1 (c) は熱応力に相当する両振台形波を 1 次波とし、ガス圧応力に相当する正弦波を 2 次波とする重畳波である。1 次波応力の上昇時間 T_U および下降時間 T_D はともに 20 秒、圧縮側の保持時間 T_O は 30 秒で、2 次波の重畳山数 n は、 $n = 10^4$ cycles、繰返し速度は 600 cpm である。

(a) Completely reversed sine wave.
(b) Zero-tension sine wave.
(c) Superposed wave.

Fig. 1. Stress wave.

1 次波応力振幅 σ_{a1} と 2 次波応力振幅 σ_{a2} との和を最大応力振幅 $\sigma_{\max} (= \sigma_{a1} + \sigma_{a2})$ 、最大応力振幅 $\sigma_{\max}$ に対する 2 次波応力振幅 σ_{a2} の割合を応力比 m ($= \sigma_{a2} / \sigma_{\max}$) と定義する。重畳疲労試験では、最大応力振幅 $\sigma_{\max} = 588, 549, 510, 471, 432$ MPa に対して、応力比 $m = 0.5, 0.4, 0.3$ を組み合わせた。疲労試験は、大気中および亜硝酸塩系インヒビター (以下、 NaNO_2 と記す) を 3 000 ppm 添加した 80℃、ASTM 腐食水中で実施した。

3 疲労寿命推定法

今回用いた疲労寿命推定法は等価繰返し数法⁴⁾ (以下、

ELF 法と記す) とレンジ・ペア・ミーン法⁵⁾ (以下、RPM 法と記す) である。疲労寿命推定法については既に多くの文献があるので、ここではその主要な点のみを記した。

疲労寿命推定に際して一定応力振幅完全両振り ($R = -1$) $S-N$ 線図を基準とし、 $S-N$ 線図は式(1)のように表される。

$$N_f \cdot \sigma_a^{a(f)} = K(f) \quad (1)$$

N_f : 破断繰返し数

σ_a : 応力振幅

$a(f), K(f)$: 実験定数

$S-N$ 線図は疲労限度以下まで直線を延長して疲労限度以下の応力を評価し (修正マイナー則)、疲労損傷 D を計算する。推定疲労寿命 $\bar{N}_{es}$ は式(2)で表される。

$$\bar{N}_{es} = C/D, \quad C: \text{Const}(=1.00) \quad (2)$$

なおレンジ・ペア・ミーン法における平均応力の効果は、修正グッドマンの方法において引張強度 σ_B の代わりに真破断力 σ_T を用いた方法⁶⁾ (以下、RPM 法 I と記す) および山田の方法⁷⁾ (以下、RPM 法 II と記す) により両振り応力振幅 σ_t に換算する。換算式は次式のとおりである。

$$\text{修正グッドマンの方法} \quad \sigma_t = \sigma_a / (1 - \sigma_m / \sigma_T) \quad (3)$$

σ_T : 真破断力

$$\text{山田の方法} \quad \sigma_t = \sigma_a + q \sigma_a^r \cdot \sigma_m \quad (4)$$

q, r : 実験定数

$$q = 0.4, \quad r = 0 \quad \text{とすると} \quad (5)$$

$$\sigma_t = \sigma_a + 0.4 \sigma_m \quad (6)$$

4 実験結果および考察

4.1 疲労試験結果

大気中および NaNO_2 添加 80℃、ASTM 腐食水中における両振り ($R = -1$) と片振り ($R \approx 0$) の $S-N$ 線図を Fig. 2 に示す。 NaNO_2 添加 80℃、ASTM 腐

Fig. 2. Fatigue data of completely reversed and zero-tension stress for Cr-Mo cast steel in air and in ASTM solution containing NaNO_2 at 80℃.

