

本研究はモーターボート競走公益資金による日本
財團の補助金を受けて実施したものである

研究資料 No. 409 号

バラストタンクの腐食疲労に関する研究

成 果 報 告 書

(第220研究部会)

平 成 8 年 3 月

社団法人
日本造船研究協会

はしがき

本研究は、日本財団補助事業として、日本造船研究協会第220研究部会において、平成5年度から平成7年度の3カ年で実施した「バラストタンクの腐食疲労に関する研究」の成果を取りまとめたものである。

第220研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	藤田 譲 (東京理科大学)(H.5~7)	吉成 仁志 (東京大学)(H.5~7)
代表幹事	熊倉 靖 (石川島播磨重工業)(H.5~7)	駒井 謙治郎 (京都大学)(H.5~7)
委員	富田 康光 (大阪大学)(H.5~7)	宮城 靖夫 (船舶技術研究所)(H.6~7)
	岩田 光正 (広島大学)(H.5~7)	在田 正義 (船舶技術研究所)(H.6~7)
	三澤俊平 (室蘭工業大学)(H.5~7)	太田 昭彦 (金属材料技術研究所)(H.5~7)
	藤井 英輔 (船舶技術研究所)(H.5)	北川 正樹 (石川島播磨重工業)(H.5~7)
	小林佑規 (船舶技術研究所)(H.6~7)	亀井 前人 (日立造船)(H.6~7)
的場	正明 (日本海事協会)(H.5~7)	村上 彰男 (川崎重工業)(H.6~7)
近藤	公雄 (日立造船)(H.5)	豊福 正継 (日本钢管)(H.5~7)
賀田	和夫 (川崎重工業)(H.5)	江原 隆一郎 (三菱重工業)(H.5~7)
福岡	哲二 (三井造船)(H.5~7)	末岡 英利 (三菱重工業)(H.7)
松井	明男 (住友重機械工業)(H.5~7)	藤井 一申 (新来島どっく)(H.5~7)
伏見	彬 (三菱重工業)(H.5~6)	牧野 秀哉 (新日本製鐵)(H.6)
野中	真治 (大島造船所)(H.5~7)	征矢 勇夫 (新日本製鐵)(H.5~7)
大谷	幸三郎 (新日本製鐵)(H.5)	二戸 信明 (住友金属工業)(H.7)
渡邊	一夫 (新日本製鐵)(H.7)	上寺 孝明 (中国塗料)(H.5~7)
渡邊	祐一 (住友金属工業)(H.5~6)	後藤 昌之 (ナカボーテック)(H.6)
楠原	裕司 (川崎製鐵)(H.5~7)	
橋本	堅 (ナカボーテック)(H.5)	
鏡宗	男 (ナカボーテック)(H.7)	

幹事会委員名簿

(敬称略、順不同)

主 委 員	熊 倉 靖 (石川島播磨重工業)(H. 5~7)	
委 員	小 林 佑 規 (船舶技術研究所)(H. 5~7)	在 田 正 義 (船舶技術研究所)(H. 5~7)
	太 田 昭 彦 (金属材料技術研究所)(H. 5~7)	的 場 正 明 (日本海事協会)(H. 5~7)
	北 川 正 樹 (石川島播磨重工業)(H. 5~7)	近 藤 公 雄 (日立造船)(H. 5)
	亀 井 前 人 (日立造船)(H. 6~7)	福 岡 哲 二 (三井造船)(H. 5~7)
	賀 田 和 夫 (川崎重工業)(H. 5)	村 上 彰 男 (川崎重工業)(H. 6~7)
	豊 福 正 繼 (日本鋼管)(H. 5~7)	松 井 明 男 (住友重機械工業)(H. 5~7)
	江 原 隆一郎 (三菱重工業)(H. 5~7)	大 内 博 史 (新日本製鐵)(H. 5~6)
	瀬 戸 厚 司 (新日本製鐵)(H. 7)	

ワーキンググループ委員名簿

(敬称略、順不同)

