

日本船舶振興会昭和48年度補助事業
“船舶の構造・性能に関する基礎的研究”

研究資料 No. 190

取扱注意

第128研究部会

船殻の腐食と腐食疲れによる 損傷防止対策に関する研究

報告書

昭和49年3月

社団法人

日本造船研究協会

第128研究部会報告書正誤表

研究資料 No.190 昭和49年3月

頁	行	図 表	誤	正															
1	9		タールエポキシ系塗料を用いた塗料が実施され……	タールエポキシ系塗料を用いた塗装が実施され……															
"	下から 17		……膜厚はおよそ 250μ であつた。	……膜厚はおよそ $170\sim250\mu$ であつた。															
"	下から 13		重は繰返し速度……	重は繰返し速度……															
"	下から 12		天燃海水	天然海水															
"	"		…… 60°C に保たれ、恒温	…… 60°C に保ち、恒温															
"	下から 4		1kHz	1KHz															
"	下から 3		C_x および P_x が……	C_x および R_x が……															
2	1		$R_x = \frac{Q_A}{\omega C(1+Q)} (Q^2)$	$R_x = \frac{Q_A}{\omega C(1+Q^2)}$															
"	2		1kHz	1KHz															
"	下から 10		(1) 軟鋼の海水中で疲労強度は	(1) 軟鋼の海水中での疲労強度は															
3	11		……スロット孔縁でのひずみゲージにより測定した。	……スロット孔縁でのひずみをひずみゲージにより測定した。															
"	下から 17		……弾性ひずみ ϵ_0 を P_{max} で割った値……	……弾性ひずみ ϵ_0 とする。 ϵ_0 を P_{max} で割った値……															
4	2		……ウェブプレートでのき裂発生寿命 N_f と	……ウェブプレートでのき裂発生寿命 N_c および破断寿命 N_f と……															
"	下から 4		$N_c = 10^4$ サイクルで $R_c = 1.14$ 程度	$N_c = 10^4$ サイクルで $K_c = 1.14$ 程度															
5		表 1.1.1	紋り	紋り															
"		表 1.1.2	(霧潤気の欄) 天然海水	天然海水															
6		図 1.1.1	図面差換え	別紙のとおり															
"		図 1.1.2	(タイトル) 並列抵抗ブリッジ	並列抵抗ブリッジ															
7		図 1.1.3	(図中の記号説明) 非塗装試験片 大気中 (20°C) 非塗装試験片 海水中 (40°C)	非塗装試験片 大気中 (R.T.) 非塗装試験片 海水中 (20°C)															
8		表 1.2.2	(データ追加)	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">供試体 No.</th> <th colspan="3">疲労寿命 (サイクル)</th> </tr> <tr> <th>スティフナー</th> <th>ウェブプレート</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>M-8</td> <td>N_c</td> <td>2.4×10^4</td> <td>2.9×10^5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>N_f</td> <td>1.406×10^5</td> <td>(試験中)</td> </tr> </tbody> </table>	供試体 No.	疲労寿命 (サイクル)			スティフナー	ウェブプレート		M-8	N_c	2.4×10^4	2.9×10^5		N_f	1.406×10^5	(試験中)
供試体 No.	疲労寿命 (サイクル)																		
	スティフナー	ウェブプレート																	
M-8	N_c	2.4×10^4	2.9×10^5																
	N_f	1.406×10^5	(試験中)																
16		図 1.2.1.4		図 1.2.1.4 を削除															

頁	行	図 表	誤	正
17	1		(タイトル)と塗装の効界塗装の効果
18	5	数 + KHz數 + KHz
20		図2.1.1 a、b	(文字脱落)	
21		図2.1.2	(タイトル) ...返し試験.....	...返試験装置..... 500R
22		図2.1.4 a、b	(タイトル) ... σ_{max} σ_{max}
25	2		(タイトル) ...の防食効界.....	...の防食効果.....
27	下から 12		有孔試験所の.....	有孔試験片の.....
28		表 3.2.2	破断時間 T_i	破断時間 T_f
40	2		...大きな集中を起して	...大きな応力集中を起して
40	5		...防食法としても最も.....	...防食法として最も
"	19			
"	下から 12			
41	下から 2		{ 3% NaCl } 3% NaCl
42	9			
"	下から 6			
40	下から 2		... 1800 c.p.m の場合の方が...	1800 c.p.m の場合に比べ 10 c.p.m の場合の方が.....
"	下から 1		...あるが 1800 c.p.m の...	...あるが 1800 c.p.m の場合より 10 c.p.m の...
43		表 5.1.1	(降伏点の欄) 22.7 Kg/mm^2	26.1 Kg/mm^2
"		表 5.1.2	(No 4) $> 10^7$	10^7
45		図 5.2.1	文字脱落	別紙の通り
47		図 5.2.5	$\text{No.1 } \sigma_a = 30.9$ $\text{No.2 } \sigma_a = 25.0$ $\text{No.3 } \sigma_a = 18.8$	$\text{No.1 } \sigma_a = 30.9 \text{ Kg/mm}^2$ $\text{No.2 } \sigma_a = 25.0 \text{ Kg/mm}^2$ $\text{No.3 } \sigma_a = 18.8 \text{ Kg/mm}^2$
48	下から 4	 0.01 mm 精度で..... 0.01 mm の精度で.....
49	上から 19		き烈伝播.....	き裂伝播.....
"	上から 23		...、 30 cpm では両者の.....	...、 30 cpm では前者は後者の約 1/2 であるが、 300 cpm では両者の.....

頁	行	図表	誤	正
49	下から 10		…と Irwin [C] …… ……の応力拡大係数 K との……	……と Irwin [C] …… ……の応力拡大係数 ΔK との……
"	"			
"	下から 9		$da/\alpha N = C(\Delta K)^4 \dots (2)$	$da/dN = C(\Delta K)^4 \dots (2)$
"	下から 6		ただし 2 b は試験片の全巾を……	(ただし 2 b は試験片の全巾) を…
"	下から 1		における c と m を……	における C と m を……
50	上から 3		……で積分すること。	……で積分すると、
"	上から 4		$(\Delta \sigma)^4 N_p = \frac{1}{2\pi b c} \{ \dots \} \dots (5)$	$(\Delta \sigma)^4 N_p = \frac{1}{2\pi b C} \{ \dots \} \dots (5)$
"	上から 6		……は応力レベルに……	……は各応力レベルに……
"	上から 15		……でせい性破	……でせい性
"	上から 19		……、試験片表	……試験片
"	下から 9		$\frac{\partial (\sum \delta_i^2)}{\partial C} = \dots - nC = 0$	$\frac{\partial (\sum \delta_i^2)}{\partial C} = \dots - nC = 0$
51	上から 6		……の腐食き裂……	……の腐食疲れき裂……
"	下から 18		……変えた引張疲れ	……変えた片振り引張疲れ
52	表 6.1.2		$\dots = c(\Delta K)^m$ と……による c と…	$\dots = C(\Delta K)^m$ と……による C と…
"	表 6.1.3		$\dots = c(\Delta K)^m$ と……ときの c の値	$\dots = C(\Delta K)^m$ と……ときの C の値
"	"		$c \times 10^{-12}$	$C \times 10^{12}$
57	図 6.1.8		c に及ぼす……	c に及ぼす……
59	上から 9		……Wormwell ²⁾ の……	……Wormwell ³⁾ の……
60	上から 1		$R_x = 1/(2\pi f c_x \tan \delta) \quad (2)$	$R_x = 1/(2\pi f C_x \tan \delta) \quad (2)$
"	上から 11		……に示すごとく……	……に示すごとく……
"	下から 4		…の破断寿命 N_f ……の寿命 N_f …	…の破断寿命 N_f ……の寿命 N_f …
61	上から 18		(3) 塗膜試験片の……	(3) 塗装試験片の……
"	上から 20		……、塗装劣化後の……	……、塗膜劣化後の……
66	上から 6		……亀裂が発生するまで……	……亀裂が発生するまで……
67	上から 6	7.2.1 試験結果と考察	7.2.1 曲げによる表面歪	7.2.1 曲げによる表面歪
"	上から 15	……、 $P_a(N_c)NC$ 、 ……	……、 $P_a(N_c)$ と N_c 、 ……	……、 $P_a(N_c)$ と N_c 、 ……

頁	行	図表	誤	正
6 8	上から 12		寿命領域では寿命領域に……	寿命領域では歪振巾が同一なら、亀裂発生寿命もほぼ同一であるが、長寿命領域に……
8 0	下から 12		(δ_a)～歪(ϵ_a)……	(σ_a)～歪(ϵ_a)……
〃	下から 8		…サンドプラス材の塗装材の…	サンドプラス材及び塗装材の…
8 1	上から 10		“B”型試験片	“B”型試験片
〃	下から 10		(XI-134, XI-133)低応力…	(XI-134, XI-133) 低応力…
〃	下から 5		……その振幅を 2 倍……	……その板幅を 2 倍……
8 2		表 8.1.1	$\sigma_y = 3.1.7$	3.1.7
8 4		図 8.2.2	横軸の 10^4	10^4
8 8		図 8.2.9	$\epsilon_a = 2840 \times 10^{-6}$ 、 $N_f = 1.59 \times 10^4$ の点 ▲印	▲印

記号追加

σ_a : 応力片振幅

N_c : 疲労亀裂発生までの繰返し数

$2\sigma_a$: 応力全振幅

f : 繰返し速度

ϵ_a : 歪片振幅

a : 亀裂長さ

$2\epsilon_a$: 歪全振幅

N_f : 破断までの繰返し数

ただし、特に指定のある場合を除く。

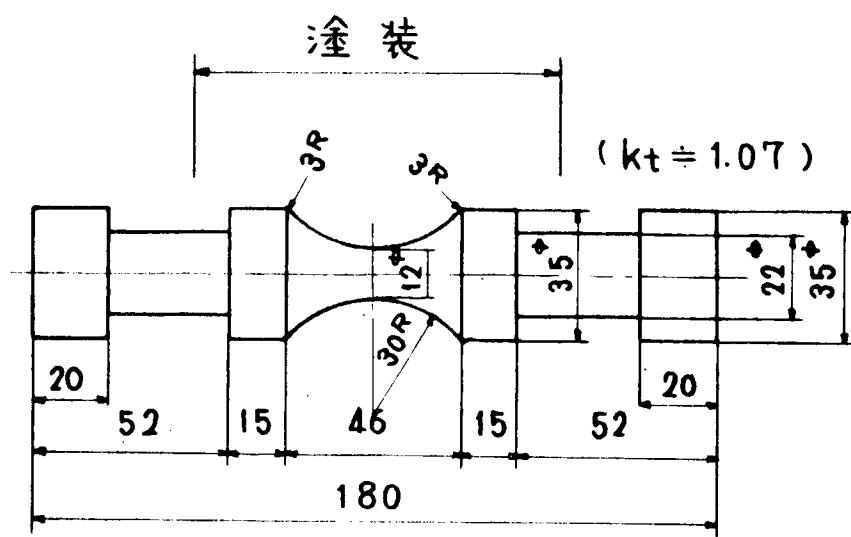


図 1.1.1 疲労試験片形状

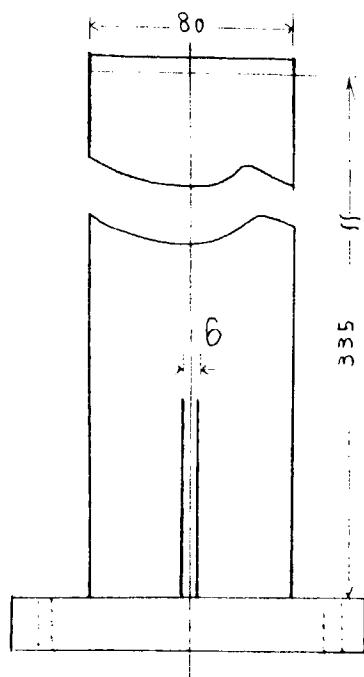


図 5.2.1

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会の昭和48年度補助事業「船舶の構造・性能に関する基礎的研究」の一部として、日本造船研究協会が第128研究部会においてとりまとめたものである。

第128研究部会委員名簿（敬称略、順不同）

部会長	南 義夫（横浜国大）	
幹事	飯田国広（東京大学）	飯野暢（石川島播磨重工業）
	大井利継（三井造船）	小川鉄夫（横浜国大）
	岸本宏次（三井造船）	木下元洋（三菱重工業）
	竹内信彦（広島大学）	寺田泰治（日本海事協会）
	永井欣一（広島大学）	中村宏（川崎重工業）
	向井喜彦（大阪大学）	渡辺正紀（大阪大学）
委員	井上肇（船舶技術研究所）	梅崎一夫（三菱重工業）
	遠藤吉郎（京都大学）	尾川宣之（日本钢管）
	大野章（新日本製鉄）	織田貞四郎（三菱重工業）
	海田秀美（神戸製鋼所）	笠井眷次（佐野安船渠）
	勝部以和男（東京計器）	金井一十三（昭和海運）
	唐沢孝夫（三光汽船）	河澄竜之助（川崎重工業）
	小林茂夫（佐世保重工業）	佐武二郎（住友金属工業）
	鈴木省輔（函館ドック）	高屋鋪尚史（出光タンカー）
	谷川典人（新和海運）	長尾実三（名村造船所）
	永元隆一（三菱重工業）	西牧興（日立造船）
	服部堅一（住友重機械工業）	花田政明（日本防食工業）
	藤井英輔（船舶技術研究所）	前田恂（石川島播磨重工業）
	八木順吉（大阪大学）	山口勇男（日本海事協会）
	横見敏雄（大阪商船三井船舶）	

目 次

まえがき

1. 腐食と腐食疲れ損傷発生に関する研究	1
1. 1 軟鋼の海水中腐食疲労強度に及ぼす塗装の影響	1
1. 1. 1. 試験方法	1
1. 1. 2. 試験結果および考察	2
1. 1. 3. 結論	2
1. 2 実船局部構造模型の海水腐食疲労強度の検討	2
1. 2. 1 供試体および試験方法	3
1. 2. 2 試験結果および考察	3
1. 2. 3 結論	4
2. 海水中腐食疲れと塗装の効果	17
2. 1 実験	17
2. 1. 1 供試材および試験片	17
2. 1. 2 試験装置および試験方法	17
2. 2 試験結果	17
2. 3 考察	18
2. 4 まとめ	18
3. 片振り引張り腐食疲れに対する不活性ガスと塗料の防食効果に関する研究	25
3. 1 実験方法	25
3. 1. 1 試験片	25
3. 1. 2 塗装方法	25
3. 1. 3 試験装置および試験方法	25
3. 2 実験結果および考察	27
3. 2. 1 塗膜の初期インピーダンス	27
3. 2. 2 疲れ試験結果	27
3. 3 まとめ	27
4. 腐食疲労に及ぼす塗装の防食効果	33
4. 1 実験方法	33
4. 1. 1 試験片	33
4. 1. 2 塗装方法	33
4. 1. 3 装置および試験方法	33
4. 2 実験結果および考察	33
4. 2. 1 疲労試験結果	33
4. 2. 2 繰返し速度の影響	34
4. 2. 3 塗装による防食効果	34
4. 3 結言	34
5. 海水腐食疲れの塗装による防食効果と溶接構造要素への応用の研究	40

5. 1 回転曲げ試験による基本特性の検討	40
5. 1. 1 試験片および試験方法	40
5. 1. 2 塗膜の初期インピーダンス	40
5. 1. 3 実験結果および考察	40
5. 1. 4 試験結果のまとめ	41
5. 2 溶接構造モデルによる試験	41
5. 2. 1 試験片および試験方法	41
5. 2. 2 静荷重の付加による試験片のひずみ分布	42
5. 2. 3 実験結果および考察	42
5. 2. 4 試験結果のまとめ	42
6. 構造用鋼の食塩水中における腐食疲れき裂伝播速度に及ぼす荷重繰返し速度および平均応力の影響とペイントの密着性劣化に及ぼす変動応力の影響に関する研究	48
6. 1 構造用鋼の食塩水中における腐食疲れき裂伝播速度における荷重繰返し速度および平均応力の影響	48
6. 1. 1 実験方法	48
6. 1. 2 実験結果	49
6. 1. 3 考察	50
6. 1. 4 結言	51
6. 2 ペイントの密着性劣化に及ぼす変動応力の影響	59
6. 2. 1 実験方法	59
6. 2. 2 実験結果	60
6. 2. 3 考察	60
6. 2. 4 結言	61
7. 平面曲げ塩水腐食疲労強度に及ぼす塗料の効果	66
7. 1 実験	66
7. 1. 1 供試材および試験片	66
7. 1. 2 試験機	66
7. 1. 3 試験方法	66
7. 2 実験結果と考察	67
7. 2. 1 試験結果と考察	67
7. 2. 2 諸因子の影響	67
7. 2. 3 軸力疲労試験との比較	68
7. 3 結論	68
8. 腐食疲労に及ぼす塗装の効果	80
8. 1 試験方法	80
8. 1. 1 試験片と塗装	80
8. 1. 2 試験機と試験方法	80
8. 2 試験結果およびその考察	80
8. 2. 1 A型試験片の結果	80
8. 2. 2 B型試験片の結果	81
8. 2. 3 C型試験片の結果	81

8. 2. 4	繰返し速度の影響	8 1
8. 2. 5	クラックある塗膜の防食効果	8 1
8. 2. 6	試験片寸法の影響	8 1
8. 2. 7	荷重方法の影響	8 1
8. 3	結　　言	8 2

まえがき

わが国の造船技術の進歩向上は目覚しく、船舶の巨大化や高速化においては、世界的にも大きな役割を果しているが、一方では従来あまり問題とされていなかったような損傷が重大視されるようになり、保守安全についても技術的配慮がなされなければならなくなっている。したがって今後の造船技術の一つの方向として疲労強度を考慮に入れた設計が要求されるようになり、これに対するバックデータの集積や疲労を考慮を入れた設計法の設定が必要とされる。

実際の船体構造においては、部材の組合せやスロット孔のような切欠きを多数有し、また、環境においても、海水は激しい腐食性を有するものであり、さらにまた、波浪などによる外力と実際に部材に生ずる応力との関係が未だ十分に把握されていない現状においては、問題を早急に解決することはできない。また最近の船舶においては、腐食耗の防止対策の一つとして、特殊塗装が用いられている。しかしながら、軟鋼の海水中における腐食疲れ強さに及ぼす塗装の効果とともに塗膜自身の繰返し荷重に対する耐久性は未だ定量的に把握されていない。

このような観点から、実船構造の疲労強度に及ぼす波浪などによる外力応力集中、溶接ならびに腐食雰囲気などの各種因子の効果および海水中腐食疲れ強さに及ぼす塗装の効果等を明らかにし、また、実際にみられる損傷との対応を行なって、船殻の腐食と腐食疲れによる損傷の防止対策に資することを目的として、昭和46年度より3ヶ年計画で実施し、48年度は主として、海水腐食疲れに及ぼす塗装の効果について研究を行なった。

1. 腐食と腐食疲れ損傷発生に関する研究

本報告は、一般に船体構造材料としてよく用いられている軟鋼 (SS 41) およびそれを用いた実船局部構造模型の海水中腐食疲労試験を行ない、大気中での試験結果とも対比させながら検討したものである。

第1章においては、小型平滑丸棒試験片にタールエポキシ塗料を施した場合の腐食疲労強度と、応力の繰返しによる塗膜自体の劣化について示している。

第2章においては、昨年度に引き継いで実施した実船比縮尺約1/2の実船局部構造模型の海水中と大気中での疲労試験結果から、スティフナーやウェブプレートのスロット孔部での疲労強度やき裂進展挙動に及ぼす海水の影響について示している。

1.1 軟鋼の海水中腐食疲労強度に及ぼす塗装の影響

船殻構造部材の防食対策の一つとして、タールエポキシ系塗料を用いた塗料が実施されるようになってきた。この種の塗料が実際に用いられる場合に、防食効果はかなり期待できると言われているが、長期間に亘った場合、繰返し応力を受ける場合あるいは板縁や溶接の隅肉部などの形状的に塗装が完全に行なわれ難い場合さらにはこれらの条件が重複したときの塗装の有効性は未だ充分には検討されていない段階にある。第128研究部会においては、今年度の主要研究課題として、タールエポキシ塗装を施した軟鋼の腐食疲労強度を採り上げた。本報はその一環として行なった、軟鋼の平滑丸棒試験片が海水中で両振り軸力荷重を負荷される場合の疲労強度に及ぼすタールエポキシ樹脂塗装の効果について明らかにしたものである。

1.1.1 試験方法

(1) 試験片および試験方法

使用した鋼材は表1.1.1に示すような機械的性質と化学成分をもつ軟鋼である。試験片の形状は図1.1.1に示すように、直径1.2mmの平滑丸棒試験片である。塗装は第128研究部会において定められた方法により、塗料メーカーによって行なわれた。その要領は次のとおりである。機械加工後の試験片の供試部はサンドブラスト後脱脂洗浄された。塗装はショットプライマー(エバボンドF、計画膜厚1.5μ)後タールエポキシ(ビスコン1000)の茶と黒の順に吹付けによって行なった。最終的に得られた膜厚はおよそ25.0μであった。疲労試験は塗装後2週間以上経過してから行なった。なお、供試部端での断面不連続部は半径3mm以上に丸味を付けて、塗膜の欠陥が生じ易くならないようにした。

疲労試験は、既に前報^{1) 2)}で述べたような荷重容量20tonの電気油圧式腐食疲労試験機によって行なった。荷重は繰り返し速度毎分60サイクルの軸力両振り正弦波である。腐食方法は供試部の周囲に腐食槽を設け、その内部に天然海水を入れて供試部が常に浸されるようにした。また海水は、温度を常に20°Cもしくは60°Cに保たれ、恒温槽と腐食槽との間を循環するようにしている。海水は試験片ごとに新液と交換している。また、試験片は疲労試験の前に無負荷の状態で海水中にて約6時間程度養生し、その後に疲労試験を行なった。

(2) 塗装試験片の電気抵抗と電気容量の測定

試験片表面の塗膜が疲労試験によって次第に劣化することが考えられる。疲労試験中の塗膜の状態を把握するため、永井らによってその有効性が示されている方法により塗膜のインピーダンスを測定した³⁾。測定方法はおよそ次のようである。試験片表面から約2mm離れた所に、試験片の周囲に沿って白金の対極を設け、試験片母材と白金の間の電気抵抗と電気容量を海水を介して測定するものである。測定に際しては万能ブリッジを用いた。またこれらの測定で直流を用いると腐食挙動(分極)に大きな影響を与えるので、装置に内蔵されている1kHzの交流電源を用いた。回路は図1.1.2に示すような並列抵抗ブリッジ(C_pモード)で、C_xおよびP_xが被測定部の電気容量と電気抵抗である。電気容量C_xおよび良好度Qはブリッジをバランスせしめたときの測定器のダイヤルの値によって示される。また電気抵抗R_xは(1.1.1)式によって与えられる。

$$R_x = \frac{Q A}{\omega C (1 + Q)} \quad \dots \dots \dots \quad (1.1.1)$$

ここで、 $\omega = 2\pi f$ (f は測定に用いた交流周波数、今回は 1 kHz)、 A は試験片の接水面積、 37 cm^2 である。

1.1.2 試験結果および考察

(1) 疲労強度

塗装試験片の各種環境中での疲労試験結果をまとめて表 1.1.2 に示す。またこれらの結果を両対数の S-N (t) 線図で示すと図 1.1.3 のようになる。この図には昨年度に得られた非塗装材の海水中ならびに大気中での疲労試験結果²⁾も併せて示している。

軟鋼試験片の腐食疲労強度は、タールエポキシ樹脂の塗装を施すことによって改善され、大気中での非塗装試験片の疲労強度に近くなる。また、塗装試験片の疲労強度と非塗装試験片の疲労強度を比較すると、塗装試験片の海水中での疲労強度は非塗装試験片の海水中での疲労強度よりも大きく、むしろ非塗装試験片の大気中での疲労強度とほとんど差の無いことが明らかであり、タールエポキシ系塗料の腐食疲労強度改善効果が認められる。

塗装試験片の同一応力での大気中での破断寿命と海水中での破断寿命を比較すると表 1.1.3 に示すようになる。応力振幅 $20 \sim 17 \text{ kg/mm}^2$ 程度では、海水中での破断寿命は大気中での破断寿命より短かくその比は $60 \sim 85\%$ 程度である。また、海水の温度が 20°C の場合と 60°C の場合とでは、寿命あるいは寿命比には特に顕著な差は認められないようである。このように海水中での疲労寿命が大気中での疲労寿命より若干短かくなる傾向を示すのは、塗膜の劣化による影響よりもむしろ疲労き裂の進展過程においては塗膜による保護効果が期待できなく、伝ば寿命が大気中の場合に比して海水中の場合の方が短かくなることによるものと考えられる。

(2) 塗装試験片の電気抵抗と電気容量の変化

図 1.1.4 に海水中で繰返し荷重を与えた場合の塗装試験片での電気抵抗ならびに電気容量の荷重繰返しとともに変化状況の一例を示す。いずれの試験片も初期から疲労寿命のほとんどの期間中において、電気抵抗は $10^5 \Omega$ 以上、電気容量はほぼ $10^{-3} \mu\text{F}$ を示した。初期の状態から繰返し数の増大に伴って次第に電気抵抗は減少し、電気容量は増大する傾向を示すが、破断寿命近くまでそれらの値の変化は小さい。塗膜の劣化後から試験片の破断するまでの期間は非常に短かい。このことは、今回の試験条件や環境では、塗膜自身の応力繰返しによる劣化の寿命は、母材金属の疲労寿命にほとんど依存しているものと言える。

1.1.3 結論

本研究では船体構造用軟鋼 (SS 41) の平滑丸棒試験片にタールエポキシ系塗料により塗装し、海水中で軸力両振り疲労試験を行ない、その疲労強度を非塗装試験片の場合とも比較し、検討を行なった。また、腐食疲労試験片の電気抵抗と電気容量を測定し、荷重繰返しとともに塗膜の劣化状況を調査した。これらの結果を要約すると次のようになる。

- (1) 軟鋼の海水中で疲労強度は、タールエポキシ系塗料による塗装を施すことによって、大気中での非塗装試験片の疲労強度程度に改善される。
- (2) 塗装試験片の疲労寿命は、海水中の場合では大気中の場合の疲労寿命の $60 \sim 85\%$ 程度となる。また、海水温度 20°C と 60°C とで顕著な差はないようである。
- (3) 塗膜が応力の繰返しによって劣化する時期は破断寿命近くであり、ほとんどの期間では初期の状態が保たれる。

1.2 実船局部構造模型の海水腐食疲労強度の検討

実際の船殻構造に発生する疲労による損傷の内、かなりの比重を占めているスティフナー・ウェブプレート等のスロット孔回りの疲労き裂損傷に対する解明を行なう為の資料を得るため、48年度も47年度と同様に実船局部(スロット部)構造模型の疲労試験を行なった。今年度においては、特に長期間の腐食疲労試験を目標として試験を行ない、昨年度得られた試験結果も併せて検討した。以下にその結果を述べるが、スティフナーの腐食疲労強度は、繰返し数の増大に伴なつ

て著しく低下することやウェブプレートでの腐食疲労き裂進展速度は大気中の場合に比べて早くなることなどが明らかとなつた。

1.2.1 供試体および試験方法

供試体は、47年度において供試したものと同じ模型で、その形状寸法を図1.2.1に示す。これはおよそ実船比1/2の縮尺のスロット部の模型である。供試体の材料は、表1.2.1にその化学成分や機械的性質を示すような一般に船体構造材料としてよく用いられる軟鋼SS41である。

疲労試験は47年度と同様な方法で行なつた。²⁾用いた疲労試験機は大型腐食疲労試験機で、試験機の下部のテーブル上に腐食槽を設置し、この内部に供試体を両端で支持して置く。荷重は模型中央のロンジ材のフェースプレート上面で両側を下に押す三点曲げとした。応力比Rは0.2とし、繰返し速度は海水中の場合は10cpm、大気中の場合は20cpmとした。それぞれの供試体においては、疲労試験の前に静的試験を行なつた。また、静的試験、疲労試験ともに、スティフナーの端部近傍とスロット孔縁でのひずみゲージにより測定した。

腐食疲労試験で用いた海水は、ポンプにより汲み上げた天然海水で、試験中は少量ずつ新しい海水を補給し交換した。

1.2.2 試験結果および考察

本年度においては、M-6、M-7およびM-8の三体を供試した。ただしM-8は現在なお試験中である。これらの試験結果を47年度実施分も併せて一覧表にして表1.2.2に示す。

1) スティフナーのひずみ分布

それぞれの供試体によって得られた中央スティフナーの隅肉溶接部近傍でのひずみ分布を図1.2.2～図1.2.5に示す。ひずみゲージの中心位置はM-3～M-7供試体ではフェイスプレート上面から約15mmとした。またM-8供試体は、スティフナーに疲労き裂が生じても計測が続けられ得るように、その距離を約33mmとした。図1.2.2と図1.2.3は静的に最大荷重 P_{max} を負荷したときに生じたひずみ ϵ_{max} のスティフナー巾方向での分布の状況を示す。一般にスティフナーの溶接部側では、ウェブプレート側が最も大きな値となり外側になるほどひずみの値は減少する。図1.2.3に示したM-8供試体の結果ではウェブプレート側が必ずしも最大のひずみの値を示していないが、これはウェブプレートによる拘束の影響を受けているものと考えられる。図1.2.2に示した結果から除荷後の残留ひずみ ϵ_r を ϵ_{max} から差引いた弾性ひずみ ϵ_e を P_{max} で割った値すなわち単位荷重当りの弾性ひずみ量の巾方向分布を示すと図1.2.4のようになる。また疲労試験中のひずみ範囲を荷重範囲で割った値の巾方向分布を示したもののが図1.2.5である。この分布の状況は、疲労試験を開始してから後、疲労き裂の発生迄の期間中ではほぼ同じである。静的な荷重つまり初期の状態では、内側での単位荷重当りの弾性ひずみは約9.5μ/tionであるが、繰返し荷重下ではその値は11.5μ/tion程度に増大し、また全体的に曲げ成分が大きくなる傾向を示す。繰返し荷重下でのスティフナーに生ずるひずみの平均値は約30μ/tionとなり、これよりスティフナーの受持つ荷重は外力の1ton当り約350kgとなることが明らかとなった。

2) ウェブプレートのスロット孔縁でのひずみ分布

図1.2.6に中央のスロット孔での孔縁接線方向ひずみの分布状況を示す。こゝでは全て単位荷重当りの弾性ひずみにより示している。ひずみの計測時期は初期の静的荷重の負荷時、繰返し荷重下でスティフナーのき裂発生前と同じくスティフナーの破断後の三段階である。スロット孔縁でのひずみは、例えば水平方向の位置では、初期では約50μ/tionであるが、繰返し荷重が負荷されると60μ/tion程度に増大し、更にスティフナーの破断後では約120μ/tionに大きくなる。またこの傾向は、それぞれの供試体の別あるいは負荷荷重の大きさにかかわらずかなり良い再現性を有している。スロットコーナーでの疲労寿命は特にき裂発生寿命においては、スティフナーのき裂伝ばに伴なう供試体での荷重再配分を考慮する必要がある。スティフナーでのき裂発生前と破断後でのそれとのひずみを比較すると約2倍になっていることから、中央スティフナーが健全な時期での受持つ荷重は負荷荷重の35～50%程度であると言える。

3) 疲労強度

スティフナーおよびスロット部ウェブプレートでのき裂発生寿命 N_f と荷重範囲 $2\sigma_a$ との関係をそれぞれ図 1.2.7 と図 1.2.8 に示す。さらにまた、スティフナーにおいては、図 1.2.5 に示した内側での単位荷重当りのひずみ量 $1.15 \mu/\text{ton}$ から換算した応力範囲を用い、ウェブプレートにおいては図 1.2.6 に示した単位荷重当りの孔縁での接線方向のひずみで、スティフナー破断後の場合の水平方向より下側 8° の場所での値約 $1.20 \mu/\text{ton}$ から換算した応力範囲を用いて、疲労き裂発生寿命 N_c と応力範囲 $2\sigma_a$ との関係を示すと図 1.2.9 のようになる。これらの図からも明らかなように、スティフナーの疲労強度に及ぼす海水の影響は大きく、 N が 10^4 サイクルより大きな領域では腐食疲労強度は大気中での疲労強度よりもかなり低下し、また繰返し数が増大するにつれてその傾向は著しくなる。同一繰返し数での大気中疲労強度と腐食疲労強度の比で示される腐食効果係数 k_c ($=\sigma_{air}/\sigma_{corr}$) を発生寿命 N_c の場合について求めると N_c が 10^4 サイクルでは約 1.14 であるが、 N_c が 10^5 サイクルでは約 1.75 となる。一方ウェブプレートの疲労強度に及ぼす海水の影響は、スティフナーの場合に比較すると小さく、き裂発生寿命 N_c に対する k_c は N_c が 10^5 サイクルで 1.13 程度である。

4) 疲労き裂の伝ば挙動

スティフナーに生じた疲労き裂の長さ a と繰返し数 N の関係を図 1.2.10 に示す。また横軸を N の替りにスティフナーの破断寿命 N_f と繰返し数 N の比 N/N_f をとって、き裂長さ a との関係を示すと図 1.2.11 のようになる。これらの図から、スティフナーの疲労き裂伝ば寿命 N_p ($=N_f - N_c$) には荷重の他に雰囲気も影響を及ぼし、荷重が大きくなるにつれて、あるいは同一荷重では大気中の場合よりも海水中の場合の方が N_p は小さくなる傾向を有する。また、荷重や雰囲気が一定ならば、疲労き裂進展のほぼ全期間に亘って、疲労き裂の進展速度 d_a/dN はあまり大きく変化しないものと考えられる。

図 1.2.12 にウェブプレートに発生した疲労き裂の長さと繰り返し数との関係を示す。ここで M-7 供試体の試験ではウェブプレートのき裂発生寿命が 1.52×10^6 サイクルであることを確認したが、その後のき裂進展速度が著しく小さいため、天然き裂に隣接して長さ 4.8 mm の人工き裂を設け、荷重を最大 1.4 ton 最小 2.5 ton 荷重範囲 1.15 ton に増してき裂長さが 100 mm となるまで試験した。M-4, M-6, M-7 供試体でのき裂長さとき裂進展速度との関係を示すと図 1.2.13 のようになる。き裂進展速度は特に海水中での場合にはバラツキが大であるが、この場合でもき裂の進展速度は荷重の増大とともにあって、あるいは、同じ荷重であっても大気中の場合よりも海水中の場合の方がより大きくなる。またウェブプレートでの疲労き裂の進展速度は図 1.2.12 からも明らかなように、き裂長さが大きくなるにつれて、早くなる傾向を有している。

1.2.3 結論

実船比 $1/2$ の縮尺のスロット部局部構造模型供試体を軟鋼 SS41 によって製作し、天然海水中において $10 \text{ cm}/\text{min}$ の速度で部分片振り ($R=0.2$) 三点曲げ疲労試験を行なった。大気中で行なわれた試験とともに、スティフナーやスロット孔縁でのひずみ分布、疲労き裂発生寿命と破断寿命ならびに疲労き裂伝ば挙動を測定検討し、これから以下のようなことが明らかとなった。

- 1) スティフナーおよびスロット孔部の疲労強度はともに海水の影響を受けて、海水中の場合では大気中の場合よりも疲労強度が低くなる。
- 2) 疲労強度に及ぼす海水の影響は、スティフナーの場合の方が、スロット孔部よりも大きい。
- 3) 腐食効果係数 k_c をき裂発生寿命について示すと、スティフナーでは $N_c = 10^4$ サイクルで $R_c = 1.14$ 程度、 $N_c = 10^5$ サイクルで $k_c = 1.75$ 程度となる。一方スロット孔縁では $N_c = 10^5$ サイクルでは $k_c = 1.13$ 程度である。
- 4) スティフナーあるいはウェブプレートでの疲労き裂伝ば寿命 N_p は、荷重の増大により、あるいは同一の荷重であっても大気中の場合よりも海水中の場合の方が短くなる。

文 献

- (1) 木下、(SR128)「船殻の腐食と腐食疲れによる損傷防止対策に関する研究」昭和46年度報告書、(昭47-3)
- (2) 木下、(SR128)「船殻の腐食と腐食疲れによる損傷防止対策に関する研究」昭和47年度報告書、(昭48-3)
- (3) 永井、竹内、赤石、機論、39-318 (昭48-2)

表 1.1.1 供試材(SS41)の化学成分と機械的性質

化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質			
C	S i	Mn	P	S	上降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	紋り (%)
0.20	0.04	0.78	0.024	0.026	21.7	41.7	40.2	63.9

表 1.1.2 塗装材の疲労試験結果 ($f = 60 \text{ cpm}$)

雰 囲 气	温 度	応 力 σ_a (kg/mm ²)	繰返し数 N_f
大 气 中	R . T .	20.0	7.5×10^4
		18.0	6.5×10^5
		17.0	8.0×10^5
天 燃 海 水 中	20 °C	20.0	6.4×10^4
		18.0	3.9×10^5
		17.0	5.7×10^5
		16.0	6.5×10^5 (未破断、試験中)
	60 °C	18.0	4.9×10^5

表 1.1.3 塗装試験片の疲労寿命に及ぼす環境の効果

応 力 振 幅 σ_a (kg/mm ²)	破 断 寿 命 N_f あるいは 寿 命 比	大 气 中		海 水 中	
		(R . T .)	(20 °C)	(60 °C)	
20	N_f	7.5×10^4	6.4×10^4		
	$N_f \text{ corr} / N_f \text{ air}$	1.0	0.85		
18	N_f	6.5×10^5	3.9×10^5	4.9×10^5	
	$N_f \text{ corr} / N_f \text{ air}$	1.0	0.60	0.75	
17	N_f	8.0×10^5	5.7×10^5		
	$N_f \text{ corr} / N_f \text{ air}$	1.0	0.71		

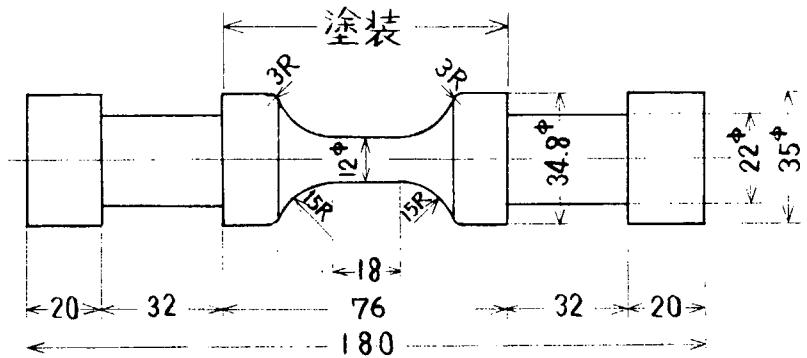


図 1.1.1 疲労試験片形状

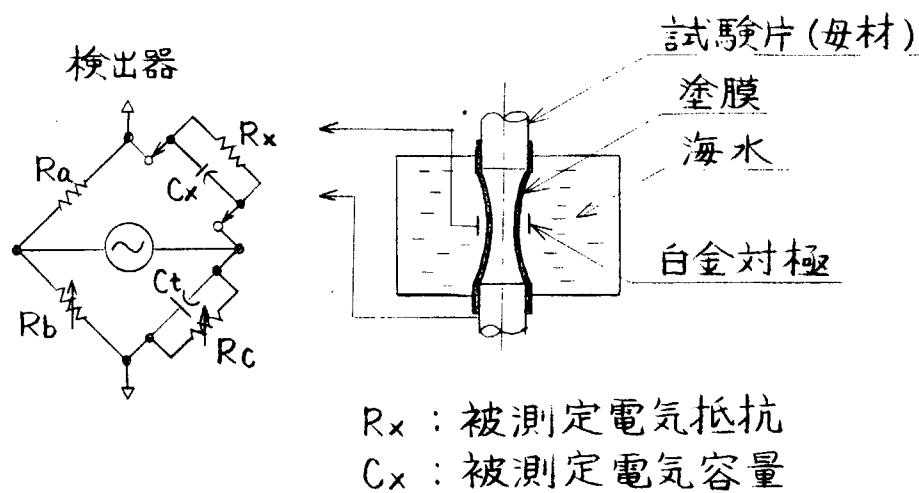


図 1.1.2 並列低抗ブリッジと測定方法

(CP モード)

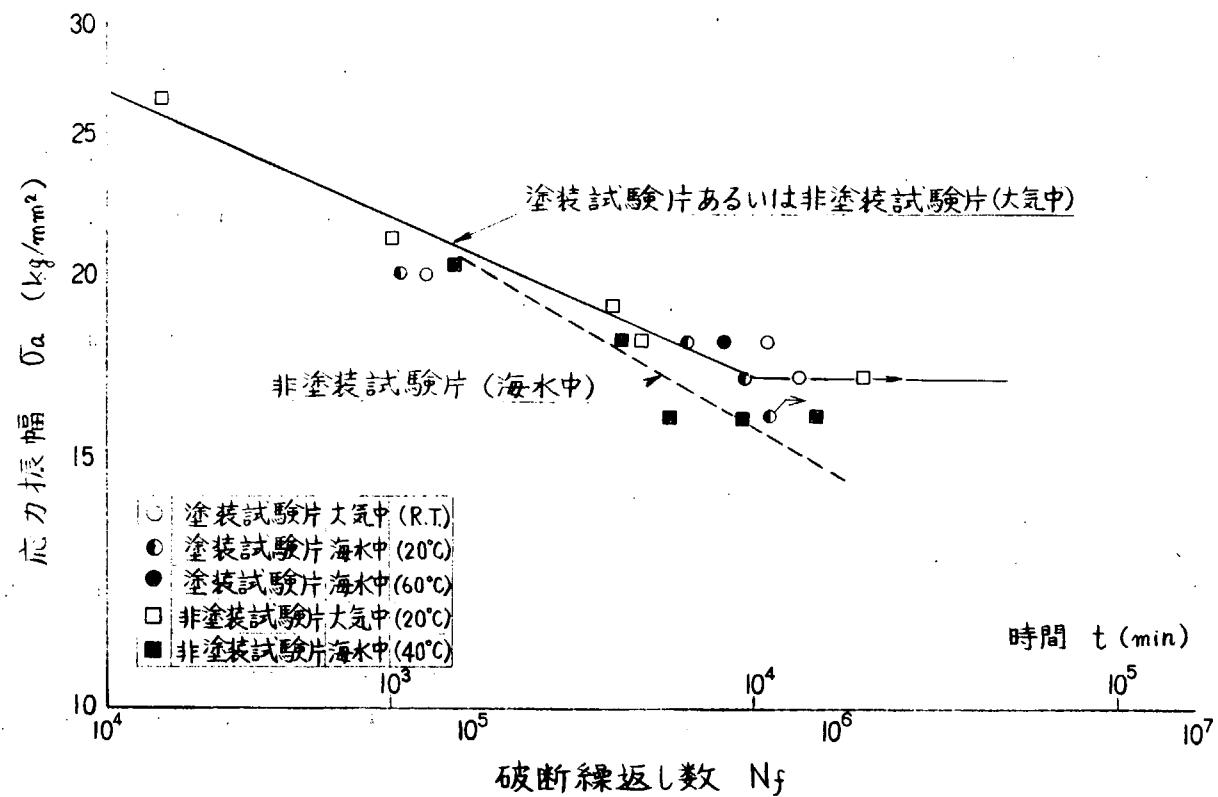


図 1.1.3 軟鋼塗装試験片および非塗装試験片の疲労強度

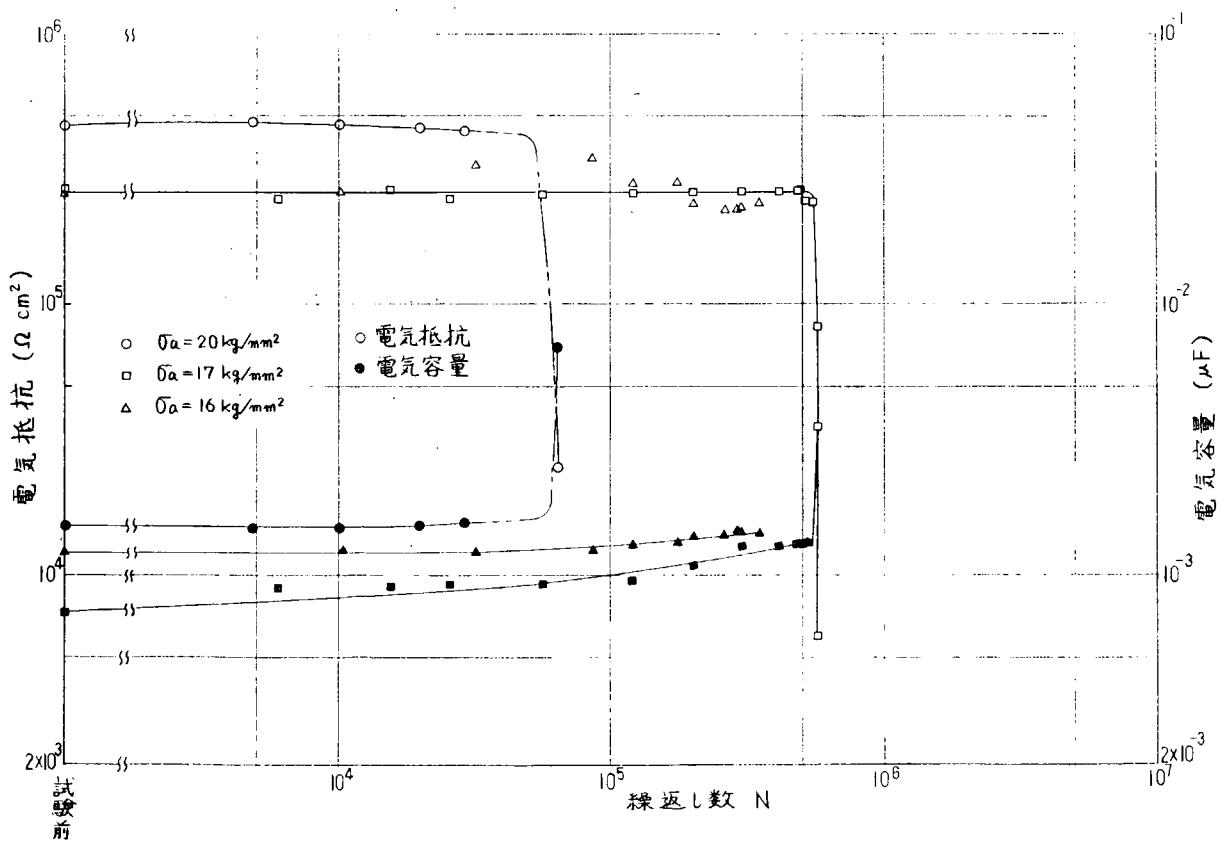


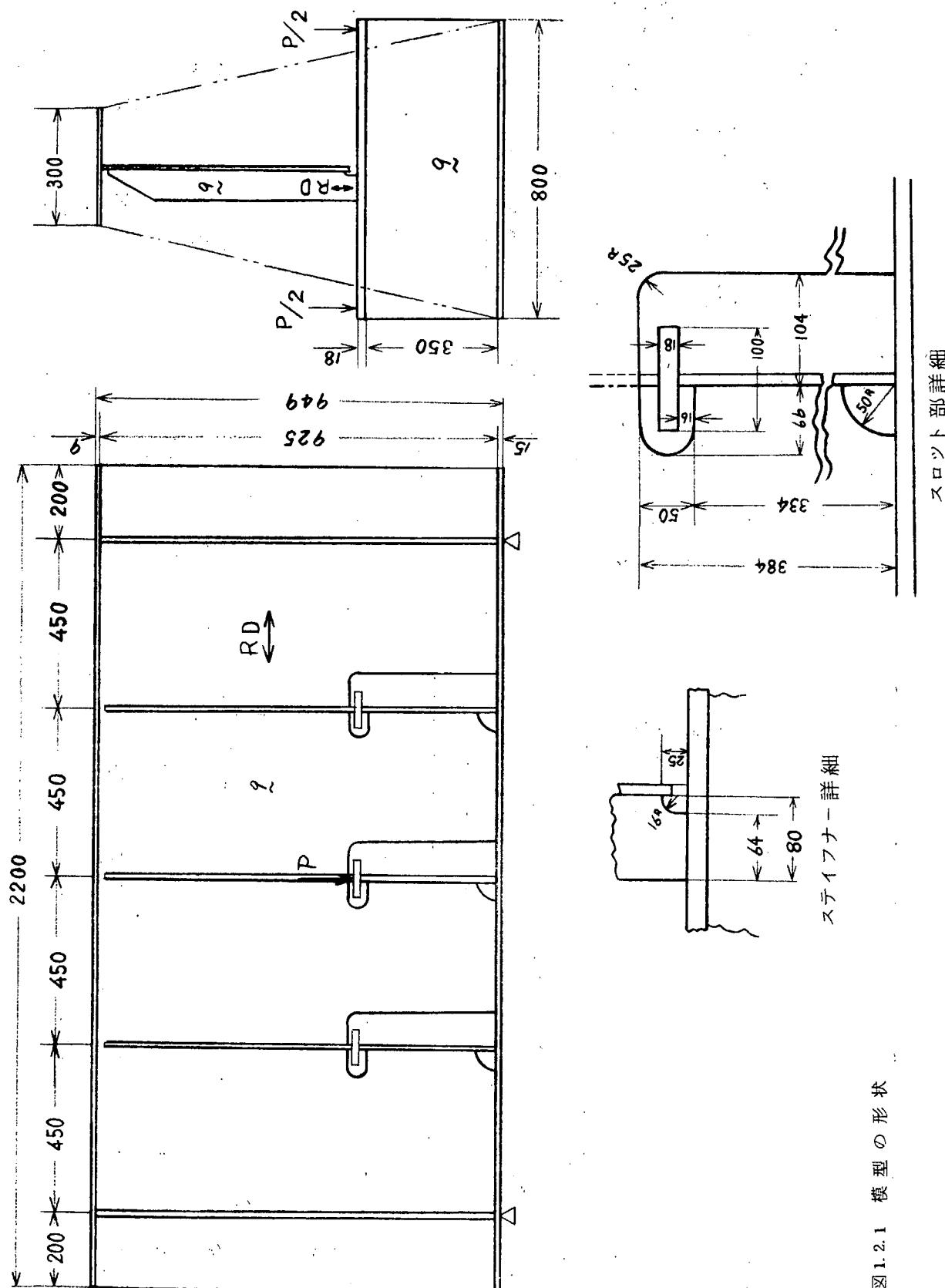
図 1.1.4 塗装試験片の電気抵抗ならびに電気容量の変化

表 1.2.1 供試材 (SS41) の化学成分と機械的性質

用途	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質		
		C	S i	Mn	P	S	上降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
M - 3							29.8	44.5	44.4
M - 4	9	0.18	0.05	0.74	0.012	0.021			
M - 5							31.2	42.6	42.8
M - 6									
M - 7	9	0.17	0.04	0.79	0.012	0.013	27.8	44.2	33.9
M - 8							27.3	44.2	33.0