食水中における疲労強度は、大気中よりわずかではあるが低下する。しかし一定応力振幅条件では疲労限度 σ_w が存在する。応力振幅 σ_a と破断繰返し数 N_f とは対数的に直線関係が認められ、次式のように表すことができる。

大気中、両振り ($R = -1$)

$$N_f \cdot \sigma_a^{13.55} = 1.17 \times 10^{40} \quad (7)$$

$$\sigma_w \approx 304 \text{ MPa} \quad (8)$$

片振り ($R \approx 0$)

$$N_f \cdot \sigma_a^{4.22} = 8.28 \times 10^{15} \quad (9)$$

$$\sigma_w \approx 191 \text{ MPa} \quad (10)$$

NaNO₂ 添加 80℃, ASTM 腐食水中, 両振り ($R = -1$)

$$N_f \cdot \sigma_a^{8.75} = 3.45 \times 10^{27} \quad (11)$$

$$\sigma_w \approx 284 \text{ MPa} \quad (12)$$

片振り ($R \approx 0$)

$$\sigma_w \approx 181 \text{ MPa} \quad (13)$$

重畳疲労試験結果については、2 次波の応力振幅 σ_a と 2 次波の破断繰返し数 N_f との関係を応力比 m をパラメータとして整理した。Fig. 3, 4 は大気中および NaNO₂ 添加 80℃, ASTM 腐食水中における応力比

Fig. 3. Superposed fatigue data for Cr-Mo cast steel in air.

Fig. 4. Superposed fatigue data for Cr-Mo cast steel in ASTM solution containing NaNO₂ at 80°C.

$m = 0.5, 0.4, 0.3$ の重畳疲労試験結果である。Fig. 3, 4 によれば、重畳疲労強度と破断繰返し数との間には、応力比 $m = 0.5, 0.4, 0.3$ に対して対数的な直線関係が認められる。NaNO₂ 添加 80℃, ASTM 腐食水中の疲労強度は大気中と比べ若干低くなっているが、疲労強度に特に大きな低下はなく、塑性変形を伴った重畳疲労条件下においても NaNO₂ による腐食疲労防止効果が認められる。NaNO₂ による鋼の防食過程について H. H. Uhlig らが述べているように、NO₂⁻ イオンと溶存酸素との吸着層の形成と、これに⁸⁾ つづく不働態皮膜の形成によるものであると報告した。妨害イオンと NO₂⁻ イオン、溶存酸素との競合吸着から、局部的にも妨害イオン濃度の増加を生じなければ鋼の不働態化は安定であり、試験片に塑性疲労損傷を受けても NO₂⁻ イオンと溶存酸素の吸着によって不働態化は維持されたものと考えられる。

4・2 疲労寿命の評価

大気中および NaNO₂ 添加 80℃, ASTM 腐食水中における重畳疲労試験結果について、前述の 3 種類の疲労寿命推定法を適用し、1 次波を基準とする推定寿命 $\bar{N}_{es}$ を算出した。1 次波を基準とする重畳波形下の実験寿命 N 、推定寿命 $\bar{N}_{es}$ および実験寿命 N と推定寿命 $\bar{N}_{es}$ との比 $N/\bar{N}_{es}$ を Table III, IV に示す。また Fig. 5~7 は大気中重畳疲労の実験寿命 N と推定寿命 $\bar{N}_{es}$ との相関性を示すもので、寿命推定法はそれぞれ ELF 法 (Fig. 5) では、 $1/2 \leq N/\bar{N}_{es} \leq 7$ で比較的安全側の寿命推定となるが、推定寿命 $\bar{N}_{es} \geq 10^2$ cycles の高寿命側で $N/\bar{N}_{es}$ は低下する傾向が認められる。RPM 法 I (Fig. 6) では、 $1/100 \leq N/\bar{N}_{es} \leq 4$ であるが、寿命比 $N/\bar{N}_{es}$ は広範囲に分散しており、特に高寿命側の $\bar{N}_{es}$ で危険側の寿命を推定する。RPM 法 II (Fig. 7) では、 $1/4 \leq N/\bar{N}_{es} \leq 5$ で、全体としてほぼ $N/\bar{N}_{es} = 1$ の近傍に分散している。 $N/\bar{N}_{es}$ の分散範囲から今回適用した寿命推定法を比較すると、RPM 法 II の寿命推定の精度が最も高いことが分った。しかし、RPM 法 II においても ELF 法と同様、 $\bar{N}_{es} \geq 10^2$ cycles の高寿命側で $N/\bar{N}_{es}$ は低下し、危険側の寿命を推定する傾向にある。 $N/\bar{N}_{es}$ の低下原因の一つとして、基準 S-N 線図のとり方が考えられる。¹⁰⁾