主 委 員	岩 田 光 正 (広島大学)(H. 5~7)	
幹 事 員	北 川 正 樹 (石川島播磨重工業)(H. 5~7)	
委 員	富 田 康 光 (大阪大学)(H. 5~7)	吉 成 仁 志 (東京大学)(H. 5~7)
	駒 井 謙治郎 (京都大学)(H. 5~7)	三 澤 俊 平 (室蘭工業大学)(H. 5~7)
	小 林 佑 規 (船舶技術研究所)(H. 5~7)	在 田 正 義 (船舶技術研究所)(H. 5~7)
	松 岡 一 样 (船舶技術研究所)(H. 5~7)	太 田 昭 彦 (金属材料技術研究所)(H. 5~7)
	飯 田 雅 (石川島播磨重工業)(H. 5)	熊 倉 靖 (石川島播磨重工業)(H. 6~7)
	的 場 正 明 (日本海事協会)(H. 5~7)	真 鍋 英 男 (石川島播磨重工業)(H. 5~7)
	富 士 彰 夫 (石川島播磨重工業)(H. 6~7)	小 野 塚 正 一 (石川島播磨重工業)(H. 6~7)
	亀 井 前 人 (日立造船)(H. 5~7)	福 岡 哲 二 (三井造船)(H. 5~7)
	今 北 明 彦 (三井造船)(H. 5~7)	尾 野 英 夫 (川崎重工業)(H. 5~7)
	村 上 彰 男 (川崎重工業)(H. 5)	東 健士郎 (川崎重工業)(H. 6~7)
	山 本 聰 (日本鋼管)(H. 5~7)	片 岡 福 彦 (日本鋼管)(H. 5~7)
	根ヶ山 博 (住友重機械工業)(H. 5)	濱 崎 稔 文 (住友重機械工業)(H. 6)
	中 澤 和 弘 (住友重機械工業)(H. 7)	江 原 隆一郎 (三菱重工業)(H. 5~7)
	渡 邊 栄 一 (三菱重工業)(H. 5)	坪 内 大 泉 (三菱重工業)(H. 6~7)
	紀 博 徳 (三菱重工業)(H. 5~7)	多 田 益 男 (三菱重工業)(H. 5~7)
	大 内 博 史 (新日本製鐵)(H. 5~6)	萱 森 陽 一 (新日本製鐵)(H. 7)
	上 寺 孝 明 (中国塗料)(H. 5~7)	橋 本 堅 (ナカボーテック)(H. 5)
	後 藤 昌 之 (ナカボーテック)(H. 6)	鏡 宗 男 (ナカボーテック)(H. 7)

目 次

緒 言	1
1. 研究の目的	2
2. 小型試験片及び中間試験片を用いた腐食疲労実験による各種要因の把握	3
3. 構造モデルを用いた腐食疲労試験	10
4. 腐食疲労のメカニズムの研究	14
5. その他の因子の影響の検討	15
6. 環境模擬試験法に関する調査	16
7. 実船の塗装劣化・腐食疲労の調査及び評価	17
8. 腐食疲労強度評価法の提案	19
9. 腐食疲労試験データベース	23
9. 研究成果の総括	25
結 言	27

緒 言

船舶のバラストタンクは最も厳しい腐食環境下にある。満載航海時には空となり、バラスト航海時には海水が満載されるという状態が繰り返されるために船体構造の腐食は顕著であり、さらに波浪変動荷重と船体運動に伴うタンク内海水の変動内圧によって激しい繰り返し荷重が加わるために船体構造に疲労損傷が発生する可能性が大きい。

船体構造の腐食対策として船級規則により、有効な塗装を施すことが決められているが、塗装状況、温度・湿度等の環境状態、船体構造の応力分布等によって、数年後には塗装の劣化、塗膜の破壊、船体構造のサビ、き裂の発生等が生じて来る。

このような損傷例が実船では非常に多いのにも拘らず、実構造、実環境における腐食疲労特性はまだ十分に把握されていないのが実情である。特に最近よく使用される高張力鋼についての研究も非常に少ない。