表 1.2.2 模型供試体の試験結果

供試体 No.	荷重 (TON)		繰返し速度 (cpm)	雰囲気	Temp (°C)	疲労寿命 (サイクル)		備考
	max	min				N _c	N _f	
M - 3	50	5	10	海水中	25~26	3×10 ² *	7×10 ²	*) 溶金部にて破断
M - 4	25	5	10	海水中	25~26	7.2×10 ³	8.4×10 ⁴	
M - 5	静的							ひずみ分布測定
M - 6	25	5	20	大気中	16~19	1.8×10 ⁴	1.8×10 ⁵	
M - 7	125	2.5	10	海水中	20~22	6.6×10 ⁴	1.5×10 ⁶	
M - 8	20	4	10	海水中	12~14	2.4×10 ⁴		試験中
						N _f		



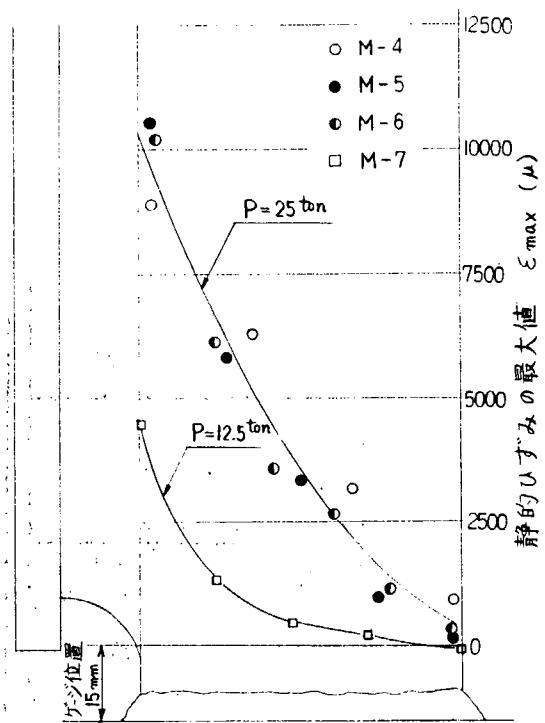


図 1. 2. 2 最大ひずみの分布

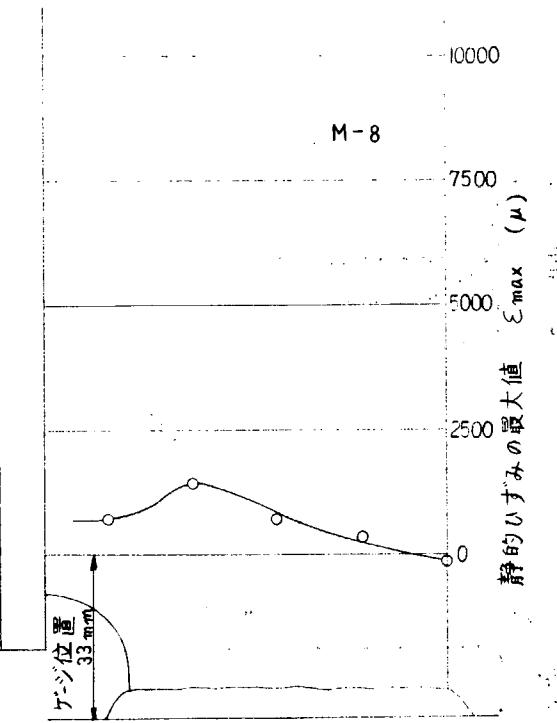


図 1. 2. 3 最大ひずみの分布

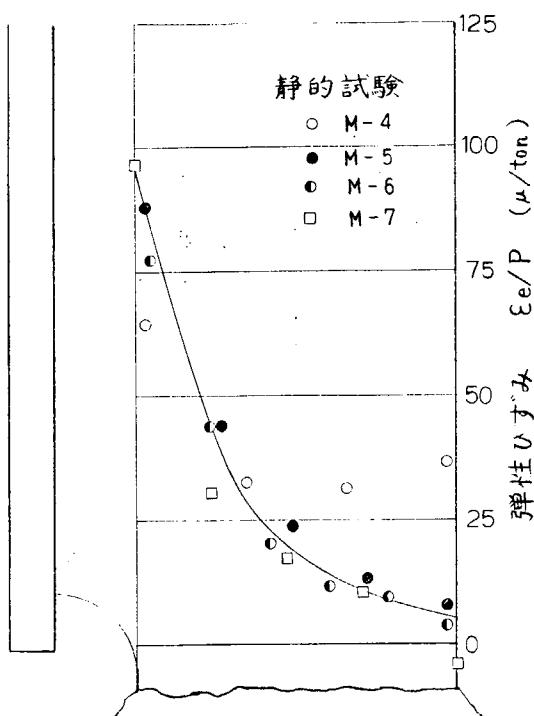


図 1. 2. 4 単位荷重当たりの静的弾性ひずみの分布

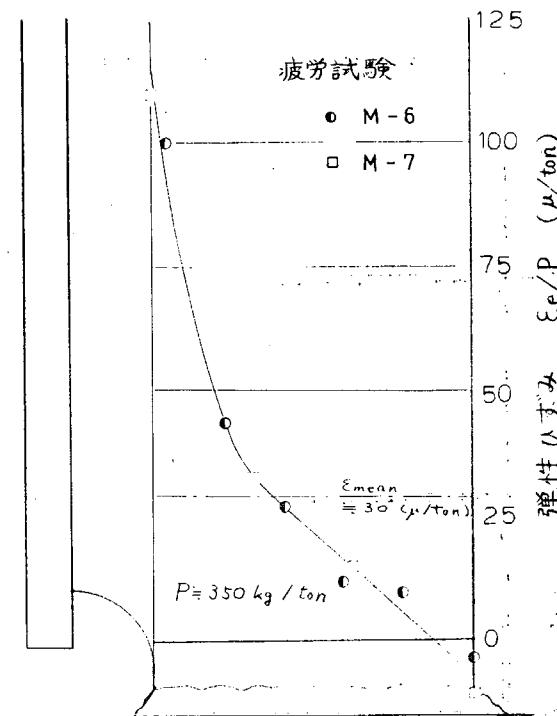


図 1. 2. 5 単位荷重当たりの動的弾性ひずみの分布

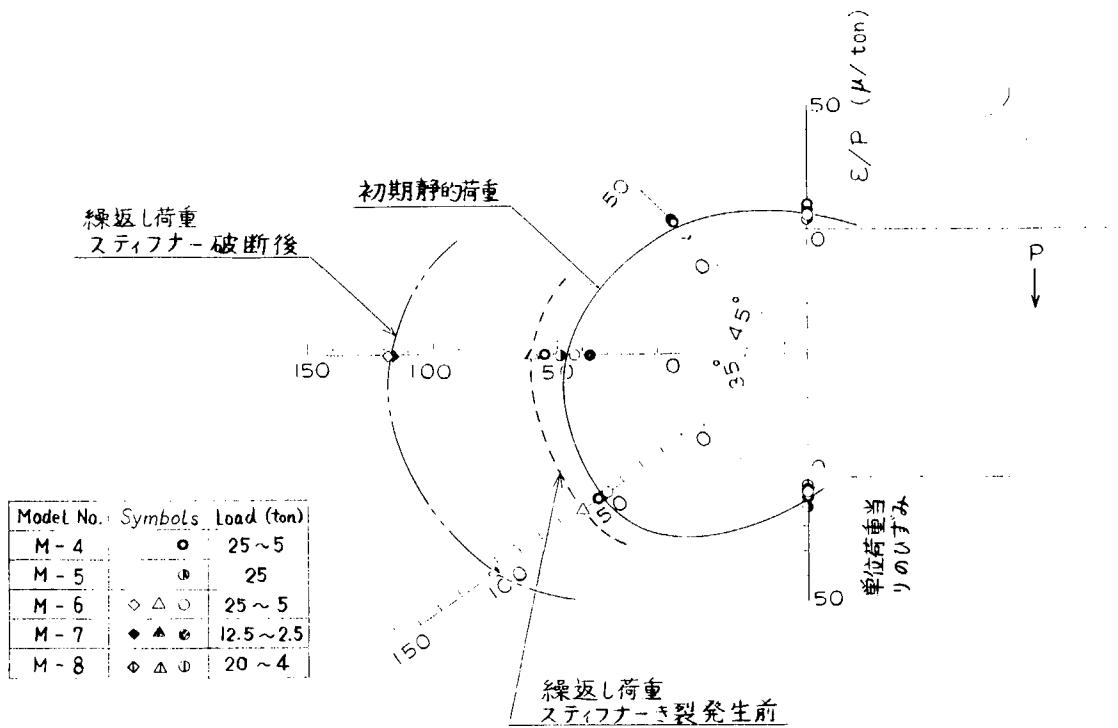


図1.2.6 スロット孔縁、接線方向のひずみの分布

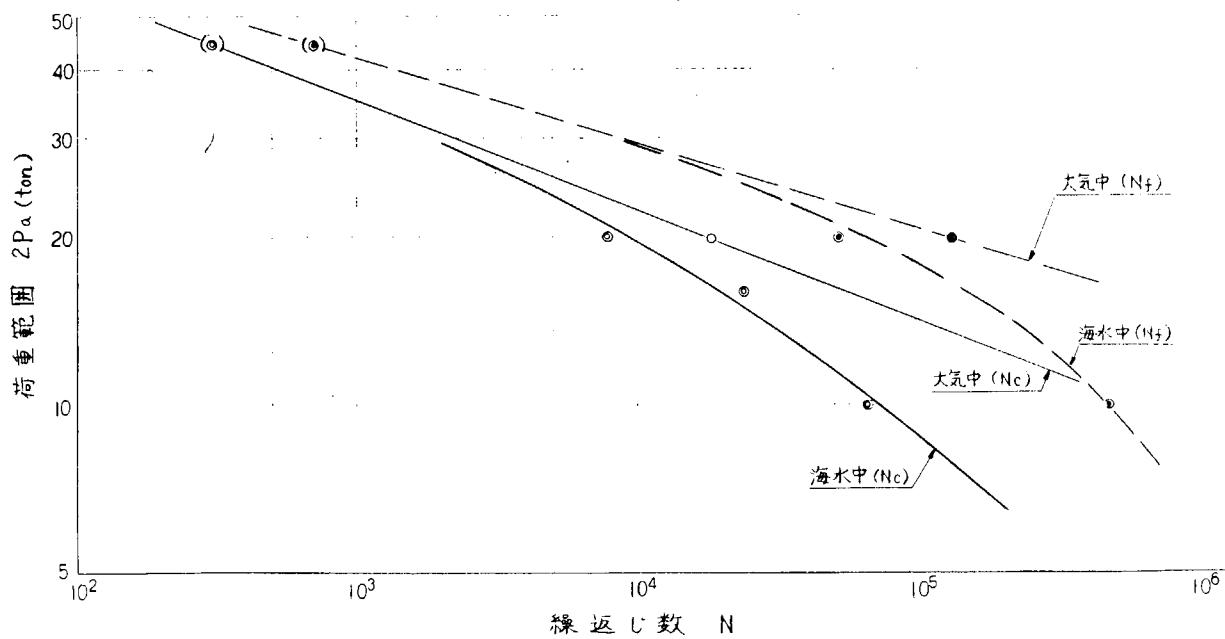


図1.2.7 スティフナーの疲労強度

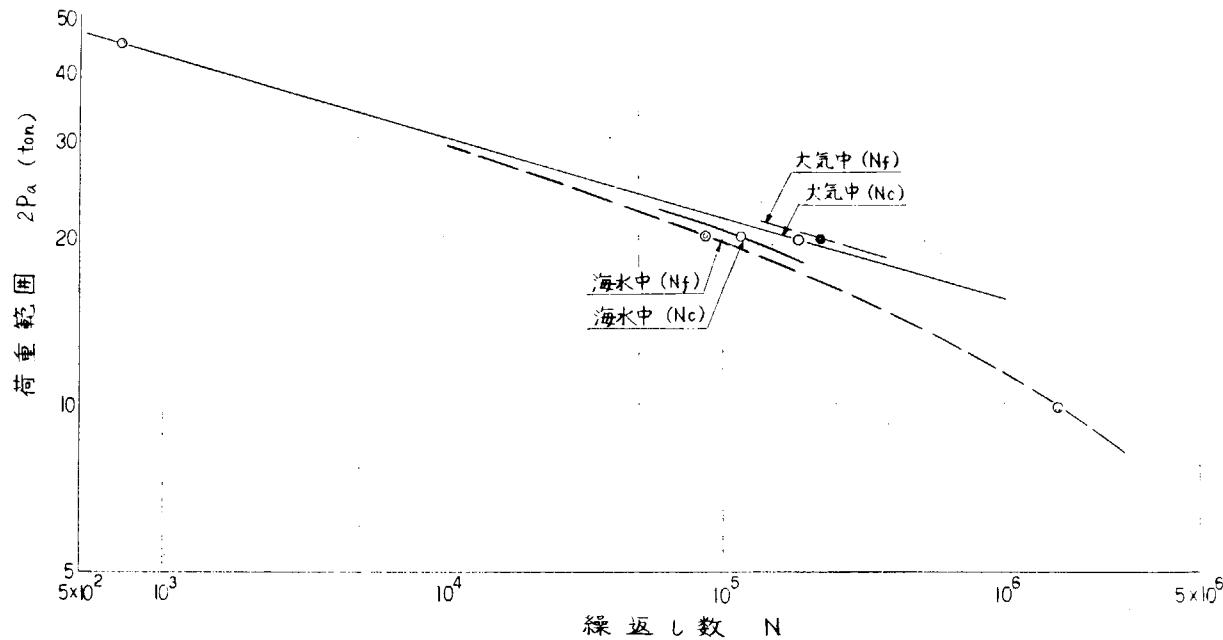


図 1.2.8 スロットコーナ部の疲労強度

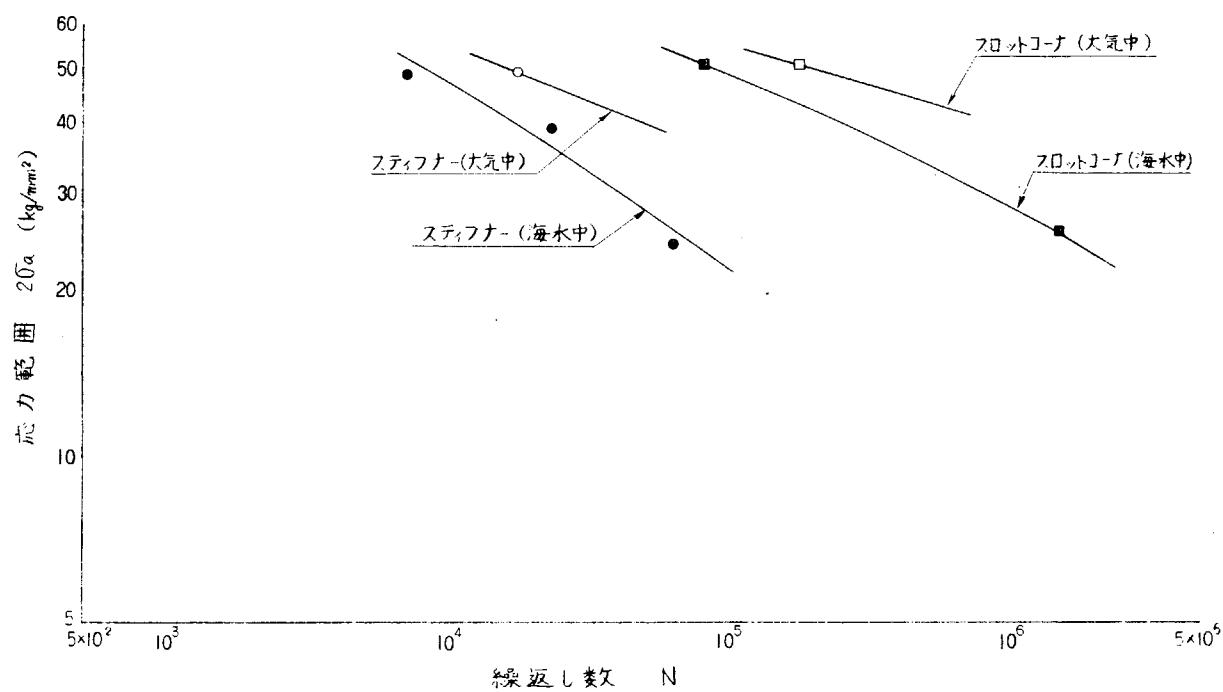


図 1.2.9 ひずみゲージにより測定した応力範囲とき裂発生寿命との関係

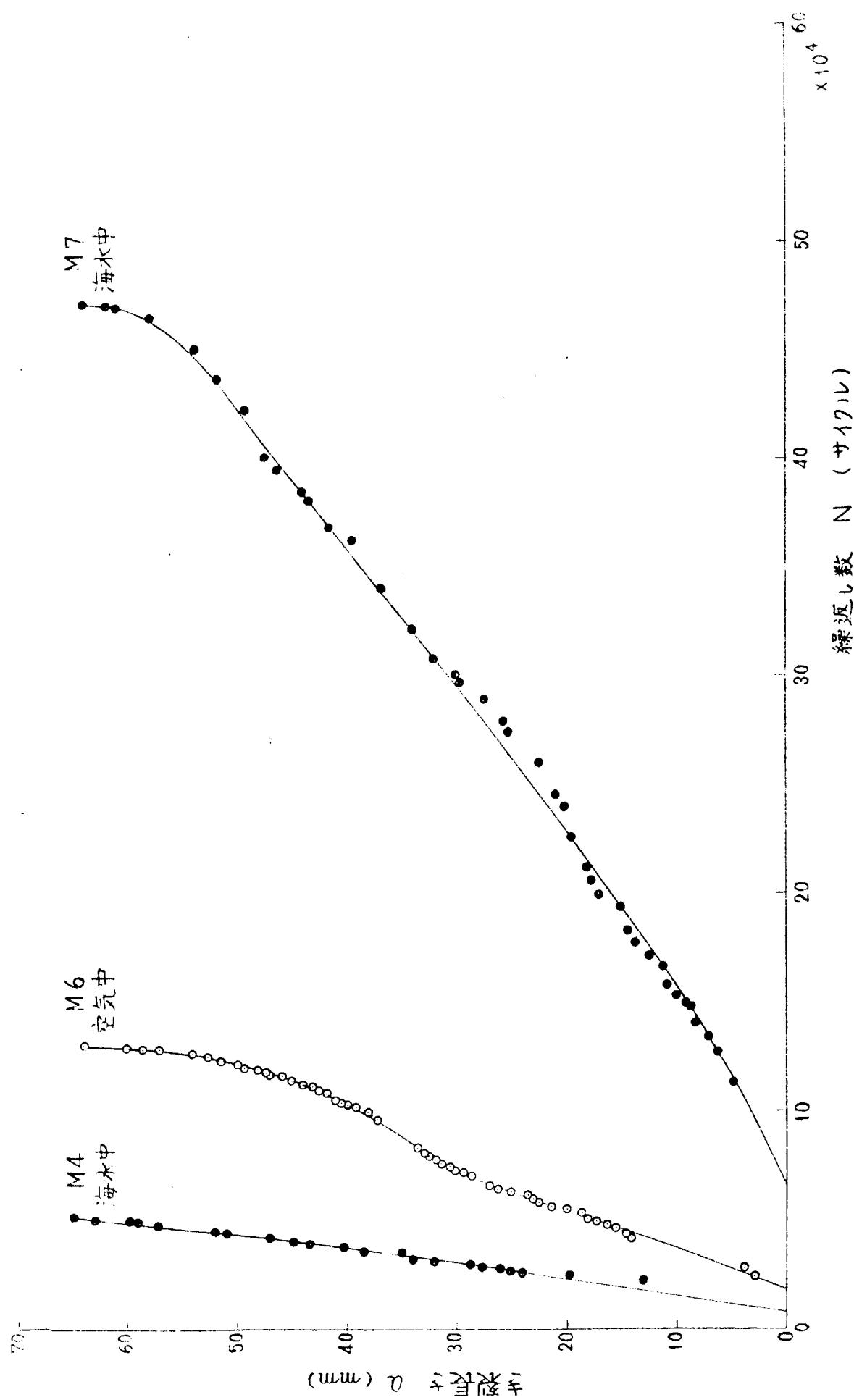


図 1.2.10 スロット模型スティフナーの疲労き裂進展状況

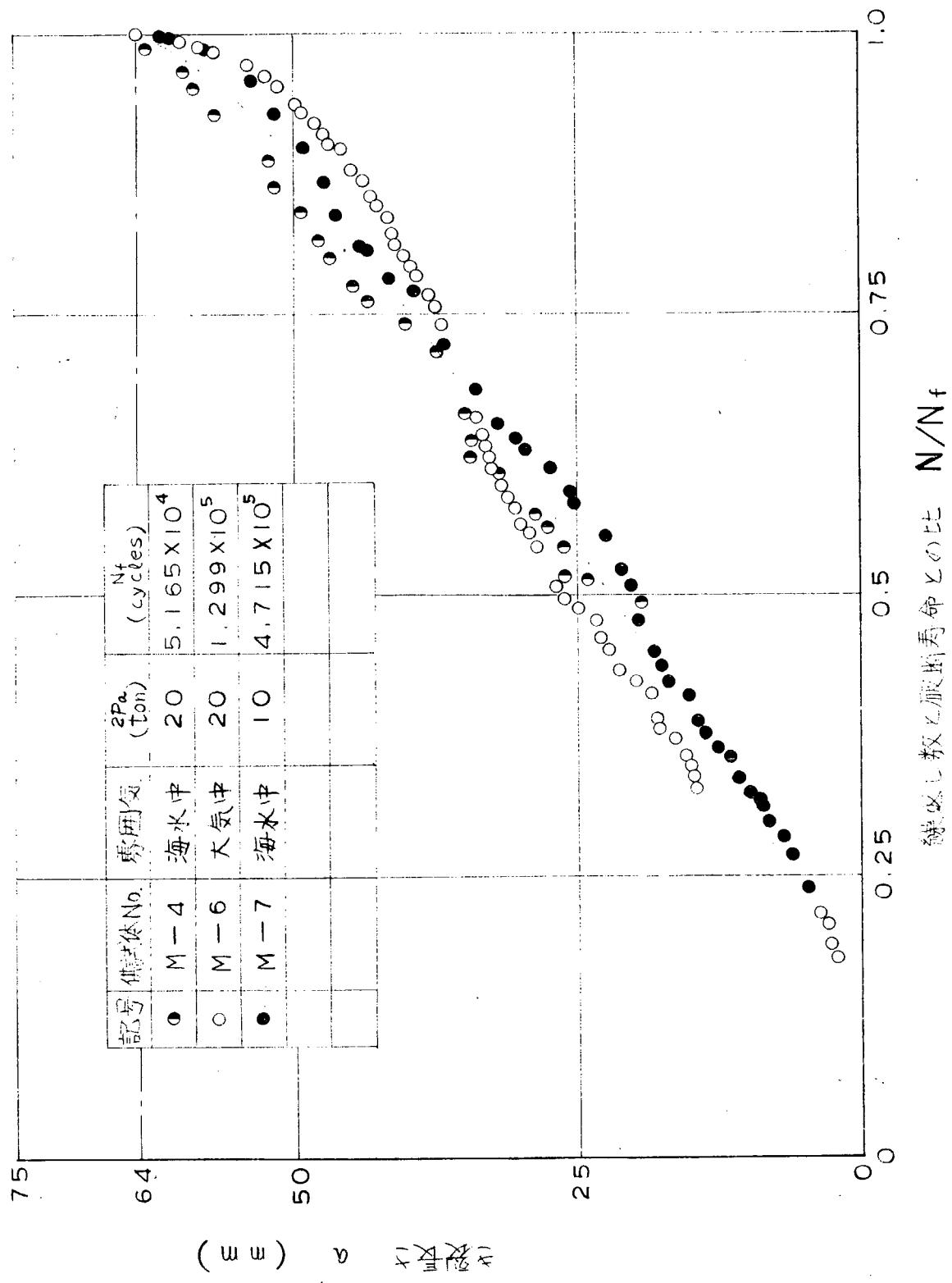
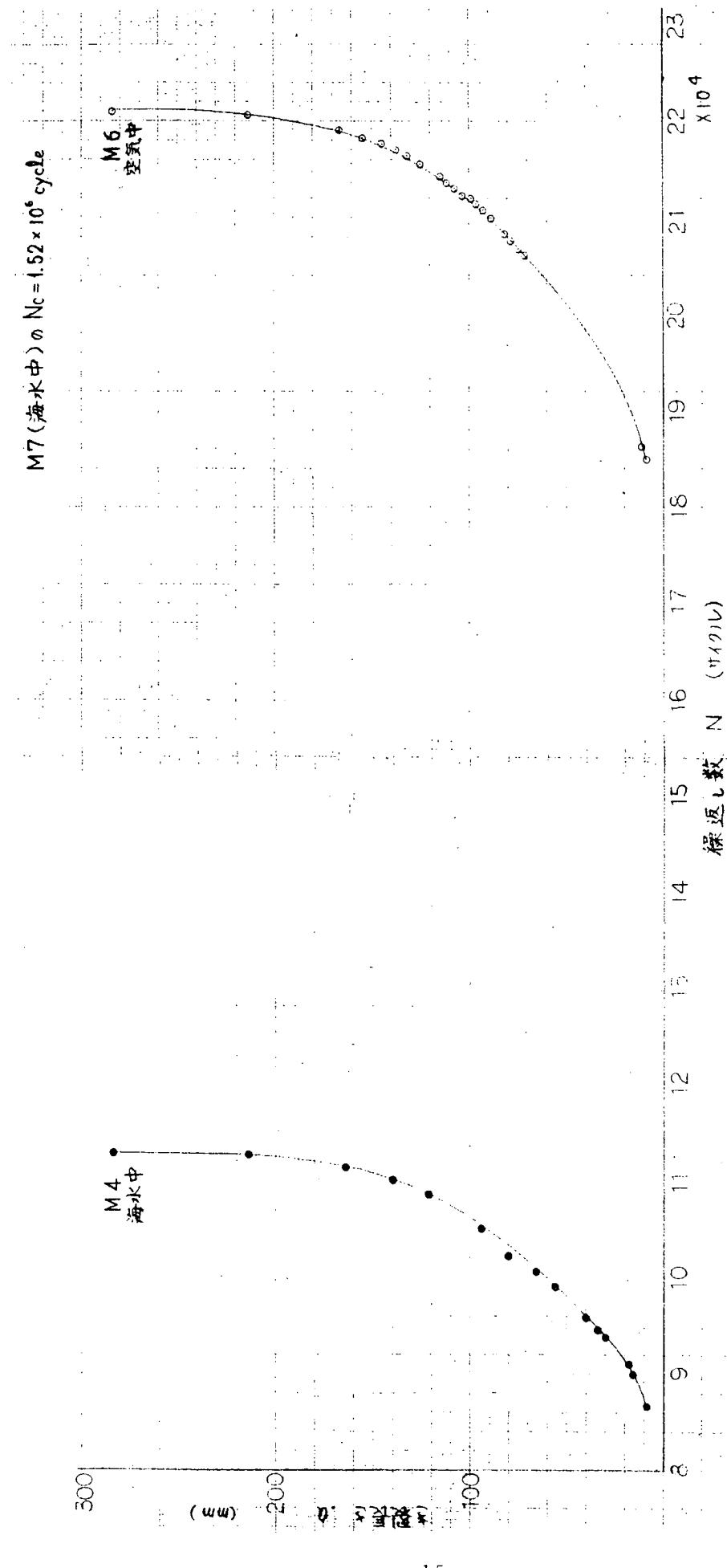


図 1.2.1.1 スティフナーの疲労き裂進展挙動

図 1.2.1.2 ヴェーブブレート亀裂進展状況



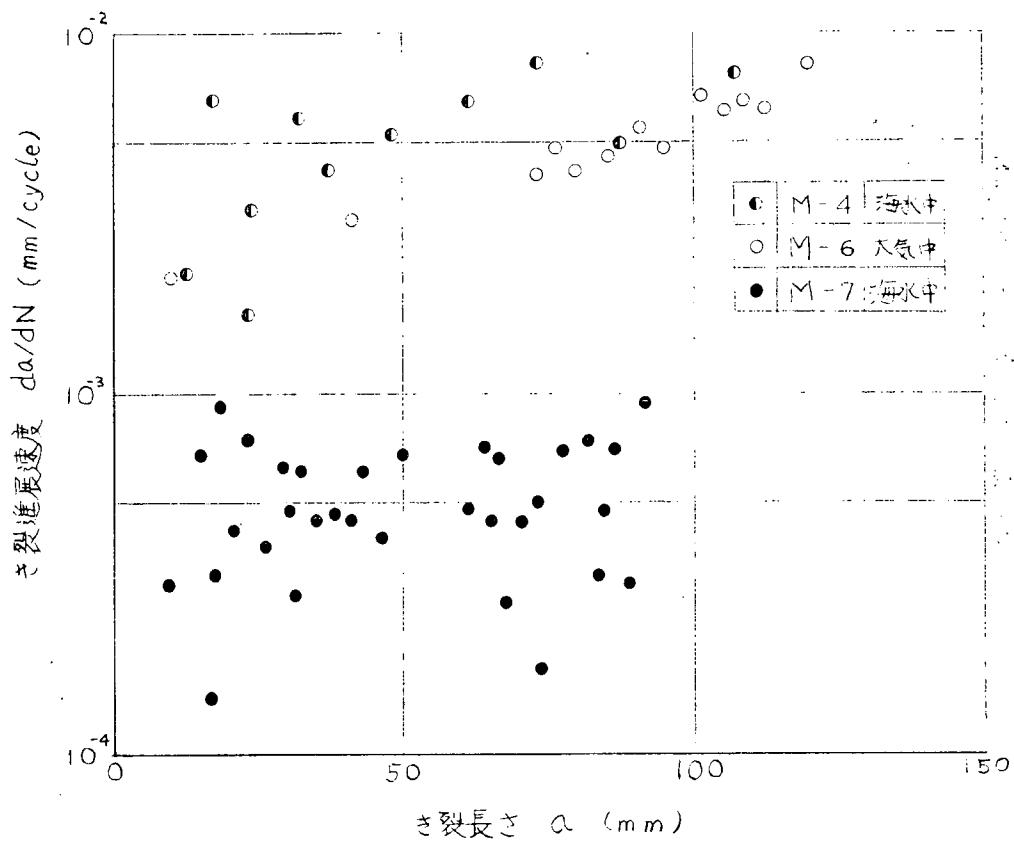


図 1.2.1.3 ウェブプレートの疲労き裂進展速度とき裂長さとの関係

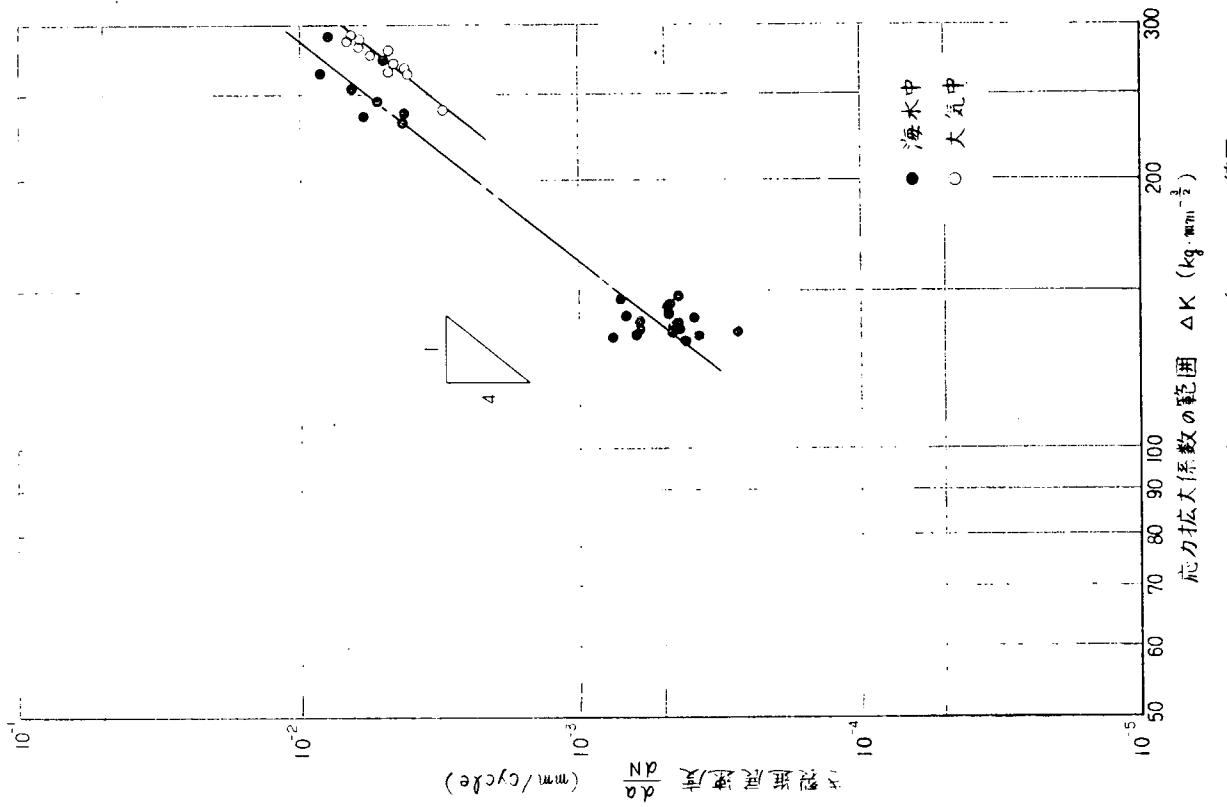


図 1.2.1.4 ウェブプレートの $da/dN - \Delta K$ 線図

2 海水中腐食疲れと塗装の効界

船殻の部材に限らず海水環境下で使用される構造物が多い。構造部材に変動荷重がかゝると部材の受ける応力と繰り返し速度により被害が累積し損傷することもあり得る。疲労による損傷防止の対策としての疲労設計は破壊力学などの導入により近年において急速な進歩を遂げているが、環境の影響まで考慮に入れた腐食疲労の定量化はまだなされていない。ここでは特に海水腐食環境中における低速繰り返し速度領域における環境および速度の疲労寿命におよぼす影響を実験的にしらべ大気中疲労試験結果と対比し考察を行なった。

2.1 実験

2.1.1 供試材および試験片

実験に用いた供試材は板厚 8 mm の造船用軟鋼板 SM41A 材でミルシートによる化学成分および機械的性質を表 2.1.1 に示す。試験は全て部分片振り引張りにて行なったが大気中および 3% 食塩水中ではチャック型を、海水中腐食環境中ではピン荷重型を用いた。それぞれの試験片形状および寸法を図 2.1.1.a および図 2.1.1.b に示す。試験片には全て 30 メッシュサンドブラスト処理を行なった。

2.1.2 試験装置および試験方法

大気中および 3% 食塩水中浸漬疲労試験については動的 ± 40 トン能力のローゼンハウゼン型試験機を行い、荷重繰り返し速度は全て 660 cpm にて行なった。3% 食塩水中浸漬の疲労試験については後述の海水腐食環境中試験のように水の循環、回流はせず水槽からの洩れによる減量分の補充のみ行なった。

海水腐食環境中での疲労試験は油圧式の負荷繰り返し装置を作成し、これにより試験を行なった。圧力設定はレリーフ弁を行い、タイマーで上限および下限の保持時間を制御した。この試験では荷重繰り返し速度の影響をみる他に腐食環境条件の疲労寿命におよぼす影響も調べるために一定荷重条件にて海水中に常時浸漬もの、15 分 - 15 分および 2 時間 - 2 時間の周期の乾湿交番試験と 3 種類の環境条件の試験を行なった。海水腐食試験に利用した試験機の配管系回路図を図 2.1.2 に、また試験装置と実験中の配置などを図 2.1.3 に示す。

2.2 試験結果

実施した疲労試験の条件および結果は表 2.1.2 に示す通りである。これらの試験結果を速度別に最大応力 (σ_{max}) - 破断寿命 (N_f) の関係でまとめたものを図 2.1.4 a, b に示し、両者の比較を図 2.1.4 c に示した。ローゼンハウゼン試験機の高速での疲労試験は下限応力はすべて同じであるが低速荷重繰り返し試験においては装置と試験速度の関係で前者に比べて 1 kg/mm² 前後の差がある。そこで応力全振幅 ($2\sigma_a$) と繰り返し数の関係に示したもの図 2.1.5 に示す。最大応力 (σ_{max}) と破断時間、および応力全振幅 ($2\sigma_a$) と破断時間 (T_f, min) の関係を全試験片について示したのが図 2.1.6 および図 2.1.7 である。ローゼンハウゼン型試験機の負荷波形は正弦波で、低速の油圧装置ではほぼ台形に近い波形で負荷しているが、波形による影響を無視すると次のことが言える。最大応力で整理した場合大気中における疲労寿命がもっとも大きく、同じ荷重速度で行なった 3% 食塩水中疲労の寿命は繰り返し数にして一様に 10% 程度の低下がみられる。

海水腐食環境中における低速繰り返し試験では常時浸漬の場合の他に乾湿交番の周期 2 条件について行なったがこれらの差異は認められなかった。低速で行なった試験の結果を高速で行なった 3% 食塩水中での疲労試験結果と比べると実施した応力レベルの高い条件では寿命にして約 40% の低下があり腐食環境中の疲労寿命におよぼす速度の影響は大きい。また両者の寿命曲線を比較すると低応力側ほど曲線の開きが大きくなり、腐食環境中にある時間が長い程寿命の低下が顕著であることを示している。

実験に用いた海水の諸特性の季節変化および海水温度と溶存酸素の関係を図 2.1.8 と図 2.1.9 に示す。

2.3 考 察

この試験においては大気中および海水環境での疲労寿命の比較について調べた。しかし、繰返し速度と波形が異なるため両者が寿命におよぼす影響をしらべてみたところ繰返し速度については一般に発熱などによる二次的効果の影響を除けば材料の耐久限は繰返し速度に伴なって単調増加すると考えられているが速度の影響について調べている報告の多くは数 Hz から数 kHz の範囲のもので本実験における繰返し速度範囲での把握はできなかった。しかし、一般的にはこの速度領域では速度の寿命におよぼす影響は少ないとしている。また 3 % 食塩水中における結果と海水中疲労試験の結果を比較する際に波形のおよぼす影響を明らかにしておく必要があるが、低繰返し速度で腐食環境中のものに関しての結果の報告はなく腐食環境下での疲労寿命におよぼす速度と波形の影響を明らかにすることは腐食環境中の寿命を定量化するための今後の課題である。

高速における高応力レベルでの試験は相当の発熱を伴う。大気中の試験に比較して 3 % 食塩水中に浸漬した冷却による寿命増加の効果はみられなかった。

2.4 ま と め

造船用軟鋼板 SM 41 A 材にサンドblast 处理を行なった試験片について大気中および海水環境中における疲労試験を行なった結果以下のことがわかった。

- 1) 高速繰返し速度における疲労寿命は 3 % 食塩水中浸漬では大気中のものに比べて、実験を行なった領域にわたって一様に約 30 % の寿命低下がみられる。
- 2) 海水腐食環境中における低速荷重繰返し速度での疲労試験結果は高応力 ($\sigma_{max} \approx \sigma_y$) においても約 40 %、 $\sigma_{max} \approx \sigma_y$ では約 50 % の寿命低下がある。
- 3) 腐食環境中での繰返し速度の寿命低下におよぼす影響は短寿命側（高応力レベル）では比較的小さく、低応力レベル側の寿命低下の割合が大となることがわかった。これは低応力側では試験片が腐食環境にある時間が長く、機械的に受ける被害に対して雰囲気の与える割合が大きくなるためと考えられる。

表 2.1.1 供試材の化学成分と機械的性質

材 料	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質		
	C	S i	Mn	P	S	降伏点、 σ_y	引張強さ、 σ_B	伸び、 ϵ
SM 41 A	0.16	0.04	0.84	0.016	0.026	30.6 kg/mm ²	47.2 kg/mm ²	27.0%

表 2.1.2 試験条件および破断寿命 N_f と破断時間 T_f

雰囲気	試験片番号	負荷荷重 (P_{max})	最大応力 (σ_{max} , kg/mm)	破断繰返し数 (N_f)	破断時間(分) (T_f)	繰返し速度
大気中	TP-2	24.3 トン	38.0	0.90×10^5	0.14×10^3	660 cpm
	P-2	13.5	28.2	1430	2.17	"
	A-3	13.0	27.1	1440	2.18	"
	5	14.5	30.2	617	0.94	"
	6	19.0	39.6	0.65	0.10	"
	7	12.0	25.0	4030	61.10	"
	8	12.5	26.0	1487	2.25	"
	9	16.5	34.4	143	0.22	"
	10	16.0	33.3	252	0.38	"
	1	13.5	28.2	559	0.85	"
海水	2	15.1	33.0	215	0.33	"
	3	12.0	25.0	2166	3.28	"
	1	設定圧力(Kg/cm^2) 13.0	37.5	0.61	6.10	10 cpm
	4	12.0	34.8	0.88	8.81	"
	7	11.0	32.0	1.23	41.07	3 cpm
	10	11.0	32.0	1.56	15.57	10 cpm
	2	13.0	37.5	0.62	6.16	"
	5	12.0	34.8	0.79	7.89	"
	11	11.0	32.0	1.91	19.12	"
	3	13.0	37.5	0.56	5.60	"
水中	6	12.0	34.8	0.93	9.31	"
	12	11.0	32.0	1.73	17.28	"
	2	13.0	37.5	0.56	5.60	"