大気中の単独波疲労強度 (Fig. 2) と重畳疲労強度 (Fig. 3) を比較すると、片振り ($R \approx 0$) の時間強度は $m = 0.5$ の重畳疲労強度に一致している。また $m = 0.5$ の重畳疲労強度は $m = 0.4, 0.3$ の重畳疲労強度とはほぼ比例関係にある。片振り ($R \approx 0$) の S-N 線図を基準として山田の方法を適用すると、負荷応力は次式のように表すことができる。

$$\sigma_t = \sigma_a + q \cdot (\sigma_m - \sigma_a), \quad q = 0.2 \quad (14)$$

Table III. Results of fatigue test under superposed stress and fatigue life estimation (in air).

Stress $\sigma_{\max}$ (MPa)	Stress ratio m	Experi- mental life N (cycles)	ELF method		RPM method I		RPM method II	
			$\bar{N}_{es}$ (cycles)	$N/\bar{N}_{es}$	$\bar{N}_{es}$ (cycles)	$N/\bar{N}_{es}$	$\bar{N}_{es}$ (cycles)	$N/\bar{N}_{es}$
588	0.5	17.3	3.52	4.92	5.01	3.45	4.40	3.93
588	0.5	19.9	3.52	5.66	5.01	3.97	4.40	4.52
588	0.4	45.9	8.86	5.18	33.9	1.36	14.7	3.12
588	0.3	155.8	22.5	6.93	339.6	0.46	53.9	2.89
549	0.5	41.5	8.95	4.64	18.0	2.31	11.2	3.70
549	0.4	77.0	22.6	3.41	133.5	0.58	37.5	2.05
549	0.3	215.0	57.3	3.75	1251.3	0.17	137.2	1.57
549	0.3	365.6	57.3	6.38	1251.3	0.29	137.2	2.67
510	0.4	113.9	61.5	1.85	554.7	0.21	102.3	1.11
510	0.3	286.1	156.3	1.83	4618.2	0.06	374.3	0.76
510	0.3	306.7	156.3	1.96	4618.2	0.07	374.3	0.82
471	0.4	241.4	182.0	1.33	2454.8	0.10	302.5	0.80
471	0.3	574.0	46.2	11.24	17422.2	0.03	1106.7	0.52
432	0.5	138.8	234.7	0.59	1259.9	0.11	293.8	0.47
432	0.3	931.7	1501.9	0.62	68923.4	0.01	3596.5	0.26

Table IV. Results of fatigue test under superposed stress and fatigue life estimation (in ASTM solution containing NaNO_2 at 80°C).

Stress $\sigma_{\max}$ (MPa)	Stress ratio m	Experi- mental life N (cycles)	ELF method		RPM method I		RPM method II	
			$\bar{N}_{es}$ (cycles)	$N/\bar{N}_{es}$	$\bar{N}_{es}$ (cycles)	$N/\bar{N}_{es}$	$\bar{N}_{es}$ (cycles)	$N/\bar{N}_{es}$
588	0.5	26.0	3.52	7.40	5.01	5.19	4.40	5.91
588	0.5	38.3	3.52	10.9	5.01	7.65	4.40	8.70
588	0.4	30.9	8.86	3.49	33.9	0.91	14.7	2.11
588	0.4	30.9	8.86	3.49	33.9	0.91	14.7	2.10
588	0.4	39.2	8.86	4.43	33.9	1.16	14.7	2.66
588	0.3	94.0	22.5	4.18	339.6	0.28	53.9	1.75
549	0.5	17.0	8.95	1.92	18.0	0.96	11.2	1.54
549	0.5	19.6	8.95	2.19	18.0	1.09	11.2	1.75
549	0.4	45.5	22.6	2.02	133.5	0.34	37.5	1.21
549	0.4	70.6	22.6	3.13	133.53	0.53	37.5	1.88
549	0.3	171.1	57.3	2.99	1251.3	0.14	137.2	1.25
510	0.5	85.0	24.4	3.48	68.7	1.24	30.6	2.78
510	0.4	105.0	61.5	1.71	554.7	0.19	102.3	1.03
510	0.3	228.0	156.3	1.46	4618.2	0.05	374.3	0.61

Fig. 5. Relation between estimated life $\bar{N}_{es}$ by ELF method and experimental life N in air.