腐食環境や変動荷重条件の特に厳しいバラストタンク構造の信頼性向上のために、実船における腐食疲労特性を考慮した高精度の寿命予測技術の確立が必要である。

当部会では平成5年度から平成7年度までの3年間に、過去の実績調査、KA32鋼(315N/mm^2 級TMC P鋼)を使用した小型試験片及び中型試験片による腐食疲労試験と解析による各種要因の解明、実船調査等を実施し、これらの成果の総合的な検討結果を基にして、バラストタンクの腐食疲労強度について合理的な評価法の提案を行うことを目的として研究を実施して来た。

小型試験片を用いた疲労試験の結果から種々の要因をパラメトリックに表示出来る手法を確立し、中型試験片を用いた疲労試験でこれを確認した上で合理的な海水腐食疲労寿命予測法を確立しようとするものである。

更に腐食疲労データの調査、環境模擬試験法の検討、実船調査等を実施して側面からこれを確認、補強することを意図している。

本研究の結果として下記が期待される。

- (1) 腐食疲労の寿命予測法の精度向上が図れる。
- (2) 実船の検査保守技術の方向付けが可能となる。
- (3) 実船バラストタンクの信頼性向上及び長寿命化が実現する。

1. 研究の目的

一般船舶では次の理由で空倉時に専用バラストタンクに海水を積む。

- a) 針路安定とプロペラを沈めるために十分な喫水を取る。
- b) 船体のトリムを調整する。
- c) 船体縦曲げモーメントと剪断力を許容値まで低下させる。

ところが海水による鋼材の腐食は顕著であり、また海水中の鋼構造の疲労強度は大気中に比較して大きく低減する。

そこでこれを防止するために次の対策が施されている。

- A) タールエポキシ塗料のような適当な塗料を建造時に塗装する。
- B) 電気防食を行う。
- C) 鋼板の厚さを増す。

船級協会の統一規則により塗装が要求されているのでタールエポキシの塗装が実施されているが、塗膜は板の角や溶接継手等の下地処理の不十分な箇所から劣化、破損して鋼板が露出し腐食が開始する。塗膜の状況と構造部材の損傷の関係は次のように分類される。

i) 第1期

塗膜の状態は比較的良好であるが（N Kの塗装状況 c Cより良い）、構造部材にき裂が発生している。（建造後8年間位まで）

ii) 第2期

鋼板の角や溶接継手の塗膜が破損し、局部的な腐食が生じており（同c D）、腐食した箇所にき裂が発生している。（建造後9乃至12年間）

iii) 第3期

構造部材全体に腐食、衰耗が進行している。（建造後13年以上）

塗装の状態は建造時の塗装と就航後の保守点検の手の掛け方に大きく依存するが、塗装が健全であってもバラストタンク内の損傷は跡を絶たない。

一般に腐食或いは腐食疲労とは上記の第1期から第3期までの損傷を漠然と指している。本研究部会では研究の範囲を第1期の疲労き裂に絞ってその機構を解明し、具体的にバラストタンク内の損傷防止に寄与することを目的として研究を実施した。

- 1) KA32級鋼の小型試験片を用いて大気中と人工海水中で疲労実験と残留応力計測を行い、疲労強度に対する温度、塗膜厚、電気防食の影響と効果を研究する。
- 2) 実構造を模擬した同鋼種の中型試験片を用いて大気中と人工海水中で疲労実験と残留応力計測を行い小型試験片の成果の確認を行う。
- 3) 腐食疲労のメカニズムの解明のためにき裂発生と進展の理論的検討を行う。
- 4) 就航船の損傷状況を調査し、各種の変化に対応するS-N線図をまとめ、船体構造部材の設計時に適用出来る腐食疲労強度評価法を提案する。
- 5) 報告された腐食疲労試験結果と本研究成果をまとめてデータベースを構築する。

本研究の成果によりバラストタンク内構造部材の腐食疲労寿命予測法の向上、検査技術の方向付け及び長寿命化が可能となり、よって構造部材の腐食疲労による損傷の低減を期すものである。