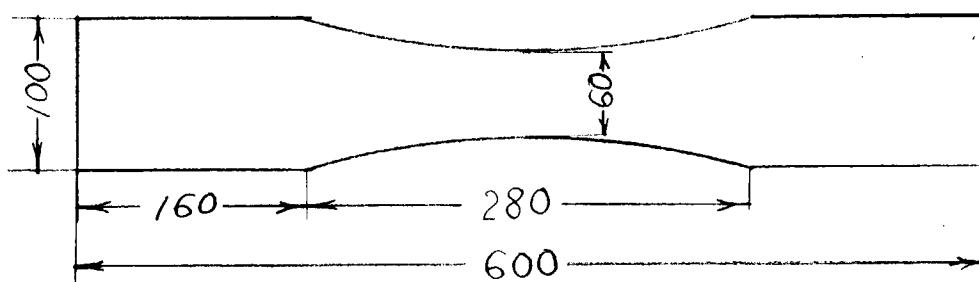


図 2.1.1 a 大気中および 3% 食塩水中疲労試験片の形状寸法

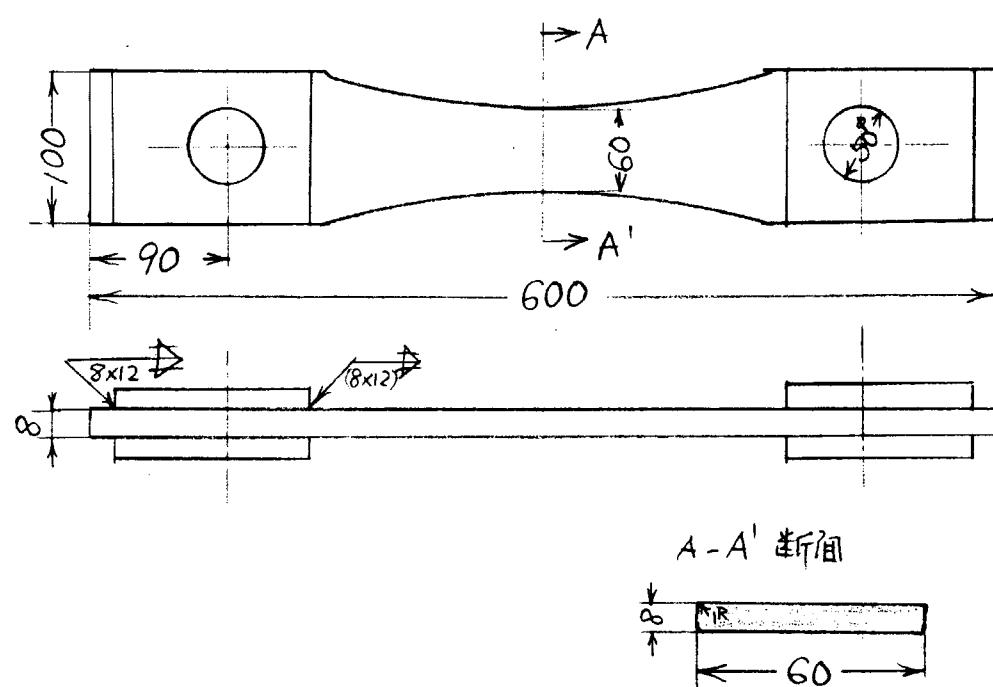


図 2.1.1 b 海水中腐食疲労試験片の形状寸法

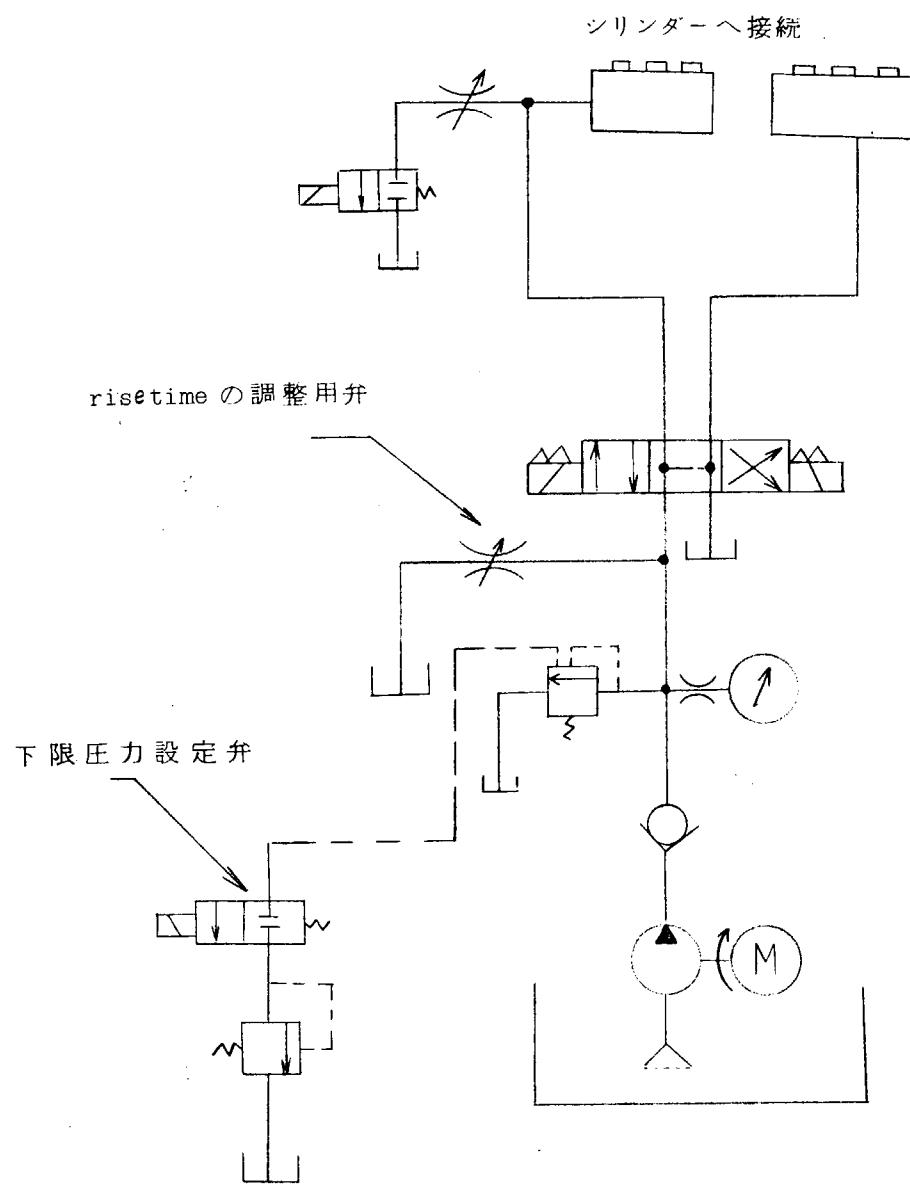


図 2.1.2 海水腐食疲労試験用負荷繰返し試験
配管回路図



図 2.1.3 海水中腐食疲労試験装置

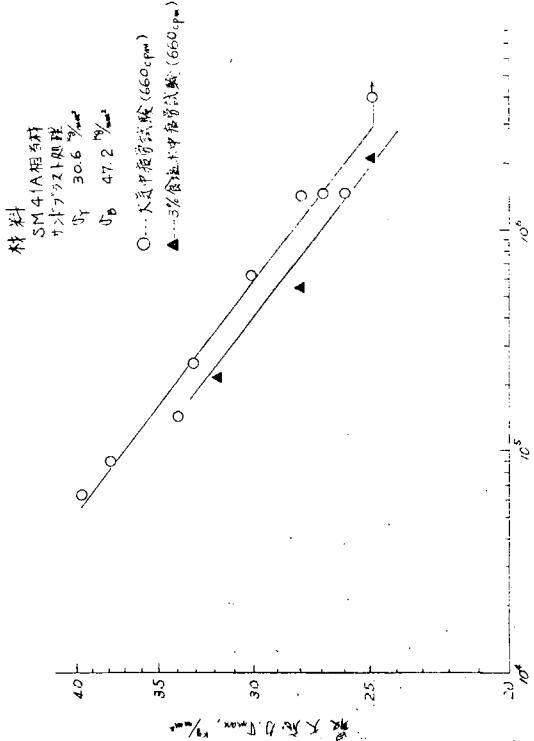


図 2.1.4 a 高線返し速度における σ_{\max} と N_f 線図

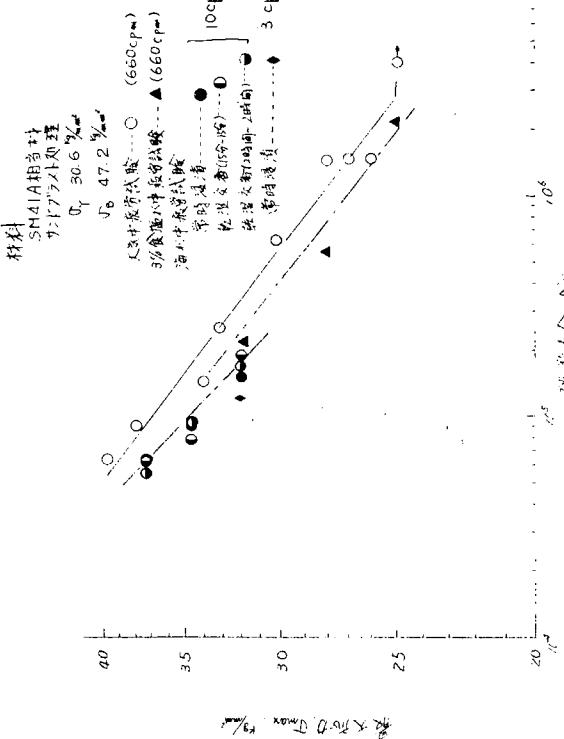


図 2.1.4 b 低線返し速度における σ_{\max} と N_f 線図

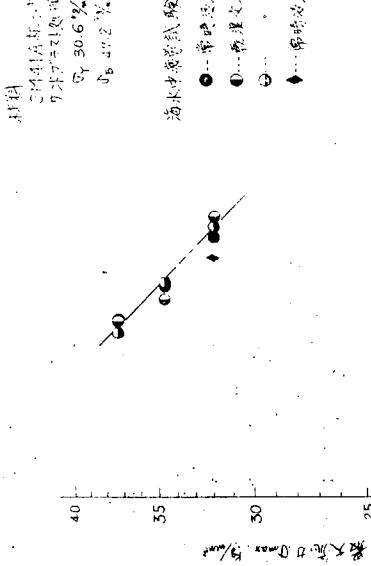


図 2.1.5 低線返し速度における σ_{\max} と N_f 線図

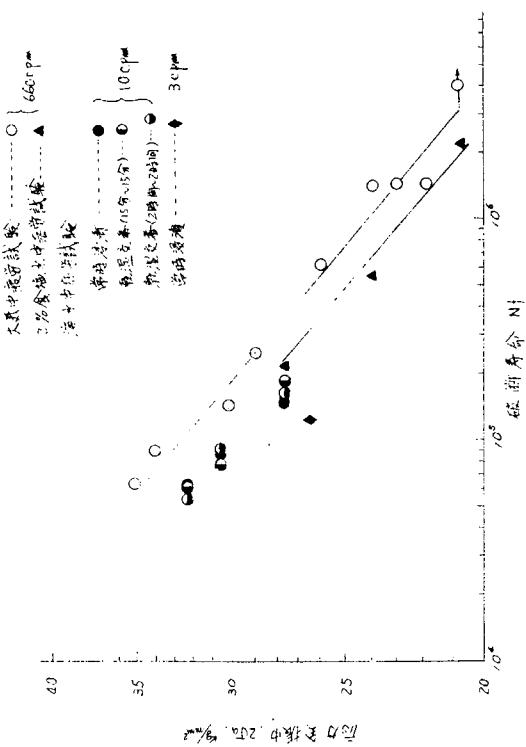


図 2.1.4 c 最大荷応力と破断寿命

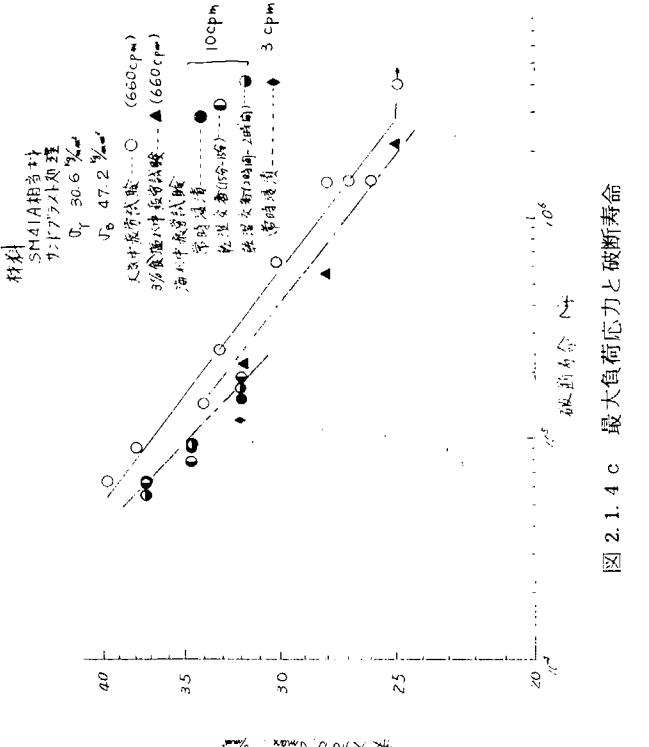


図 2.1.5 底力全振巾と破断寿命

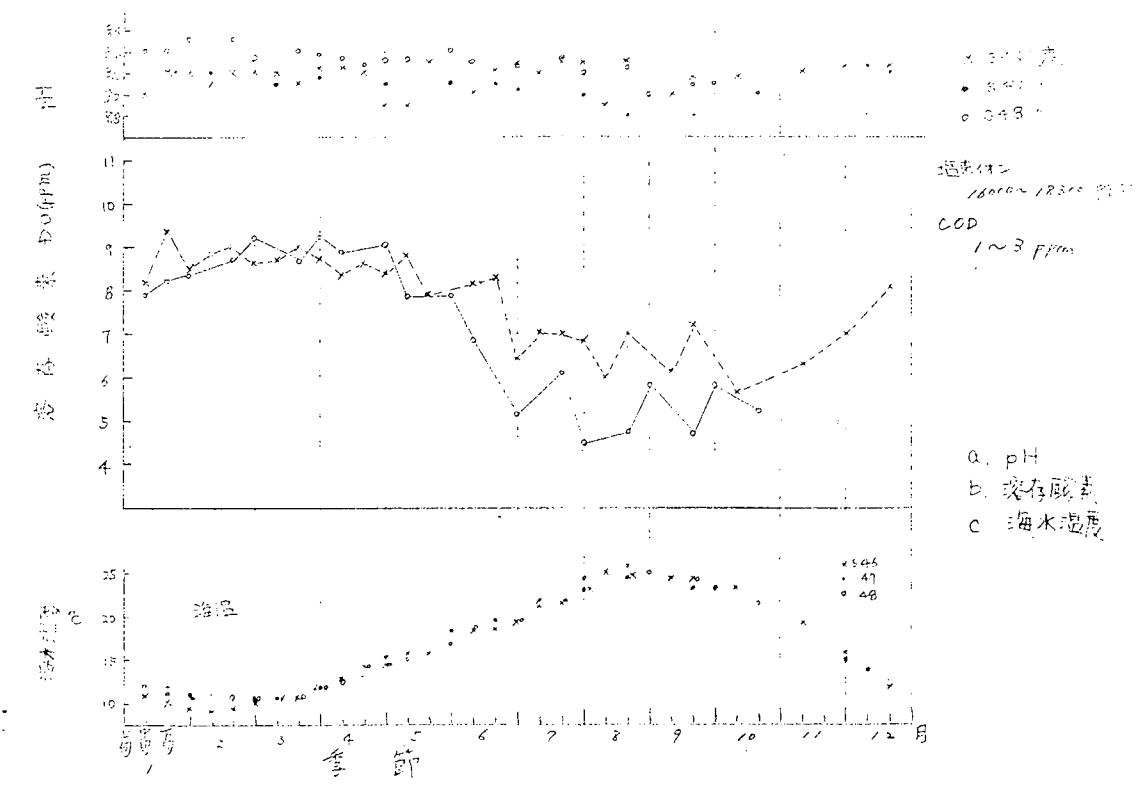


図 2.1.8 海水諸特性の年間変化（於 呉海水実験場）

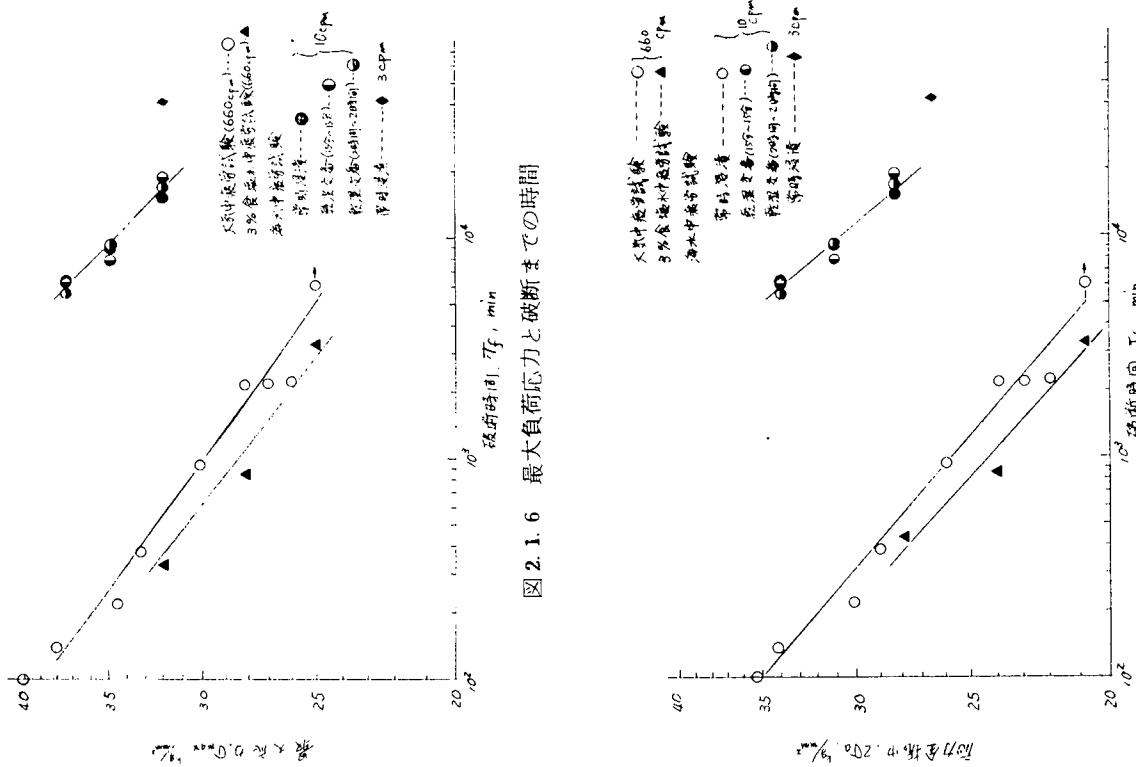


図 2.1.7 応力全振巾と破断までの時間

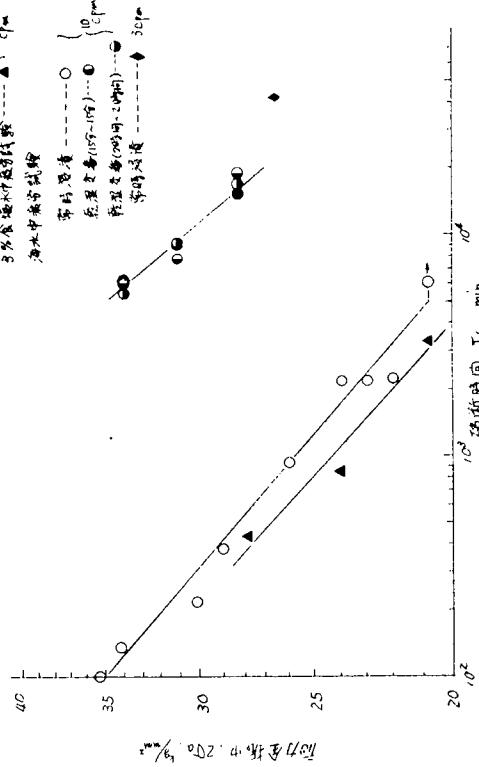


図 2.1.7 応力全振巾と破断までの時間

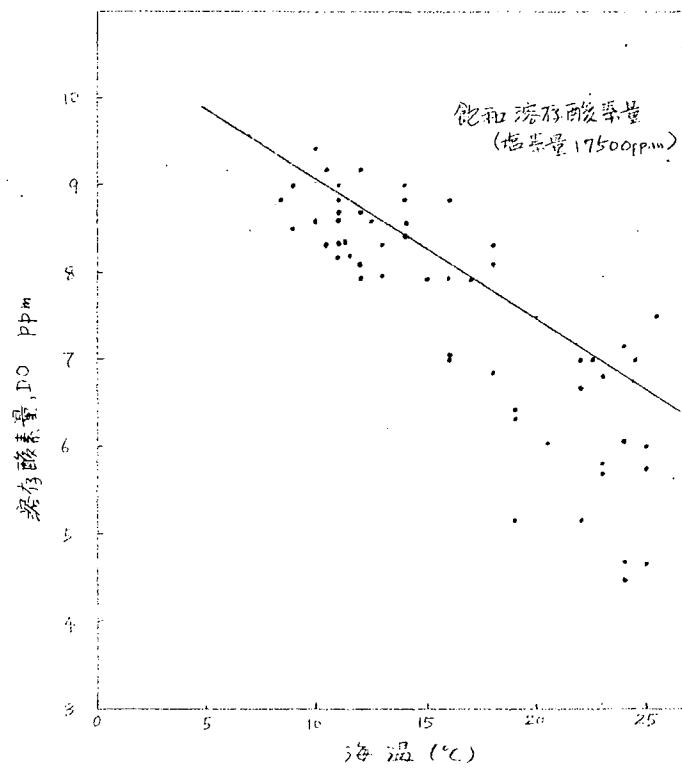


図 2.1.9 海水温度と溶存酸素の関係

3. 片振り引張り腐食疲れに対する不活性 ガスと塗料の防食効率に関する研究

繰返し荷重下における塗膜の海水に対する防食効果に関する一連の実験的研究のうち、軸力荷重に対する且応力集中部を有する材料についての実験を実施したものである。荷重状態は前年度と関連させるために、基本的な片振り張とし、応力集中部を有する試験片材料としては、有孔板及び十字隅肉溶接継手を用いた。

3.1 実験方法

3.1.1 試験片

試験片材料は前年度使用したものと全く同じ 6 mm 厚の SS 41材であり、それらの成分及び機械的性質は表 3.1.1 に示す通りである。試験片形状は図 3.1.1 に示すように有孔板は前年度と同様試験片巾 40 mm の中央に 10 φ の孔を設けたもので、理論応力集中係数は $\alpha_t = 2.4$ となっている。円孔周辺の角はペーパーで丸めた。十字隅肉溶接継手は、溶着鋼が荷重を伝達するよう中央に入れた 9 mm 厚材に被覆アーケ溶接棒 B-17 (3.2 φ 神鋼製) により、完全溶込みで各 2 層溶接を行なったもので、脚長は約 5 mm になっている。

塗装材は次の要領で塗装を行なった。

表 3.1.1 供試材の化学成分、機械的性質

鋼種	化 学 成 分 (%)					機械的性質 (kg/mm ²)	
	C	Si	Mn	P	S	σ_y	σ_u
SS 41	0.10	0.17	0.46	0.013	0.013	32.5	45.5

3.1.2 塗装法

- ① 塗 料 : タールエボキシ塗料ビスコン No. 1000
- ② 表面除錆率 : サンドblastにより S_a 2.5 程度
- ③ 膜 厚 : ショッププライマー (15 μ) → 1回目ビスコン (100~125 μ) → 2回目 (100~125 μ)
- ④ 試験片角処理 : 非塗装材に準ず
- ⑤ 施工場所 : 千葉造船所特殊塗装工場

3.1.3 試験装置および試験方法

有孔試験片に用いた疲労試験装置は、前年度製作した 10 Ton サーボ油圧式荷重制御型片振り張疲労試験機と環境制御装置であり、溶接継手の大気中試験には 50 Ton サーボ油圧式疲労試験機を用いた。

負荷は完全片振り近い部分片振り ($R = 0.05 \sim 0.17$) 引張りを与える、寿命は全て破断時とした。

腐食雰囲気は、試験槽に約 20 ℥ の 3% NaCl 水溶液を入れ、試験片をこれに浸漬した。液温は夏季の室温に合わせて全て 30 °C に保持した。塩水中には小型ポンプで空気を送給し、溶存酸素量を飽和状態にした。

負荷の繰返し速度は、腐食雰囲気下では 200 cpm 溶接継手の大気中では 300 cpm とした。

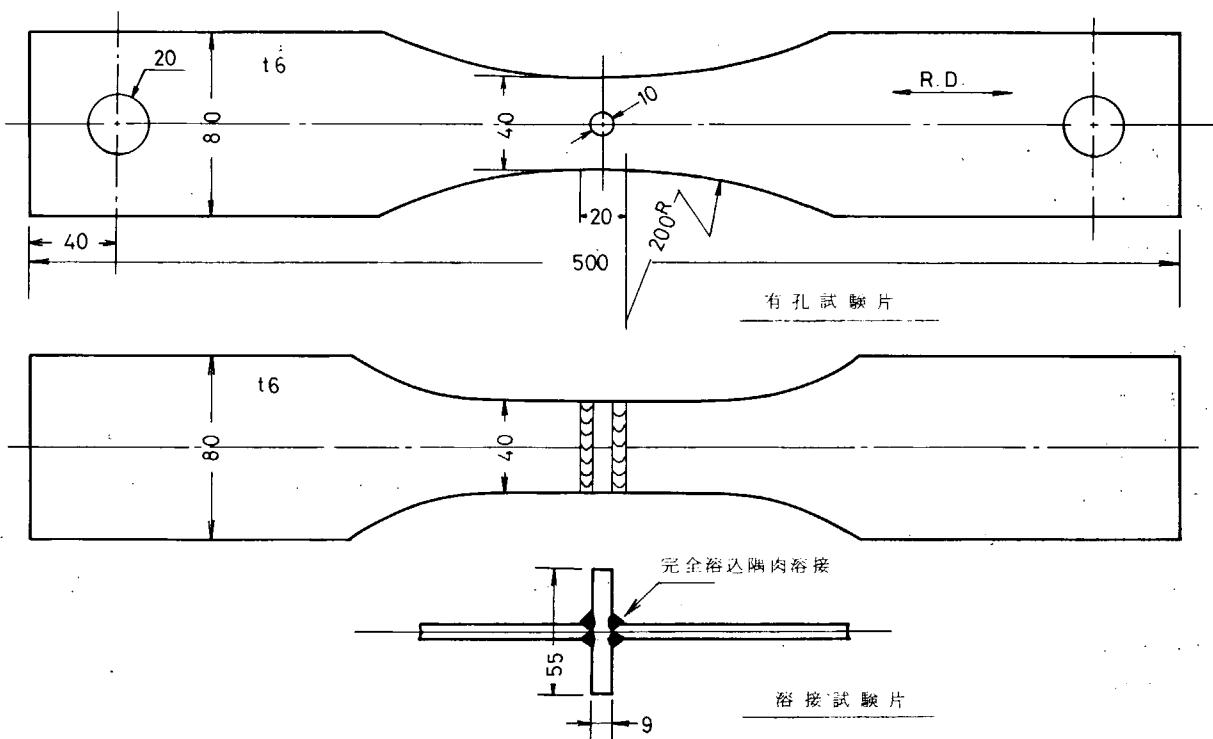


図 3.1.1 試験片形状

3.2 実験結果および考察

3.2.1 塗膜の初期インピーダンス

塗膜の初期インピーダンスをベースト法で測定した結果を表3.2.1に示す。

測定器：電研式塗膜劣化検査器 TD 1-2 (TOEI KOGYO社製)

発振周波数：1 Kc

電解液：3% NaCl ベースト貼付け

同表には小刀によるスクラッチ傷 1.0 mmを入れた場合の値も併記して示した。

傷の存在により、抵抗が2桁半程度減少し、容量が1桁半程度増大した。

表3.2.1 塗膜の初期インピーダンス測定結果

試料	健全塗膜		傷塗膜		ベースト 円孔及び 両側面
	抵抗 (KΩ)	容量 (μF)	抵抗 (KΩ)	容量 (μF)	
1	700	0.0038	1.3	0.051	
2	800	0.0039	1.3	0.111	
3	1000	0.0034	1.5	0.029	
4	700	0.0036	1.0	0.115	
平均	800	0.0037	1.3	0.077	

なお試験機の試験槽に取付けて3%食塩水中に浸漬した状態での初期インピーダンスは、チャックに取付けない状態で数ないし数10 KΩ程度しか出なかったため疲労試験中のインピーダンス測定は中止した。初期インピーダンスが低いのは、主として浸漬面積が大きいために試験片角部に生じ易い塗装不良部が多くなることによると思われる。

3.2.2 疲れ試験結果

今までえられている疲れ試験の結果を表3.2.2にまとめた。

これらの結果を前年度えられたデータと比較して図3.2.1および2に示した。

有孔試験所の塩水中疲れ強さは、図3.2.1に示すように塗装材の方が寿命が短くなっている。これは、応力集中部のように局部的に歪が大きく、塗膜の劣化が局部的に生じている場合、本実験ではSUS製容器がサーモスタット、温度計から試験機本体、チャックを通じて試験片と短絡していたため、腐食電流の密度が非塗装材よりも高くなるためと考えられる。このように塗装試験片の局部が劣化すると、電流密度が高まって、かえって寿命を縮める場合があることを示唆している。又、試験片表面仕上の相違による影響も考えられる。

写真3.2.1は試験片の破断状況を示すもので、破断後は塗膜が明らかに剥離していることがわかる。

図3.2.2は溶接継手の大気中試験の結果であり、き裂発生位置は、写真3.2.2に示すように隅肉溶接の趾端部である。

3.3 まとめ

船体用軟鋼板で有孔試験片および十字隅肉溶接継手を作成し、それらの非塗装材あるいはタールエボキシ塗装を施した試験片について、大気中あるいは3%食塩水中において片振り張りによる疲れ試験を実施した結果、塗装試験片の寿命はSUS製容器と試験片が短絡していたため、非塗装材よりもかえって寿命が短くなつたが、他の要因も考えられるので、更に詳細な検討が必要である。

表 3.2.2 疲れ試験結果

試片	界囲気	試料No.	最大応力 σ_{max}	応力範囲 $2\sigma_a$	破断時間 T_i	負荷線返し数 N_f	負荷線返速度
塗装材有孔試片	3%NaCl 水溶液 浸漬 30°C	H C - SW - 1	2 7.0	2 5.3	4 1.8	5.06×10^4	200 rpm
		" - 2	2 4.7	2 3.3	5 8.0	7.03×10^4	
		" - 3	3 0.2	2 8.0	2 3.0	2.78×10^4	
		" - 4	3 4.2	3 2.8	7.5	9.14×10^3	
非塗装溶接継手試片	大気中 室温	W - A - 1	3 0.8	2 6.4	—	1.69×10^5	300 rpm
		" 2	2 5.9	2 1.6	—	1.20×10^6	
		" 3	3 3.6	2 9.4	—	1.87×10^5	
		" 4	2 9.4	2 5.2	—	3.84×10^5	
		" 5	3 7.3	3 3.2	—	6.00×10^4	
		" 6	3 5.4	3 1.3	—	1.39×10^5	

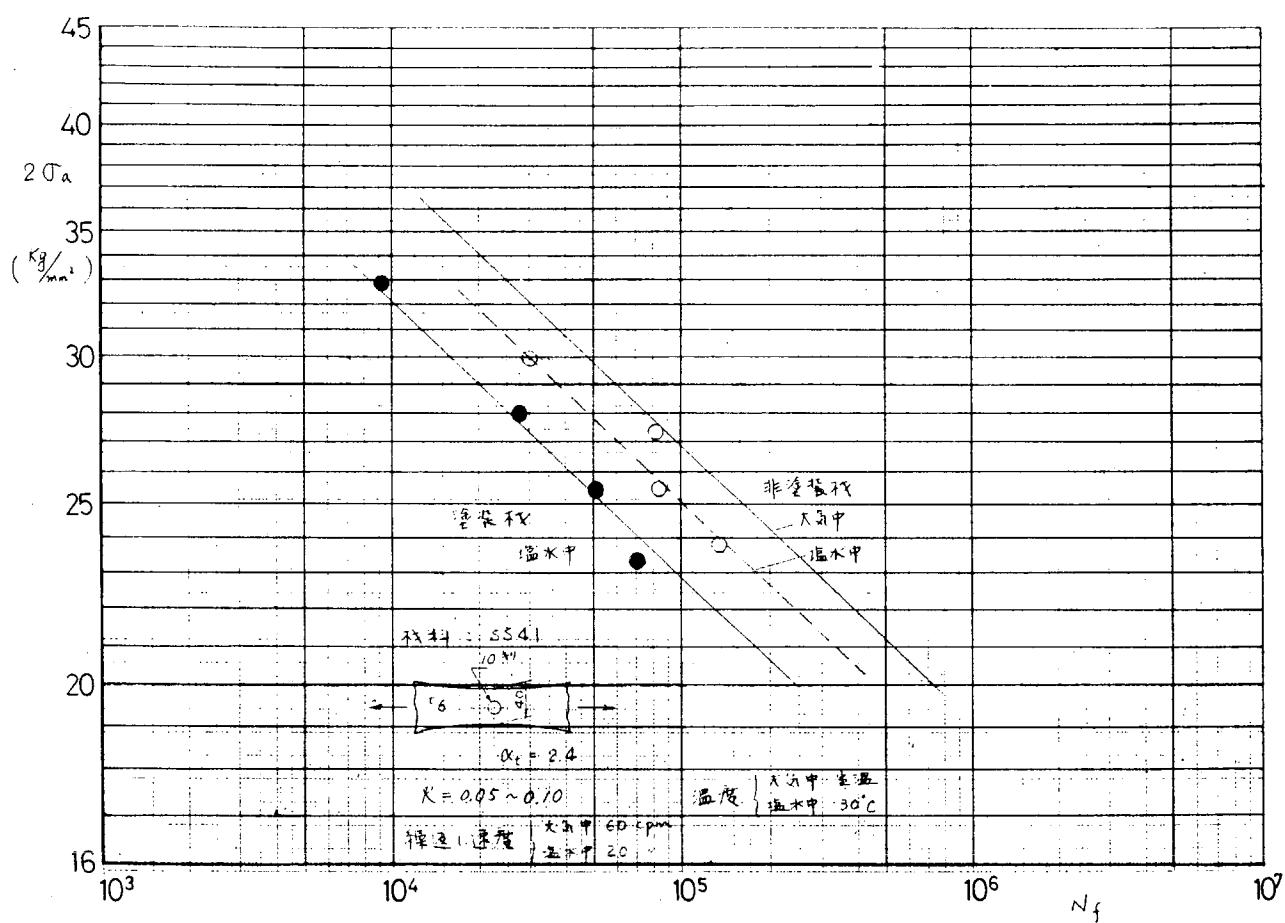


図 3.2.1 有孔試験片に関する疲れ試験結果

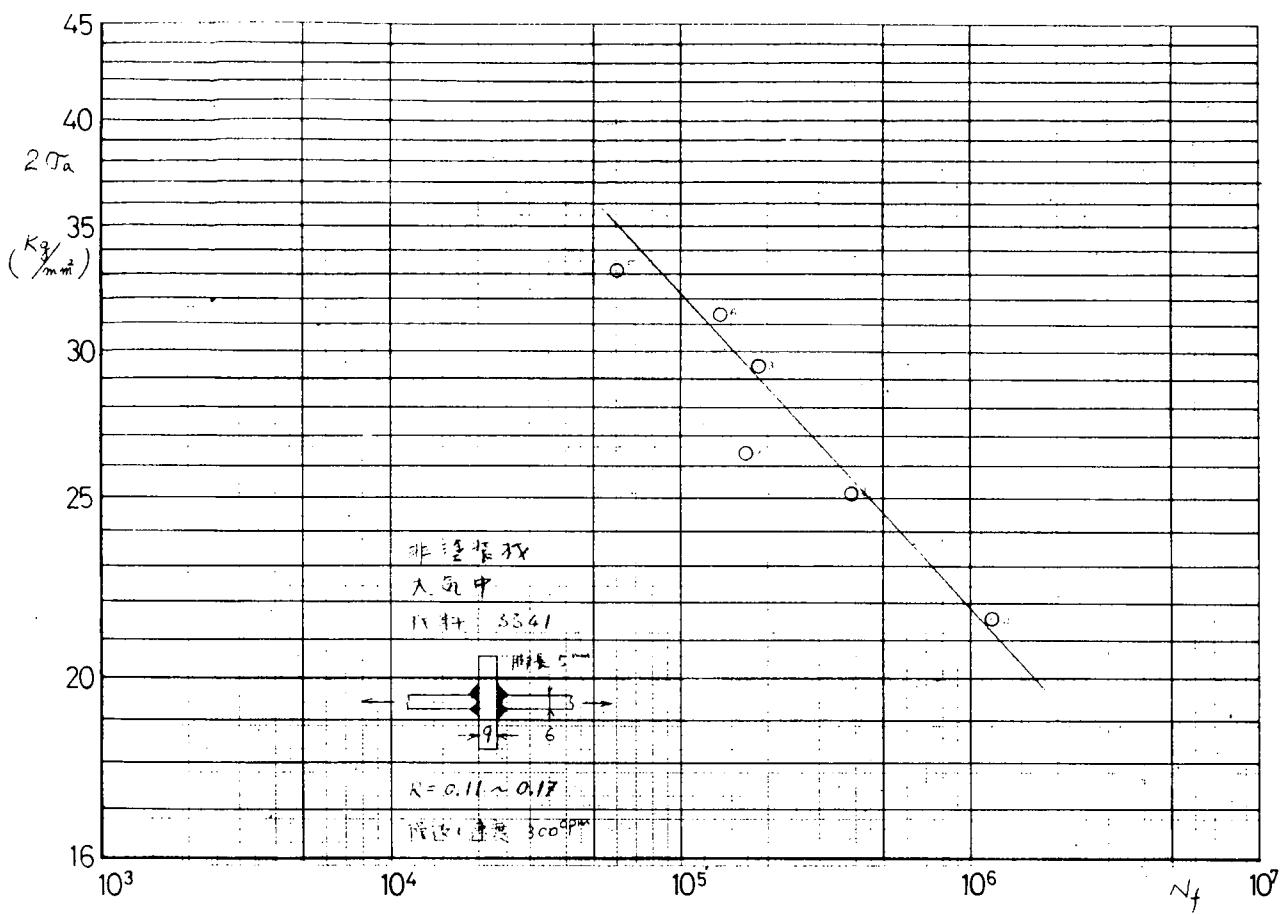


図 3.2.2 溶接継手試験片に関する疲れ試験結果（大気中）

写真 3.2.1 塗装試験片 塩水中疲労試験後の破断状況

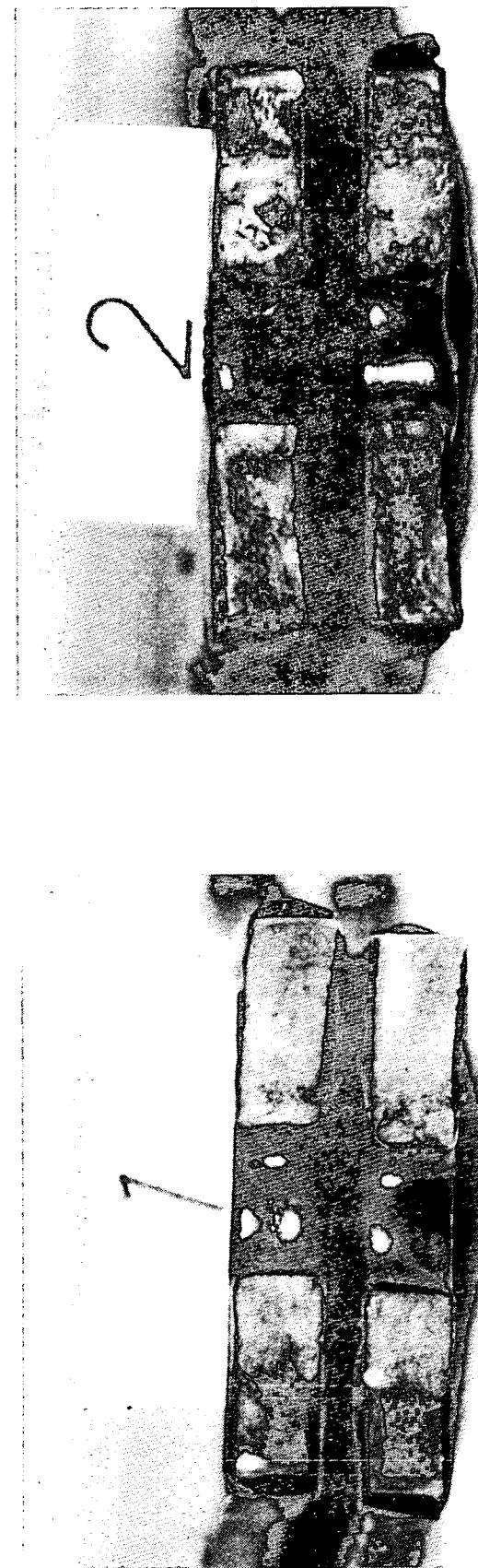
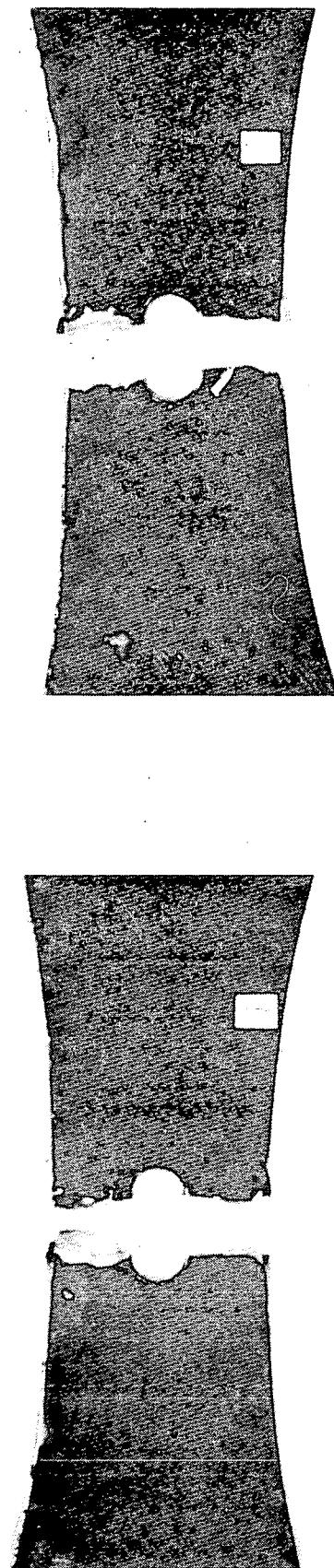
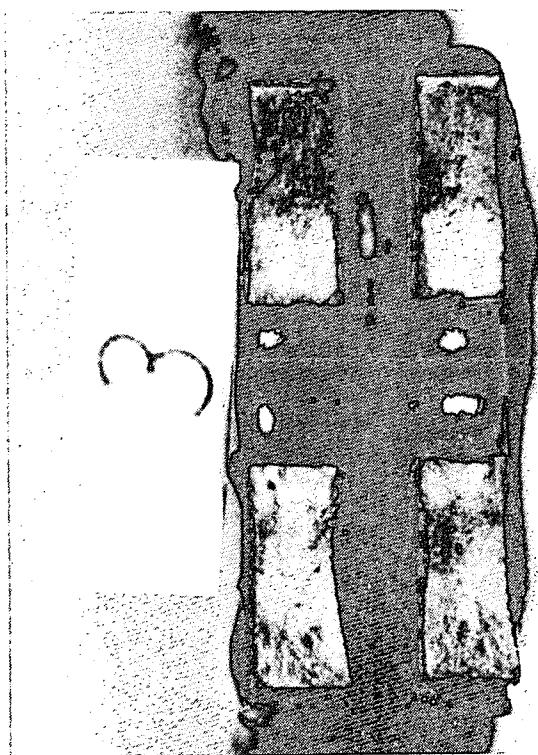
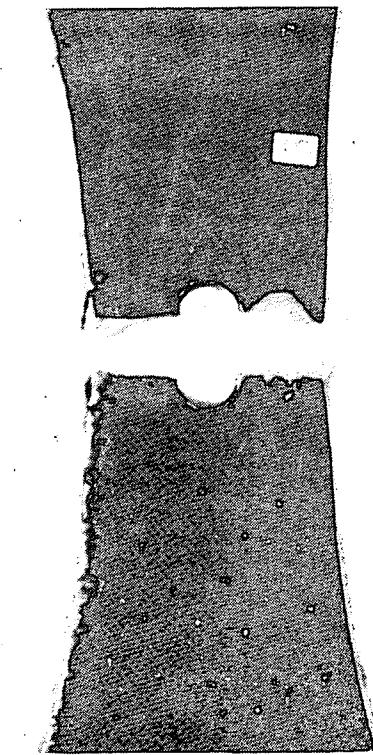
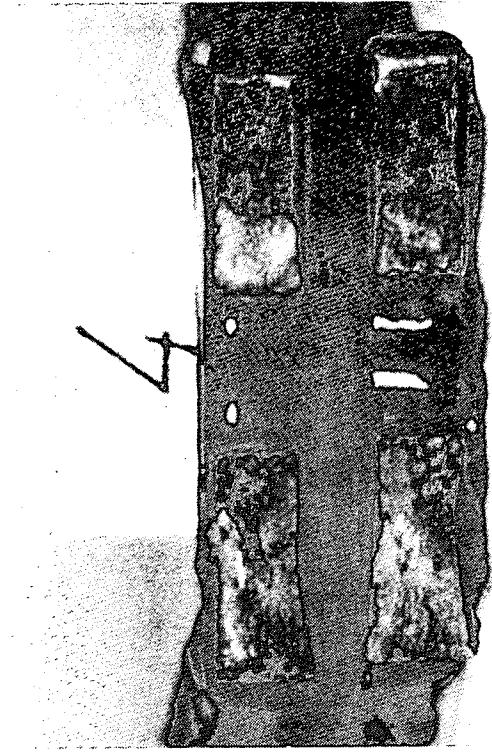
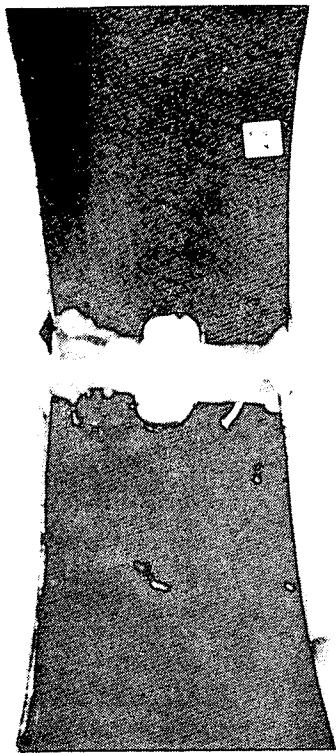


写真3.2.1（続き）



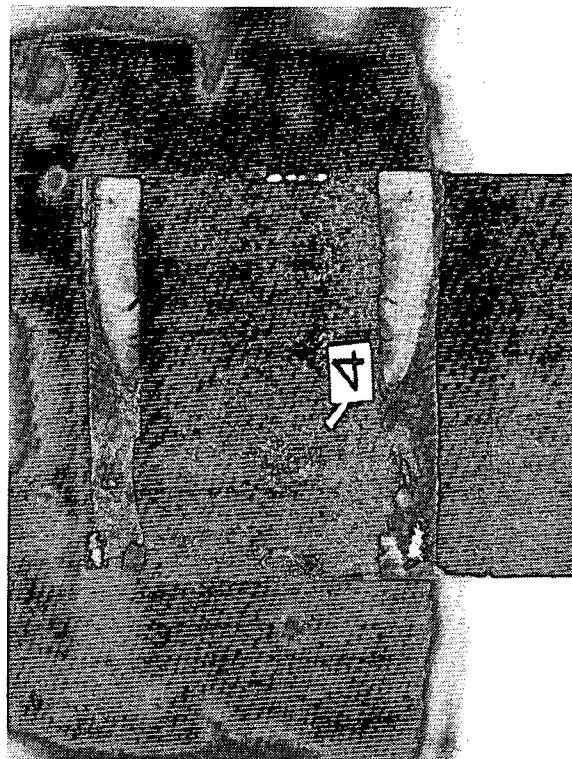
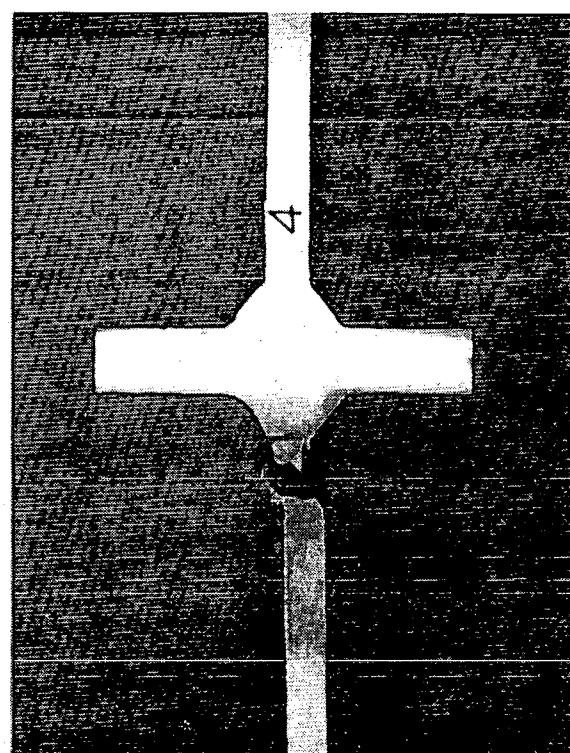
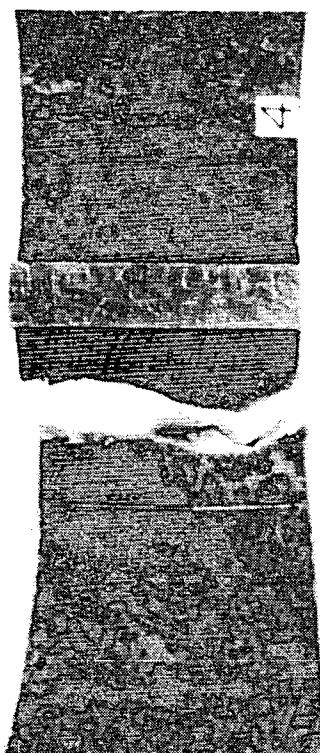


写真 3.2.2 溶接継手試験片の破断状況



4. 腐食疲労に及ぼす塗装の防食効果

腐食と疲労が共存して作用する腐食疲労においては、腐食作用を取り除けば、強度は少なくとも空中の単なる疲れにおける値まで上昇するはずである。したがって、一般の腐食防止法は大部分腐食疲れの防止として役立つと予想される。船舶においては、防食法として電気防食、塗装が主に使用されているが、特に塗装による防食については、繰返し荷重が加わる場合腐食疲労に効果が充分發揮されているかどうかについては疑問である。

このため今年度は腐食疲労に及ぼす塗装の防食効果について、繰返し速度をかえて実験を行ない、検討した。

4.1 実験方法

4.1.1 試験片

供試材はSS41材で板厚6mmのものである。機械的性質はJIS5号の引張り試験片を5本採取し試験をした。5本の平均の値を表4.1.1に示す。また供試材の分析をおこなった結果、同表のような化学分析を得た。

この供試材から図4.1.1に示す試験片形状に機械加工して試験片を製作した。試験部は板厚4mm、板幅10mmの平滑試験片である。

4.1.2 塗装方法

塗装試験片としては、サンドblast処理をおこなった後、タルエポキシ塗料（ビスコンNo.1000）を二回塗りとした。サンドblast処理、塗装は中国塗料㈱に一括依頼した。

塗膜の厚さはすべて280μであった。

4.1.3 装置および試験方法

試験機は4kg/mm²シエンタ式平面曲げ疲労試験機で両振り疲労試験をおこなった。繰返し速度の影響をみるために、繰返し速度は60cpm、と1750cpmの二種類とした。腐食環境および装置は46¹⁾、47²⁾年度のものと同一のものである。すなわち腐食としては3%NaCl溶液を行い、液は循環させ腐食サイクルを5min-5minのWet-Dryの繰返しとした。液温は室温で大体10°C-19°Cの範囲であった。乾燥は1分間ブロアーにより行ない、液を腐食槽に供給する場合は、常に空気を巻き込む状態とし、液中の溶存酸素量を飽和状態とした。

なお、試験内容としては、表4.1.2の○印について実験をおこなった。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 疲労試験結果

各種疲労試験の結果を表4.2.1に示す。

図4.2.1は1750cpmでのDry、Wet-Dryの結果を示すS-N線図である。サンドblast処理をおこなった試験片の疲労強度は、機械研削のままのものより若干低下する傾向を示した。これは試験片の板厚が薄いため、サンドblastによる効果があまりなく、むしろ表面の粗さによる影響が大きく出たために、このような結果が得られたものと考えられる。サンドblast処理したものに塗装した試験片の疲労強度は、Dryの場合はサンドblastした試験片の疲労寿命とほとんど一致する。これは下地金属の強度に支配されるためと考えられる。

サンドblast処理した試験片の3%NaCl Wet-Dryでの腐食疲労強度は、図に示すような結果となりDryの場合とくらべると特に繰返し数が10⁶位から大きく差がでてくることがわかった。繰返し数が10⁷での腐食疲労限度は約13.5kg/mm²となり、Dryの疲労限度が約2.3kg/mm²であるので $\sigma_{W-D} / \sigma_{D} = 0.6$ と非常に低下することがわかった。

また機械研削した試験片の腐食疲労強度は実験結果が1本と少ないのでわからないが、サンドblastのそれよりは強度低下が小さいようである。これは表面粗さが、腐食疲労強度に影響してくるためと考えられる。

図4.2.2はサンドblast処理した試験片のみについての結果で、繰返し速度が60cpmの場合である。Wet-Dry

での疲労寿命はDryのそれの約1/2となった。

4.2.2 繰返し速度の影響

図4.2.1と図4.2.2の結果について、繰返し速度の影響をみるためにサンドブラスト処理した試験片について整理した結果が図4.2.3である。Dryの場合、Wet-Dryの場合、いずれも若干速度効果がみられ、繰返し速度の小さいものが寿命は低くなっている。この場合、Wet-Dryの方が速度効果の影響が少し大きいようである。これは腐食疲労においては時間の要因が大きいことを示唆するものと考えられる。

図4.2.4は図4.2.3の横軸を時間で表わしたものである。繰返し速度の遅いものの方が破断までの時間は長くなり、繰返し数で整理した図4.2.3の結果と逆になることがわかる。

4.2.3 塗装による防食効果

サンドブラスト処理後、タールエポキシ塗料を塗装し、Wet-Dryで腐食疲労した実験結果が図4.2.1、図4.2.2の△印である。前者は繰返し速度1750cpm、後者が繰返し速度60cpmの場合の結果であるが、いずれの場合も腐食疲労はDryの場合の疲労と同寿命を示すことがわかった。この結果、塗装による防食効果はこの実験範囲内では充分に認められたと考えられる。塗膜の強度はさらに低い応力で長時間の繰返しの場合が非常に大なるが今回は時間の関係上確かめられなかった。

4.3 結 言

腐食疲労に及ぼす塗装の防食効果をみるために、SS41鋼を用いサンドブラスト処理後タールエポキシ塗料を塗装し、3%NaCl、Wet-Dry 5 min - 5 minでの腐食疲労試験をした。その結果、以下のようない結論を得た。

- (1) サンドブラスト処理したSS41鋼の腐食疲労強度は繰返し速度が1750cpmの場合、Dryの場合と比べると 10^7 回繰返しにおいて約40%強度が低下する。繰返し速度が60cpmの場合、腐食疲労寿命はDryの約1/2となる。
- (2) 繰返し速度の影響はDry、Wet-Dryのいずれの場合も若干あり、繰返し数で整理すると、60cpmの方が1750cpmにくらべて寿命が短くなる。
- (3) 腐食疲労におよぼす塗装の効果は、この実験範囲内ではいずれの繰返し速度においてもみられ、腐食疲労寿命はほとんどDryの疲労寿命と同程度となることがわかった。

参 考 文 献

- 1) SR128研究資料 No 160 (昭46) p. 40.
- 2) " No 174 (昭47) P : 57.