ただし $m \leq 0.5$

Fig. 6. Relation between estimated life $\bar{N}_{es}$ by RPM method I and experimental life N in air.

RPM 法 II による低応力側での推定寿命を修正するため、両振り ($R = -1$) および片振り ($R \approx 0$) の $S-N$ 線図を基準とし、山田の方法により平均応力を評価し

た。Fig. 8 は、実験寿命 N と両振り ($R = -1$) と片振り ($R \approx 0$) の 2 種類の $S-N$ 線図を基準にした RPM 法 II による $\bar{N}_{es}$ との相関性を示すものである。両者の

Fig. 7. Relation between estimated life $\bar{N}_{es}$ by RPM method II and experimental life N in air (• estimated life $\bar{N}_{es}$ for the base of modified S-N curve).

Fig. 8. Relation between estimated life $\bar{N}_{es}$ by RPM method II and experimental life N in air (the basis of completely reversed and zero-tension S-N curve).

関係は疲労試験のばらつきの範囲内で一致し、非常に良好な推定寿命の範囲を得ることができた。 $N/\bar{N}_{es}$ は

$$\frac{1}{3} \leq N/\bar{N}_{es} \leq 3 \quad (15)$$

片振り ($R \approx 0$) の S-N 線図を基準にした RPM 法 II が良好な寿命推定になった理由として、本実験に用いた重畳応力波形が重畳山数 $n=10^4$ の 2 重重畳応力波形であり、また両振り ($R=-1$) より片振り ($R \approx 0$) に近い応力波形であった。平均応力の評価について理論的な根拠が乏しいため、片振り ($R \approx 0$) の S-N 線図を基準にした平均応力評価法が外挿の程度は少なく良好であったことなどが考えられる。

前述のように両振 ($R=-1$) S-N 線図を基準にすると、 $\bar{N}_{es}$ の増加とともに $N/\bar{N}_{es}$ は低下し、 $\bar{N}_{es} \geq 10^2$ の高寿命側で危険側の寿命を推定することを示した。両振 ($R=-1$) S-N 線図を基準にするならば、 $\bar{N}_{es} \geq 10^2$ cycles に相当する疲労限度以下の S-N 線図を Corten-Dolan 流に補正する必要がある。 $N/\bar{N}_{es}$ の結果から両振 ($R=-1$) S-N 線図を補正するため応力

振幅 σ_a を $\sigma_a^{1/2}$ に置き換えると、疲労限度以下の基準 S-N 線図は次式のように表される。

$$N \cdot \sigma_a^{13.55/2} = 1.77 \times 10^{13} \quad (\sigma_a \leq 304 \text{ MPa}) \quad (16)$$

補正 S-N 線図を基準とし、式(14)、(11)を用いて試験結果の疲労寿命を算出し、 N と $\bar{N}_{es}$ との相関性について検討した。その結果を Fig. 7 中に • 印で示した。RPM 法 II の推定結果に比べ、本法の寿命推定による結果は実験寿命 N に近似され、良好な推定寿命の範囲を得ることができた。 $N/\bar{N}_{es}$ は

$$\frac{1}{3} \leq N/\bar{N}_{es} \leq 5 \quad (17)$$

以上に述べた RPM 法 II を、実機ピストンクラウンの損傷事例に適用すると次のような結果が得られた。Fig. 9 は油冷却のシリンダ径 42 mm の軸対称ピストンクラウン (42 VBF 型) で、材質は Cr-Mo 鋳鋼である。就航後の定期点検から、Fig. 9 中 A 点で示したピストンクラウンの一部にき裂が発見された。き裂発生時期は 3~10 年である。運転実績の調査から、機関の発停頻度は約 50 時間に 1 回で、年平均 2000 時間運転していることが分った。また、機関の繰返し速度を 248 cpm で、重畳山数 n は、 $n=7.44 \times 10^6$ cycles である。

Fig. 9. Construction of piston crown (type 42 VBF).