2. 小型試験片及び中間型試験片を用いた腐食疲労実験による各種要因の把握

2.1 小型及び中間型試験片による試験の目的及び実験共通項目

2.1.1 目的

バラストタンクの腐食疲労強度評価法を確立するため、小型及び中間型試験片を用いた人工海水中腐食疲労試験を行い表2.1-1に示すマトリックスについて各種因子の影響を明らかにする。母材については平板切欠き板試験片を用い、海水環境における切欠き形状、温度、塗装膜厚、電気防食（及び間欠浸漬）などの効果を明らかにし、強度評価の基礎データとする。さらに、溶接継手（突合せ継手、角回し溶接、中間型）試験片についても温度や塗装の影響について実験し検討する。そこで得られた結果は、バラストタンクの腐食疲労寿命評価法の基盤となると共に、次章の中型構造モデル試験における疲労寿命評価のための基礎データとする。

表2.1-1 小型試験片（および中間型試験片）を用いた腐食疲労試験条件一覧表

[表中○印は実験実施項目示す：網掛け部は試験実施せず、*は35°C、**は間欠浸漬での電気防食]

環境	温度 ℃	腐食	母材（切欠試験片）				突合せ溶接継手				角回し溶接継手				中間型	
			無塗装材		塗装材		無塗装材		塗装材		無塗装材		塗装材			
			標準	切欠	標準	切欠	膜厚(μm)		軸力	曲げ	軸力	曲げ	軸力	曲げ		
			切欠	効果	切欠		50	100	200	300	50	200	50	250		
			機械	機械	曝露										無塗装	
大気	25	-	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
人工 海水	25	自然	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	40	自然	○*	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	60	自然	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		電防	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		間欠**	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

2.1.2 供試材

供試材は、船体用鋼板として現在広く使用されている日本海事協会（NK）規格K A32である。同ースラブから板厚10.0mm幅2000mm長さ3000mmの鋼板をT M C P (Thermo-Mechanical Control Process, 加熱工制御法：ただし、板厚が小さいため非水冷であり、C R (温度制御圧延)と同様)により製造した。本研究期間の3年間で毎年に同一の供試材とした。それらの代表的化学組成を表2.1.2-1に、機械的性質を表2.1.2-2に示す。

表2.1.2-1 供試材（K A32）の代表的化学組成

規格	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	t.Al	Nb	V	Ti	* Nb+V+Ti
	0.18	0.50	0.90/1.60	0.04	0.04	0.35	0.20	0.40	0.08	0.015	-	-	0.02	0.12
供試材	0.14	0.20	1.14	0.016	0.004	0.01	0.03	0.02	0.00	0.029	0.00	0.00	0.02	0.02

表2.1.2-2 供試材の代表的機械的性質

規格値	[引張試験(圧延垂直方向)、GL=200mm]			[衝撃試験(圧延方向)、7.5mmサブサイズ]		
	降伏点または耐力(N/mm ²)	引張強さ(N/mm ²)	伸び(%)	試験温度(°C)	平均吸収エネルギー(J), 2mmV	
供試材	315	440/590	≥22	0	≥31	
	390	496	29	0	198	

2.1.3 小型試験片製作要領

(1) 母材切欠き試験片

試験片は、両側切欠きを有する板厚10mm（原厚）の板状試験片であり、板幅は各試験機の都合により、20～60mmに変化させた。その場合、いずれも応力集中係数 K_t^1 が2.0になるように切欠きを加工した。塗装試験片は、塗装前に20日間の水散布を伴う大気曝露を行なった。代表的な試験片形状を図2.1.3-1に示す。

(2) 突合せ溶接継手試験片

突合せ溶接（MAG溶接）試験片の代表的な形状を図2.1.3-2に示す。なお、塗装材に関しては塗装前に10日間の散水大気中曝露を行なった。

(3) 角回し溶接継手試験片

角回し溶接（CO₂半自動溶接）試験片の代表的な形状を図2.1.3-3に示す。

2.1.4 塗装方法

塗装前に所定の大気曝露（水散布）をした後、以下の要領で下地処理および塗装を行なった。下地処理は、ディスクサンダー、サンドペーパー及び手ブラシを用い、母材（溶接部以外）についてはJSRA IR Pt-3、溶接継手部についてはJSRA IH Pt-2のグレードで表面処理を行なった。