表4.1.1 供試材の化学成分および機械的性質

C	S i	M n	P	S
0.15	0.17	0.43	0.016	0.015

降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
33.1	45.3	40.4	53.2

表4.1.2 試験内容

環境 縦返し速度 表面仕上	空 中			3% NaCl 乾湿腐食		
	機械研削	サンドblast	サンドblast 後塗装	機械研削	サンドblast	サンドblast 後塗装
1750 cpm	○	○	○	○	○	○
60 cpm	—	○	—	—	○	○

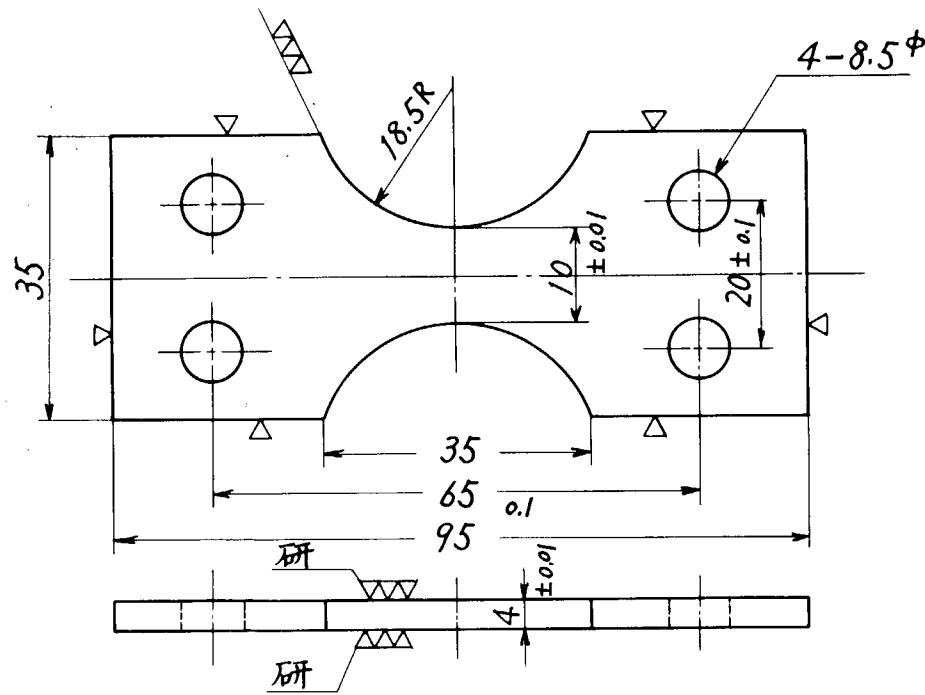


図4.1.1 試験片形状

表 4.2.1 試験結果 (その1)

※ 3% NaCl 5 min - 5 min

繰返し速度 cpm	表面仕上	環 境	試験片番号	応 力 σ_a (kg/mm ²)	繰返し数 N_f	破断時間 T_f (min)
機械研削	Dry		1	2.00	5.08×10^7 →	2.90×10^4 →
			2	3.55	7.46×10^4	4.26×10^1
			3	3.00	2.09×10^5	1.19×10^2
			4	2.53	3.22×10^7 →	1.84×10^4 →
			6	3.80	5.38×10^4	3.07×10^1
			7	3.30	1.25×10^5	7.14×10^1
			8	2.68	2.61×10^6	1.49×10^3
			9	2.90	3.80×10^5	2.17×10^2
	機械研削	Wet-Dry*	5	2.00	1.33×10^7	7.60×10^3
サンドブラスト	Dry		6.1	3.80	2.86×10^4	1.63×10^1
			6.2	3.50	4.22×10^4	2.41×10^1
			6.3	3.30	6.67×10^4	3.81×10^1
			6.4	3.00	2.00×10^5	1.15×10^2
			6.5	2.52	9.66×10^4	5.52×10^2
			6.6	2.72	5.06×10^5	2.89×10^2
			6.7	2.30	1.70×10^7 →	9.70×10^3 →
			6.8	2.40	2.59×10^6	1.48×10^3
			7.6	1.60	5.08×10^6	2.90×10^3
1750	サンドブラスト	Wet-Dry*	7.8	2.50	8.39×10^5	4.80×10^2
			7.9	3.00	1.26×10^5	7.19×10^1
			8.0	2.70	3.29×10^5	1.88×10^2
			8.1	3.55	4.74×10^4	2.71×10^1
			8.2	3.30	6.45×10^4	3.69×10^1
			8.3	1.36	1.71×10^7	9.79×10^3
			8.4	2.52	6.55×10^5	3.74×10^2
			8.5	1.19	1.64×10^7	9.36×10^3
			8.6	2.00	2.00×10^6	1.14×10^3
			8.7	1.05	1.82×10^7	1.04×10^4
			10.1	3.02	2.05×10^5	1.17×10^2
			10.2	2.56	7.57×10^5	4.33×10^2
			10.3	3.62	4.01×10^4	2.29×10^1
			10.4	3.30	9.10×10^4	5.20×10^1
サンドブラスト	後塗装	Dry	10.5	2.32	1.15×10^7 →	6.57×10^3 →
			10.6	3.62	6.90×10^4	3.94×10^1
			10.7	3.30	1.54×10^5	8.80×10^1
			10.8	3.00	3.42×10^5	1.95×10^2
			10.9	2.52	7.31×10^6	4.18×10^3

表 4.2.1 試験結果 (その2)
※3%NaCl 5min - 5min

繰返し速度 cpm	表面仕上	環 境	試験片番号	応 力 σ_a (Kg/mm ²)	繰返し数 N_f	破断時間 T_f (min)
60	サンドブラスト	Dry	7 0	3 5.0	3.89×10^4	6.48×10^2
			7 1	3 2.5	6.96×10^4	1.16×10^3
			7 2	3 0.5	9.34×10^4	1.56×10^3
			7 3	2 7.0	5.18×10^5	8.63×10^3
			7 4	2 5.2	5.34×10^5	8.89×10^3
			7 5	2 3.2	1.12×10^6 ○→	1.86×10^4 ○→
	サンドブラスト	Wet-Dry ※	8 8	3 5.2	2.30×10^4	3.83×10^2
			8 9	3 3.0	4.08×10^4	6.80×10^2
			9 0	3 0.0	7.60×10^4	1.27×10^3
			9 1	2 2.7	4.79×10^5	7.98×10^3
			9 2	2 7.0	1.50×10^5	2.50×10^3
	サンドブラスト 後塗装	Wet-Dry ※	1 1 0	3 5.0	4.66×10^4	7.77×10^2
			1 1 1	3 0.0	1.52×10^5	2.53×10^3
			1 1 2	3 2.0	7.17×10^4	1.20×10^3
			1 1 3	2 6.0	6.63×10^5	1.11×10^4

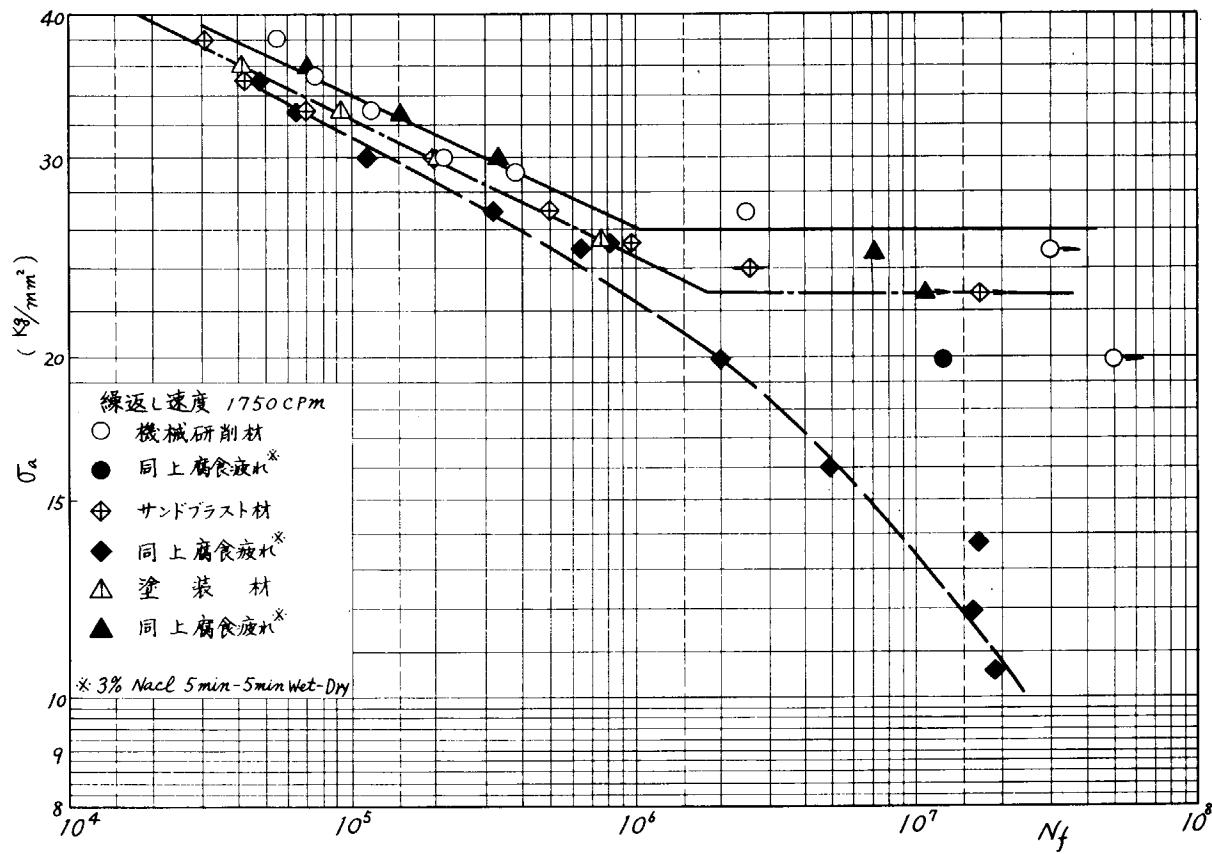


図 4.2.1 S - N_f 線図

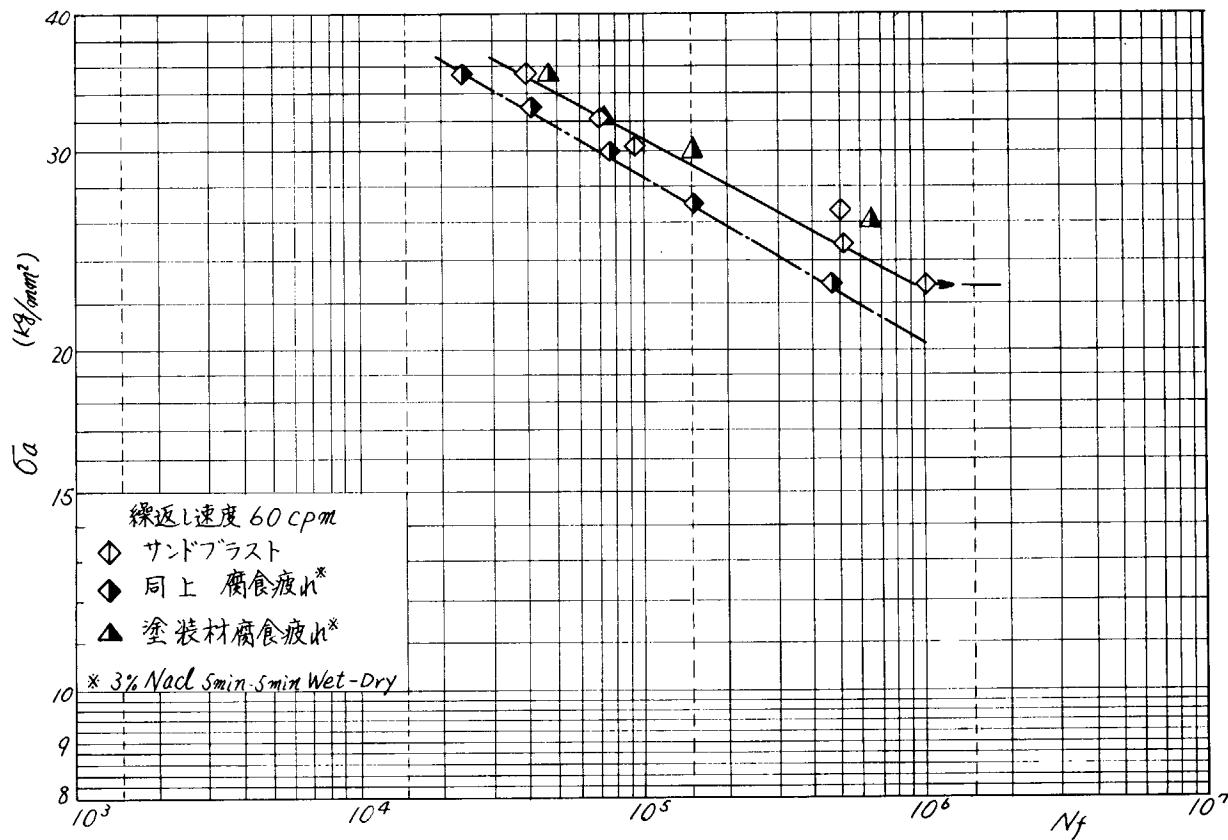
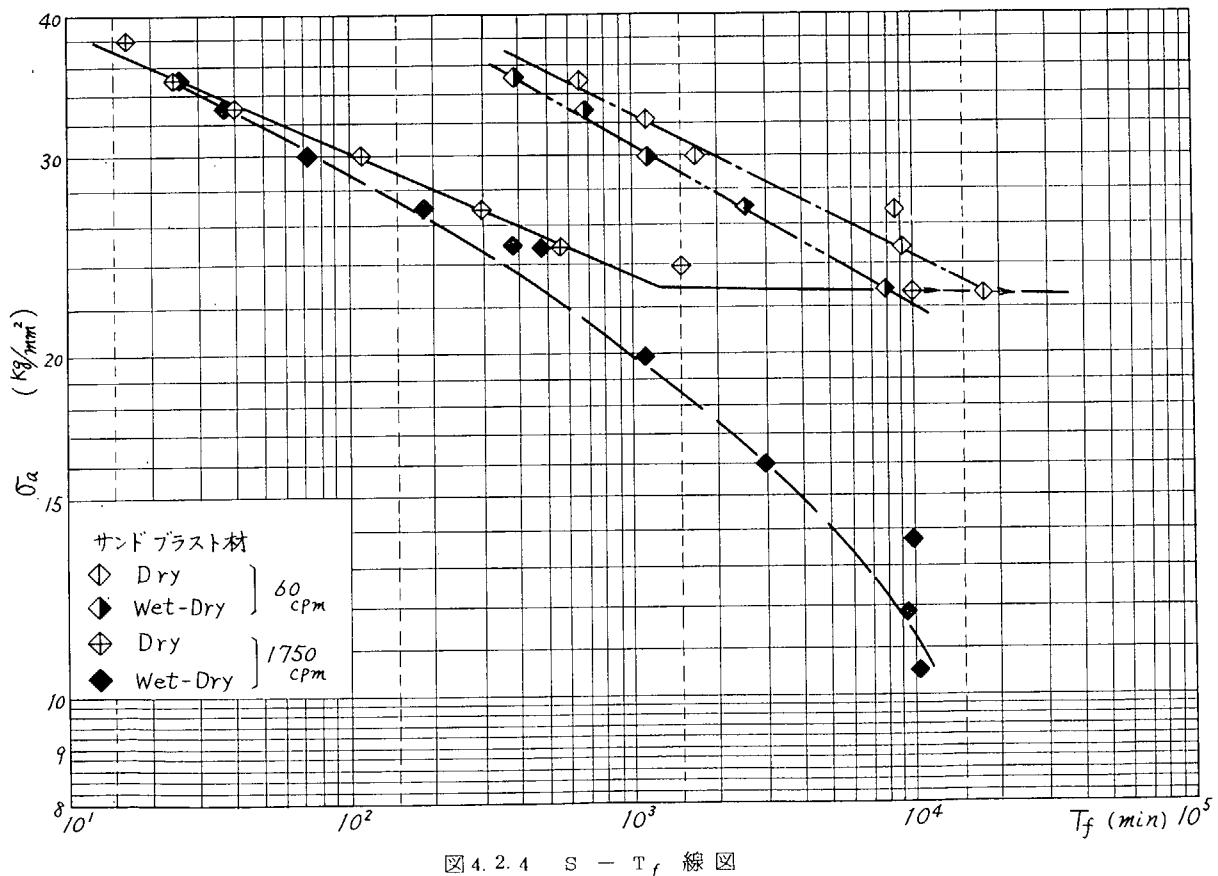
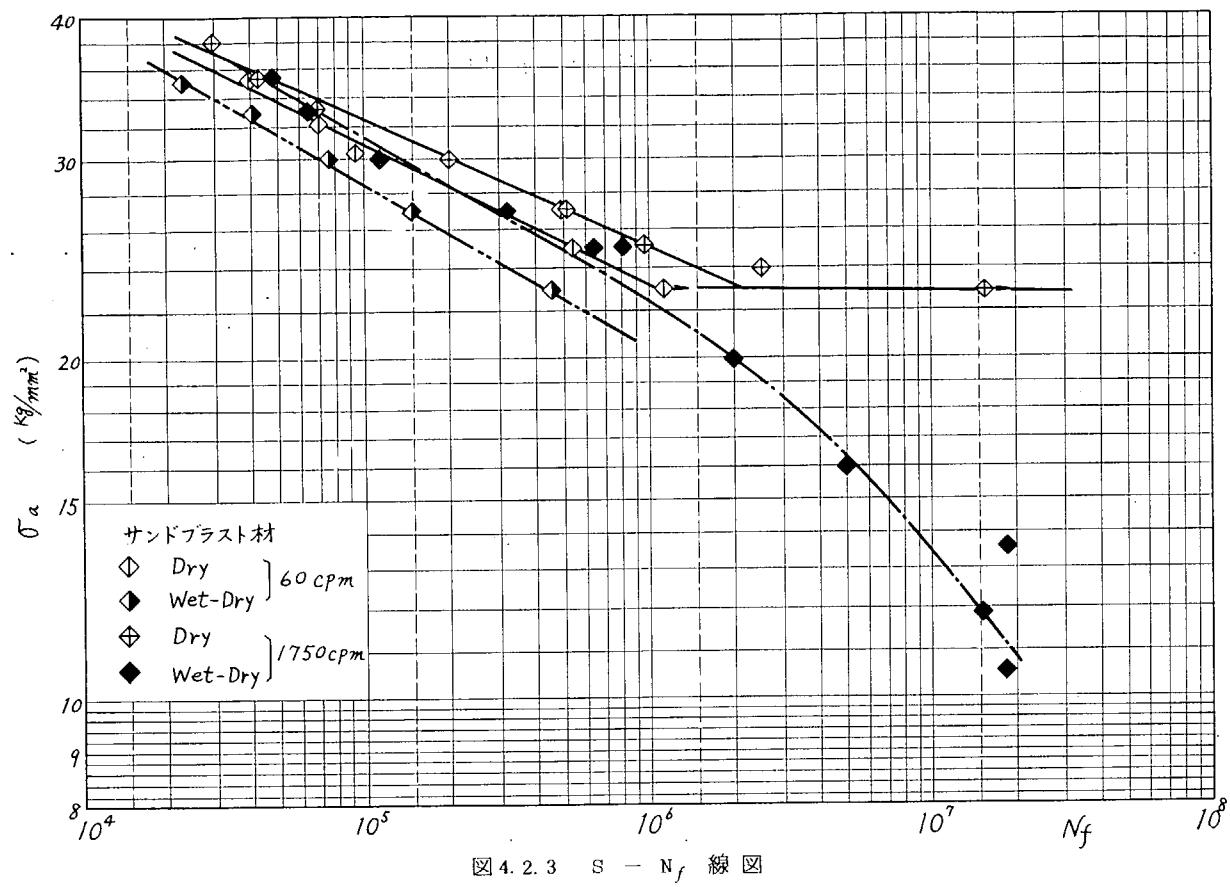


図 4.2.2 S - N_f 線図



5. 海水腐食疲れの塗装による防食効果と 溶接構造要素への応用の研究

船舶の海水に曝される部分では腐食疲れが重要問題の一つになっている。特に船殻の構造上の不連続部や部材の交差する溶接部では大きな集中を起して、高応力下でのいわゆる低サイクル腐食疲れを起す危険性がある。

昨年度において、高応力下での腐食疲れ現象の二三の特性について検討したが、低応力下での腐食疲れに対して従来より認められてきた特性とは一致しない点も少なくないことを明らかにした。なかでも、腐食により発生した水素が腐食疲労に悪影響をおよぼすことが明らかとなり、防食法としても最も一般的な陰極電気防食の適用が高応力下の腐食疲労の防止上有効とは考え難いことが推定された。

本年度においては、腐食疲労の防止策の確立を目的とするが、昨年度の結果よりみて電気防食法の効果は期待できないものと判断し、その方法をペイント塗装一本にしほってその効果を検討した。

試験は小型回転曲げ試験片により基本特性を検討するものと、溶接継手要素により実際的な問題点を検討するものとの二つよりなっている。

5.1 回転曲げ試験による基本特性の検討

5.1.1 試験片および試験方法

供試材料はSM41A鋼（板厚2.5mm）で、その化学組成および機械的性質を表5.1.1に示す。

この板の圧延方向から図5.1.1に示す寸法の回転曲げ試験片を採取した。

試験片の表面状態は、機械切削のままのもの、これにサンドブラストをかけたもの、サンドブラスト後タールエポキシ塗料を塗布したものの3種類とした。

疲れ試験は片持はり式回転曲げ疲労試験機によって行ない、試験片の試験位置より5.6.3mm離れた位置に荷重をかけて試験した。試験片の回転速度は100c.p.m.と1800c.p.mの2種類とし、回転速度の影響を検討した。

腐食疲労試験は図5.1.2に示すように試験片に円筒状のガラス容器を取りつけ、この中に3%NaCl水溶液を満たしてガラス容器を試験片と一緒に回転させる方式を取った。

5.1.2 塗膜の初期インピーダンス

塗装した試験片の塗膜の完全性をチェックするために、全塗装試験片から10本抜き取って交流ブリッヂ(1kHz)によって塗膜のインピーダンスを測定した。測定の要領は表5.1.2の付図に示すように、試験片を垂直に立ててこれに容器を取りつけ、3%NaCl水溶液を入れてその液面をAおよびBの位置になるようにして測定した。その結果を表5.1.2に示す。液面をAの位置にした場合にはすべて満足すべきインピーダンスの値を示したが、液面をBの位置まで上昇させるとインピーダンスは急に低下し塗膜が完全でないことを指示した。これは多分試験片の試験部分から太い方のつかみ部分に移る肩の所で塗膜が薄くなっているかあるいは一部ピンホールなどがあいていることを意味するものと考えられる。しかし液面がAの位置にある状態で十分に高いインピーダンスが得られたのであるから、少なくとも試験部分の塗膜はすべて完全であると判断してすべての塗装試験片を腐食疲れ試験に供した。

5.1.3 実験結果および考察

1.) 寿命における荷重繰返し速度効果の検討

機械切削材を用いて、大気中疲労寿命および腐食疲労寿命における荷重繰返し速度の影響を検討した。その結果を図5.1.3に示す。

大気中疲労試験においても荷重速度の影響は認められ、1800c.p.mの場合の方が寿命が短くなる傾向を示す。また耐久限もわずかではあるが1800c.p.mの場合の方が低くなる。

一方腐食疲労の場合の寿命におよぼす速度効果は大気中の疲労の場合よりはるかに大きく、1800cpmの寿命より10cpmの寿命の方がかなり短くなる。

したがって、塗装による腐食疲労の防止効果をしらべる場合も荷重繰り速度のはやい場合とおそい場合について検討しておく必要がある。

2) 寿命におよぼす塗装の効果

試験片の表面にサンドブラスト処理をしたものと、さらにそれに塗装をしたものとについて比較試験を行ない塗装による防食効果を検討した。

図5.1.4に回転速度1800cpmの場合の試験結果を示した。腐食疲労試験結果(破線)は大気中疲労試験結果(実験)よりやゝ短寿命側にあり、この傾向は N_f が 10^3 オーダーの低サイクル疲れ領域において認められる。

塗装材の腐食疲労試験結果であるが、特性上二つの領域に別けることができる。すなわち N_f が 10^6 以下の低サイクル疲れ領域(応力からみると本研究の場合大気中の疲労限以上の応力領域に当る)と N_f が 10^6 以上の高サイクル疲れ領域である。 $N_f < 10^6$ の領域においては塗装材の腐食疲労寿命は大気中の疲労寿命と一致し、塗装による防食効果が十分に発揮されたことを意味するものと判断される。一方、 $N_f > 10^6$ の領域においては、大気中の疲労限以下の付加応力であるにもかゝらず、塗装試験片は腐食疲労試験によって破断する。しかし、その寿命は非塗装材の腐食疲労寿命よりもかなり長くなる。この場合は試験中のある時期に塗膜が破損し、腐食液が浸入してその後は腐食疲労によって破断に到ったものと推定される。なお、付加応力が 1.5 Kg/mm^2 以下では塗膜の損傷は起らないような傾向も認められる。

図5.1.5に回転速度10cpmの場合の試験結果を示す。大気中の疲労試験結果(実線)よりも腐食疲労試験結果(破線)の方がやゝ短寿命側にある。

一方、塗装材の腐食疲労試験結果であるが、 σ_a が 2.5 Kg/mm^2 以下の場合はほぼ大気中の寿命に近い寿命を示し、塗装による防食効果がかなりよく発揮されているものと考えられる。しかし、 σ_a が 2.5 Kg/mm^2 よりも高応力側では塗装の効果はあまり期待できないようである。

高応力の繰返しを受けると塗膜が比較的はやく損傷するものと推定される。

5.1.4 試験結果のまとめ

塗装による腐食疲労の防止効果を回転曲げ試験により検討した結果をまとめると次のようになる。

- (1) 機械切削材で荷重速度の寿命におよぼす効果をしらべた所、大気中疲労試験においてもやゝ速度効果が認められ、1800cpmより10cpmの方が短寿命になった。
腐食疲労寿命においてはその差はさらに大きく現われた。
- (2) 塗装の効果は低応力側ではよく発揮されていたが、高応力側ではあまり期待できない。

5.2 溶接構造モデルによる試験

5.2.1 試験片および試験方法

供試材料はSM41A鋼(板厚6mm)で、その化学組成および機械的性質を表5.2.1にします。

この板より、図5.2.1に示す形状寸法の試験片を手溶接により組立て製作した。

試験片の状態は、機械切削のままのもの、それにサンドブラストをかけたもの、サンドブラスト後タールエポキシ塗料を塗布したものの3種類を用意した。

疲れ試験は変位制御式曲げ疲労試験機によって行ない、図5.2.1に示した試験片の矢印の荷重点を一定の変位振巾で両振り試験をした。変位繰返し速度は100pmである。

腐食疲労試験は試験片の試験部分に腐食槽を取りつけ、その中に3%NaCl水溶液を注入して試験部を腐食液中に浸漬して行なった。

5.2.2 静荷重の付加による試験片のひずみ分布

疲労試験に先立って、試験片に曲げモーメントが付加された場合の溶接部近傍のひずみの分布状態を集中ゲージにより測定した。

測定結果の例を図 5.2.2 および図 5.2.3 に示す。溶接したヒレの先端部に近い試験板上でかなり大きなひずみ集中の起っているのがよくわかる。

このように大きなひずみ集中を起す部分では塗装による腐食効果があまり期待できないのではないかということが前項の基礎実験の結果から推定されるので、この試験片に塗装をした場合の腐食疲労の防止効果を特に検討した。

5.2.3 実験結果および考察

図 5.2.4 は大気中および 3 % NaCl 水中における疲れ試験の結果である。図の縦軸は所定の変位振巾によって生ずる試験部のモーメントを試験板の断面係数で割ったいわゆる弾性計算による公称応力値で表示したもので、溶接されたヒレによる応力集中は考慮していない値である。

大気中の試験の場合のみは割れの発生時期を肉眼でとらえることができたので、そのデータも図 5.2.4 中に記入した。腐食疲労試験の場合は破断時のデータのみしか取ることができなかった。

図 5.2.4 で σ_a が 1.5 Kg/mm^2 よりも高応力側では、大気中の疲労試験結果も 3 % NaCl 水中の非塗装材の腐食疲労試験結果も塗装材の腐食疲労試験結果もほとんど一致しており、腐食疲労による寿命減少も塗装によるその防止効果も明瞭にはみとめられなかった。

しかし、 σ_a が 1.5 Kg/mm^2 以下の低応力では塗装によって腐食疲労がやゝ防止しうる傾向が認められた。

図 5.2.5 に大気中で破断した試験片の外観および破面の例を示す。割れはヒレの先端の溶接トウ部から発生、板の両端部へ向って進展していく。

5.2.4 試験結果のまとめ

応力集中を起す例として溶接構造モデルを取りあげ、それの塗装による腐食疲労防止効果を検討したことが明らかになった。

- (1) 比較的高応力(今回のモデルの場合 $\sigma_a = 1.5 \text{ Kg/mm}^2$ 以上)が繰返される場合には、大気中の疲労寿命と腐食疲労寿命との間に明瞭な差異がなく、したがって塗装の効果も明確でない。
- (2) 比較的低応力が繰返される場合には、塗装により腐食疲労寿命はかなり長くなるような傾向が認められた。

むすび

タルエポキシ塗料による、造船用軟鋼板の 3 % NaCl 水中での腐食疲労の防止効果について検討した。

くり返される応力が、その材料の大気中疲労限より低い場合には塗装による腐食疲労の防止効果はかなり期待しうるが、それより高い応力がくりかえされる場合にはその防止効果は十分ではない。特に、応力くり返し速度がおそらく長時間にわたって高応力のくり返しを受けるような場合には防止効果はほとんど期待しがたい。

したがって、実船において、構造不連続部や部材の交差する溶接部などで大きな集中応力が比較的低速でくりかえされる部分では塗装による腐食疲労の防止は期待しがたいものと推定される。

表 5.1.1 回転曲げ試験片用鋼の化学組成及び機械的性質

化 学 組 成 (wt %)					機 械 的 性 質			
C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%) (GL=40 mm)	絞り (%)
0.18	0.03	1.00	0.014	0.03	22.7	45.6	44.3	71.6

表 5.1.2 塗装試験片のインピーダンス測定結果

κ_a	インピーダンス (液面 A の場合)		インピーダンス (液面 B の場合)	
	インピーダンス (Ω)	インピーダンス (Ω)	インピーダンス (Ω)	インピーダンス (Ω)
1	6.75×10^6	5.55×10^4	3.78×10^5	6.21×10^4
2	3.41×10^6			
3	2.63×10^6			
4	$> 10^7$	8.41×10^5		
5	5.98×10^6	6.60×10^6		
6	3.75×10^8	5.15×10^3		
7	4.53×10^6	9.51×10^5		
8	1.12×10^6	4.31×10^4		
9	8.95×10^6	2.15×10^5		
10	7.31×10^6	7.31×10^5		

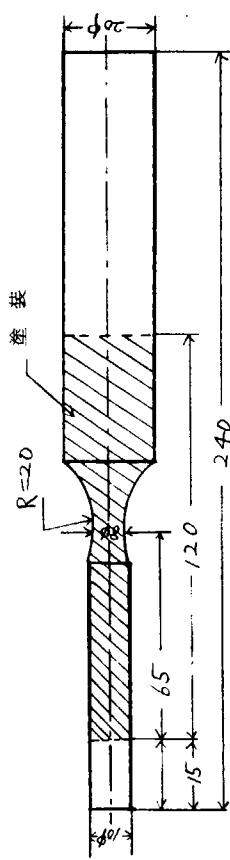


図 5.1.1 回転曲げ試験片の寸法 (mm)

$$K_d = 1.06$$

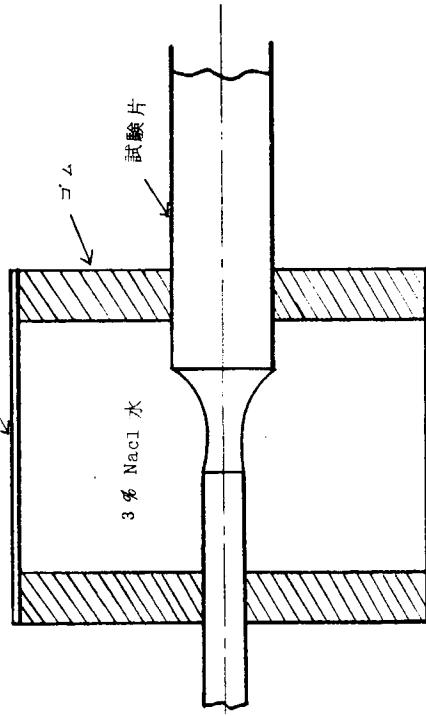
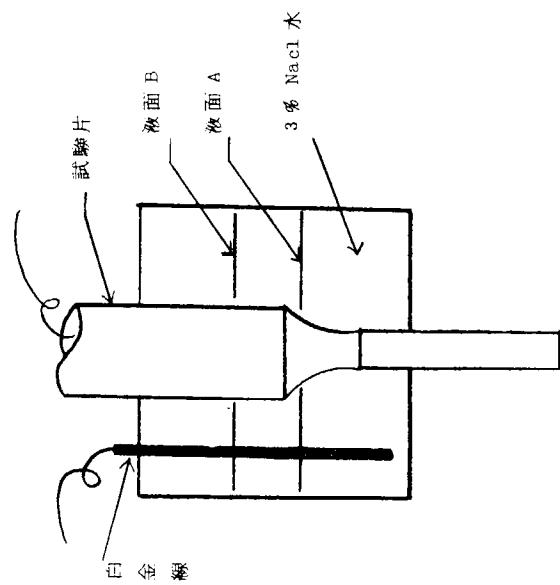


図 5.1.2 回転曲げ試験の場合の腐食槽



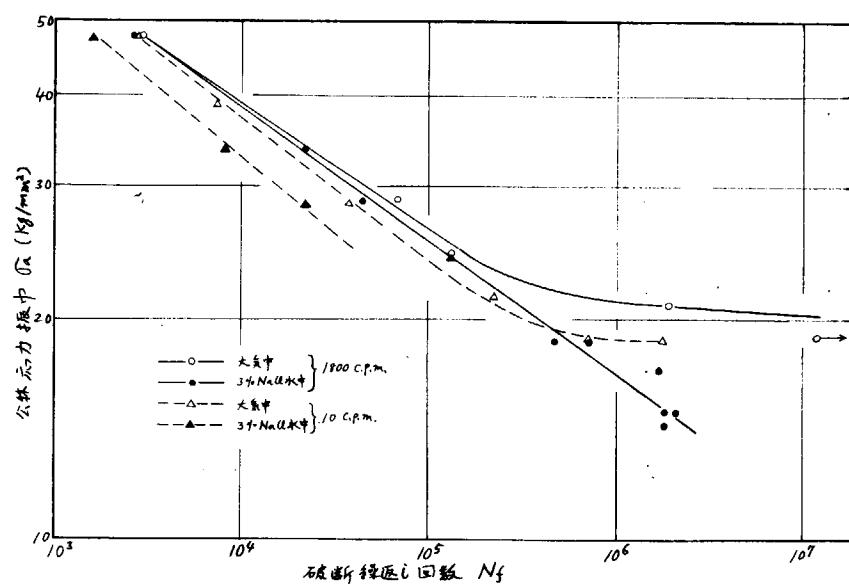


図 5.1.3 機械切削材VCによる応力繰返し速度効果の検討

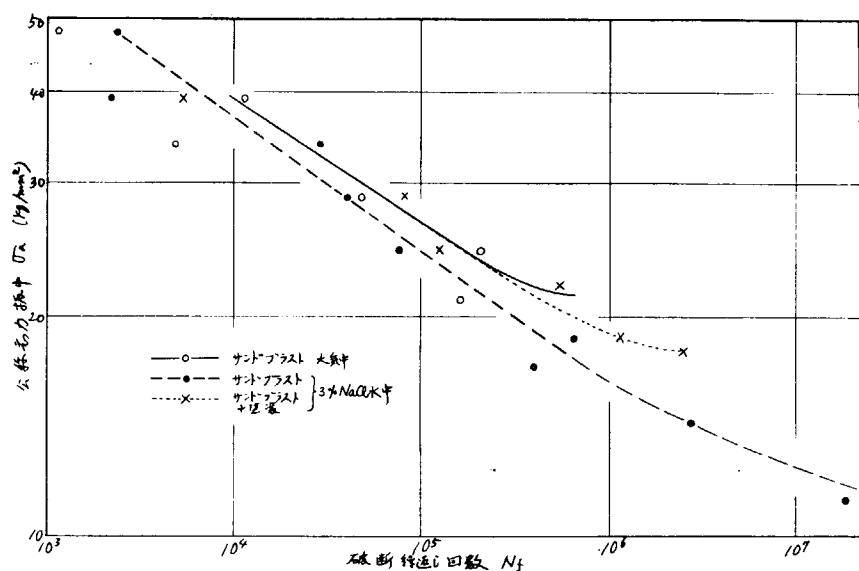


図 5.1.4 応力繰返し速度 1,800 c.p.m.における塗装効果

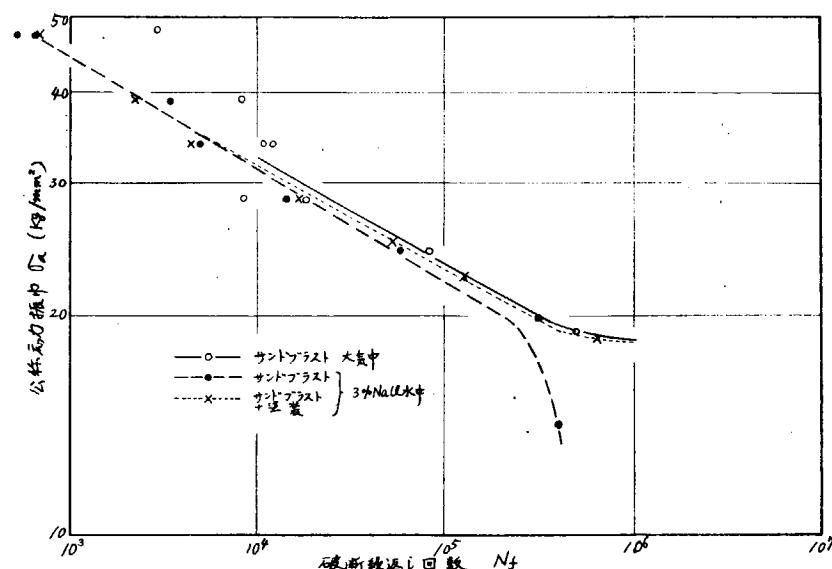


図 5.1.5 応力繰返し速度 10 c.p.m. VCにおける塗装効果

表 5.2.1 溶接構造モデル用鋼の化学組成及び機械的性質

化 学 組 成 (w t %)					機 械 的 性 質			
C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び(%) (GL=40 mm)	絞り(%)
0.19	0.03	0.78	0.02	0.03	28.0	43.5	46.5	65.3

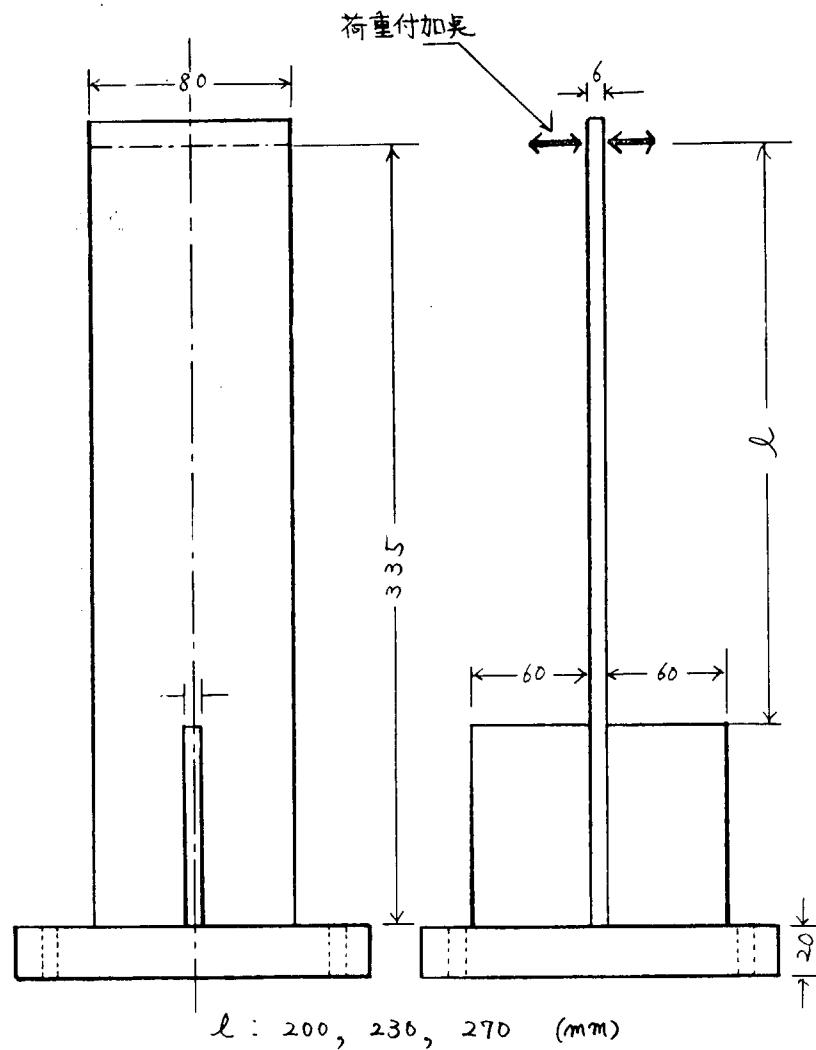


図 5.2.1 溶接構造モデル試験体の形状 (mm)

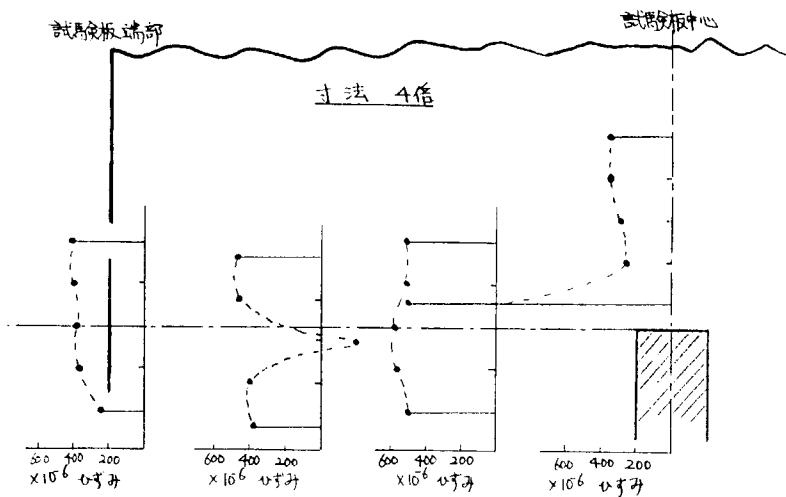


図 5.2.2 試験部の静曲げによるひずみ分布(曲げモーメント: $20 \text{ kg} \cdot \text{m}$)

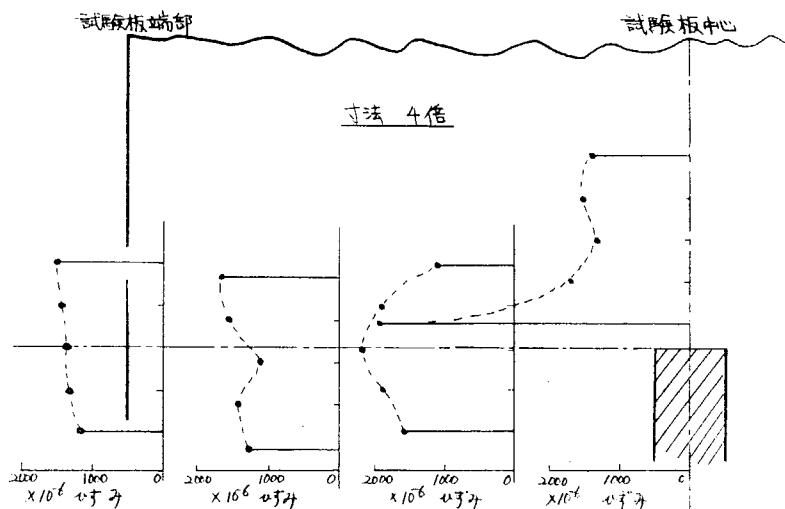


図 5.2.3 試験部の静曲げによるひずみ分布(曲げモーメント: $148 \text{ kg} \cdot \text{m}$)

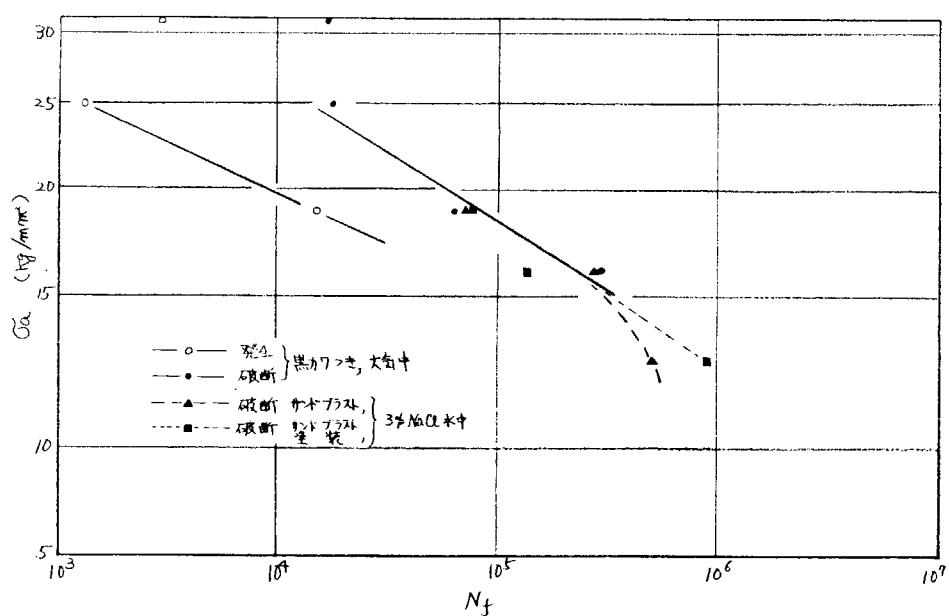
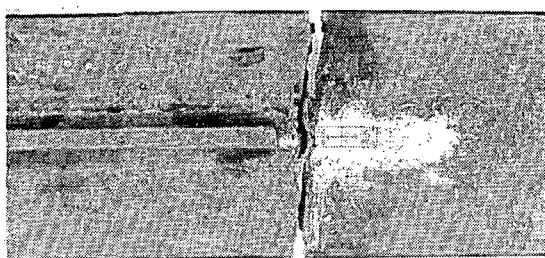


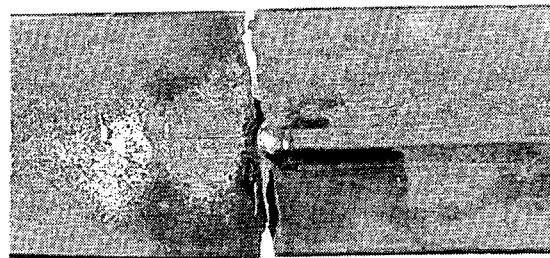
図 5.2.4 溶接構造モデルの試験結果 (10 c.p.m.)