実機部材から疲労試験片 (試験部径 $\phi 10$ mm) を切り出して回転曲げ疲労試験を実施し、次のような結果が得られた。

$$N_f \sigma_a^{14.81} = 2.46 \times 10^{42}, \quad \sigma_w \approx 245 \text{ MPa} \quad (18)$$

A 点での実機部材肉厚は 38 mm~40 mm、機械加工を施さず鋳肌のままである。寸法効果¹⁴⁾、鋳肌の影響¹⁵⁾による強度低下率 η は、

$$\eta = 0.95 \times 0.80$$

基準 S-N 線図は次式のように表される。

$$N \sigma_a^{14.81} = 4.23 \times 10^{40}, \quad \sigma_a \geq \sigma_w = 187 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$N \sigma_a^{14.81/2} = 6.11 \times 10^{23}, \quad \sigma_a < \sigma_w = 187 \text{ MPa} \quad (20)$$

ただし $R \leq 0.5$

2 次元有限要素法による応力解析結果から、ピストンクラウンの A 点における機械的応力は -76.6 MPa であった。熱応力については本ピストンクラウンに関する詳細な温度分布値がなかったため、同型機関のピス

トンクラウンから推定すると 279 MPa になった. 本結果を用いて, 1 次波繰返し数に相当する機関の発停回数 $\bar{N}_{es}$ を算出すると次のようになる.

$$\begin{aligned}\bar{N}_{es} &\sim 154 \text{ cycles} \\ &= 7700 \text{ hr} (\sim 4 \text{ years})\end{aligned}\quad (21)$$

補正 $S-N$ 線図を基準とした RPM 法 II による寿命推定結果は, 本機関におけるピストンクラウンのき裂発生時期とはほぼ一致し, 本法は寿命推定法として有効であると考えられる.

つぎに, Fig. 10~12 は NaNO_2 添加 80℃, ASTM 腐食水中重畳疲労の実験寿命 N と推定寿命 $\bar{N}_{es}$ との相関性を示すもので, 寿命推定法はそれぞれ ELF 法, RPM 法 I および RPM 法 II である. 実験結果は低寿命側に限られているが, ELF 法 (Fig. 10) では $1 \leq N/\bar{N}_{es}$, ≤ 11 で安全側の寿命を推定し, RPM 法 I (Fig. 11) では $1/20 \leq N/\bar{N}_{es} \leq 8$ で, 寿命比は広範囲に分散している. また大気中の結果と同様, 高寿命側で $N/\bar{N}_{es}$ の低下傾向が認められる. RPM 法 II (Fig. 12) では $1/2 \leq N/\bar{N}_{es} \leq 9$ となり, 一部のデータを除けば良好

Fig. 10. Relation between estimated life $\bar{N}_{es}$ by ELF method and experimental life N in ASTM solution containing NaNO_2 at 80°C.

Fig. 11. Relation between estimated life $\bar{N}_{es}$ by RPM method I and experimental life N in ASTM solution containing NaNO_2 at 80°C.

Fig. 12. Relation between estimated life $\bar{N}_{es}$ by RPM method II and experimental life N in ASTM solution containing NaNO_2 at 80°C (• estimated life $\bar{N}_{es}$ for the base of modified $S-N$ curve).

な結果を示している. なお補正 $S-N$ 線図を基準にした RPM 法 II の推定結果 $m=0.3$, $\sigma_a=153 \text{ MPa}$ を Fig. 12 中に • 印で併記した.