塗装は、標準塗料としてタールエポキシ塗料（ビスコンHB-200黒）を用い、スプレーガンにより所定の膜厚まで行われた。なお、一部に変性エポキシ塗料（ビスコンHB・NT-L白）を用いた。塗装後、全試験片について膜厚計測を行なった。

2.1.5 中間型試験片製作方法

構造モデル（中型試験片）の応力集中部の構造要素を比較的小型の試験片で再現するため製作された。溶接方法は、角回し溶接継手と同じとした。試験片形状を図2.1.5-1に示す。

2.1.6 標準試験条件

腐食疲労試験は、実験装置等は各研究機関により異なるものの、次の標準条件を設定し実施した。環境は、人工海水（pH8.2、アクアマリン）循環式とし、流速は記録する。溶存酸素は、腐食液槽で空気バブル等により飽和とする。温度は海水温度を±1°C程度で制御（25, 40, 60°Cを標準）することにより行なう。負荷は、繰返し速度を0.17Hz、正弦波、軸荷重での応力比0.1を標準とした。さらに、各々の方法でN_c（き裂発生寿命）を計測する。

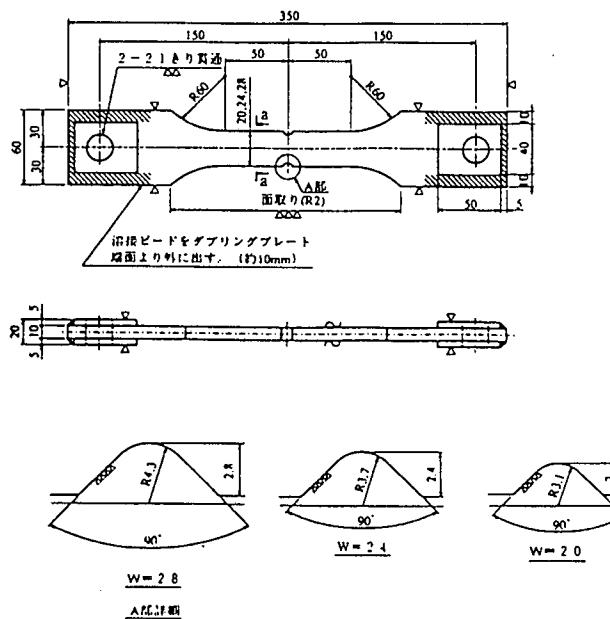


図2.1.3-1 代表的な母材切欠き試験片形状

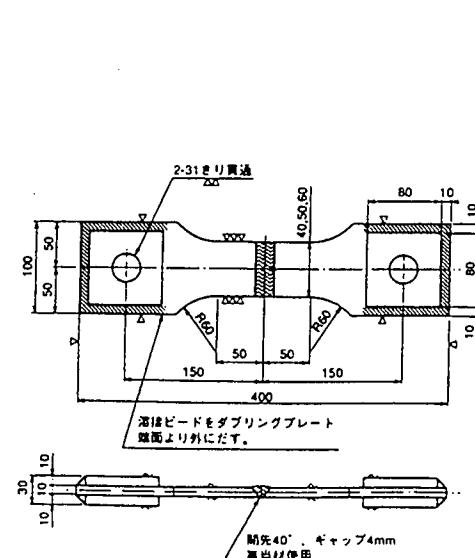


図2.1.3-2 代表的な突合せ溶接継手試験片

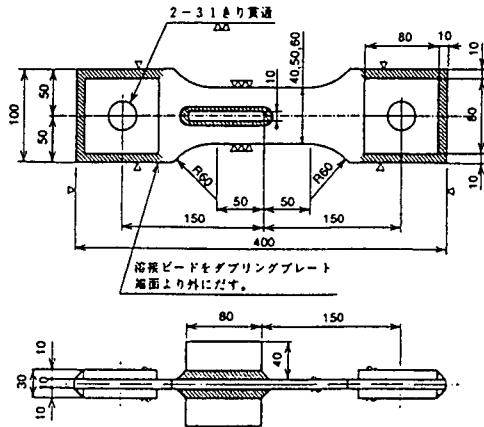


図2.1.3-3 代表的な角回し溶接継手試験片

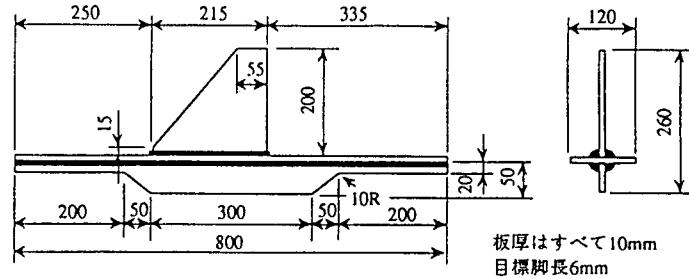