表

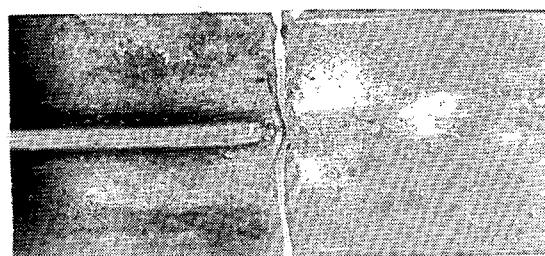
裏



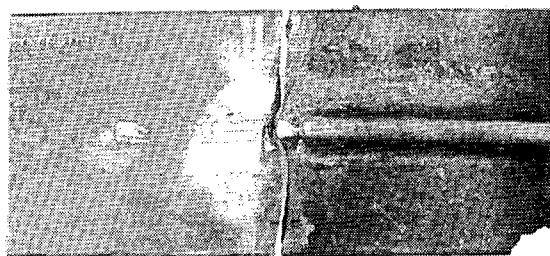
No. 1. $\sigma_a = 30.9$



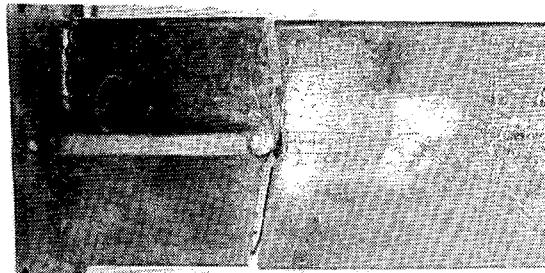
$N_f = 16750$



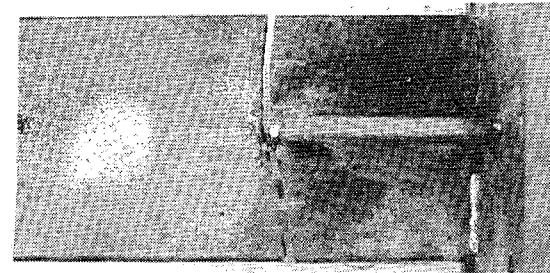
No. 2. $\sigma_a = 25.0$



$N_f = 17495$

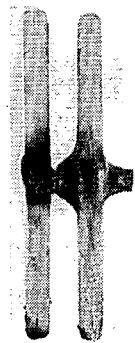


No. 3. $\sigma_a = 18.8$

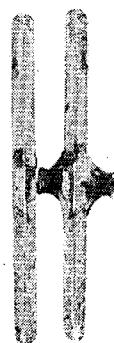


$N_f = 62523$

破断後の外観



No. 1.



No. 2.



No. 3.

図 5.2.5 大気中で破断した試験片の外観および破面

6. 構造用鋼の食塩水中における腐食疲れき裂伝播速度に及ぼす荷重繰返し速度および平均応力の影響とペイントの密着性劣化に及ぼす変動応力の影響に関する研究

6.1 構造用鋼の食塩水中における腐食疲れき裂伝播速度に及ぼす荷重繰返し速度および平均応力の影響

鋼構造物の設計は、主として荷重の大きさおよびその種類に基づいて行われるのであるが、構造物が普通の自然環境以外で使用される場合には、上述の力学的状態のほかに、それが置かれた環境すなわち雰囲気、熱等による材料の損傷および負荷と環境との相刺効果を考慮して構造物の強度あるいは寿命が決定されねばならない。船体構造においてもパラストタンクあるいは船底肋骨材スロット部に多発する疲れき裂は、繰返し負荷、腐食環境およびそれらの相刺効果により、大気中におけるよりもはるかに短期間で生じたものである。このような疲れ損傷には、き裂の発生と伝播の過程があり、両過程とも腐食環境によってそれぞれ影響をうけると考えられる。船体構造物では、構造上の不連続部や溶接欠陥等の応力集中箇所における疲れき裂の発生は避けられない場合が多く、一旦発生したき裂の腐食環境下における伝播特性を知ることは船体の設計あるいは安全な航行にとってきわめて重要である。そこで本研究では、船体構造用鋼として最も多用される軟鋼について、海水中における軟鋼のき裂伝播特性を明らかにするため、比較的大型の中央切欠試験片を用い、3%食塩水中および大気中において、種々の繰返し速度で疲れ試験を行って、き裂伝播速度に及ぼす荷重繰返し速度と雰囲気の影響を検討した。また海水中における鋼の腐食に対するすぐれた防食効果を示し、実船にもよく用いられている陰極防食が鋼の食塩水中における疲れき裂の伝播に及ぼす影響についても調べた。

6.1.1 実験方法

本実験に用いた軟鋼SM41A(板厚1.3mm)の機械的性質および化学組成をミル・シートから引用して表6.1.1に示す。この鋼板から図6.1.1に示すような中央切欠試験片を採取し、大気中および3%食塩水中の疲れ試験に供した。

鋼材の腐食量は時間の関数であり、したがって腐食疲れ強さは負荷の繰返し速度の影響を受けることが知られている。そこで本実験では、腐食疲れき裂の伝播速度に及ぼす荷重繰返し速度 f の影響を調べるために f を3, 30および300cpmの3段階に変えて疲れ試験を行った。3および30cpmの疲れ試験は、50tonアムスラー低サイクル疲れ試験機(東京試験機KK)を、300cpmのそれは50tonバルセーター(前川試験機KK)を使用し、上限のグロス σ_g maxを9.0, 12.0および15.0kg/mm²の3段階とし、図6.1.2に示すようにビンを介して負荷するので、下限のグロス応力 σ_g minを0.83kg/mm²一定として、ほぼ完全片振り引張に近い負荷形式で行った。

腐食疲れ試験片には、図6.1.2に示したように試験片に塩化ビニル製の水槽をシリコンゴム・パッキングでシールして取付け、試験片の平行部が食塩水中にほぼ浸漬するようにした。これまでに行った実験結果によれば、鋼材の食塩水中における自然腐食電流密度すなわち腐食速度は、試験片を浸漬した直後は時間の経過に伴って変化するが、浸漬後約5時間経過したのちは、ほぼ一定値を保つことが知られているので、腐食疲れ試験に際しては、タンク内に3%の食塩水を注入し、12時間を経過したのちに、負荷を開始した。なお、腐食に及ぼす温度の影響を考慮して、食塩水の温度を28±1°Cに保持した。試験片の中央切欠のスリット先端から、き裂の進行方向に向って1mm間隔で鉛筆線を入れ、き裂先端部とその周辺の鉛筆線を酢酸メチルにより貼付けたアセチルセルロース膜(レブリカ膜)に写し取って、20倍の拡大鏡を用い、荷重繰返しの各段階におけるき裂長さを0.01mm精度で測定した。

つぎに図6.1.1に示した試験片において、スリット状切欠を中心として長さ方向に50mmの部分のみを残してタールエポキシ系塗装を施した試験片を用意した。その露出部の表面積は130cm²である。この試験片を用いて3%食塩水中における疲れき裂伝播に及ぼす陰極防食の影響を調べることとした。陰極防食法としては次の2種類を採用した。すな

わち、図 6.1.3 (a) に示すように補助電極として白金網を用い、甘コウ照合電極と試験片との間を -800 mV の一定電位に保持する外部電源法と同図 (b) の補助電極として亜鉛板を用いた流電陽極法である。なお後者の方法では、試験片の電位は、甘コウ電極基準で約 -1000 mV であり、試験中ほぼ一定に保たれていた。比較のため、図 6.1.3(c) に示すように、鋼よりも貴な白金対極と試験片との間を短絡したガルバニック腐食下でのき裂伝播についても検討した。各防食電流および腐食電流を無抵抗電流計によって記録し、電気量をクーロメーターによって計測した。各補助電極は、試験片表面の両側に約 100 mm 離して設置し、両電極の表面積が試験片の露出面積とほぼ等しくなるようにしたものを使いた。疲れ試験は、すべて上限応力 $\sigma_{g,\max}$ を 12 kg/mm^2 、下限応力 $\sigma_{g,\min}$ を 0.83 kg/mm^2 とし、 300 rpm で行った。き裂長さの測定は上述の自然腐食の場合と同様である。

6.1.2 実験結果

1) き裂伝播寿命について

スリット状切欠先端の形状が不揃いであること、および永井¹⁾が明らかにしたごとく、軟鋼の大気中における疲れき裂伝播過程の初期には、き裂伝播速度がしばしば不規則であることを考慮して、き裂発生寿命のかわりに、き裂伝播の開始点として、切欠長さ $2a_0 = 20 \text{ mm}$ から 5 mm だけき烈が成長した時点、すなわち $2a_0$ を含めたき裂長さ $2a$ が 25 mm に達したときの繰返し数 N_{25} を採用した。また本実験のように、有限幅の試験片で定荷重の疲れ試験を行った場合、き裂の成長に伴なう実断面の減少によりある繰返し数 $N_{g,y}$ においてき裂を含む断面が全断面降伏を起したのち、わずかな繰返し数で破壊する。したがって、最終寿命としては、破断寿命ではなく、 $N_{g,y}$ を取り、

$$N_p = N_{g,y} - N_{25} \quad \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる N_p をき裂伝播寿命とした。後述するき裂進展曲線から N_{25} および $N_{g,y}$ を求め、(1)式により算出したき烈伝播寿命 N_p と応力全振幅 $2\sigma_a (= \sigma_{g,\max} - \sigma_{g,\min})$ を両対数の S-N 線図で示すと、図 6.1.4 のようになる。同図によれば食塩水中のき裂伝播寿命 N_p は荷重繰返し速度の低下に伴なって著しく減少しており、また大気中の試験結果にも同様の傾向が認められる。すなわち、き裂伝播寿命は大気中、食塩水中ともに繰返し速度の影響を受けるが、その程度は前者よりも後者において顕著である。

食塩水中のき裂伝播寿命を大気中のそれと比較すると、 300 rpm では両者のそれはほぼ等しく、繰返し速度が大きくなると、き裂伝播に及ぼす腐食の影響はほとんど無視できるようである。またいずれの試験条件に対する S-N 曲線も平行でその傾きは $-1/4$ にはほぼ等しい。

2) き裂伝播速度について

荷重繰返しの各階段におけるき裂長さを示したき裂進展曲線を $\sigma_{g,\max} = 9.0, 12.0$ および 15.0 kg/mm^2 に対して図 6.1.5(a), (b) および(c) にそれぞれ示す。この曲線の接線がき裂伝播速度 da/dN となる。Paris は疲れき裂伝播機構を線形破壊力学を用いて説明し、き裂先端の塑性域がき裂長さに比べて十分小さいとき、すなわち small scale yielding の状態で da/dN と Irwin によって示されたき裂先端の応力拡大係数 K との間に、

$$da/dN = C (dK)^4 \quad \dots \dots \dots (2)$$

が成立することを示した。そこで図 6.1.5 の実測値について

$$dK = d\sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし $2b$ は試験片の全巾を用いて dK を求め、 da/dN との関係を両対数で図示すると図 6.1.5(a), (b) および(c) に對してそれぞれ図 6.1.6(a), (b) および(c) が得られる。なお、図 6.1.5 のき裂進展曲線において荷重繰返し初期の実測値によるき裂伝播速度は、変動が激しいので、図 6.1.6 ではこれらの点を省略した。

図 6.1.6 における各試験条件に対する実測値から次式

$$da/dN = C \cdot (dK)^m \quad \dots \dots \dots (4)$$

における C と m を最小自乗法により決定し、その結果を表 6.1.2 に示す。同表によると、 m はほぼ 4 とみなすことが

できる。すなわち、いずれの応力レベルにおいても荷重繰返し速度および雰囲気のいかんを問わず、(2)式の4乗則がほぼ成立するようである。そこで(2)式に(3)式を代入し、 N_{25} および $N_{g,y}$ にそれぞれ対応するき裂長さ $2a_{25}$ 、 $2a_{g,y}$ の範囲で積分すること。

$$(4\sigma)^4 N_p^{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2\pi b} \left\{ \left(\cot \frac{\pi a_{25}}{2b} - \cot \frac{\pi a_{g,y}}{2b} \right) + \frac{\pi}{2b} (a_{25} - a_{g,y}) \right\} \dots \dots (5)$$

となる。(5)式は前述の S-N 曲線とほぼ一致し、4乗則の妥当性が確認できる。

また、図 6.1.6 の K_c は応力レベルについて、全断面降伏を起こしたときのき裂長さ $2a_{g,y}$ から求めた K 値である。 ΔK が増加して K_c 値に近づくと、き裂伝播速度は急激に増大し、直線から離れる傾向を示す。

3) 陰極防食の影響について

外部電源法、流電陽極法による防食環境下およびガルバニック腐食環境下におけるき裂進展曲線を図 6.1.7 に示す。なお同図には、図 6.1.5(b)に示した 300 ppm における自然腐食の結果も比較のため示してある。各防腐法のき裂進展曲線は自然腐食のそれより短寿命側に、ガルバニック腐食はわずかに長寿命側にある。また、各試験片の全断面降伏に達するときの繰返し数 $N_{g,y}$ は、図 6.1.5(b)に示す 300 ppm の大気中に比べて $1/2$ 以下である。すなわち、陰極防食は食塩水中における鋼の疲れき裂伝播に対してはまったく有効ではなく、むしろき裂伝播寿命は自然腐食の場合に比べて若干低下する傾向さうかがえる。

全断面降伏に達して疲れ試験を終了した流電陽極法による防食試験片と自然腐食試験片を液体窒素の温度でぜい性破壊させ、破面観察を行った。その結果によると、後者の破面は黒褐色の腐食生成物が付着しており、腐食の進行が認められるのに対して、前者の破面はその試験片表面と同程度に完全に防食されていた。このようにき裂面が防食された理由としては、き裂面内の電流密度が防食電流密度に達していること、陰極防食により試験片近傍の溶液が強いアルカリ性になっていることなどが挙げられる。なお、き裂伝播の過程で水槽内の食塩水を除去したのち、試験片表面を乾燥させ、き裂内部よりにじみ出た液体を pH 試験紙で調べたところ、その pH は約 11 で強アルカリ性を示した。

自然腐食環境下における疲れき裂の伝播は電気化学的には陽極的であると従来からいわれている。したがって上述の結果から防食環境下における疲れき裂進展の機構は自然腐食環境下におけるそれとは異ったものといえる。陰極防食における鋼材側すなわちカソード側では、原子状の水素が発生しており、この水素が鋼中に拡散し、鋼をぜい化させるために、き裂伝播速度が増大するものと考えられる。

6.1.3 考 察

1) き裂伝播速度について

荷重繰返し速度 f および雰囲気のいかんによらず ΔK と da/dN の間に 4 乗則が成立するので f および雰囲気によるき裂伝播速度の相違は(2)式の C のみに帰因すると考えることができる。そこで、次式に示す最小自乗法により

$$\frac{\partial (\sum \delta_i)^2}{\partial C} = \sum_{i=1}^n \left(\log \frac{da}{dN} \right)_i - 4 \sum_{i=1}^n (\log \Delta K)_i - nC = 0 \dots \dots (6)$$

求めた C 値を一括して表 6.1.3 に示し、 $\log f$ に対して図示すると図 6.1.8 のようになる。同図から、 f が大きくなると、食塩水中および大気中の C 値、すなわちき裂伝播速度は減少するが、減少の程度は前者の方が大きく、当然のことながらき裂伝播寿命と同一の傾向がうかがえる。大気中でも、その中の酸素、水蒸気、その他の腐食性ガスにより、鋼材の腐食は進行することから、弱い腐食性雰囲と考えてよく、食塩水中と同様、大気中のき裂伝播速度も荷重繰返し速度の影響を若干うけることが了解できる。また $f = 300 \text{ ppm}$ 以上では大気中と食塩水中の C 値すなわちき裂伝播速度はほぼ等しく、300 ppm 以上の荷重繰返し速度では、き裂伝播速度に及ぼす食塩水の速度効果は大気中と同程度である。

そこで、 $30 \text{ ppm} \leq f \leq 300 \text{ ppm}$ の範囲内で C と $\log f$ の関係を直線近似すると次式が得られる。

$$C(f) = 1.6^{-12} \log(C_0 \cdot f^{-v}) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (7)$$

ここで V よび C_0 はいずれも雰囲気によって決まる定数である。図 6.1.8 の実測値より、大気中のき裂伝播に対しては、 $V = 0.9573$ 、 $C_0 = 4.236 \times 10^{-4}$ 、3%の食塩水中に対しては $V = 4.000$ 、 $C_0 = 1.000 \times 10^{-12}$ が得られる。食塩水中における V よび C_0 は大気中の値より大きく、鋼に対する腐食速度の大きい雰囲気ほど両値は大となる傾向がある。

したがって、(2)、(7)式よりある雰囲気における軟鋼の腐食き裂伝播則として、

$$\frac{da}{dN} = C(f) \cdot (4K)^4 \dots \dots \dots \quad (8)$$

が得られる。

なお、図 6.1.8において、各繰返し速度における C 値の最大応力 $\sigma_{g,\max}$ による相違はわずかであるので、(7)式では平均応力の影響は考慮していない。

2) 防食電流について

陰極防食下における防食電流の変化と防食電気量を図 6.1.9 に、比較のためにガルバニック腐食における腐食電流および腐食電気量すなわち腐食量を図 6.1.10 に示す。各図の横軸は負荷開始点を 0 とした時間および負荷の繰返し数を示す。図 6.1.9(a)によると、外部電源法では時間の経過とともに電流はわずかに増加するのに対し、流電陽極法では、犠牲陽極の亜鉛板表面に水酸化被膜が付着し、電池の内部抵抗が、時間経過に伴なって増大するため、食塩水中に浸漬した直後には、電流は高い値を示すが、次第に減少する傾向にある。なお、防食電流および腐食電流の変化の過程において、異常に高い値が随所にみとめられるが、これはき裂長さ測定の際に食塩水を除去したことにより、試験片および対極の表面状態が変化したためである。図 6.1.9(a)において、負荷開始後の両防食法の電流値を比較すると、外部電源法が流電陽極法に比べて大きく、したがって防食電流の時間による積分値すなわち防食電気量も同図(b)に示すように前者の方が大である。このことは、外部電源法におけるカソード反応の反応速度が大であることおよび生成水素量が多いことに対応しており、外部電源法のき裂伝播寿命が流電陽極法に比べて若干短いことと符合する。

6.1.4 結 言

比較的大型の軟鋼中央切欠試験片により、大気中および 3 % 食塩水中において荷重繰返し速度を種々変えた引張疲れ試験を行い、疲れき裂伝播速度を測定した結果、次の点が明らかになった。

- (1) き裂伝播速度 da/dN とき裂先端の応力拡大係数 ΔK の間には、荷重繰返し速度 f および雰囲気のいかんによらず
4乗則が成立し、その関係は次式で与えられる。

$$da/dN = C(f) \cdot (\Delta K)^4$$

(2) 荷重繰返し速度が小さくなると、腐食性雰囲気におけるき裂伝播速度は大となる。腐食速度の大きい雰囲気ほどその傾向は著しい。

(3) 荷重繰返し速度 f および雰囲気がき裂伝播速度に及ぼす影響は上式の $C(f)$ のみによって表わされ、

$$C(f) = 10^{-12} \log(C_0 \cdot f^{-V})$$

で与えられる。 V および C_0 は雰囲気によって決る定数で、大気中のき裂伝播に対しては $V = 0.9573$, $C_0 = 4.236 \times 10^4$ 、食塩水中のそれに対する $V = 4.000$, $C_0 = 1.000 \times 10^{12}$ となり、腐食速度の大きい雰囲気ほど、 V , C_0 ともに大となる。

(4) $f = 300 \text{ cpm}$ 以上では食塩水中と大気中における $C(f)$ すなわちき裂伝播速度はほぼ等しく、き裂伝播に及ぼす食塩水の速度効果は大気中と同程度である。

(5) 陰極防食下における疲れき裂伝播寿命は大気中に比べて著しく低下し、陰極防食によって疲れき裂の伝播速度を遅らせるることは期待できない。その原因としては拡散性水素が塗げられる。

参 考 文 献

1) 永井欣一：“疲れき裂の伝播特性”，日本造船学会誌，第479号（昭44.5），P. 223

表 6.1.1 供試材の機械的性質および化学組成

機械的性質			化学組成 %				
引張強さ σ_B kg/mm ²	降伏強さ σ_S kg/mm ²	伸び ε %	C	Si	Mn	P	S
43	27	31	0.18	0.04	0.73	0.008	0.012

表 6.1.2 $da/dN = c(\Delta K)^m$ としたときの最小自乗法による c と m の値

応力 $\delta g \cdot kg/mm^2$	繰返速度 C.P.M.	大気中		3% 食塩水中	
		C	m	C	m
15	3			7.68×10^{-12}	4.05
	30	1.58×10^{-11}	3.62	2.30×10^{-11}	3.69
	300	2.25×10^{-12}	3.78	1.91×10^{-11}	4.02
12	3			1.36×10^{-10}	3.92
	30	1.24×10^{-10}	3.70	2.74×10^{-10}	3.70
	300	4.15×10^{-12}	3.87	1.47×10^{-11}	4.11
9	3			1.47×10^{-11}	3.95
	30	9.30×10^{-12}	4.32	9.74×10^{-11}	3.92
	300			5.07×10^{-13}	4.35

表 6.1.3 $da/dN = c(\Delta K)^4$ としたときの c の値

応力 $\delta g \cdot kg/mm^2$	繰返速度 C.P.M.	$c \times 10^{-12}$	
		大気中	3% 食塩水中
15	3		9.77
	30	2.84	5.50
	300	2.25	2.06
12	3		9.51
	30	3.27	5.62
	300	2.27	2.39
9	3		11.19
	30	3.54	6.82
	300		2.30

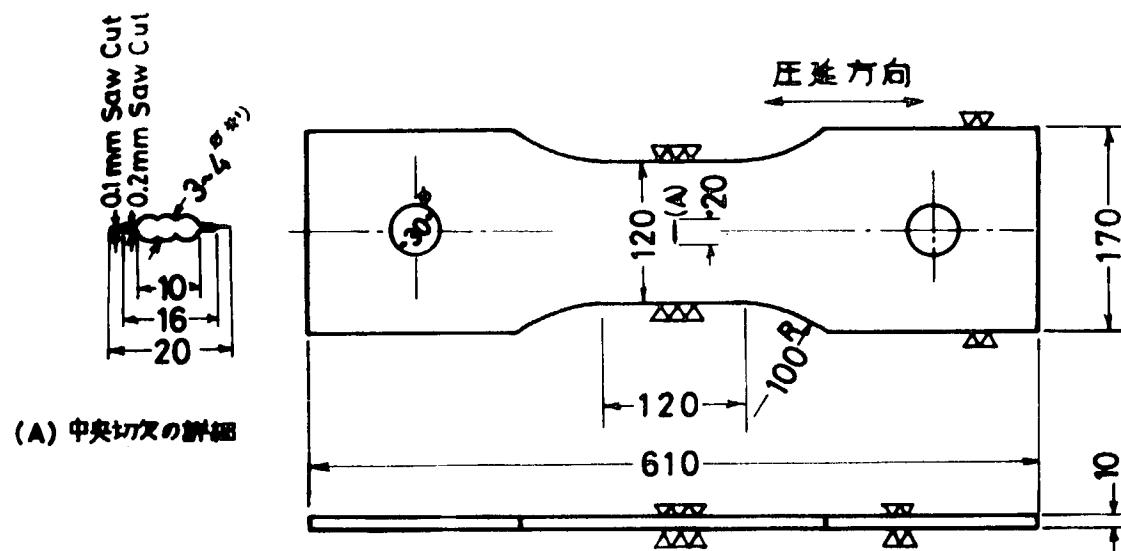


図 6.1.1 中央切欠試験片

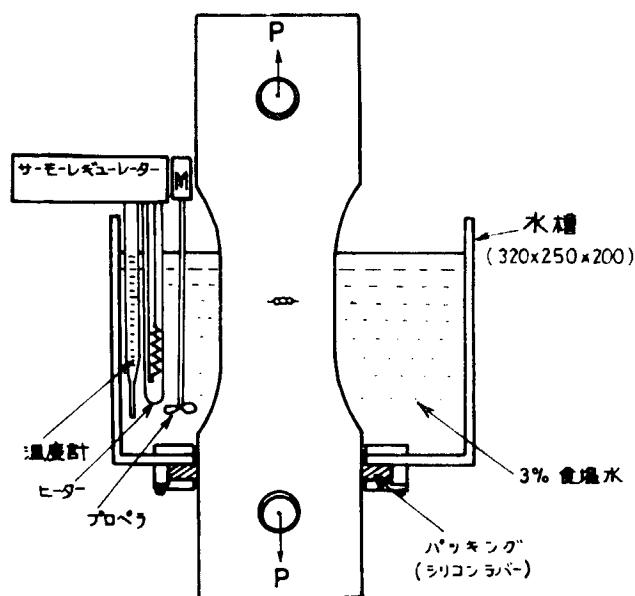


図 6.1.2 腐食疲れ試験片

S: 試験片 C: クーロメーター A: 無抵抗電流計

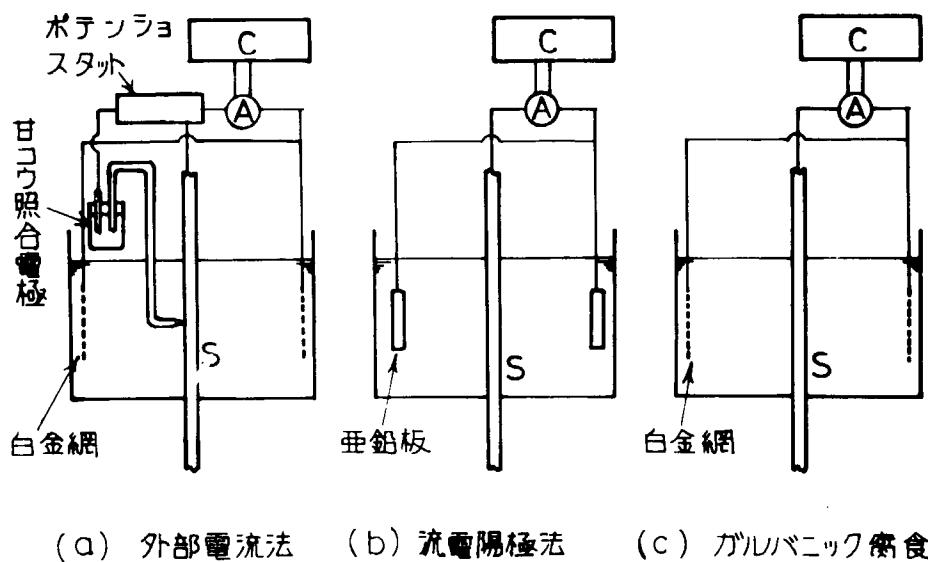


図 6.1.3 陰極防食およびガルバニック腐食回路

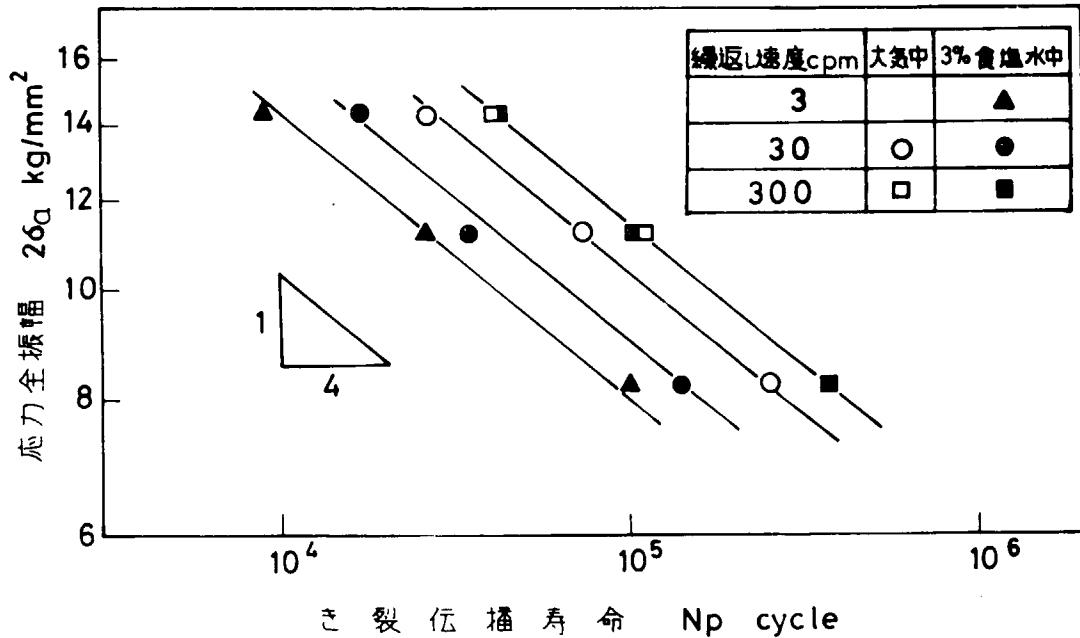
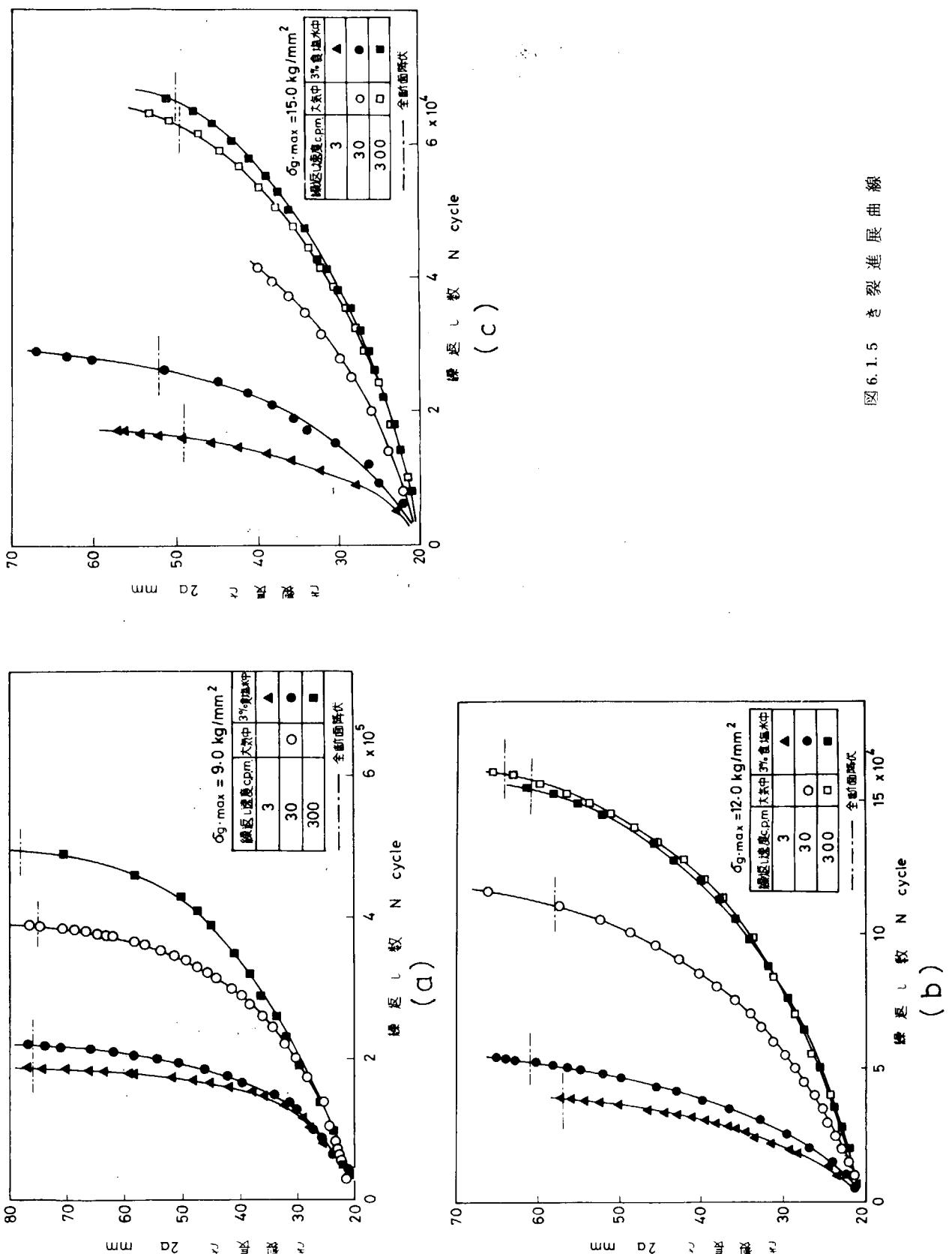


図 6.1.4 S - N 曲線

圖 6.1.5 塑裂進展曲線



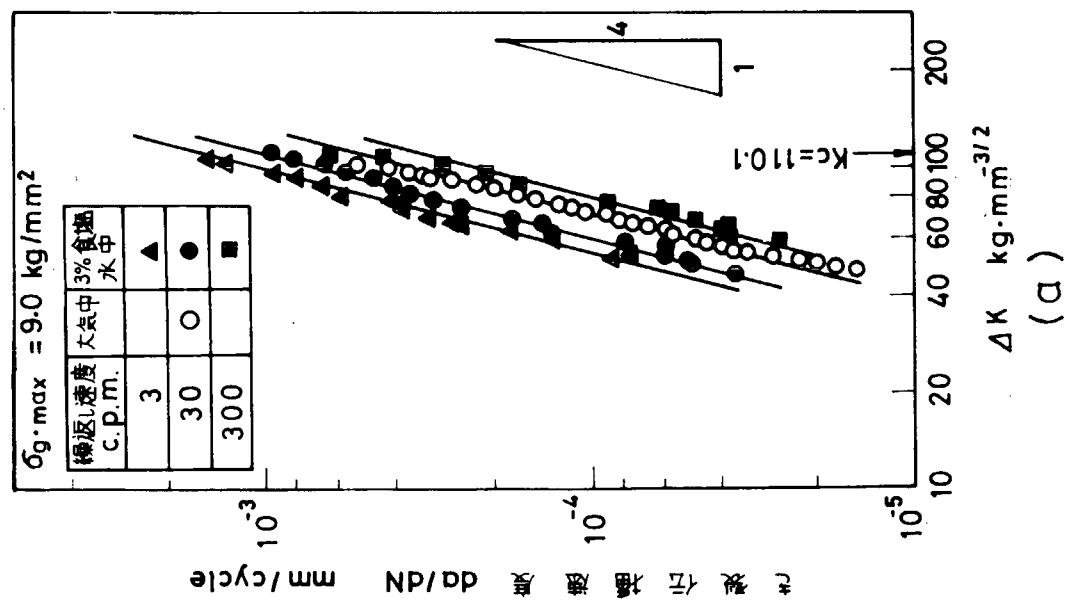
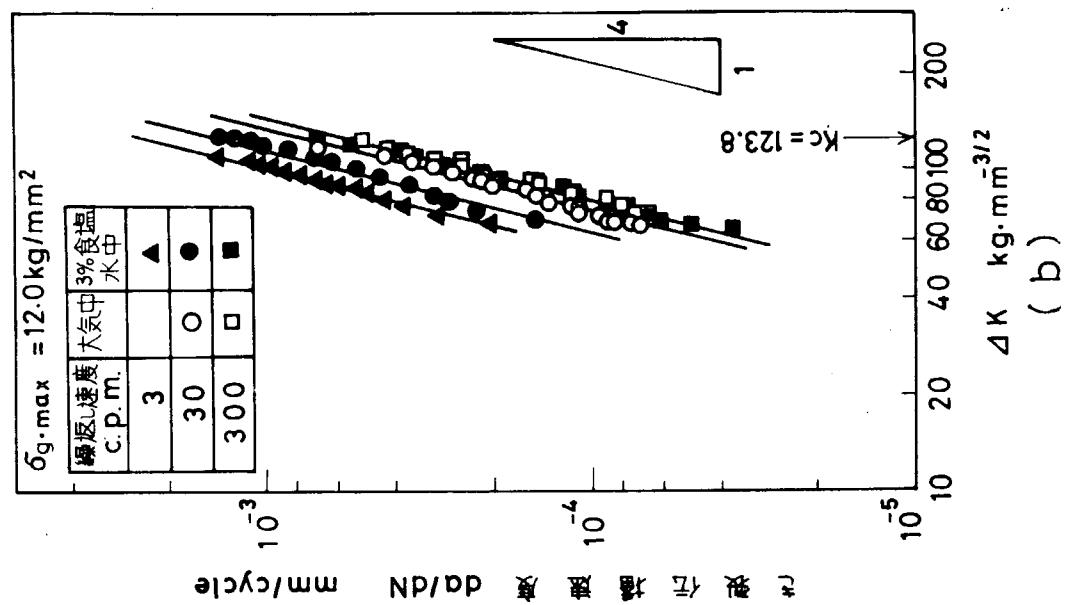
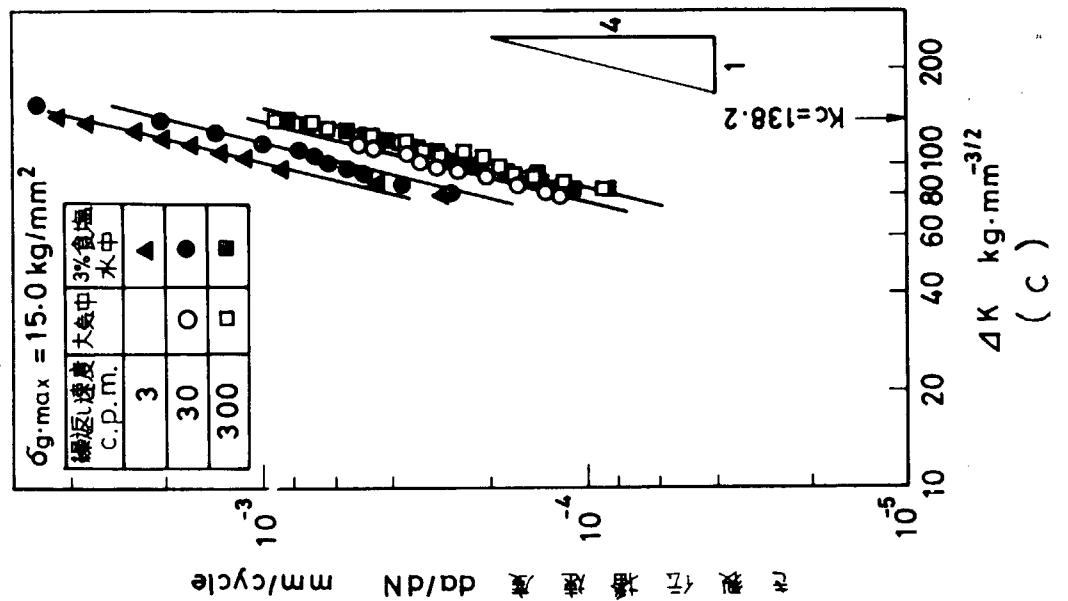


図 6.1.6 ΔK とき裂伝播速度との関係

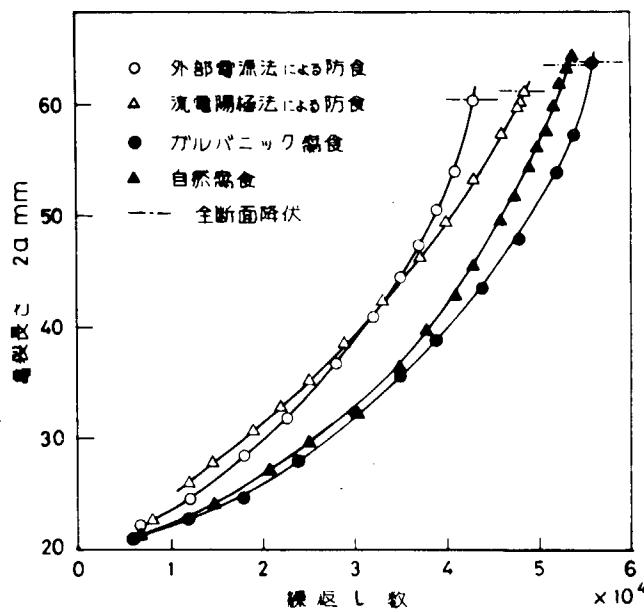


図 6.1.7 防食および腐食環境下での亀裂進展曲線

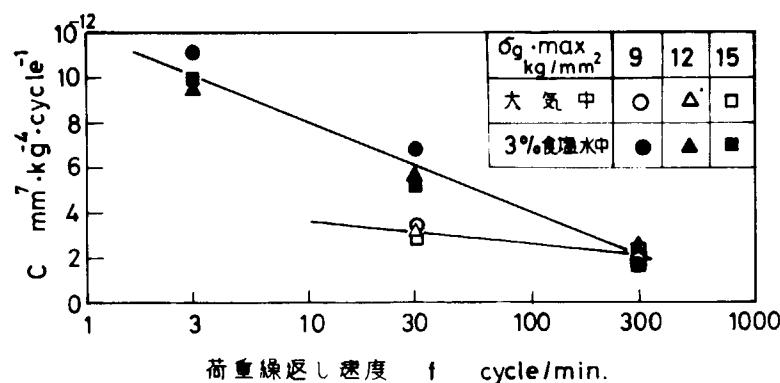


図 6.1.8 c IC 及び線返し速度と雰囲気の影響

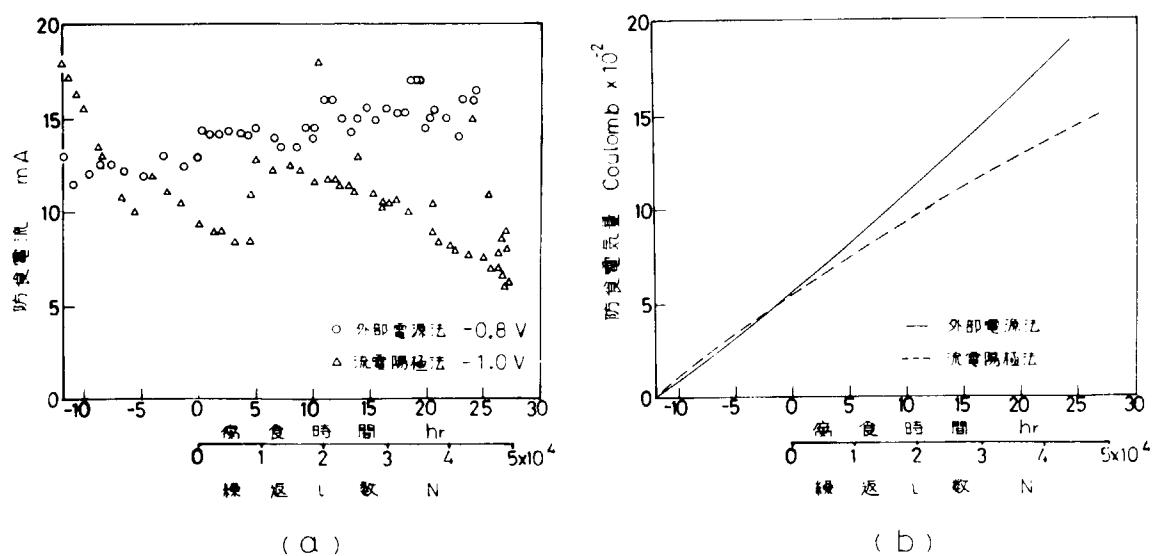
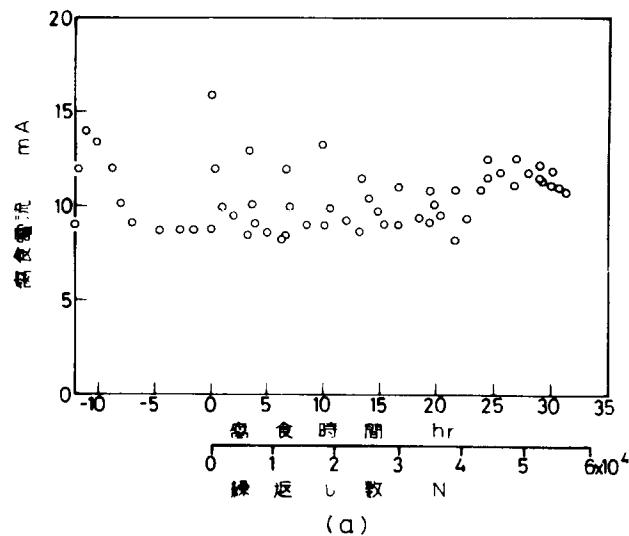
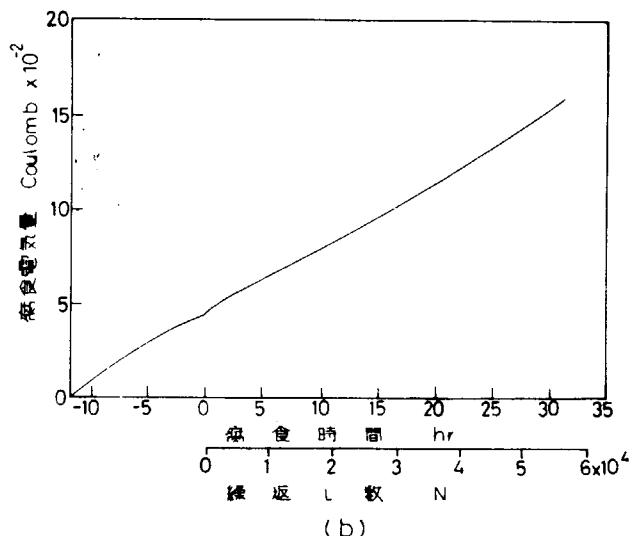


図 6.1.9 防食電流および防食電気量



(a)



(b)

図 6.1.10 ガルバニック腐食における腐食電流および腐食電気量

6.2 ペイントの密着性劣化に及ぼす変動応力の影響

船体構造物の主要な防腐法としては、ペイント塗装および陰極防食と、その併用が挙げられるが、最も広範囲に用いられるペイント塗装は、鋼材を海水雰囲気から遮断し、ピットの発生を遅らせるので、船体の腐食疲れに対しても、すぐれた改善効果を有するものと考えられる。しかしながらペイント塗膜に変動応力が加わる場合の雰囲気遮断効果の劣化に関する研究は比較的少なく、塗膜の密着性については南¹⁾、永井、竹内他²⁾の研究がみられる程度である。そこで本研究では、船体構造用鋼として主要な軟鋼に対し、すぐれた防食性能を有し、最近とくにパラストタンク内の塗装に用いられるようになつたタールエポキシ系ペイントを塗装した場合の塗装の効果と塗膜の密着性劣化について検討した。すなわちほぼ平滑とみなし得る程度の円弧切欠試験片にタールエポキシ系ペイントを、膜厚を変えて塗装し、3%食塩水中で疲れ試験を行い、疲れ強さに及ぼす塗膜の効果を明らかにした。さらにWormwellら³⁾の交流法を応用して、塗装試験片の電気抵抗および電気容量を測定して、塗膜の劣化寿命について調べた。

6.2.1 実験方法

使用した鋼材は表6.2.1に示す機械的性質と化学成分をもつ溶接構造用鋼材(SM41A)である。この鋼板から図6.2.1に示す半径20mmの円弧切欠試験片を採取した。円弧切欠の応力集中係数は1.06であり、この試験片は平滑材とみなすことができる。この試験片に表6.2.2に示すようにサンドブラスト処理(Sa2.5)を施したのち、プライマーとしてエバボンドFを、ついでタールエポキシ系塗料ビスコン#1,000をエア・スプレーによって塗布した。塗膜の厚さが密着性に及ぼす影響を調べるために塗装試験片として表6.2.2に示すように1回塗(125μ)と2回塗(250μ)の2種類を用意した。なお塗膜厚さをケット電磁膜厚計により測定したところ、1回塗試験片の塗膜厚さは125±10μ、2回塗試験片のそれは250±20μであった。これらの試験片のほかにサンドブラストのみを行ったサンドブラスト試験片、サンドブラスト処理を行わず240#エメリーペーパー紙で研磨のみを行った研磨試験片および片面に黒皮を残した片面黒皮付試験片も作成し、疲れ試験に供した。

疲れ試験は、図6.2.2に示すような遠心力で起振される形式の片持式板曲げ疲れ試験機を用い、繰返し速度約1,900cpmを行つた。3%食塩水中における腐食疲れ試験は同図に示すごとく、試験片の円弧欠部が食塩水に浸されるようになされたビニル製の腐食槽を取付け、一定水面に保たれた上部貯槽から一定流量8.0ml/minの3%食塩水を供給するようにした。また、腐食槽および上部貯槽内から溢れだした食塩水は一旦下部貯槽に戻り、上部貯槽内の液温が30°C一定に保たれるよう恒温槽内で加熱保温した。

塗装試験片およびサンドブラスト試験片について3%食塩水中の腐食疲れ試験を、比較のため大気中では研磨試験片、サンドブラスト試験片および黒皮付試験片の疲れ試験を行つた。

塗装の防食効果を電気化学的に試験する方法としてWormwellらは、直流法では分極のため測定上に種々の障害が起りうるので、交流法によることを提案した。³⁾そこでこの方法を応用し、塗装試験片の腐食疲れ過程における電気抵抗および電気容量を種々の繰返し数で測定することによって塗膜の密着性を検討した。すなわち、塗装試験片を疲れ試験機に取付け、無負荷の状態で約12時間保つたのち、図6.2.3に示すインピーダンス・ブリッジにより

(塗装試験片) | (3%食塩水) | (白金線)