Fig. 3, 4 の重畳疲労試験結果を比較すると, NaNO_2 添加 80℃, ASTM 腐食水中における実験寿命 N_{SOL} と大気中における実験寿命 N_{AIR} との比 $N_{\text{SOL}}/N_{\text{AIR}}$ は 0.85~0.80 になる. 大気中の結果によれば, 高寿命側で実験寿命 N と推定寿命 $\bar{N}_{es}$ が一致しているので, 高寿命側を含めた NaNO_2 添加 80℃, ASTM 腐食中の寿命推定には, 式(2)に示した定数 C を補正する必要がある. 大気中疲労寿命推定において, $C=1.00$ としたが, 重畳疲労試験における実験寿命比 $N_{\text{SOL}}/N_{\text{AIR}}$ から $C=0.80$ とする.

$$\bar{N}_{es} = \frac{0.80}{D} \quad (22)$$

この値は中村らが実験的に求めたインヒビターによる長期間の腐食疲労の影響を考慮した係数 η_3 とほぼ一致している.

5 結 言

比較的大型の Cr-Mo 鋳鋼試験片を用いて, 大気中および NaNO_2 添加 80℃, ASTM 腐食水中で重畳疲労試験を実施し, 重畳疲労寿命について検討した. 得られた結果を要約すると次のとおりである.

(1) ASTM 腐食水 (NaNO_2 添加, 80℃) 中の重畳疲労強度は, 大気中のそれと比較すると若干低くなるが特に大きな疲労強度の低下はなく, NaNO_2 による腐食疲労防止効果が認められる.

(2) 今回用いた 3 種類の疲労寿命推定法 ELF 法, RPM 法 I および RPM 法 II のうち, RPM 法 II が良好な推定寿命を与える. しかしいずれの寿命推定法についても, 高寿命側で $N/\bar{N}_{es}$ の低下傾向が認められる. 疲労限度以下を補正した両振 ($R=-1$) $S-N$ 線

図を基準にすると、高寿命側の実験寿命 N は推定寿命 $\bar{N}_{es}$ に近似し、非常に良好な推定寿命が得られる。

$$\frac{1}{3} \leq N/\bar{N}_{es} \leq 5$$

(3) NaNO_2 添加 80°C 、ASTM 腐食水中における実験寿命は大気中のそれより短くなるため、ASTM 腐食水 (NaNO_2 添加、 80°C) 中では腐食疲労による影響を考慮し、定数 C を補正する必要がある。推定寿命 $\bar{N}_{es}$ と累積損傷 D との関係は次式のように表される。

$$N_{es} = C/D$$

$C=1.00$ (大気中)

$C=0.80$ (NaNO_2 添加 80°C 、ASTM 腐食水中)

本研究の一部が日本造船研究協会第 164 研究部会の研究として行われたことを付記し、関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会報告書, 第83号, p. 4 (1976).
- 2) 例えば, 中村 宏, 田中真一, “機械の疲れ寿命算出法” 第七章 (1972) 養賢堂.
- 3) 三浦健蔵, 熊田 誠, 大井利継, 材料, **34**, 429 (1985).
- 4) 中村 宏, 田中真一, 日本機械学会論文集, **32**, 1755 (1966).
- 5) 河本 実, 石川 浩, 尾上暉隆, 日本機械学会論文集, **37**, 658 (1971).
- 6) 中村陽一, 中村 宏, 堀川 武, 材料, **30**, 809 (1981).
- 7) 山田敏郎, 日本機械学会関西支部第49定時総会講演論文集, p. 67 (1974).
- 8) H. H. Uhlig and S. Matsuda, J. Electrochem. Soc., **111**, 156 (1964).
- 9) 三浦健蔵, 熊田 誠, 三宅良昭, 大井利継, 防食技術, **29**, 85 (1980).
- 10) R. Nishimura, M. Araki and K. Kudo, Corrosion-NACE, **40**, 465 (1984).
- 11) 例えば, H. T. Corten, Proceeding of the International Conference on Fatigue of Metals, p. 235 (1956).
- 12) 構造物の疲れ寿命推定法分科会報告書, p. 8 (1978) 日本機械学会関西支部 1P-SC22 分科会.
- 13) 中村 宏, 恒成利康, 堀川 武, 機械の研究, **31**, 1086 (1979).
- 14) “疲れ強さの設計資料 I”, p. 145 (1974) 日本機械学会.
- 15) “疲れ強さの設計資料 II”, p. 4 (1974) 日本機械学会.