からなる電池の内部抵抗および電気容量を測定した。測定に際しては交流の周波数を1kHzとした。なお、本実験における塗膜の抵抗は10⁷Ω以上に達するものがあり、この場合図6.2.3に示したブリッジをバランスさせることは困難である。したがつて塗膜の充電電流I_Cと損失電流I_Rの比である損失係数tanδおよび電気容量C_Xとから内部抵抗R_Xを求めることとした。すなわち塗装試験片をR_XとC_Xの並列等価回路と仮定すると、

$$I_C = V / \omega C \quad I_R = V / R \quad (1)$$

したがつて

$$\tan \delta = I_R / I_C = \frac{1}{\omega C X R_X} = \frac{1}{2\pi f C X R_X}$$

となる。ゆえにR_Xは次式で算出できる。

$$R_X = 1 / (2\pi f C_X \tan \delta) \quad (2)$$

この方法で予め塗装試験片の抵抗を測定し、 R_X が $10^6 \Omega$ 以上のもののみを腐食疲れ試験に供した。

6.2.2 実験結果

1) 非塗装材の疲れ強さ

図 6.2.4 は疲れ試験結果を一括して示したものである。まず大気中の疲れ強さを比較すると、研磨試験片（○印）が最も高く、サンドブラスト試験片（□印）は研磨試験片に比べて時間強さが 5kg/mm^2 、疲れ限度が約 2kg/mm^2 程度低下している。一般にショットブラスト等の表面硬化処理は鋼材の疲れ強さを増加させるといわれているが、上述のごとくサンドブラスト試験片の疲れ強さが低下したのは、サンドブラスト試験片の表面が砂地肌で研磨試験片に比べて荒くなっているためである。本実験が比較的薄い板厚の試験片による曲げ疲れ試験であったために、表面状態の影響が顕著に現われたことによると考えられる。また片面黒皮付試験片は黒皮の面からのみ疲れき裂が発生し破断しており、その疲れ強さは図 6.2.4 に示すと、サンドブラスト材とはほぼ等しい。つぎにサンドブラスト試験片の 3% 食塩水中における腐食疲れ強さ（△印）は低応力レベルでは当然のことながら、その大気中の疲れ強さに比べて著しく低下するが、破断寿命が約 10^6 回以下の高応力レベルでは、試験時間が短かく、疲れ強さに及ぼす腐食の効果が小さいために大気中と食塩水中的時間強さはほぼ等しくなると考えられる。

2) 塗装材の疲れ強さ

図 6.2.4 の (○) および (△) 印は 1 回および 2 回塗装した試験片の塗膜劣化寿命を、(●) および (▲) 印はそれぞれの破断寿命を示す。同図によれば各塗装試験片の腐食疲れ強さはサンドブラスト試験片の腐食疲れ強さに比べて著しく向上しており、腐食疲れに対する塗装の効果が認められる。塗装材の腐食疲れ強さは、サンドブラスト試験片の大気中の時間強さよりも大きく、その差は塗装による食塩水の遮断効果だけでは十分に説明し得ない。W. Gilde⁴⁾ は、鋼材の疲れ強さが、エポキシ系の樹脂被膜により著しく向上されることを示した。その理由として、金属表面と樹脂との相互作用による表面状態の変化を挙げているが、他方益本ら⁵⁾ は雰囲気の遮断をその理由としている。したがって、塗装試験片の食塩水中における疲れ強さが、サンドブラスト試験片の大気中における疲れ強さ以上に向上するのは、サンドブラスト処理により砂地肌になった試験片の表面状態がエポキシ系塗装により改善されることと、雰囲気遮断効果によるものと推察される。2回塗装された試験片の破断寿命は1回塗装のものに比べて大きく、塗膜は厚いほうが腐食疲れにも効果的であることがわかる。

3) 塗膜劣化について

種々の繰返し応力における塗装試験片の電気抵抗および容量の変化を図 6.2.5 に示す。同図によるといずれの応力振幅においても、その抵抗および容量はある繰返し数まではほぼ一定で、それ以後抵抗は急激に低下し、容量は逆に増加することがわかる。この原因が塗膜の損傷によることは、すでにこれまでの実験結果²⁾ で確認されている。

すなわち、初めの電極インピーダンスは塗膜のインピーダンスだけであるが、塗膜が劣化し始めると、これに劣化部のインピーダンスが並列に付加される。劣化部の抵抗は溶液抵抗と金属面における電極反応による抵抗の和で、これは塗膜の抵抗に比べて著しく小さい。また劣化部の容量は、金属と溶液の界面構造二重層にもとづく容量であるから、塗膜の容量よりも大きい。したがって、図 6.2.5 に示すごとく塗膜の劣化とともに抵抗は減少し、容量は増加すると考えられる。塗膜の劣化による抵抗の変化が容量の変化よりも急激であるので、抵抗の変化により塗膜の劣化時期を判定した。図 6.2.4 の (○) および (△) 印は、抵抗が $10^5 \Omega$ 未満の値に低下したときの繰返し数である。

6.2.3 考察

表 6.2.3 は塗装試験片の塗膜劣化寿命 N_0 、試験片の破断寿命 N_f および塗膜劣化後の寿命 $N_f - N_0$ と、非塗装サンドブラスト試験片の腐食疲れ寿命 N_F を比較して示したものである。なお、応力振幅が、3.0.0、26.0 および 22.9kg/mm^2 の非塗装サンドブラスト試験片の腐食疲れ寿命 N_F は、同材の大気中の疲れ寿命と同一とみなしてその値を記入している。同表において、塗膜劣化後の寿命 $N_f - N_0$ とサンドブラスト試験片の腐食疲れ寿命 N_F を比較すると、サンドブラ

スト材の大気中での疲れ限度 2.0kg/mm^2 よりも高い応力振幅では、 $\sigma_a = 3.0 \text{kg/mm}^2$ を例外として $N_f - N_0$ は N_F よりも短かい。 $\sigma_a = 3.0 \text{kg/mm}^2$ の場合は応力振幅が降伏点に近く、両者の差は寿命のばらつきとみられる範囲にある。これらの高い応力レベルにおける塗装材の破面はそれほど腐食されておらず、大気中における破面と類似していることから、塗膜劣化時にすでに鋼材側でも疲れ損傷がある程度進行していたものと推察される。これに対して、サンドプラス材の大気中での疲れ限度よりも低い応力振幅では、 $N_f - N_0$ は N_F より明らかに大きく、塗膜が破断したのちに鋼材が食塩水にさらされて腐食疲れ破壊を起こしたものと考えられる。このときの塗装試験片の破面は、全面が黒褐色に変色しており、腐食疲れ破面であった。 $N_f - N_0$ が N_F よりも大となった理由としては、(1)塗膜が劣化したのちに、塗膜の劣化部に生じた腐食生成物によって腐食抵抗が一時増加する過程と生成物の脱落によって腐食抵抗が低下する過程を繰返すこと、(2)非塗装材では多発した疲れき裂が互に連結して破断に至るものに対し、塗装材では塗膜の一箇所に直線的なき裂を生じ、その部分の鋼材表面に局部的に疲れき裂が発生し、これが伝播して破断することなどが挙げられる。

6.2.4 結 言

軟鋼にタールエポキシ系塗料を塗装した円弧切欠試験片を用いて、3%食塩水中で腐食疲れ試験を行い、交流法により塗膜のインピーダンスを測定した結果、次の点が明らかになった。

- (1) $10^6 \Omega$ 以下の塗膜抵抗は交流ブリッジによって直接測定できるが、 $10^7 \Omega$ 程度の塗膜抵抗は損失係数 $\tan\delta$ を測定して求める必要がある。この方法で求めた抵抗値の変化から塗膜劣化寿命を推定できる。
- (2) タールエポキシ塗料により、鋼の腐食疲れ強さは著しく改善され、塗膜が厚いほどその効果は大である。とくにサンドプラス材の大気中の疲れ限度以下の応力レベルにおける疲れ寿命の増加が顕著である。
- (3) 塗膜試験片の食塩水中における時間強さは、非塗装材の大気中における時間強さよりも大きい。これは塗膜による雰囲気遮断効果とサンドプラス材のエポキシ塗装による表面状態の改善効果によるものと考えられる。
- (4) サンドプラス材の大気中における疲れ限度以上の繰返し応力では、塗装劣化後の寿命 $N_f - N_0$ は、サンドプラス材の腐食疲れ寿命 N_F よりも小さいのに対し、疲れ限度以下の応力では、 $N_f - N_0$ は N_F よりも大となる。

参 考 文 献

- 1) 南義夫；軟鋼の腐食疲労と塗装効果、材料試験、10巻、99号（昭36-12）P.988
- 2) 永井欣一、竹内信彦、赤石徹；腐食疲れにおける塗装効果について、日本機械学会論文集、39巻、318号（昭48-2）P.510
- 3) 岡本剛、諸住高；防食塗装の電気化学的研究（第1報）、塗装鋼片の交流試験法、特に周波数効果について、電気化学、23巻、1号（昭30）P.15
- 4) W.Gilde；合成樹脂被覆による疲れ強さ改善、溶接学会誌、34巻9号（昭40）P.868
- 5) 益本功、江原隆一郎；エポキシ樹脂被覆による疲れ強さ改善の原因について、第35回FS資料

表 6.2.1 塗装試験用軟鋼板のミルシート

材料	機械的性質			化学成分 %				
	降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	C	Si	Mn	P	S
SM 41A	34	48	26	0.15	0.05	1.00	0.010	0.019

 $t = 6 \text{ mm}$

表 6.2.2 塗装工程

工程	1回塗 (125μ)	2回塗 (250μ)	乾燥時間
下地処理	サンドブラスト (Sa 2.5)		—
ショッピングライマー	エバボンド F		1 時間
ペイント塗装	1回目 ビスコン No.1000 黒	ビスコン No.1000 ブラウン	24時間(2回塗のみ)
	2回目	ビスコン No.1000 黒	

表 6.2.3 塗装および非塗装試験片の腐食疲れ寿命の比較

塗装回数 (膜厚)	応力振幅 σ_a kg/mm ²	塗装試験片の寿命 cycles			非塗装サンド ブラスト試験片 の破断寿命 N_F
		塗膜劣化寿命 N_0	試験片破断 寿命 N_f	塗膜劣化後 の寿命 $N_f - N_0$	
1回塗り (125μ)	30.0	3.10×10^5	3.86×10^5	7.6×10^4	6.0×10^4
	26.0	1.15×10^6	1.25×10^6	1.0×10^5	4.0×10^5
	22.9	1.78×10^6	2.12×10^6	0.34×10^6	1.0×10^6
	18.8	1.97×10^7	2.45×10^7	4.8×10^6	2.9×10^6
	15.9	8.16×10^7	9.99×10^7	18.3×10^6	4.5×10^6

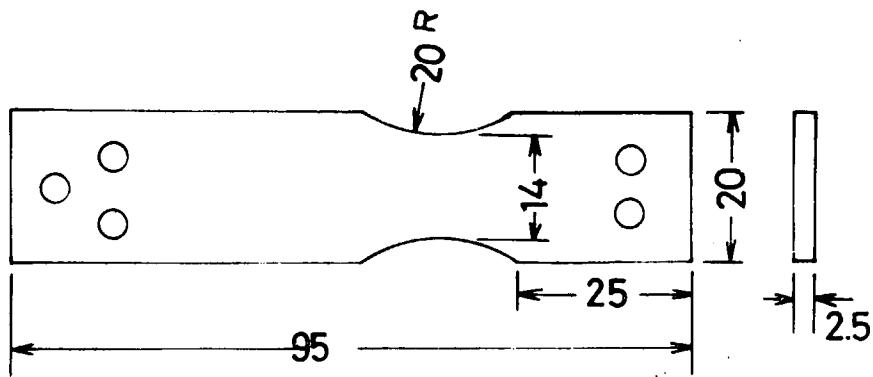


図 6.2.1 塗装試験用試験片

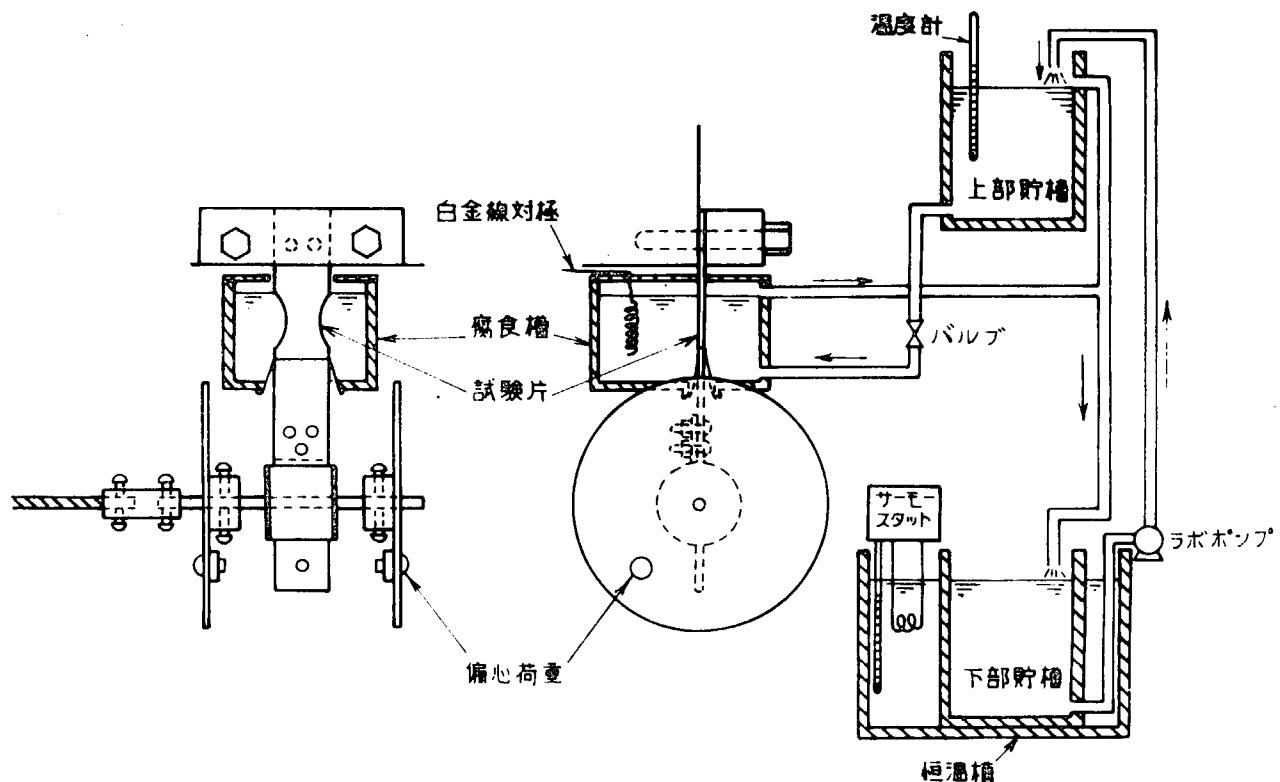


図 6.2.2 腐食疲れ試験機

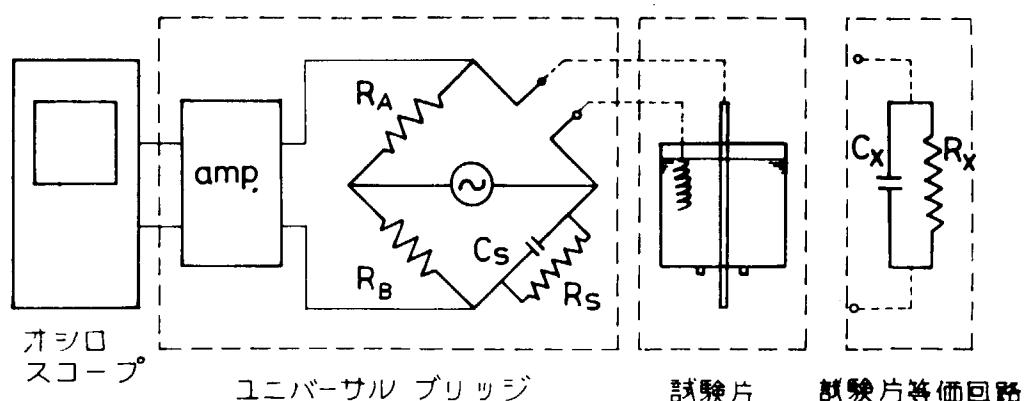


図 6.2.3 塗装試験片のインピーダンス測定装置

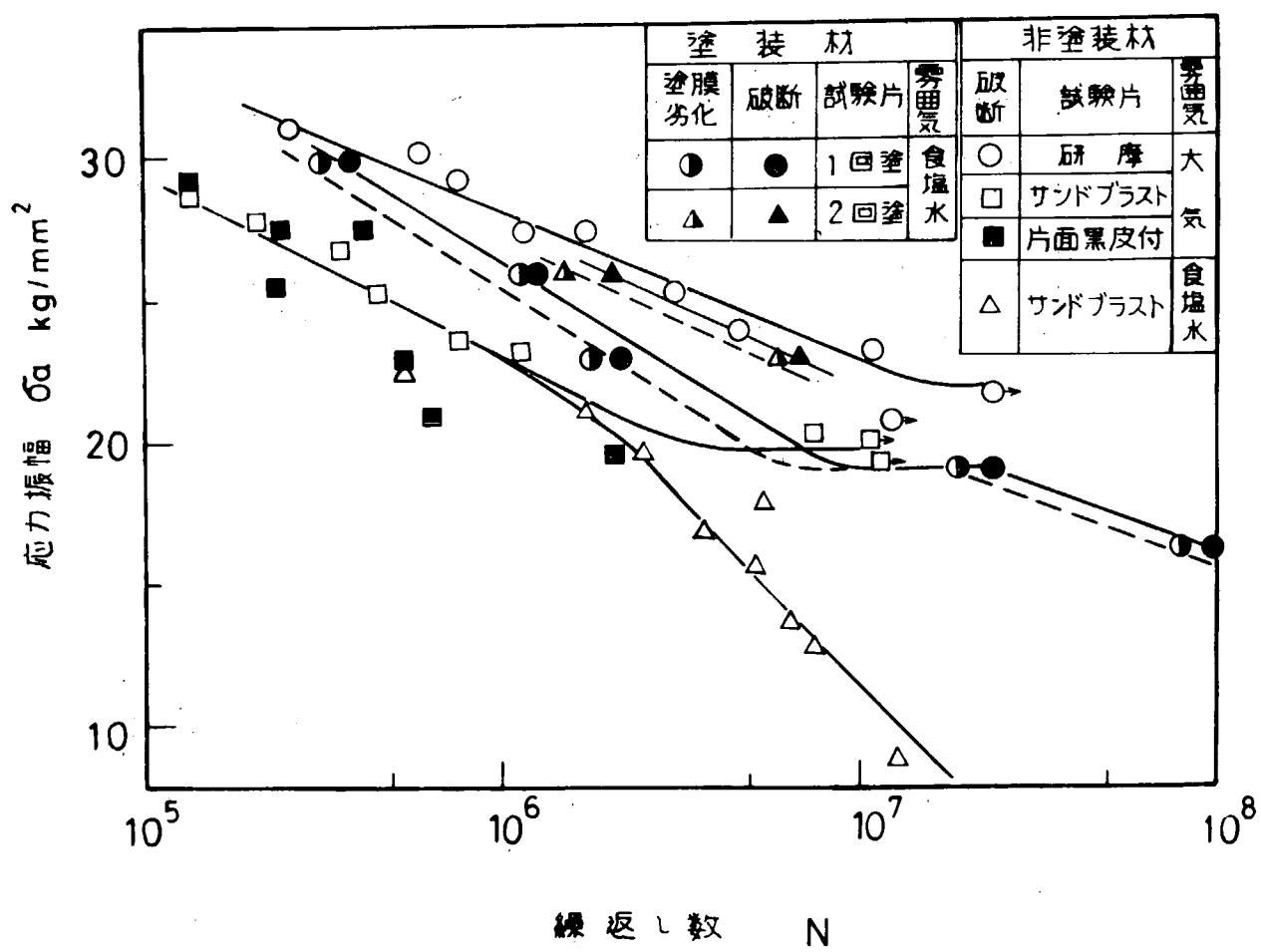


図 6.2.4 塗膜密着性試験における S-N 曲線

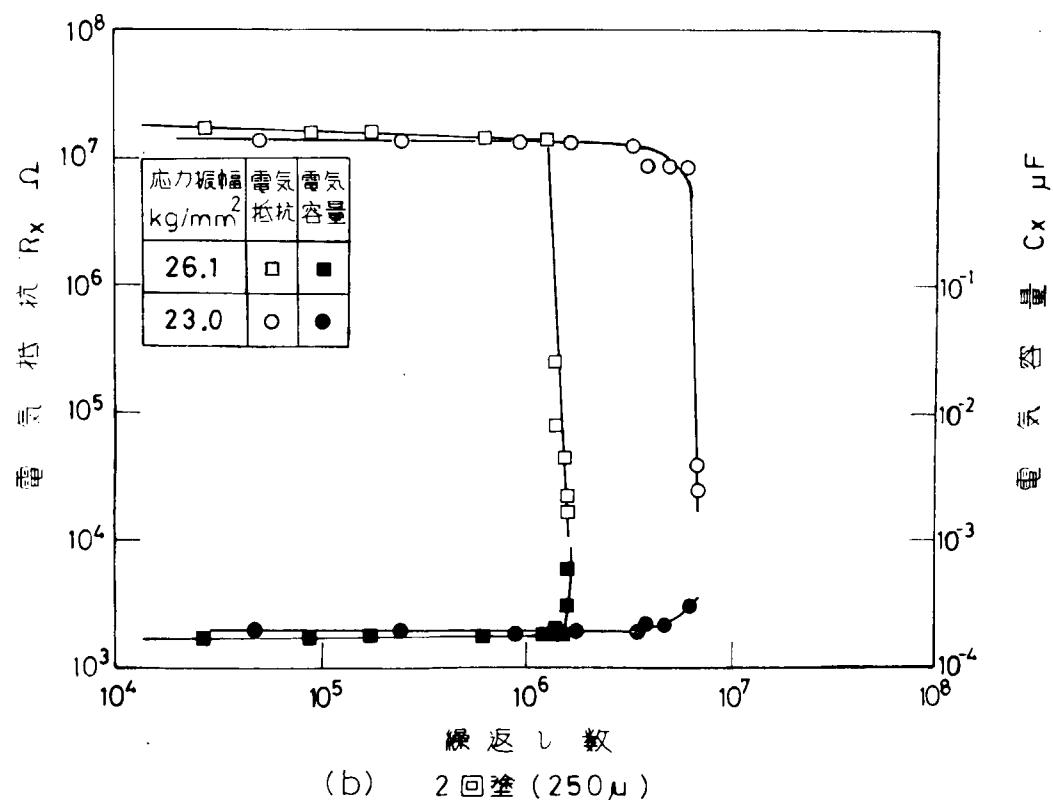
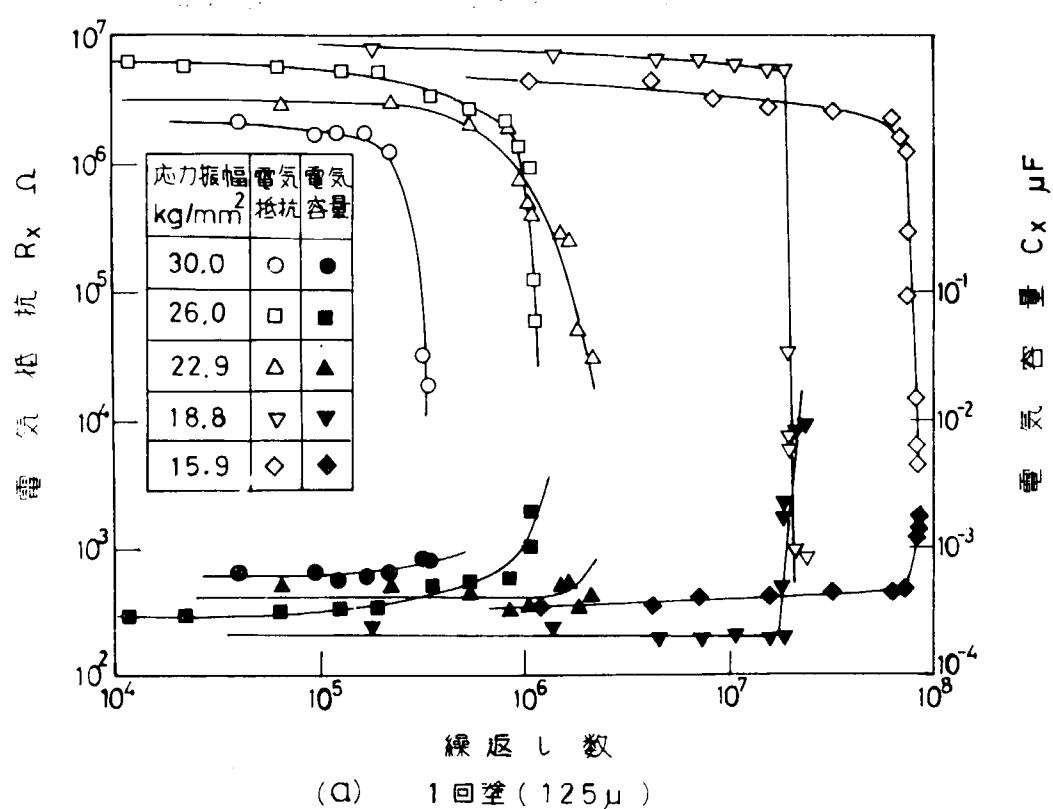


図 6.2.5 塗装試験片の電気抵抗および電気容量と荷重繰返し数の関係

7. 平面曲げ塩水腐食疲労強度に及ぼす塗装の効果

記号

- δ : 曲げ変位 (mm)
 P : 曲げ荷重 (kg)
 ϵ : 曲げによる表面の全工学歪
 N_c : 試験片の表面に長さ約 0.5 mm の疲労亀裂が発生するまでの繰り返し数
 N_f : 破断寿命；曲げ疲労試験においては固定端への荷重伝達がほぼ零になるまでの繰り返し数
一方、軸力疲労試験においては完全分離までの繰り返し数
 $P(N)$: N サイクルにおける曲げ荷重
 $\epsilon(c)$: 静的曲げ試験による較正曲線から得られる表面歪
 $\epsilon(g)$: 疲労試験中に測定された表面歪
 $\epsilon(m)$: 動的な較正曲線から得られる表面歪
 σ : 軸力真応力 (kg/mm)
 γ : 軸方向対数歪

添字

a : 振幅 e : 弹性成分 p : 塑性成分 t : 弹性成分 + 塑性成分

塩水腐食疲労強度に及ぼす塗装の効果、ならびに表面状態および切欠の影響を把握することを主たる目的とした。

7.1 実験

7.1.1 供試材、および試験片

造船用軟鋼 SM 41 B 母材を供試材とした。その化学成分を表 7.1.1 に、機械的性質を表 7.1.2 に示す。

試験片は (厚さ 2.5 mm) × (ロール方向長さ 3,000 mm) × (幅 1,500 mm) の鋼板より、ロール方向と試験片の長手方向が一致するように切り出し加工した。試験片は、表 7.1.3 の試験系列に示すように、平滑試験片と切欠試験片があり、平滑試験片はサンドブラスト処理後塗装したもの、サンドブラストしたままのものおよび、エメリーペーパー #800 で、試験片の長手方向に研磨したものを用意した。図 7.1.1 には切欠材の試験片形状を示す。なお、切欠材も、エメリーペーパー #800 で試験片の長手方向に研磨した。

7.1.2 試験機

片持梁型式の曲げ変位制御疲労試験機を用いた。その概略形状を図 7.1.2 に、油圧フローシートを図 7.1.3 に示す。

本試験機は負荷重最大 ±1 ton、変位幅は最大 ±5 mm で、サーボ制御により、変位振幅を制御する。繰り返し速度は最大 60 cpm で制御可能な波形は正弦波、三角波、矩形波および锯歯状波の 4 種類である。

7.1.3 試験方法

疲労試験を空中および 3 % 人工塩水中で行った。繰り返し速度は予想される破断寿命に応じて 6 ~ 30 cpm とした。なお、人工塩水は約 1 m 水柱の圧力により、試験部を囲ったプラスチック製の小箱に流入させた。その温度は試験部で約 35°C であった。

疲労試験の際、次の測定、記録、および観察を行った。

- 1) 曲げ変位量をモニターするため、制御パネルの増幅器出力と、ロードセルから検出した曲げ荷重を、前者は適宜、後者はほぼ連続して、ペソレコーダーで記録した。
- 2) 一部の試験片の試験部表面中央に抵抗線歪ゲージ (YF-5; G.L. = 5 mm) を貼付し、その記録をペソレコーダーで行った。

- 3) 空中での疲労試験では、15倍のルーペで試験部表面の観察を行い、疲労亀裂の発見に努めた。疲労亀裂発生寿命 N_c は、長さ約0.5mmの亀裂が認められるまでの繰り返し数とした。
- 4) 破断寿命 N_f の定義としては、モニターしている曲げ荷重がほぼ零になるまでの繰り返し数とした。
- 以上に述べた疲労試験のはかに、静的曲げ荷重による変位と表面歪の関係も調べた。

7.2 試験結果と考察

7.2.1 試験結果と考察

データ整理の方法として、平滑試験片研磨材の空中での疲労試験の結果を表7.2.1に示し、若干の考察を加える。

1) 変位振幅に依るもの

制御量である変位振幅と、 N_c または N_f の関係を示したものを図7.2.1に示す。

2) 荷重振幅に依るもの

図7.2.2に曲げ荷重の変動例を示す。この場合、曲げ荷重は繰り返しの初期に増加し、その後は N_c の付近まで、ほぼ一定値を保っている。このような性質は、図7.2.3に示すように、ある変位振幅を境に逆になり、初期の荷重振幅より N_c の振幅の方が小さくなる領域も存在する。

評価すべき曲げ荷重としては、軟化であれ、硬化であれ荷重がほぼ安定する。 N_c 付近の値 $P_a(N_c)$ を代表値とした。図7.2.4に、 $P_a(N_c)N_c$ 、 N_f の関係を示す。なお、図7.2.3には塗装材とサンドblast材の荷重変化も含めた。

3) 表面歪振幅に依るもの

低サイクル疲労では、亀裂発生点近傍の歪挙動が問題となるとされている。そこで第一に図7.2.5に示すような静的曲げ試験による変位と表面歪の較正曲線を求めておき、これを疲労試験の表面歪振幅 $\epsilon_a(C)$ と評価する方法が挙げられる。図7.2.6はこの方法によりプロットした $\epsilon_a(C)-N_c$ 、 N_f 線図である。

しかし、材料の繰り返し軟化もしくは硬化挙動を考えるならば、疲労試験中に表面歪が一定であると考えることは危険である。たとえば、図7.2.7には、試験片表面に貼付された歪ゲージの繰り返し特性を示してあるが、歪振幅は第一サイクル直後急激に減少し、その後歪振幅は、わずかながら漸減する傾向を示している。また平均歪の増加がみられるが、一定歪制御試験においても同様な歪ゲージの挙動が認められることから、この増加をみかけの平均歪と考え、平均歪零のもとで歪振幅が変化すると解釈する。そして評価すべき歪を測定した歪の $N = N_c/2$ での振幅とし、これを変位振幅 δ_a に対してプロットすると、図7.2.8のようになる。これはいわば、動的な $\epsilon-\delta$ 線図であり、これを較正曲線として評価した歪振幅を $\epsilon_a(m)$ とする。

このようにして求めた $\epsilon_a(m)$ と N_c 、 N_f の関係を図7.2.9に示すが、静的な較正曲線により求めた $\epsilon_a(C)$ も、正確に表面歪を与えると考えられる。

7.2.2 諸因子の影響

表7.2.2に塗装材(4PA, 4PB-Series), サンドblast材(4SB-Series), および研磨材(4S-Series)の疲労試験結果を、また、表7.2.3には、切欠付試験片(4N-Series)の結果を掲げる。

諸因子の効果は可能な限り疲労亀裂発生寿命 N_c を基準に評価する事が望ましいと考えられるが、塩水腐食試験の場合には、試験部表面の観察が困難であるため、この場合は、破断寿命 N_f で議論を進めることにする。

(1) 塩水効果と切欠効果

図7.2.10は、平滑試験片研磨材(4S-Series)の空中と塩水中の疲労強度(破断寿命)を動的な変位-歪較正曲線をもとに比べたものであり、図7.2.11は、切欠試験片(4N-Series)の空中および塩水中の疲労強度をプロットしたものである。

実験点が少ないため明確なことはいえないが、比較的速い繰り返し速度のもとでは、塩水効果について、切欠材も平滑材も破断寿命に顕著な差違は認められない。強いて言うならば長寿命で若干の影響があるようである。

また切欠効果については、疲労亀裂発生寿命の顕著な減少が、短寿命から長寿命領域まで認められた。

(2) 塗装と表面状態の影響

図 7.2.12, 13, 14 は、それぞれ変位振幅 δ_a 、荷重振幅 P_a ($N_f/2$) および歪振幅 ϵ_a (m) に対して N_f をプロットしたものである。いづれのグラフからも塗装材とサンドブラスト材の破断寿命が、繰り返し数と共に逐々に低下していく傾向が認められる。これは、塩水腐食効果がほとんどないであろうということから、塗装の有無よりもむしろサンドブラスト処理により表面の粗さが、寿命低下の原因となっていると推察できる。

また、塗装の影響は少なくとも悪い因子とはなっていないようである。

7.2.3 軸力疲労試験との比較

曲げ疲労試験に用いたこの SM41B 材の同一鋼板から、砂時計型丸棒試験片を作成し、往復制御軸力疲労試験を行ったので、その結果を表 7.2.4 に、また $\epsilon_a - N_c$ 線図を、図 7.2.1-5 に示す。

図 7.2.1-6 は、曲げ疲労試験による平滑試験片研摩材の疲労亀裂発生寿命と、軸力のそれを比較したものである。短寿命領域では寿命領域において、曲げ疲労試験のデータが軸力のそれより若干強く出ているのは、塑性域の大きさ、つまり曲げでは、歪が板厚方向に勾配を持つのに対し、軸力では、ほぼ一様な歪分布をするためと思われる。

7.3 結論

SM41B 母材の、平滑試験片（塗装材、サンドブラスト材研磨材）、及び切欠試験片の曲げ疲労試験を空中、及び塩水中で行い、以下の結論を得た。

- (1) 比較的速い繰り返し速度では、塩水による腐食効果は長寿命領域で若干見られるようである。
- (2) 切欠の影響は疲労亀裂発生寿命において、ほぼ低サイクル領域全体にわたり顕著な影響を及ぼした。
- (3) サンドブラスト処理による表面状態では、長寿命領域に入るにつれ、破断寿命に逐々にその影響が強くなった。
- (4) 塗装は少なくとも悪く影響はしていないようである。
- (5) 曲げによる歪の評価法としては、軸力疲労試験との相関から考えて、動的な変位-歪曲線から評価するのが適当であろう。

表 7.1.1 Chemical Composition of Material (%)

[after Mill Sheet]

Material	C	Si	Mn	P	S
SM41B	0.17	0.24	0.71	0.014	0.009

表 7.1.2 Mechanical Properties of Material

[after Mill Sheet]

Material	Tensile Test			Impact Test
	Y.S	U.T.S	ϵ_{long}	VE $^{\circ}$ C
	Kg/mm 2	%	Kg.m	
SM41B	28.0	46.0	26.0	11.2

表7.1.3 Test Series

Base Metal	Smooth		Notched	
	in Air	in Salt Water	in Air	in Salt Water
Paint A ¹⁾	4 PA		—	—
Paint B ²⁾	4 PB		—	—
Sand Blasted	4 SB		—	—
Polished (#800)	4 S		4 N ³⁾	4 N

Note

1) Paint A : Coating Thickness 125μ 2) Paint B : Coating Thickness 250μ

3) Three Kinds of Wave Shape

Triangular

Trapezoidal (2 sec. keep)

Trapezoidal (5 min. keep)

Other tests were conducted by sine wave.

表7.2.1 Bending Fatigue Test Results of 4S Series

(in Air) (sine wave)

Spec No.	Nc	Nf	$\epsilon_a (g)$ at $N=N_c/2$	$P_a (\frac{1}{4})$	$P_a (Nc)$	δa
4S-3	200	506	0.01590	—	409.8	19.3
4	2800	5200	0.00599	—	309.0	9.4
5	300	788	0.01520	—	367.1	14.5
6	650	1170	0.01143	269.2	327.3	12.8
7	80	156	0.02769	304.4	469.2	29.2
8	6×10^4 ↑	—	—	240.7	236.3 ¹⁾	5.0
9	10840	13288	—	277.9	255.9	6.8
10	127	262	—	281.2	388.6	21.1
12	385	697	0.01274	303.4	379.3	16.9
14	1650	2445	—	—	—	10.6
15	1900	3116	0.00770	250.3	279.6	9.5

Note: 1) At $N = 6 \times 10^4$

表 7.2.2 Bending Fatigue Test Results

(4PA, 4PB, 4SB, 4S-Series)

(sine wave)

Spec. #	Nc	Nf	δa	$P_a (1/4)$	$P_a (Nc)$
4 PA - 1	9 0	2 2 9	2 0.9	3 4 9.3	3 9 4.8
2	in Salt Water	2 4 0	1 8.6	3 5 8.5	3 8 6.2
3		8 0 3	1 1.8	2 7 8.2	3 2 4.6
4		1 2 6 7 6	5.4	2 5 4.9	2 1 8.8
4 PB - 1	1 3 1	2 4 4	2 0.1	3 1 8.1	3 8 4.4
2	in Salt Water	2 3 5	1 8.6	-	-
3					
4		1 4 5 3 2	4.5	2 3 1.8	2 0 5.3
4 SB - 1	1 3 3	2 9 8	1 9.4	3 3 5.9	3 7 6.0
2	in Salt Water	9 8 0 0	5.3	2 3 3.2	2 0 9.6
3		7 9 0	1 1.9	2 7 9.6	3 1 3.0
4		2 5 0	1 8.8	3 1 8.8	3 9 1.1
4 S - 1 6	in Salt Water	9 8 9	1 2.5	-	-
2 0		3 1 1 2 5	5.0	2 2 9.7 5	1 9 3.8 3

表 7.2.3 Bending Fatigue Test Results

(4N Series)

Spec. #	Nc	Nf	δa	Wave Shape
4 N - 1	2 9 9 4	-	5	
6	8 2	4 2 7	1 5	
7	7 9 9	3 5 2 1	7	
8	2 9 9	1 3 7 0	9	
9	4 7	2 1 4	2 0	
1 2	2 0 0	1 0 5 1	1 0	
2	2 6 0	-	1 0	— 5 min keep
1 3	2 1 5	1 1 1 3	1 1	— 2 sec keep
1 4	4 7	2 1 3	2 0	
4	in Salt Water	1 9 7	2 0	
5		4 0 5	1 5	
1 7		9 9 0	1 0	

表 7.2.4 SM41B Axial Fatigue Test Results

Spec No.	Nc	Nf	ϵ_{ta}	ϵ_{pa}	ϵ_{ea}	σ_a
4SH-1	300	742	0.01027	0.00834	0.00193	40.50
2	1150	2118	0.00635	0.00470	0.00165	34.67
3	3300	6220	0.00428	0.00277	0.00151	31.68
4	140	246	0.01802	0.01579	0.00224	46.99
5	30	77	0.03891	0.03618	0.00273	57.41
6	620	1171	0.00848	0.00667	0.00181	38.02
7	7800	15604	0.00326	0.00182	0.00144	30.26
8	30000	36431	0.00249	0.00135	0.00114	28.25
9	1200	2334	0.00637	0.00489	0.00148	31.11
10	650	1214	0.00836	0.00648	0.00188	39.48

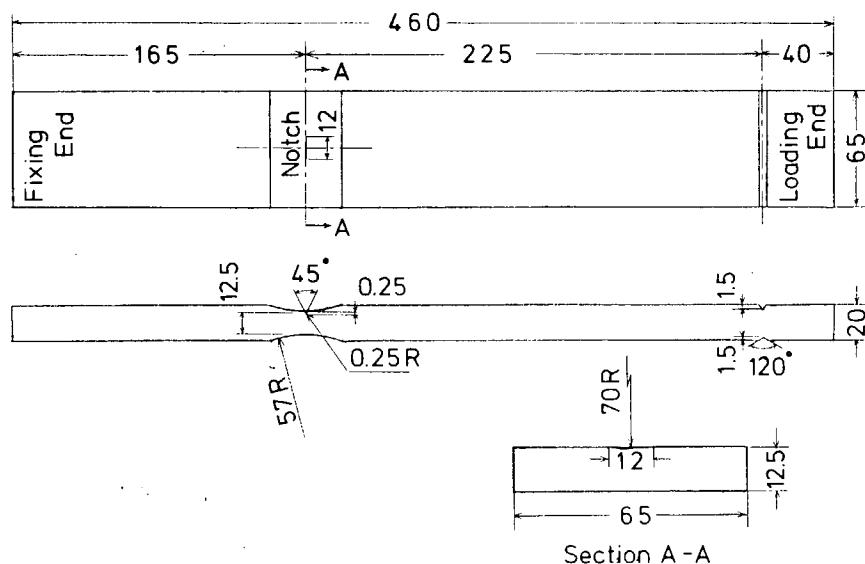


图 7.1.1 Details of Notched Specimen.

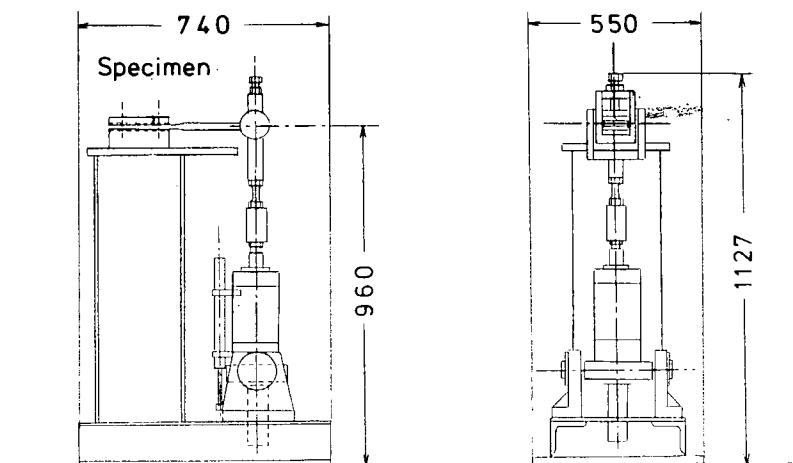


图 7.1.2 Bending Fatigue Testing Machine.

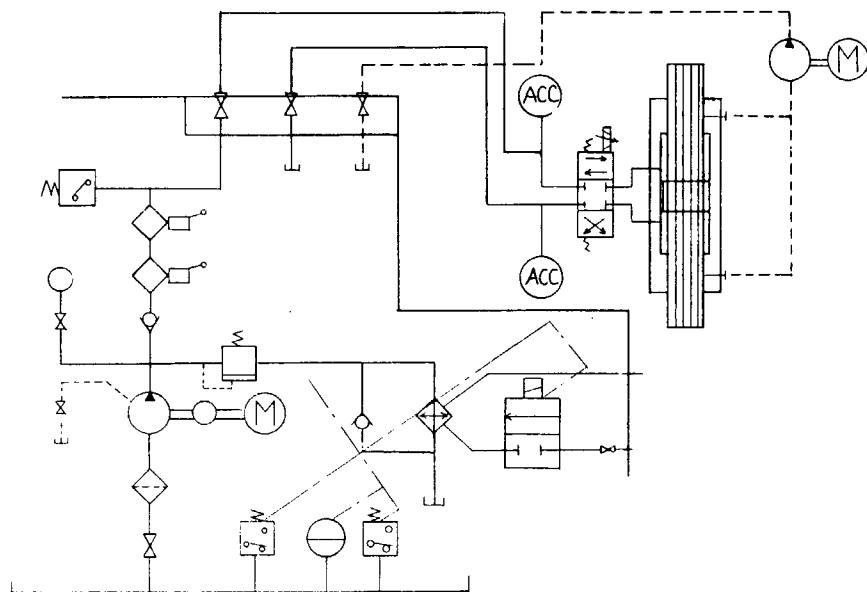


図 7.1.3 Flow Sheet of Testing Systems.

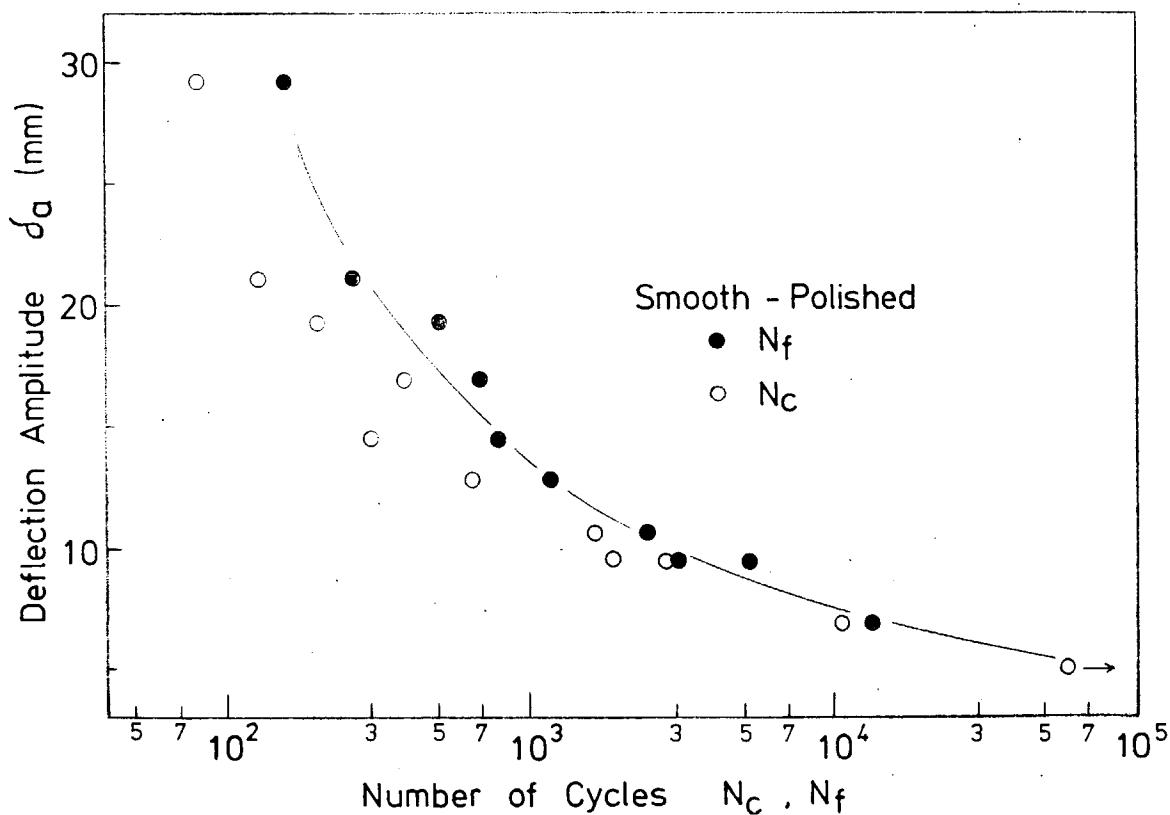


図 7.2.1 $\delta_a - N_C, N_f$ Diagram (4S Series)

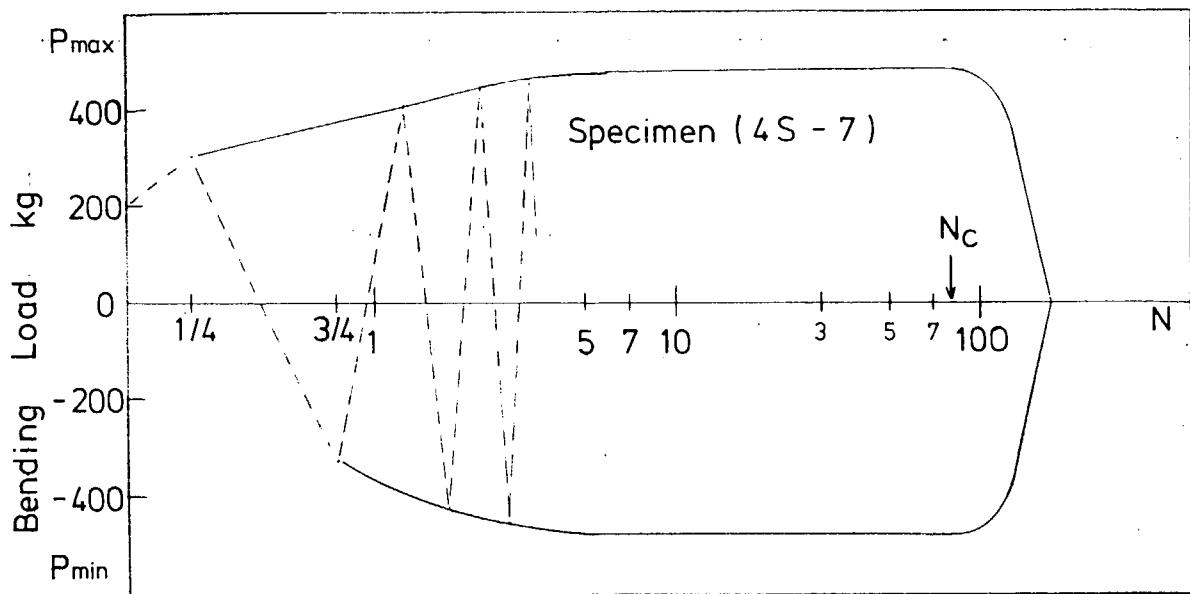


図 7.2.2 Cyclic Characteristics of Bending Load.

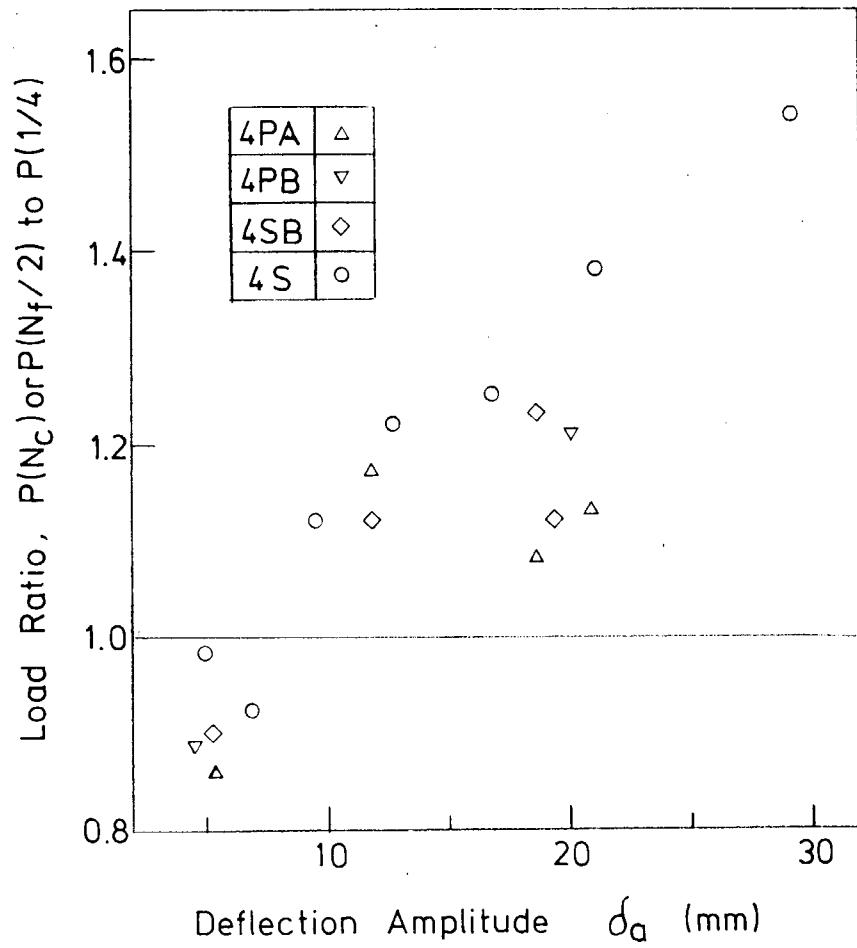


図 7.2.3 Load Ratio versus δ_a .

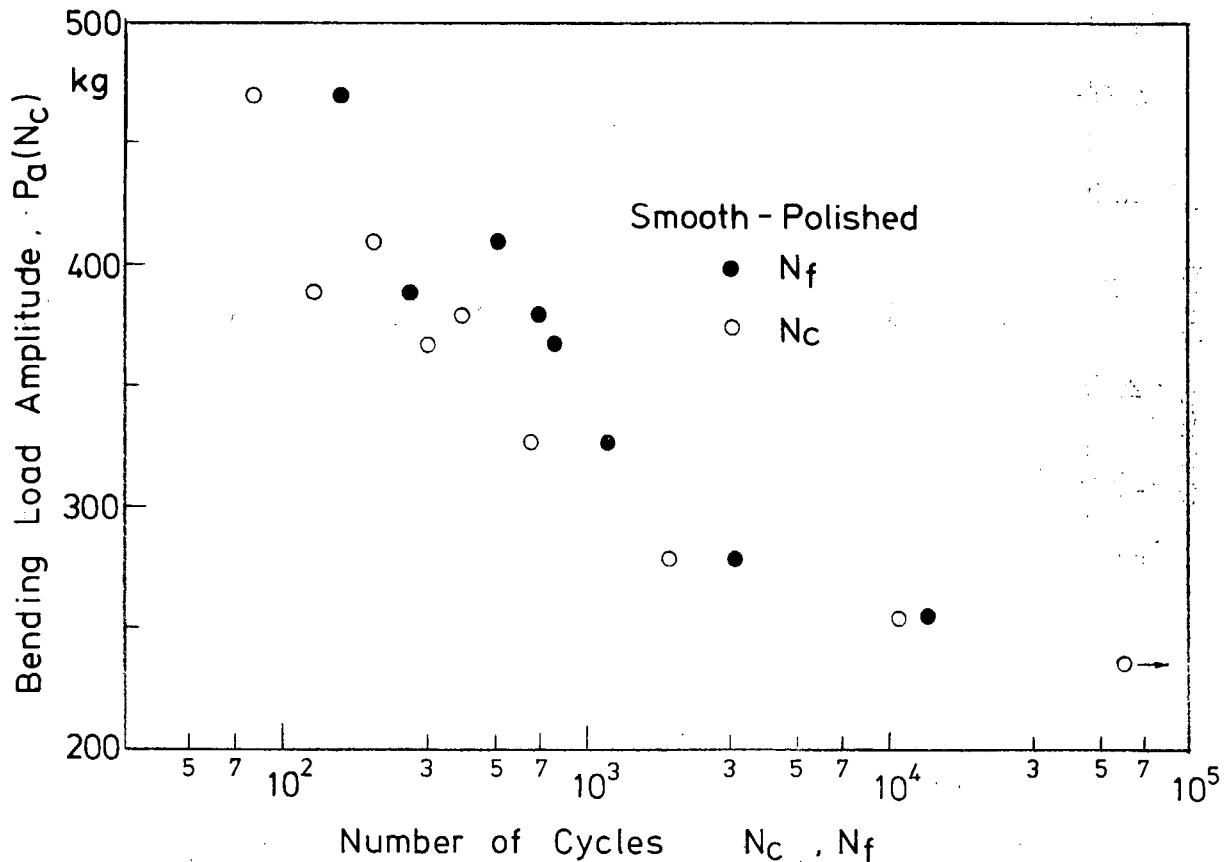


図 7.2.4 $P_a - N_c, N_f$ Diagram (4S Series)

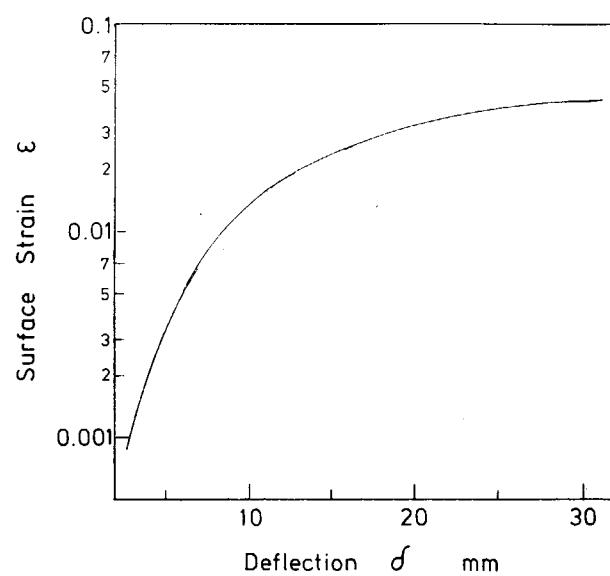


図 7.2.5 $\epsilon - \delta$ Curve by Static Bend Test.

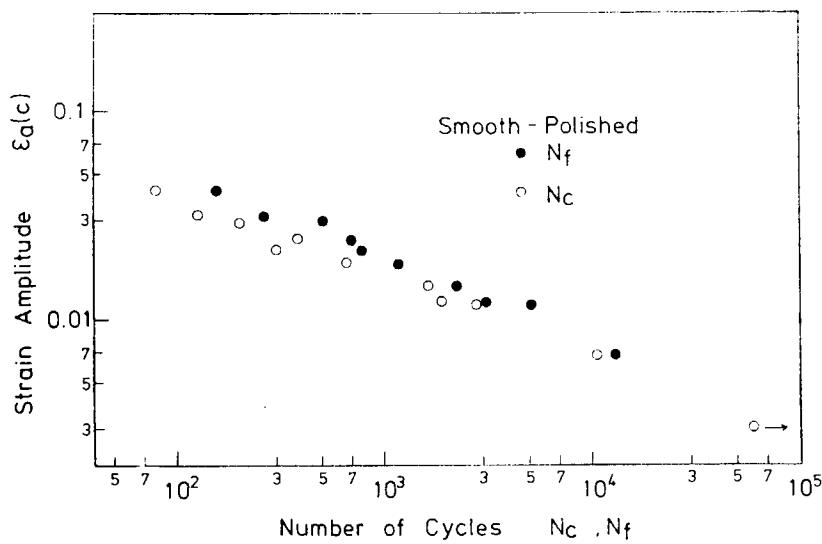


図 7.2.6 $\varepsilon_a(c)$ — N_c, N_f Diagram (4S Series)

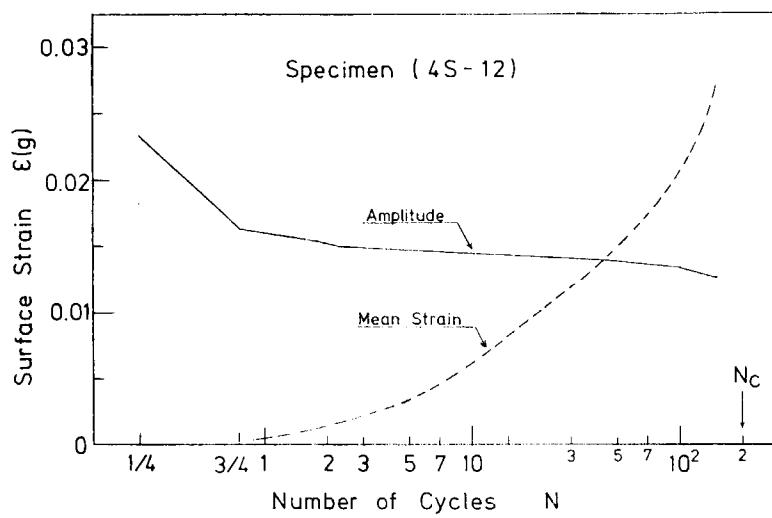


図 7.2.7 Cyclic Characteristics of Measured Strain.

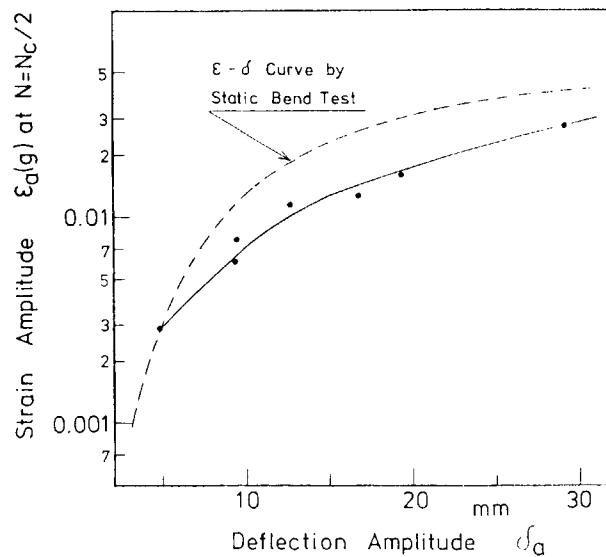


図 7.2.8 Dynamic $\varepsilon - \delta$ Curve.

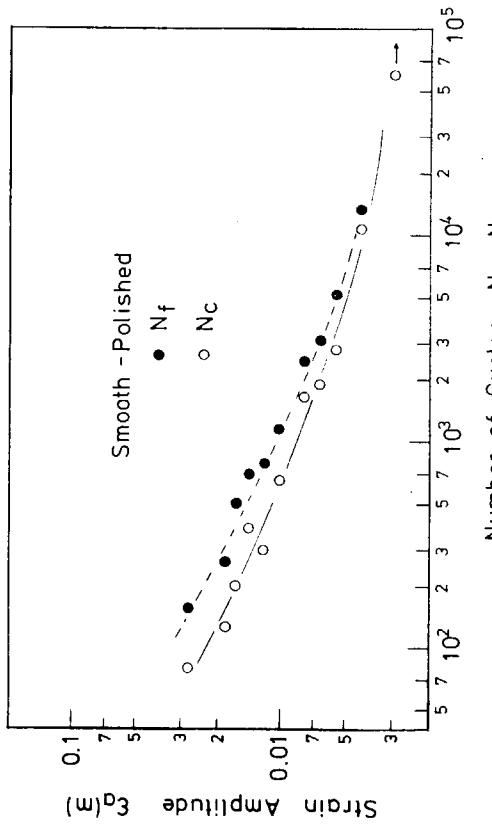


図 7.2.9 ϵ_a (m) - N_c, N_f Diagram (4S Series)

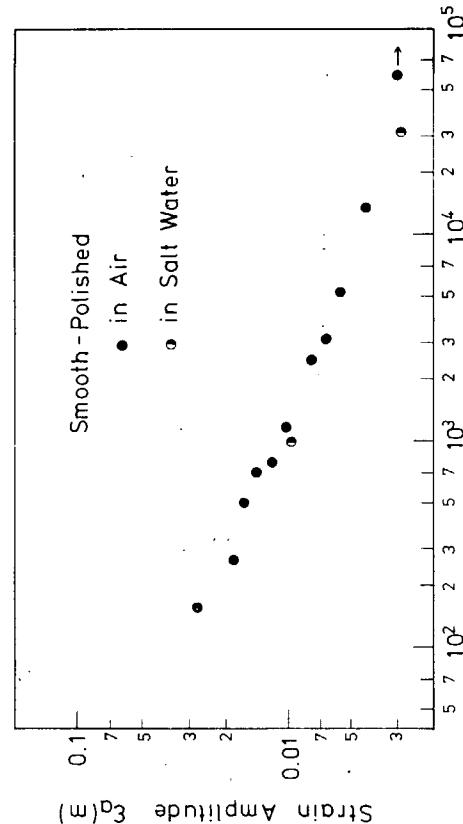


図 7.2.10 ϵ_a (m) - N_f Diagram (4S Series)

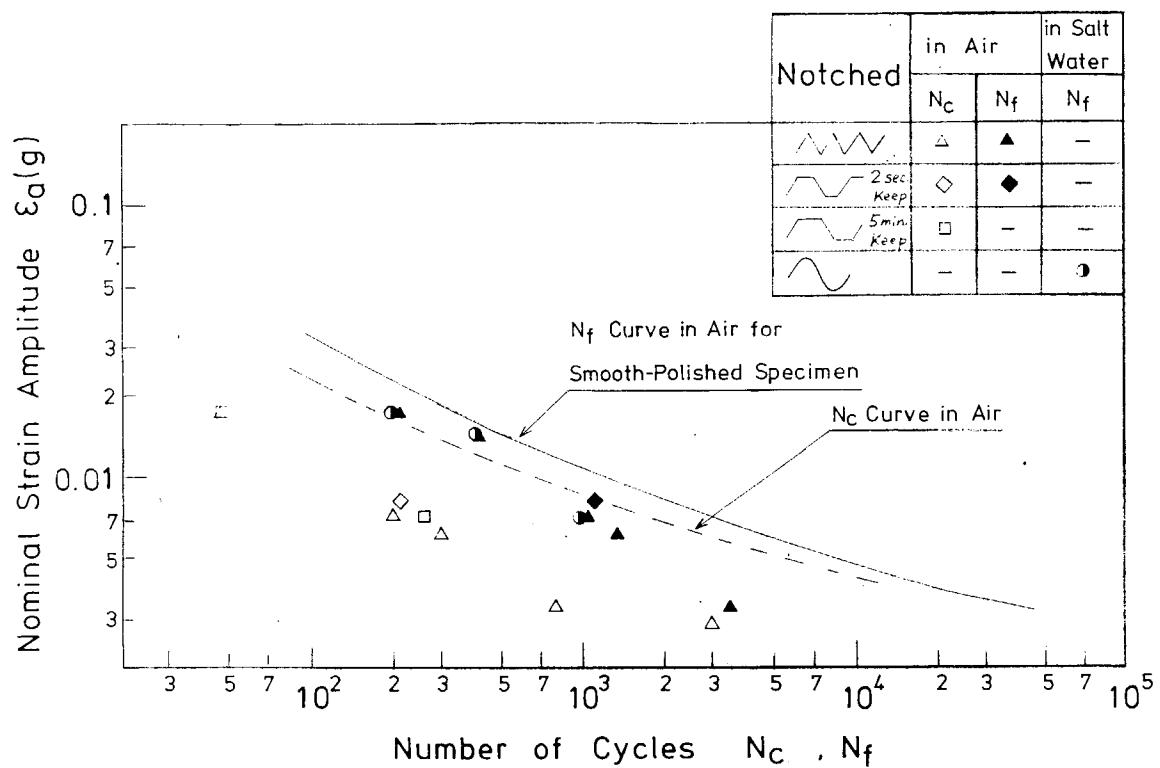


図 7.2.11 ϵ_a (m) - N_f Diagram (4N Series)

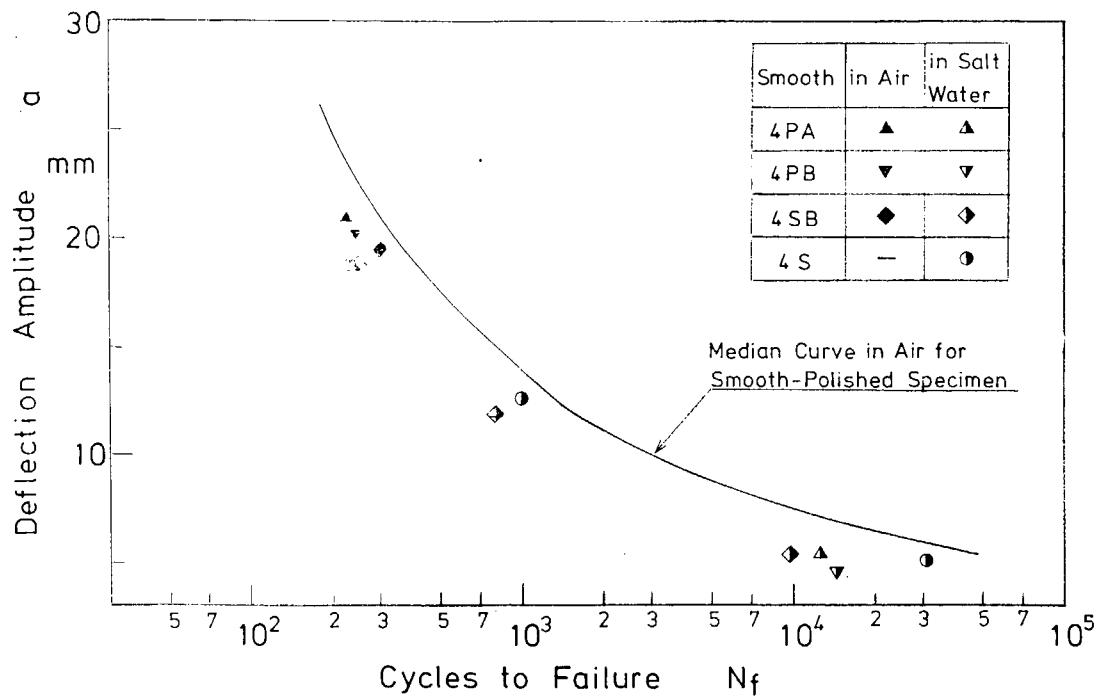


図 7.2.1.2 $\delta_a - N_f$ Diagram (4 PA, 4 PB, 4 SB, 4 S)

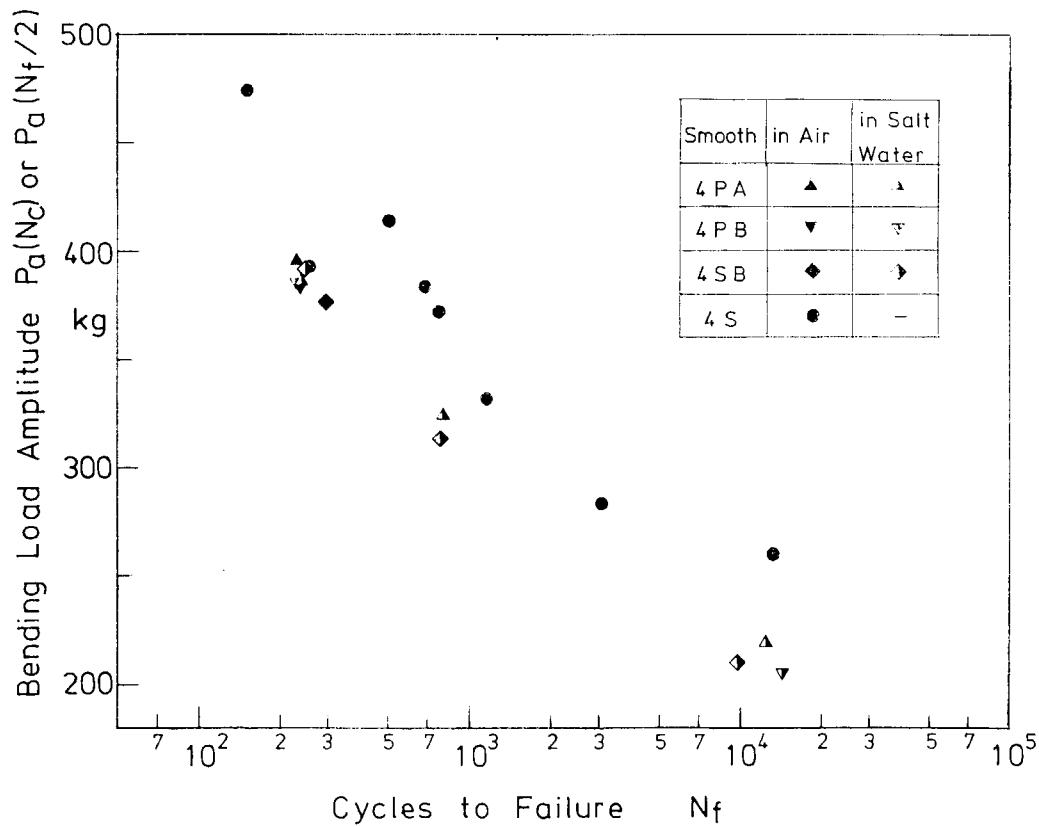


図 7.2.1.3 $P_a - N_f$ Diagram (4 PA, 4 PB, 4 SB, 4 S)

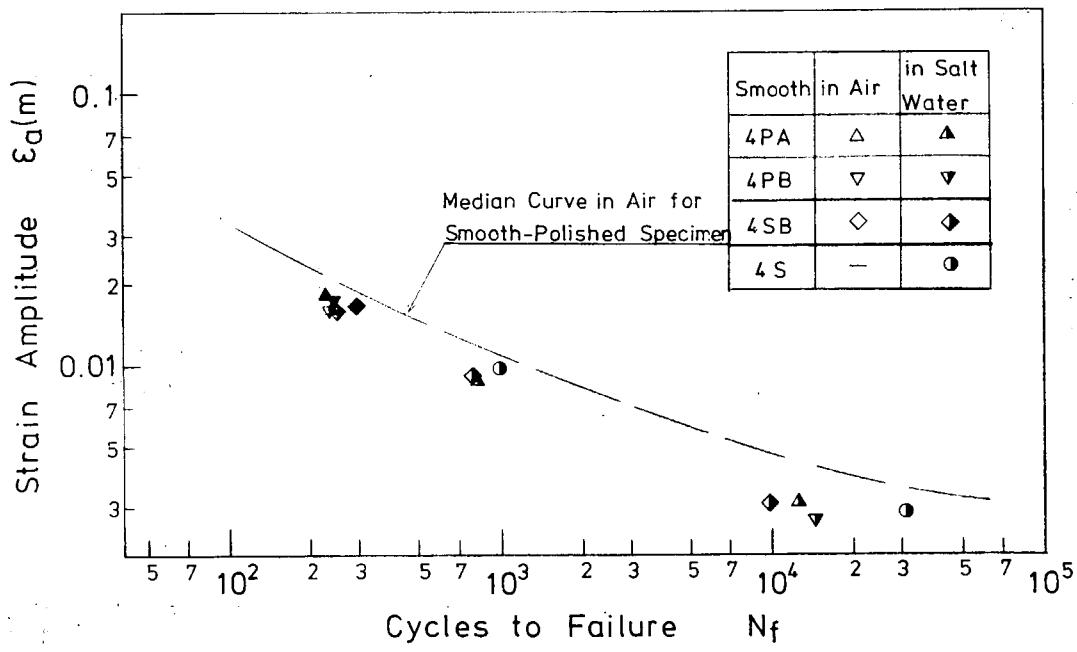


図 7.2.14 ϵ_a (m)- N_f Diagram (4PA, 4PB, 4SB, 4S)

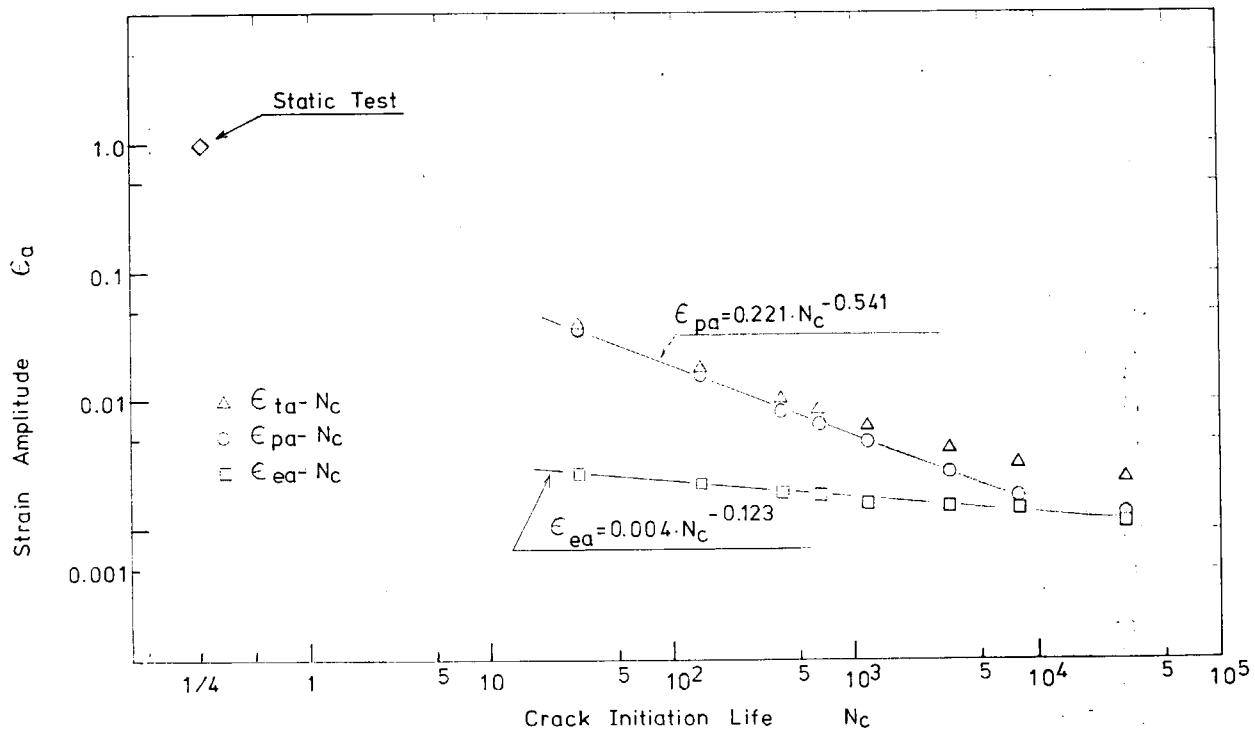


図 7.2.15 ϵ_a - N_c Diagram (Axial Fatigue Test)

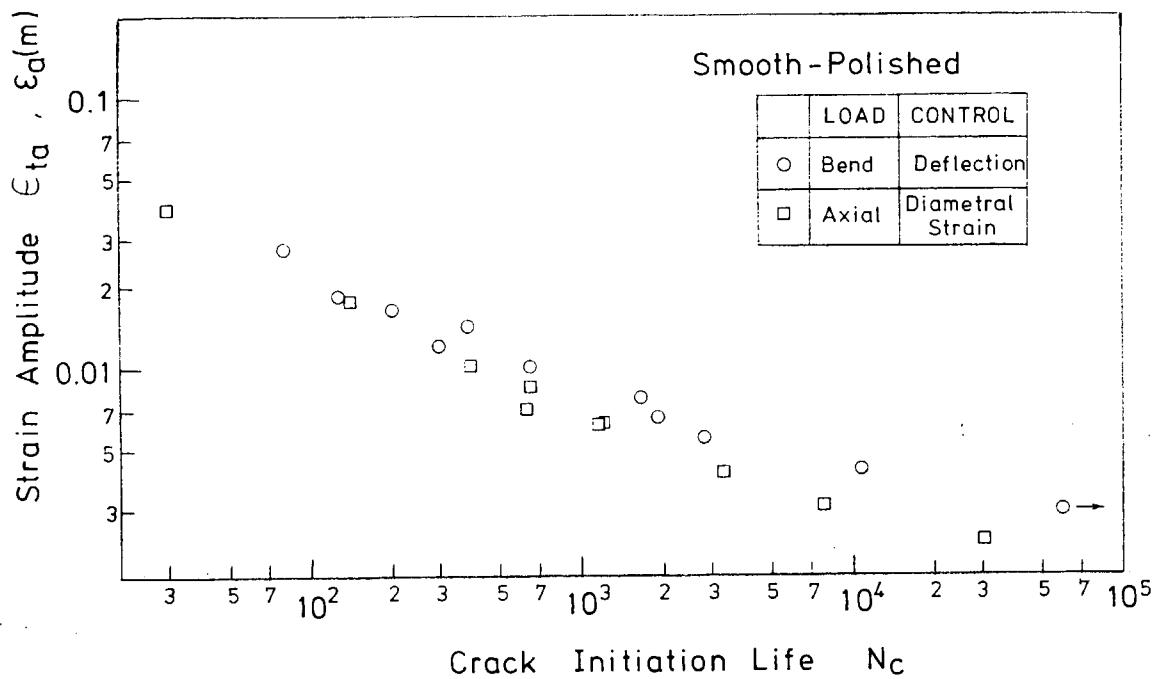


図 7.2.16 Comparison between Axial and Bending Fatigue Test Results.

8. 腐食疲労に及ぼす塗装の効果

各種の腐食防止法は腐食疲労の防止にも役立つと云われているが本研究では塗装の腐食疲労に対する研究の中で次の項目について実験を実施した。

i) 応力繰返し速度の影響

低速でも塗装が腐食疲労に有効かどうか、高電との差異はあるかなどについて比較検討した。

ii) クラックある塗膜の防食効果

実船では航海時、何等かの原因で塗膜にクラックを生じ、これが腐食疲労を受ける可能性がある。そこで、塗装面に入工クラックを入れ防食効果を検討した。

8.1 試験方法

8.1.1 試験片と塗装

供試材は、SM-41鋼板でミルシートによる化学成分および機械的性質を表8.1.1に示す。試験片の形状および寸法は図8.1.1に示されるように“A”、“B”および“C”型の3種類、又試験片表面はサンドブラストを施したもの（サンドブラスト材）、およびサンドブラスト後タルエポキシ塗料（ビスコンM-1000）を二回塗るもの（塗装材）の二種類とし、塗装は塗膜の厚さが約250μになるよう中国塗料株式会社に一括依頼した。

8.1.2 試験機と試験方法

試験にはシエンク型（容量4kg-m, 10kg-mおよび80kg-m）疲労試験機を使用し、両振り平面曲げ（“A”および“B”型試験片）と面内曲げ（“C”型試験片）試験を行った。

試験条件として、本研究では表8.1.2に示される○印の条件を選んだ。これらを行うことにより応力繰返し速度、クラックある塗膜の影響の他に試験片寸法、表面状況、荷重状態等の影響についても一部検討することができる。腐食疲労試験では、試験片中央部をビニール袋で囲み、中に3%塩水（常温）を満し、約100cc/minの流量で流して実験を行い、試験片の電位は飽和甘汞電極を基準としてこれに対して計測した。又試験開始は、塩水を注入後、電位の安定する約30分後とした。

8.2 試験結果およびその考察

8.2.1 “A”型試験片の結果

まず、圧延のままの試験片（圧延材）の中央部に歪ゲージを貼付し、平面曲げ（両振り）応力を手動で変化させ、応力（ δ_a ）～歪（ ϵ_a ）関係を調べた結果を図8.2.1に示す。

次に、圧延材とサンドブラスト材で疲労試験を行い、その $\epsilon_a \sim N_f$ 関係を図8.2.2に示した。大気中では両者とも差異は無いが腐食液中（圧延材は人工海水中）では圧延材と比べてサンドブラスト材の寿命低下が若干認められた。圧延材では低応力になると同時に寿命が減少する。これは表面処理の影響と考えられる。

サンドブラスト材の塗装材の各種条件下での疲労試験結果を図8.2.3および4に示す。サンドブラスト材の場合、高速低速繰返しとも腐食疲労による寿命低下が応力の低い程、顕著である。一方、塗装試験片の場合には、その防食効果が現われ寿命は延びて大気中の寿命に近づいてくる。これらの関係を試験片の電位と対照した図（3.000cpm）が図8.2.5および6である。サンドブラスト材の電位は、試験開始と同時に急激に上昇し、約3～4分後（ $N=9 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^4$ ）で落着き、以後はしだいに降下している。これを見ると高速繰返し応力による振動で塩水が搅拌され試験片表面の状態が変化するが、約3～4分後にその状態で安定し、以後は腐食の進展につれ電位が降下していくためと考えられる。これに対して、図8.2.7に示される低速（20cpm）の場合は高速時に比べて塩水搅拌が少ないので、試験開始時の電位上昇は見られない。

塗装材は無塗装とは、かなり違った電位の推移が観察された。図 8.2.6 の XI-121 の試験片では高速繰返しにもかかわらず試験開始時の電位の上昇が見られず、 $N = 3 \times 10^4$ 頃に、サンドプラス材の試験開始時と同様な電位の急上昇が見られる。これは塗膜の一部が破れたためと思われる。その後、一時落着くが $N = 2.7 \times 10^5$ 頃に再び塗膜が破れ電位が上昇して最初の変化と同じようなパターンを示しながら破断に至っている。XI-124、XI-123 の試験片では試験途中まで電位が安定せず、塗膜が破れ始めたと思われるところで電位の計測が可能となった。これは、本実験に使用した電位測定器の入力インピーダンスが $10^{10} \sim 10^{11}$ Ω 程度であるのに対して正常な塗膜の交流インピーダンスが 1 KHz 時で数 MΩ～数十 MΩ なのでインピーダンス整合が完全に行われず測定が不安定なるが塗膜が破れるとそのインピーダンスが下がり計測が可能となった為と思われる。このことから試験開始時から電位の測定が可能であった XI-121 試験片には試験片の一部にプローホール等の欠陥が最初からあったものと推定される。

8.2.2 "B" 型試験片の結果

試験片寸法の腐食疲労におよぼす影響等を、検討するため試験片の幅を "A" 型試験片の 2 倍にし、応力繰返し速度を 300 cpm および 1,450 cpm として試験を行った。その結果、得られた $\epsilon_a \sim N_f$ 曲線を図 8.2.8 に示す。腐食疲労寿命は低応力ほど低下し、"A" 型試験片と類似した傾向である。

8.2.3 "C" 型試験片の結果

船体構造部材にはその構造上、面内曲げによる繰返し応力を受けると考えられるものがある。そこで "C" 型試験片で面内曲げ疲労試験（両振り）を大気中と 3 % 塩水中で行った。応力繰返し速度は 300 cpm で、読み取り顕微鏡により上縁および下縁からのクラックの進展状況を調べた。図 8.2.9 に $\epsilon_a \sim N_f$ 線図を示す。ここで、歪は図 8.2.1 で示されるように切欠部底に貼付した歪ゲージにより計測されたもので、応力～歪曲線も同図に示す。又、図 8.2.10 ～ 14 は、計測したクラック長さ $a \sim N$ の関係を示す図である。

8.2.4 繰返し速度の影響

"A" 型試験片について、繰返し速度 200 cpm と 3,000 cpm の場合を同一スケールで、 $\epsilon_a \sim N_f$ 曲線を表わしたもののが図 8.2.15 である。大気中、3 % 塩水中ともに速度効果が現われ、いづれも低速のほうが短寿命となっている。又、図 8.2.15 の横軸を時間で表わすと、図 8.2.16 のようになり、低速のほうが破断まで長時間要し、寿命で整理した場合と逆転する。

"B" 型試験片についても同様な試験 (300 cpm と 1,450 cpm) を大気中で行い、図 8.2.8 に示してあるが、"A" 型と類似した結果が得られた。

8.2.5 クラックある塗膜の防食効果

実船では塗装面にいろんな原因でクラックが入り、そこから腐食が進み腐食疲労と結びつく可能性がある。そこで、塗膜に人工的にケガキ針で金属面に達するクラックを試験片中央部に入れ、腐食疲労試験を行った結果を図 8.2.4 の△印 (片面にクラック) と△印 (両面にクラック) で示す。その寿命はクラックの無い塗装材と同様な傾向を示すが大気中の疲労限以下でも破断している。(XI-134、XI-133) 低応力で長時間繰返すと、塗膜の破れている面から腐食が進行し、防食効果が薄れてくるためであろう。これらと同じ程度の応力レベルで試験を行って途中で中止した塗装材 (XI-123、124、125、120) について塗膜面を顕微鏡で観察すると断面の幅の角縁に近い部分に微小クラックらしきものが数箇所に見られ、試験を継続していれば、破断したであろうと推定される。

8.2.6 試験片寸法の影響

"A" 型試験片とその振幅を 2 倍にした "B" 型試験片の疲労試験の結果を比較したものを図 8.2.17 (大気中) および 18 (3 % 塩水中) に示した。応力繰返し速度がほぼ等しければ、大気中、塩水中とも $\epsilon_a \sim N_f$ 曲線はほぼ一致するようであり、この程度の板幅の違いによる寸法の影響は無いと云える。

8.2.7 荷重方法の影響

平面曲げと面内曲げによる結果を $\epsilon_a \sim N_f$ 曲線で表わすと、図 8.2.19 および 20 のようにほぼ一致し、荷重方法に

よる差異は見られない。

8.3 結 言

以上のようにSM-41鋼板に、サンドブラストを施した後タルルエポキシ系塗料を塗装し、腐食疲労に及ぼす塗装の効果を低速高速繰返し応力下で検討した結果、次のようなことがわかった。

- 1) サンドブラスト処理したままの材料の疲労強度は圧延のままの材料のそれに比べると大気中では略々等しいが、3% 塩水中では低下する。
- 2) 塗装による防食効果は応力繰返しが低速でも高速でも認められ、比較的高い応力レベルでは大気中の疲労寿命に近づく。
- 3) 応力繰返し速度の影響は、大気中に於ても3%塩水中に於ても現われ、繰返し数(N_f)で整理するといづれも低速のほうが低寿命となる。
- 4) 塗表面にクラックある試験片の疲労寿命は、高応力レベルではクラックの無い塗装材の疲労寿命と大差ないが低応力レベルでは、腐食の影響を受けて破断し、腐食疲労の $\epsilon_a \sim N_f$ 線図が、長寿命側は移動したような結果を与えるように見える。
- 5) 試験片の幅を2倍にした試験片を用いても、応力繰返し速度がほぼ等しければ $\epsilon_a \sim N_f$ 曲線はほぼ一致する。
- 6) 試験方法が面内曲げでも平面曲げでも略々等しい $\epsilon_a \sim N_f$ 線図を与える。

表 8.1.1 供試材の化学成分および機械的性質

鋼種	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質		
	C	Si	Mn	P	S	σ_Y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	ϵ (%)
SM-41	0.14	0	0.49	0.01	0.014	31.7	46.6	42.0

表 8.1.2 試験条件

種類	試験片 形狀	繰返し 速度 f cpm	表面処理 (サンド ブラスト)	塗装	環境	
					大気中	3%塩水中
平 面	A	20	無	無	○	○*
			有	無	○	○
		3,000	有	有	—	○
	B	30	無	無	○	○
			有	有	—	○**
		1,450	有	無	○	○
面 内 曲 げ	C	30	無	無	○	○
			有	無	○	○
			有	有	—	○

* 人工海水中、** 塗装面に入工クラック有る場合を含む

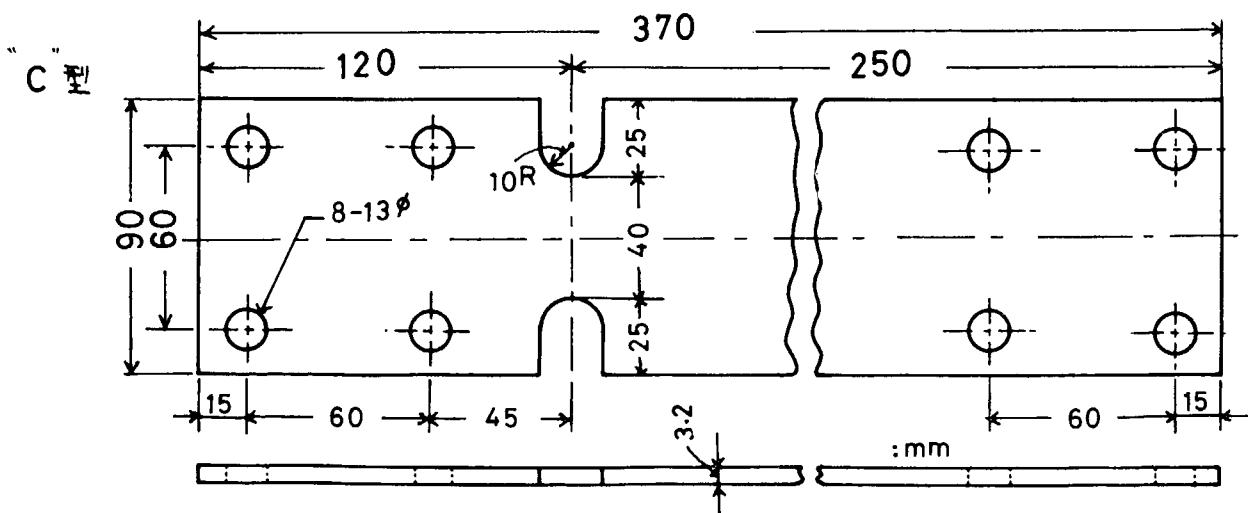
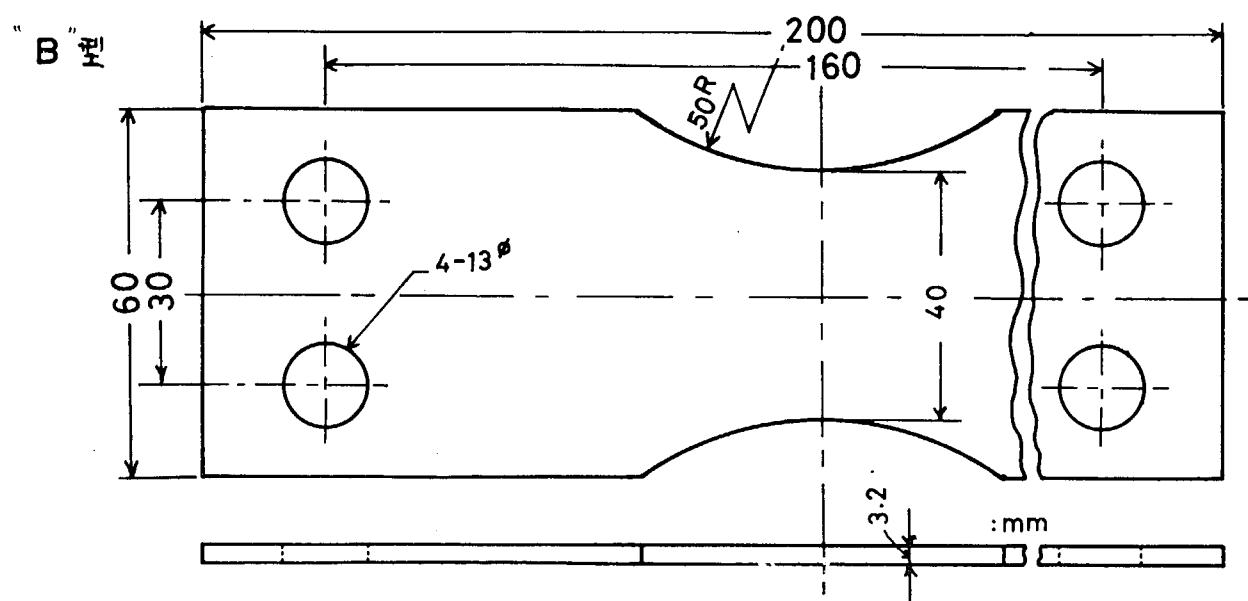
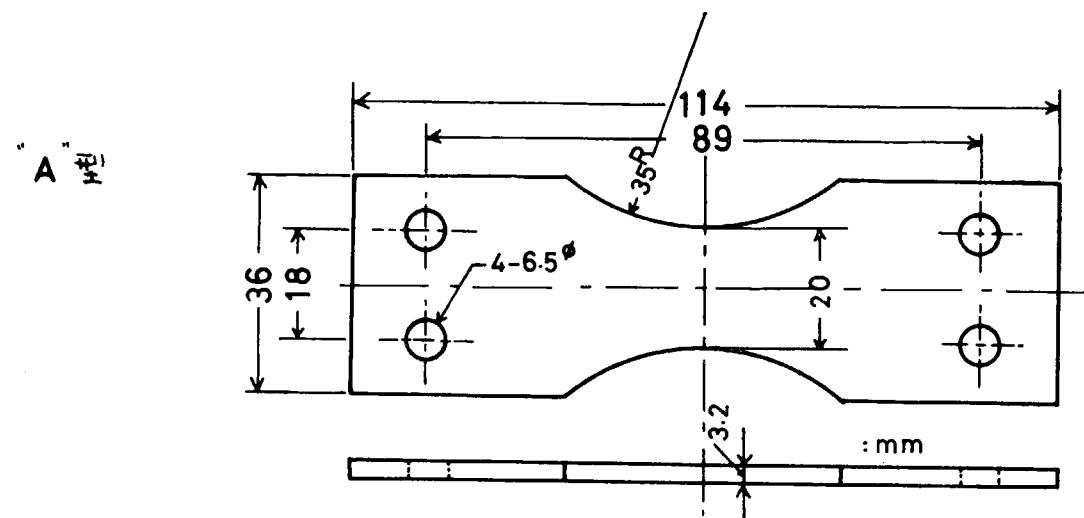


図 8.1.1 試験片の寸法と形状(A型、B型、C型)

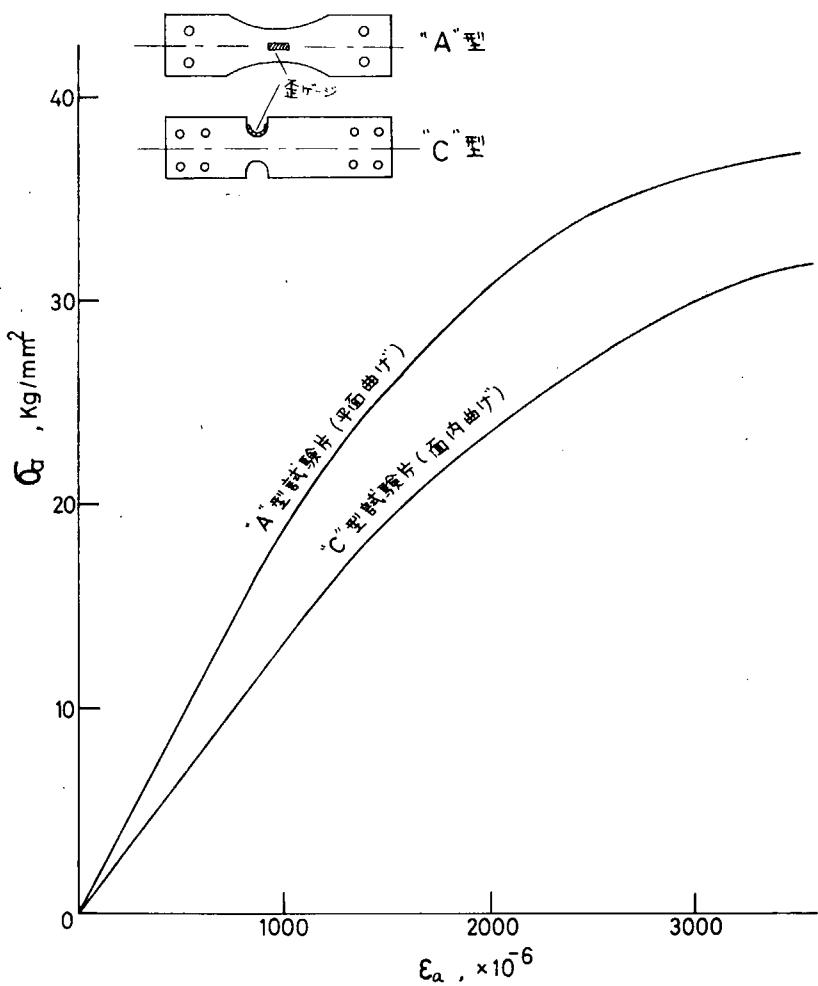


図 8.2.1 公称応力～歪線図

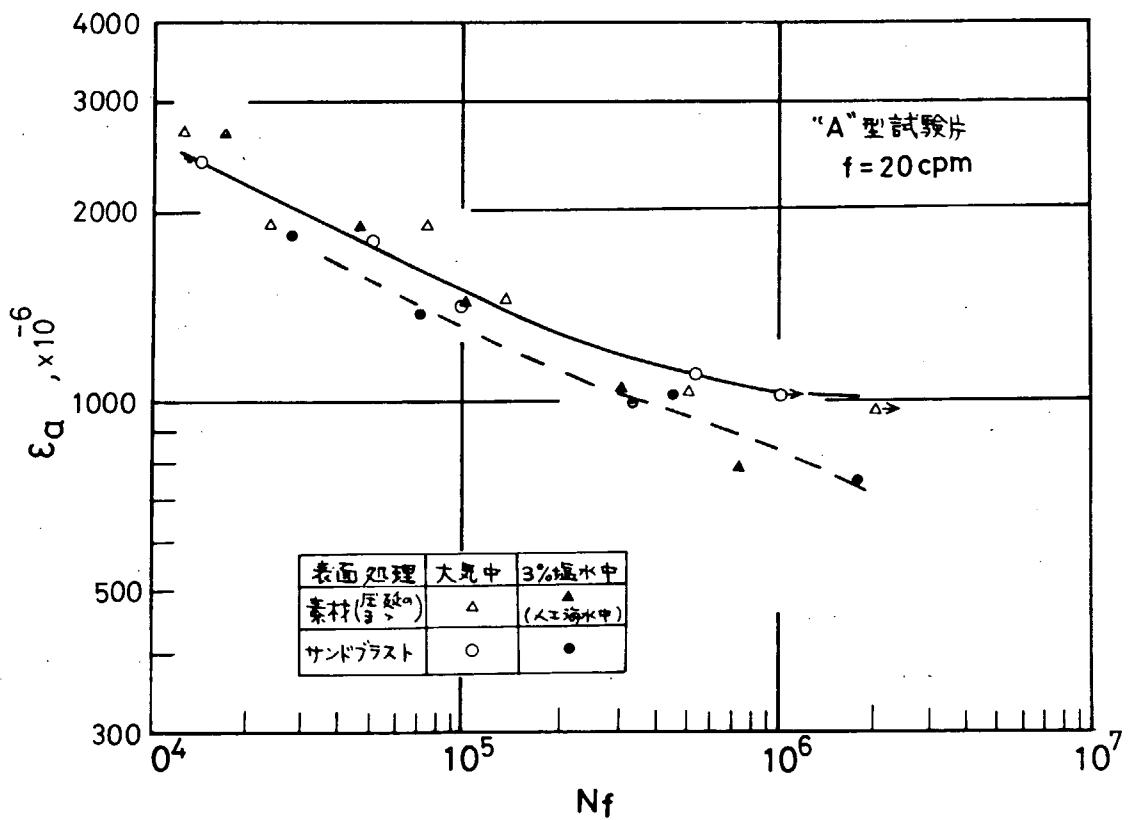


図 8.2.2 圧延材とサンドブラスト材の $\epsilon_a \sim N_f$ 線図

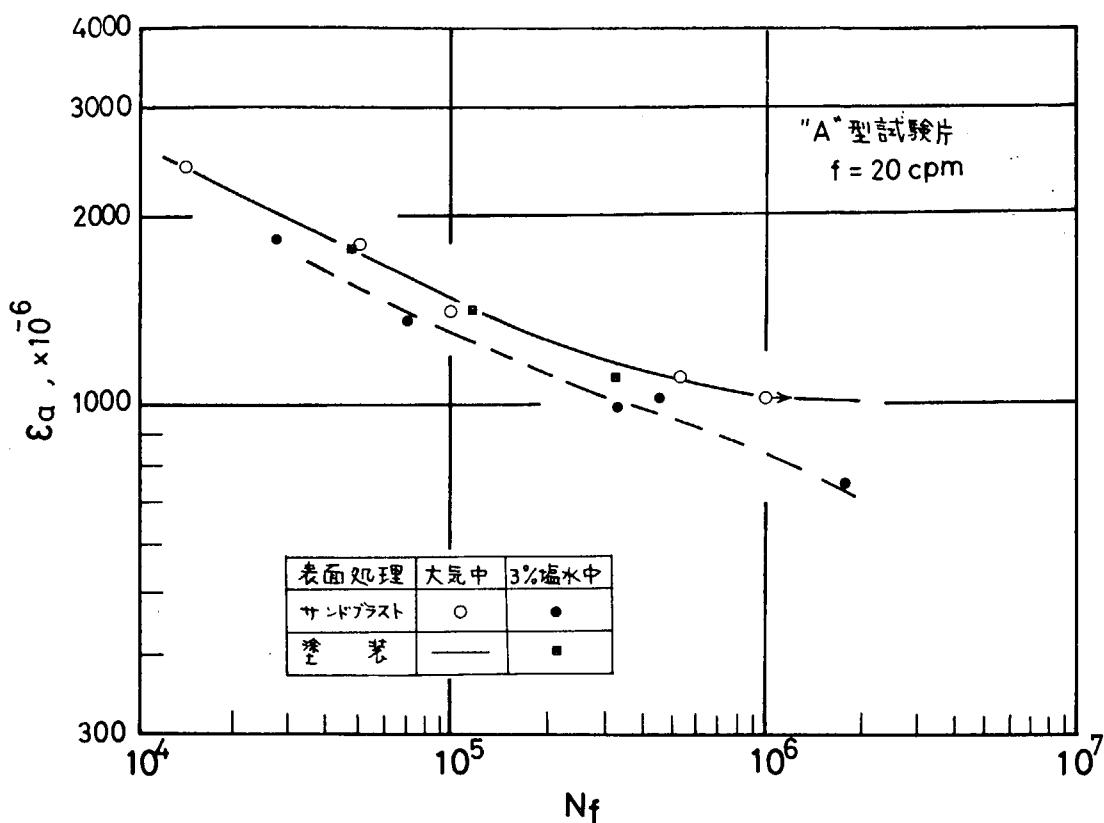


図 8.2.3 "A"型試験片の $\epsilon_a \sim N_f$ 線図(低速)

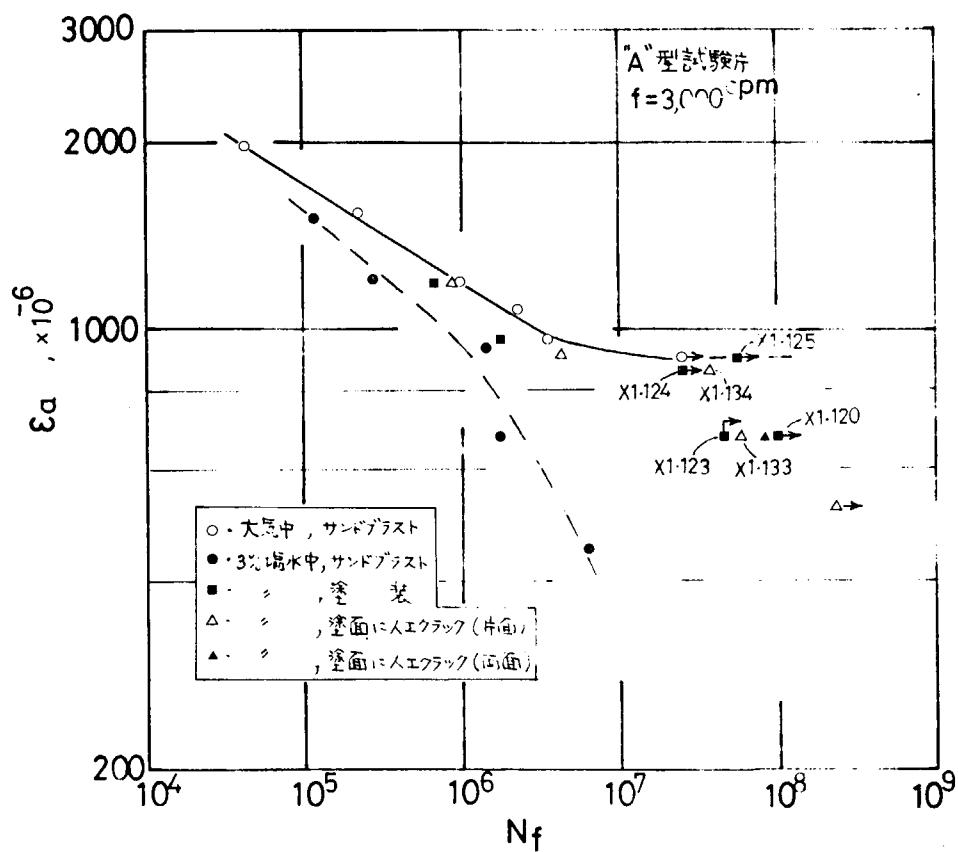


図 8.2.4 "A"型試験片の $\epsilon_a \sim N_f$ 線図(高速)

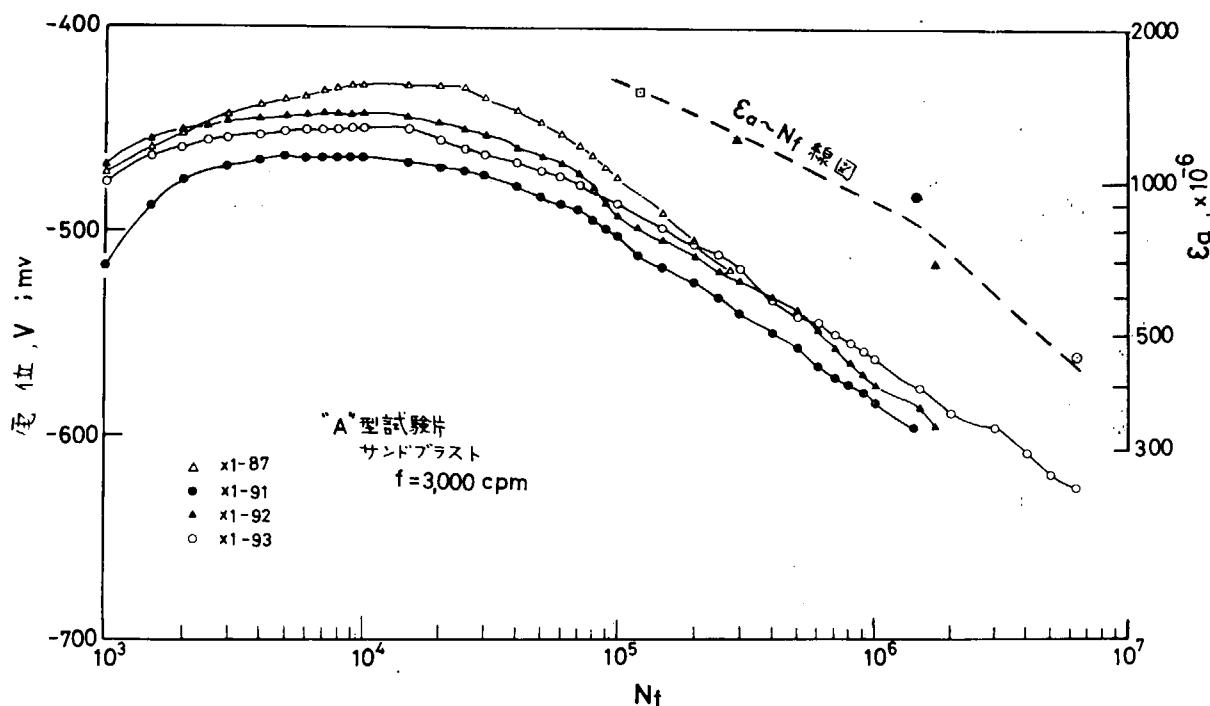


図 8.2.5 腐食疲労試験中の試験片の電位(サンドblast材)

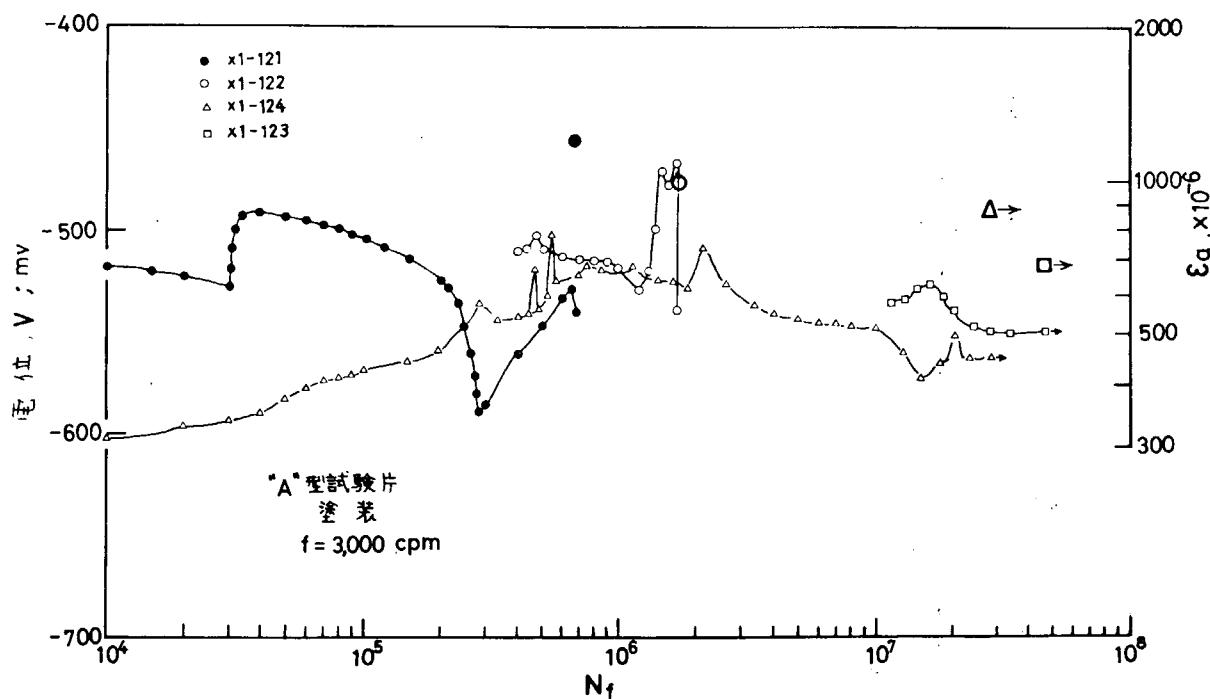


図 8.2.6 腐食疲労試験中の試験片の電位(塗装材)

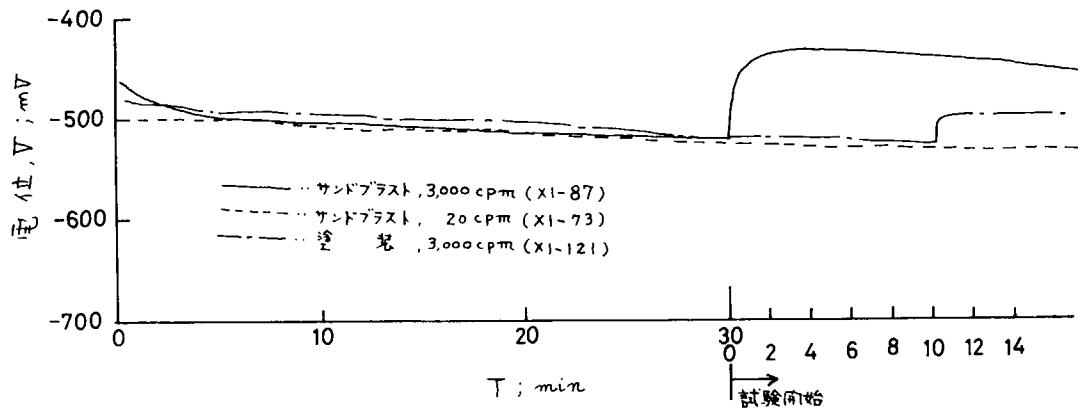


図 8.2.7 腐食疲労試験開始時の試験片の電位変化

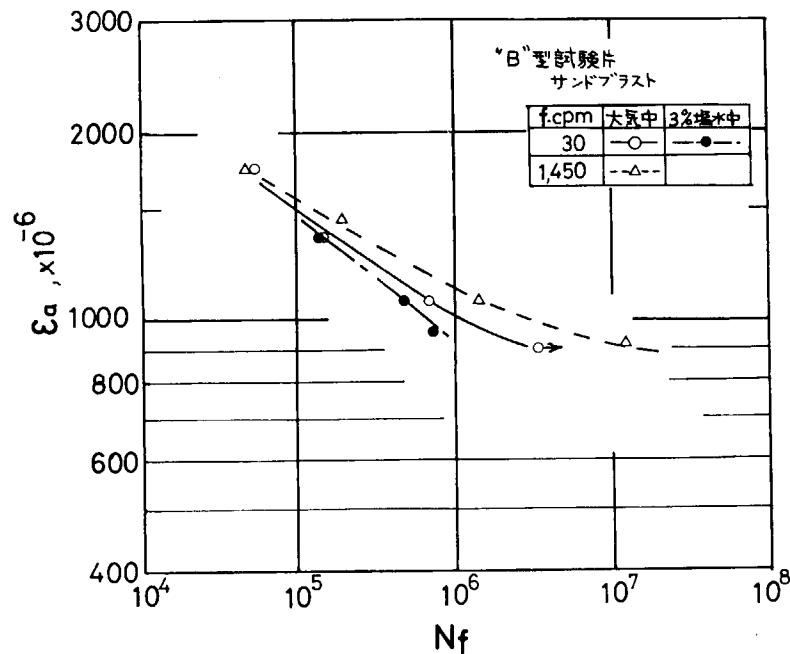


図 8.2.8 “B”型試験片の $\epsilon_a \sim N_f$ 線図

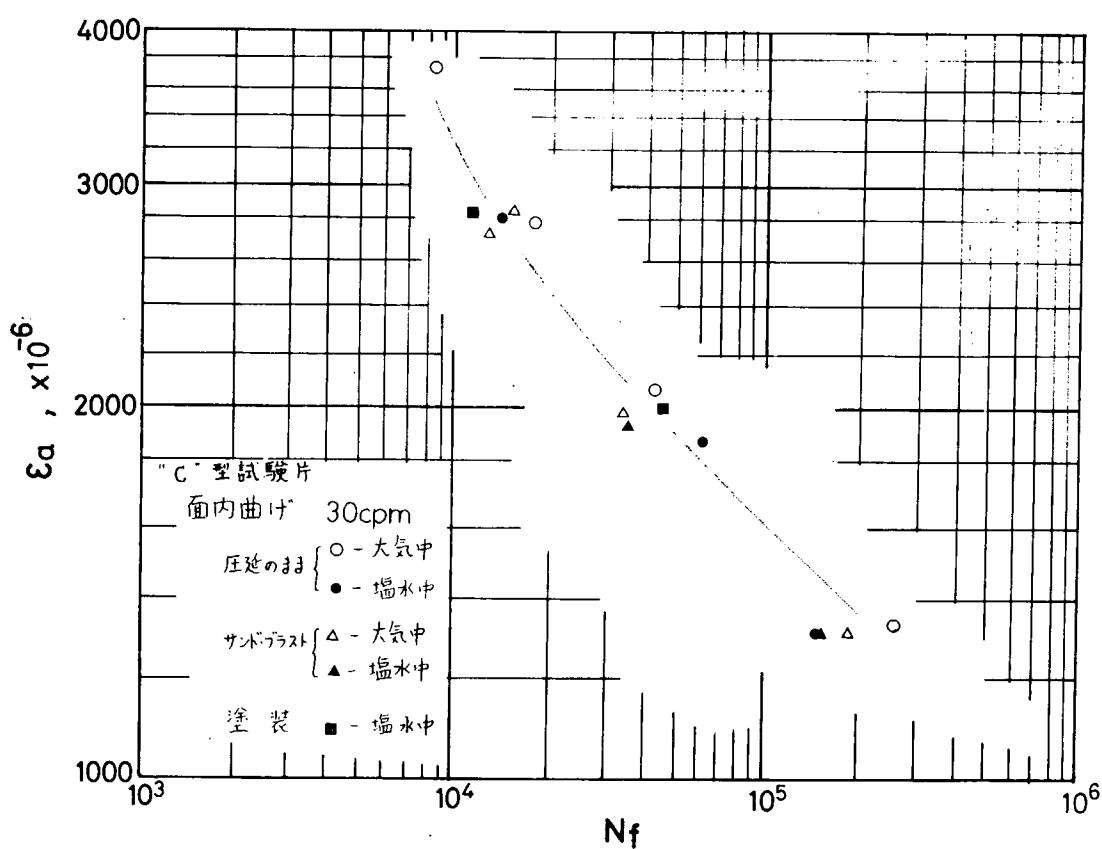


図 8.2.9 "C"型試験片の $\epsilon_a \sim N_f$ 線図

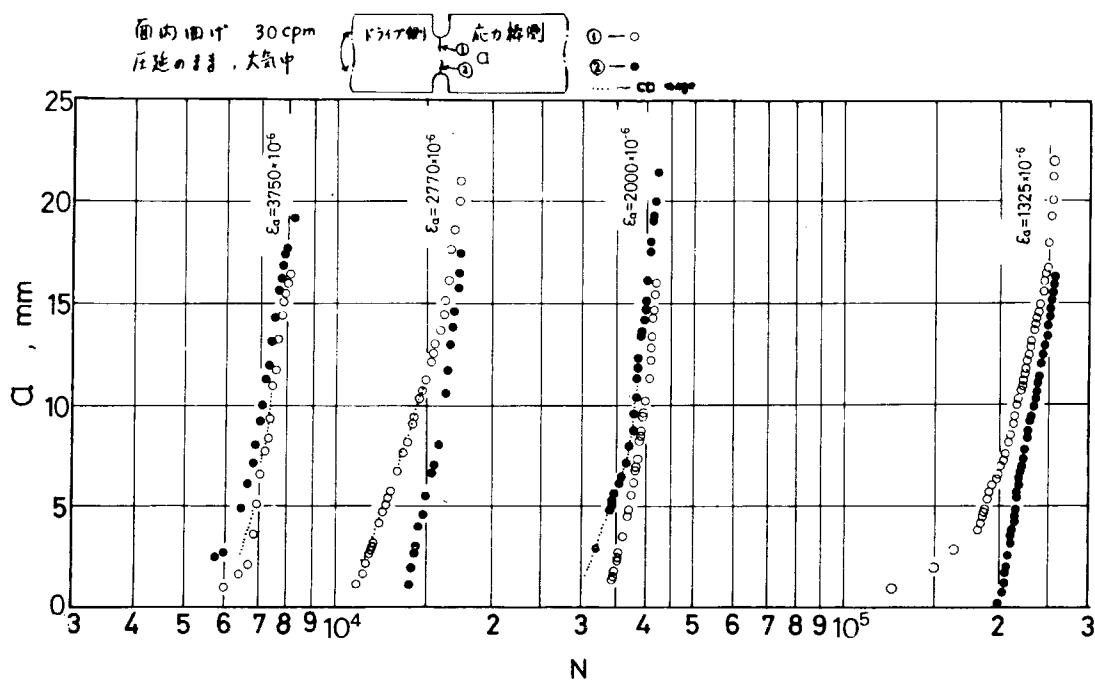


図 8.2.10 "C"型試験片の $a \sim N$ 曲線(圧延材、大気中)

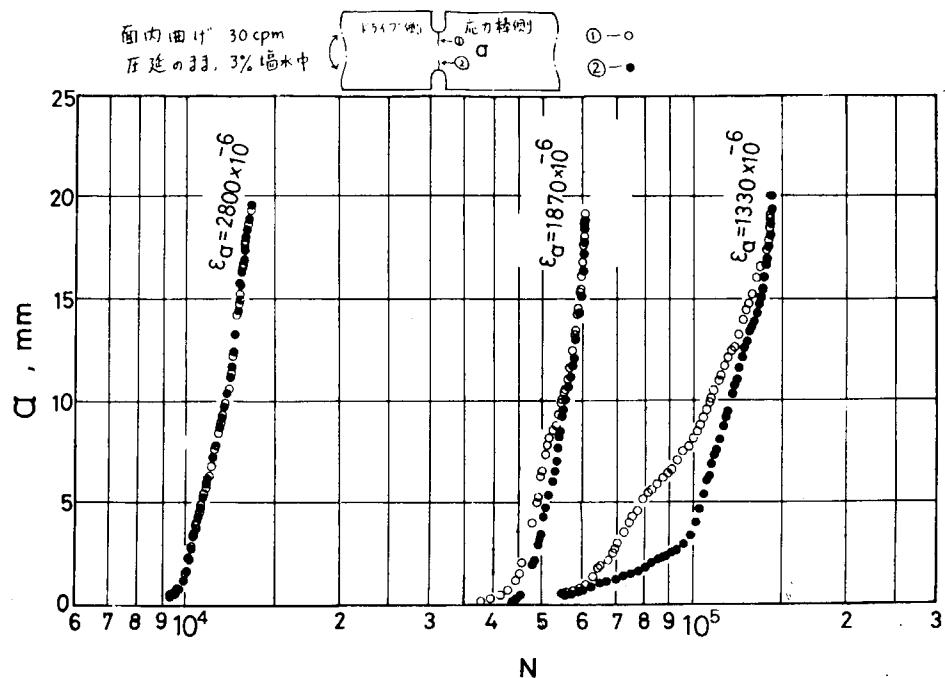


図 8.2.1.1 “C”型試験片の a～N 曲線(圧延材、3% 塩水中)

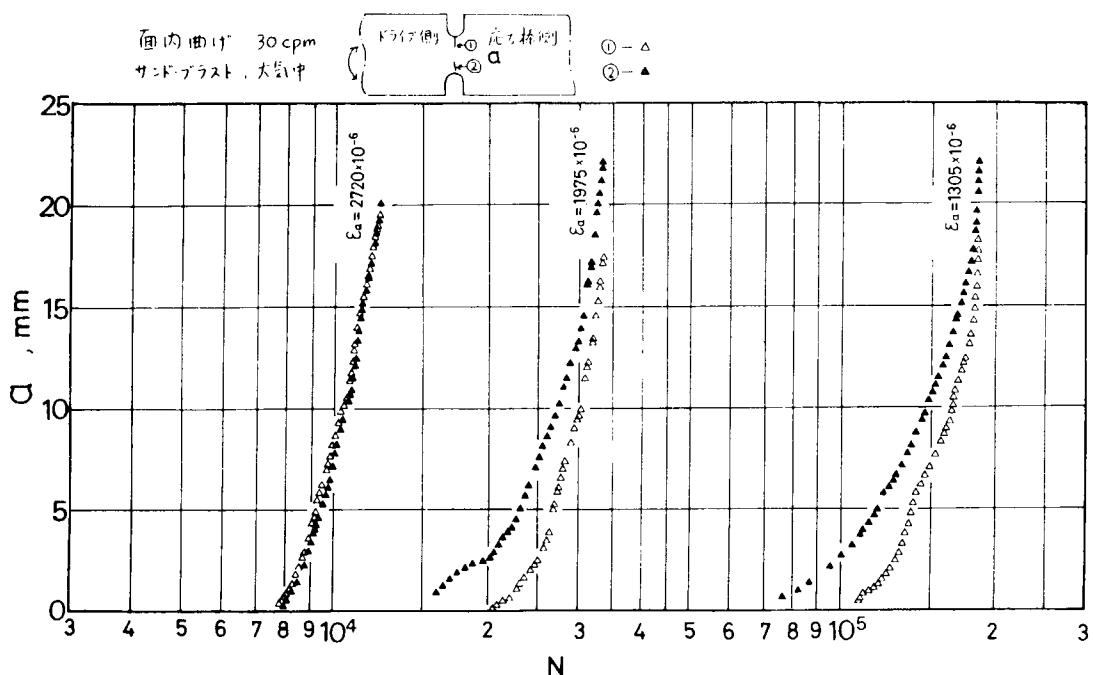


図 8.2.1.2 “C”型試験片の a～N 曲線(サンドブラスト材、大気中)

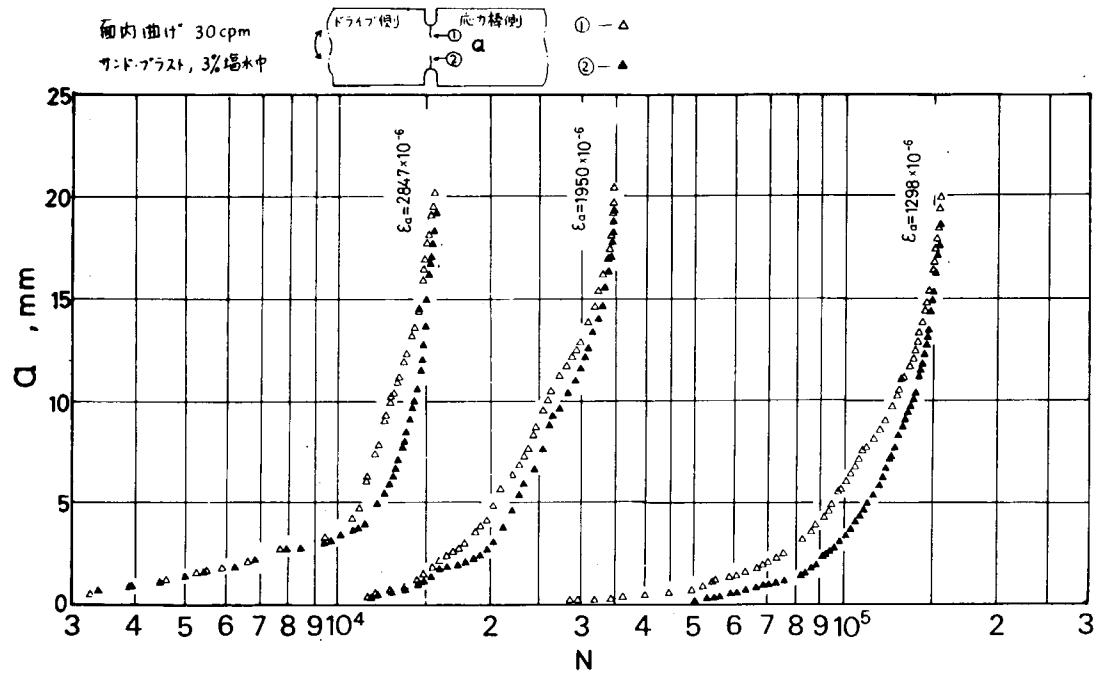


図 8.2.1.3 “C”型試験片の a～N 曲線(サンドブラスト材、3% 塩水中)

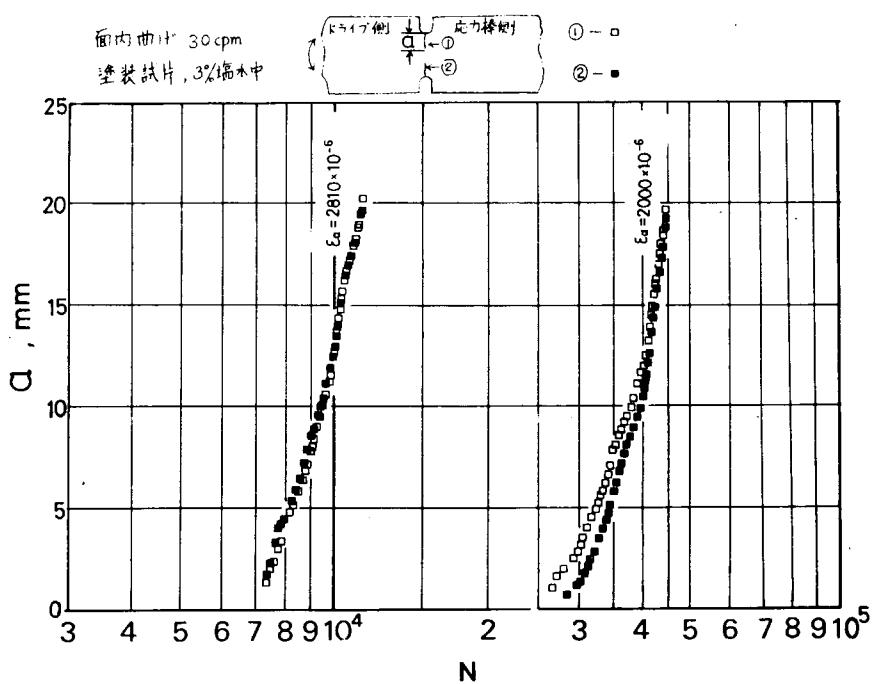


図 8.2.1.4 “C”型試験片の a～N 曲線(塗装材、3% 塩水中)

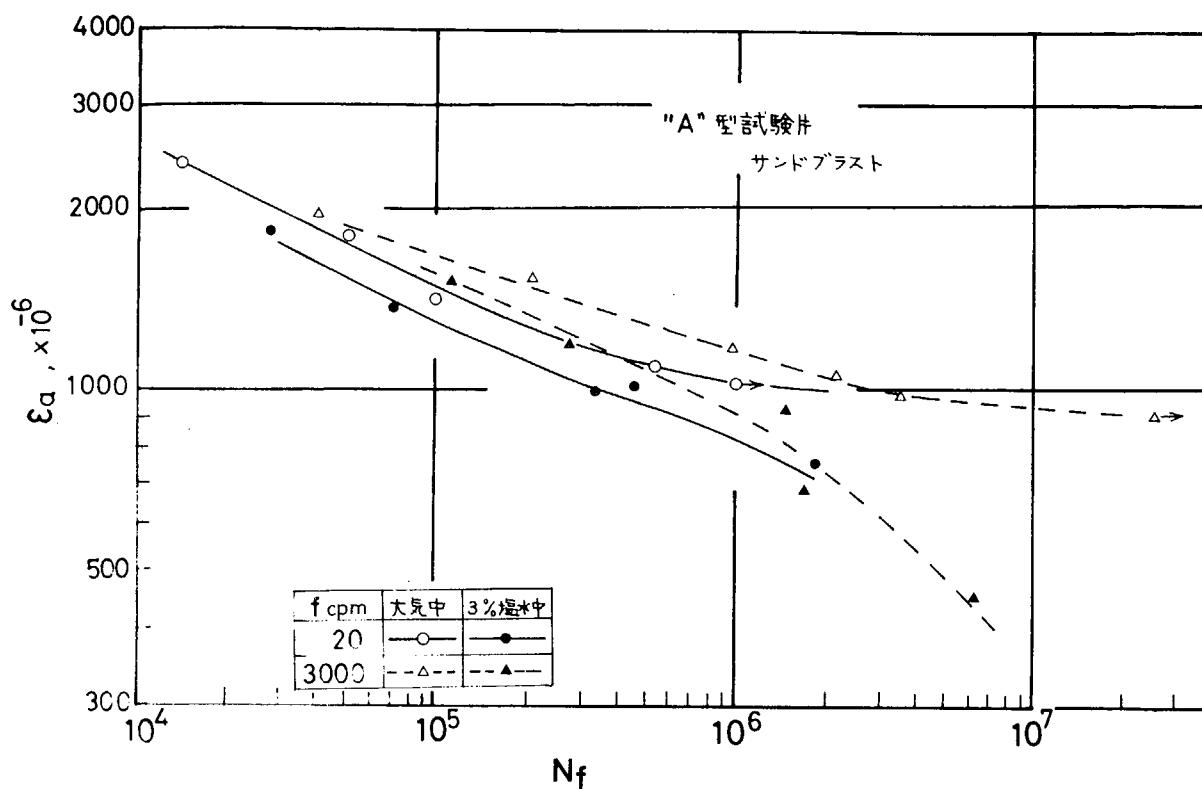


図 8.2.1.5 応力繰返し速度の影響 ($\varepsilon_a \sim N_f$ 線図)

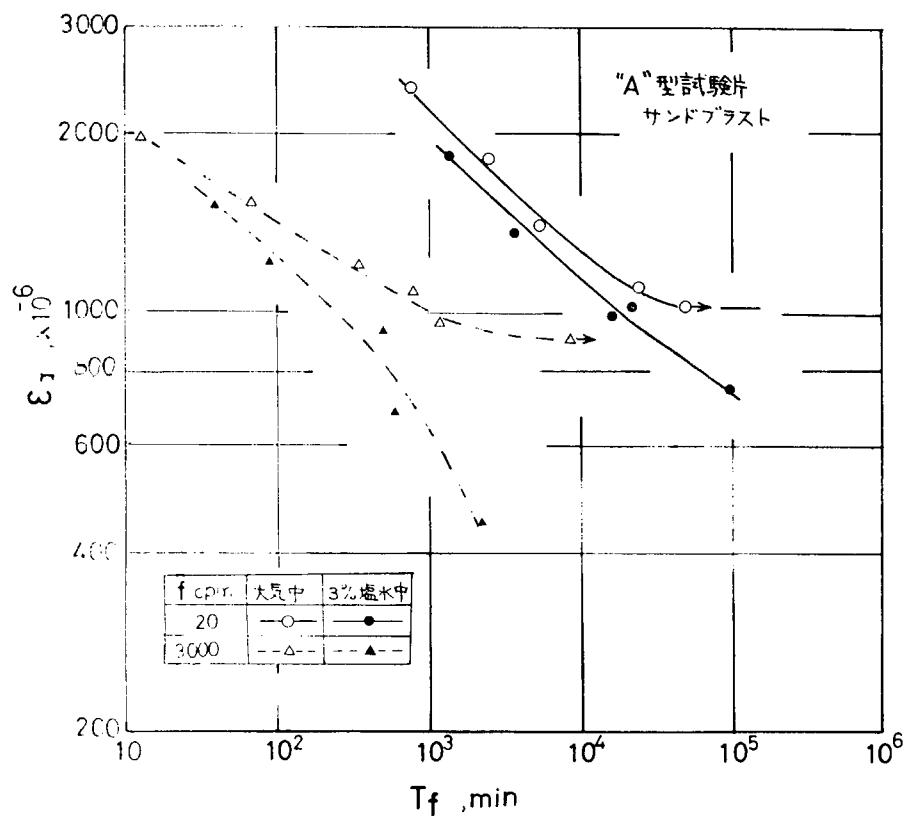


図 8.2.1.6 応力繰返し速度の影響 ($\varepsilon_a \sim T_f$ 線図)

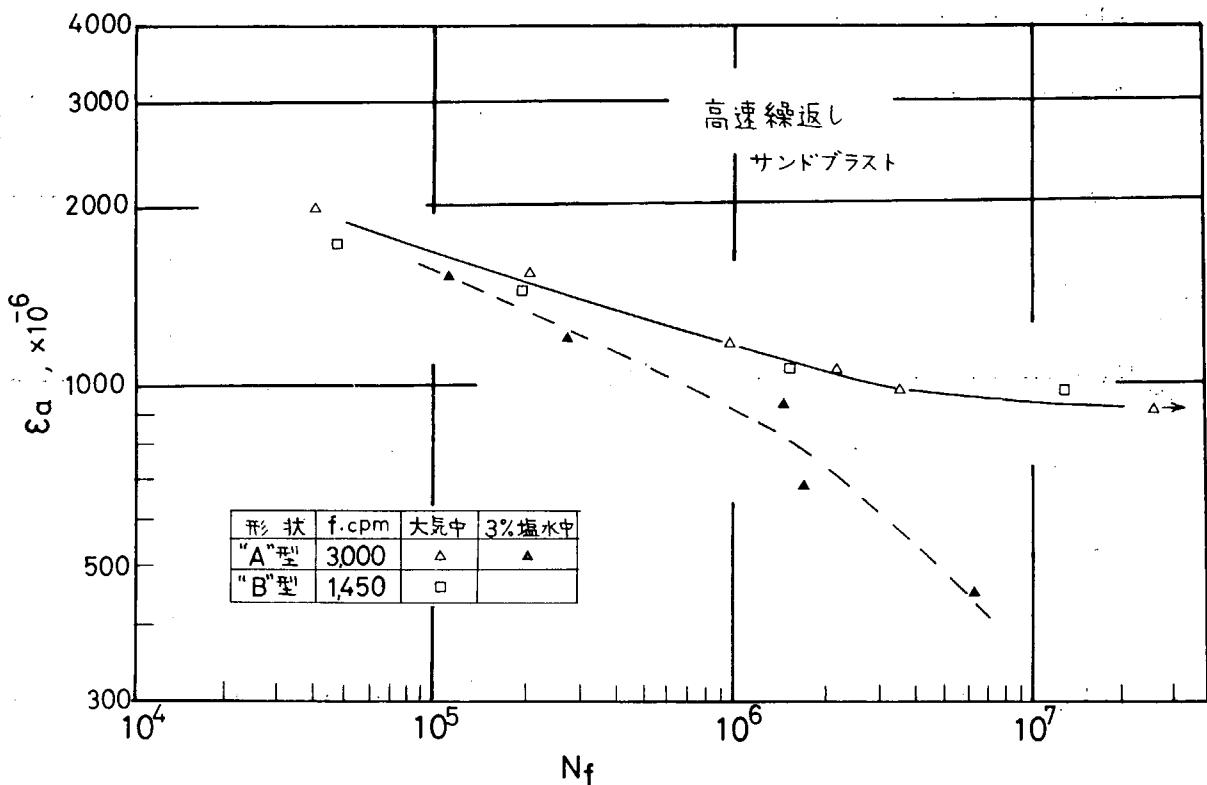


図 8.2.1.7 試験片寸法の影響(高速繰返し)

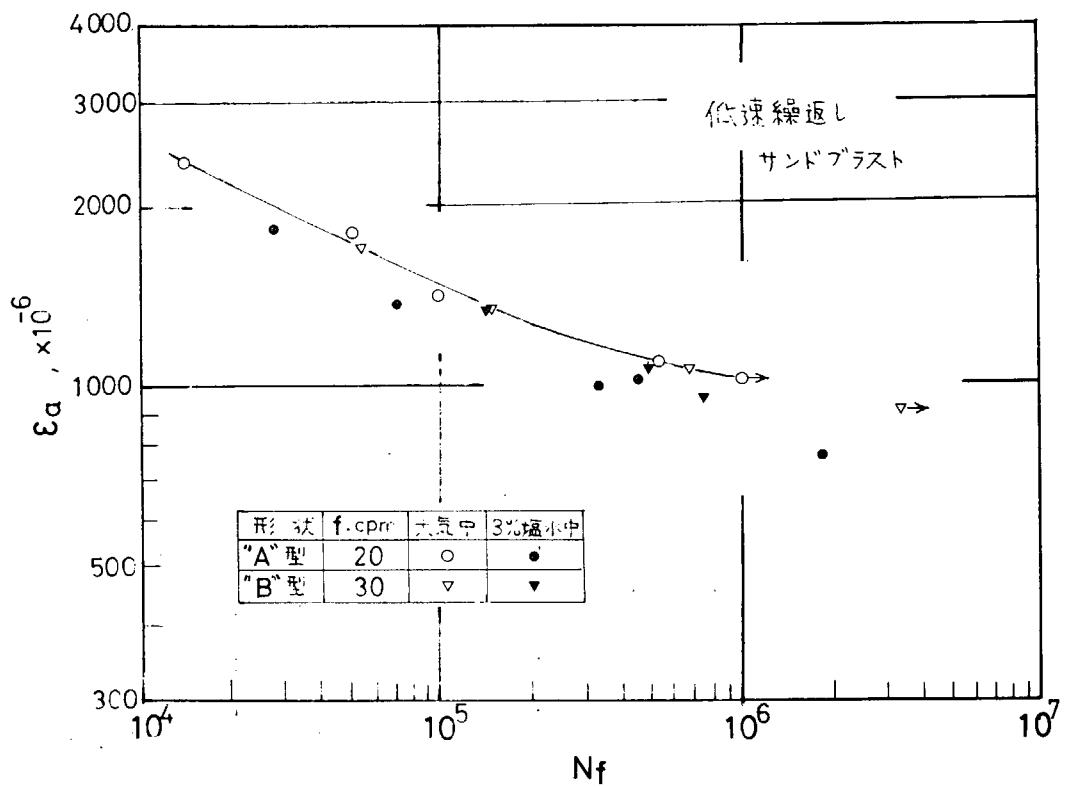


図 8.2.1.8 試験片寸法の影響(低速繰返し)

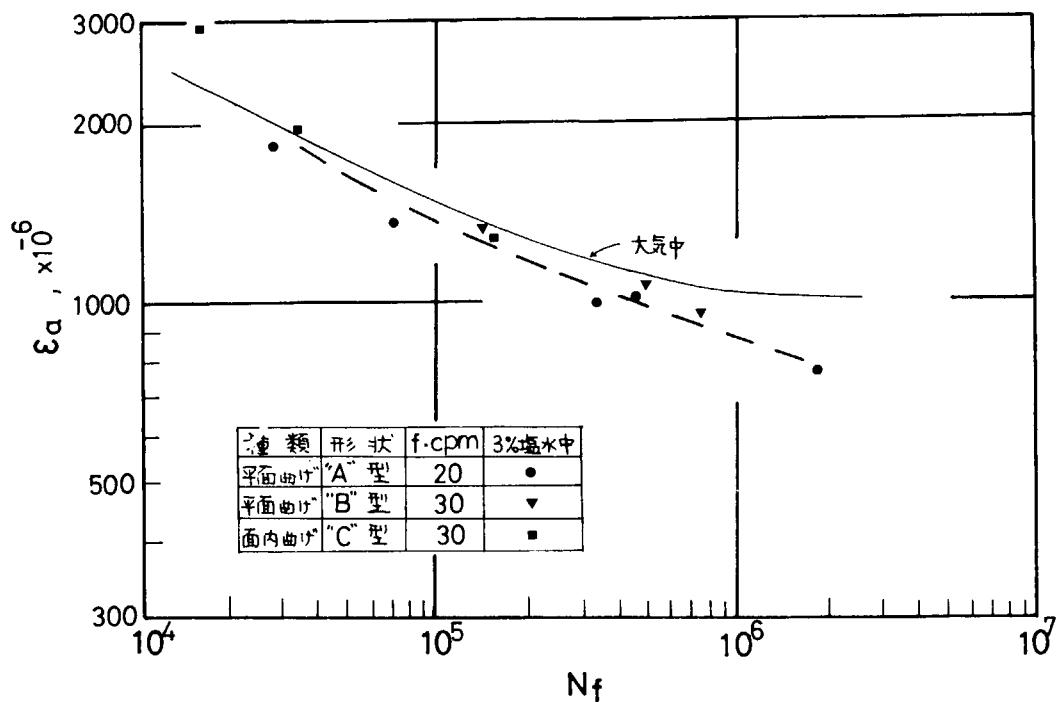


図 8.2.1.9 平面曲げと面内曲げの $\varepsilon_a \sim N_f$ 線図 (3 % 塩水中)

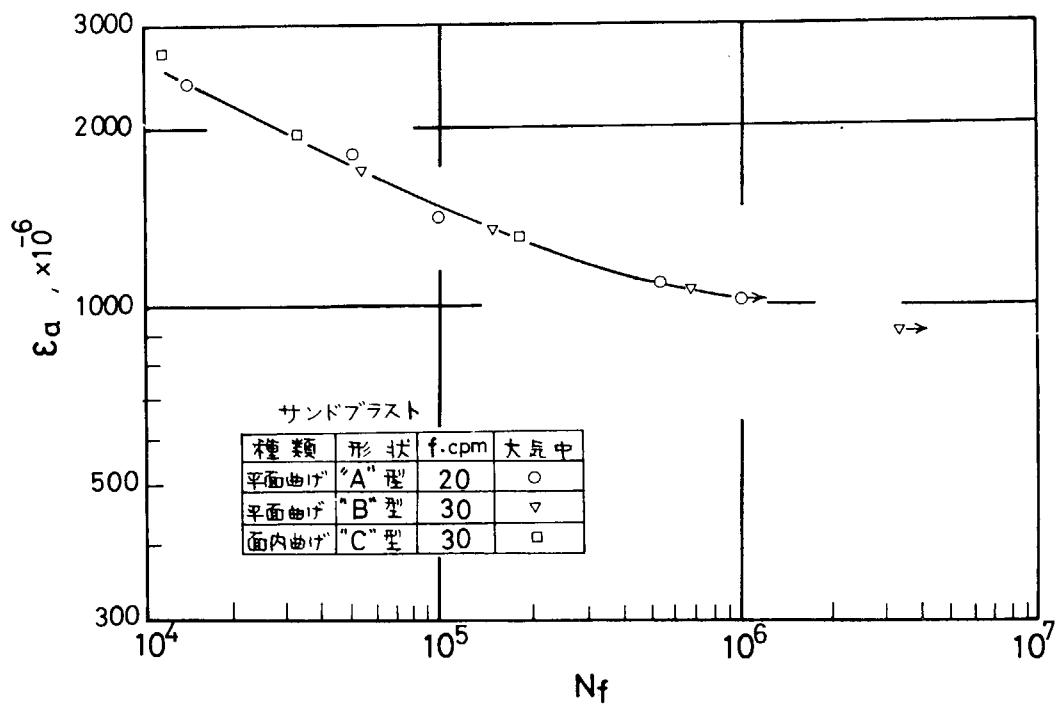


図 8.2.2.0 平面曲げと面内曲げの $\varepsilon_a \sim N_f$ 線図 (大気中)