図2.1.5-1 中間型試験片形状

2.2 標準条件下での腐食疲労試験

標準状態（母材切欠きおよび突合せ継手、無塗装材）での腐食疲労試験を実施し、基準となる大気中および海水中のS-N線図が得られた（図2.2-1）。大気中では疲労限を有するが、海水中では 2×10^6 付近を境に疲労強度は低下する。さらに、大気中及び海水中疲労特性に及ぼす切欠き効果がK_t（応力集中係数）を変数として定式化できることを示した。突合せ継手の腐食効果は 10^6 以上の繰返し数で顕著に現れる。

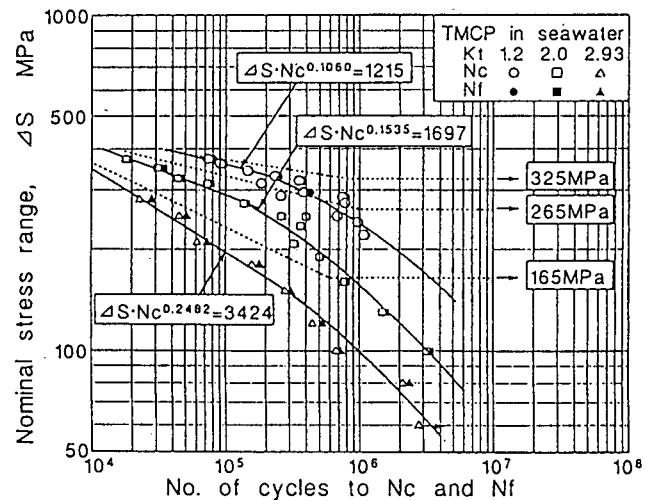


図2.2-1 大気中および海水中の腐食疲労に及ぼす切欠効果（K_t応力集中係数）

2.3 温度因子の影響

海水温度を種々変化させた（25, 40, 60°C）実験結果より、母材および溶接継手の温度因子の影響を明らかにした。母材の疲労強度は、室温（25°C）から40°C程度までは温度上昇に伴い低下する。それ以上の温度では飽和する傾向が見られた（図2.3-1）。また、突合せ溶接継手及び角回し溶接継手試験片では海水温度の影響はほとんど見られなかった。

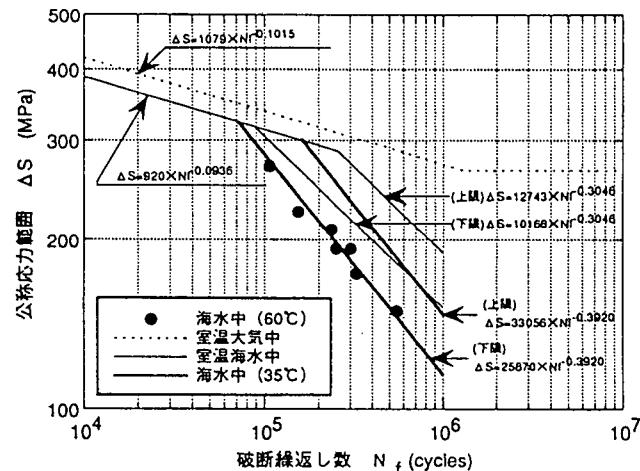


図2.3-1 無塗装材の腐食疲労特性に及ぼす温度因子の影響

2.4 塗装材の塗膜厚さの影響

塗装材の塗膜厚を種々変えて(50, 100, 200, 300 μm)腐食疲労試験を実施した結果、母材に対する塗膜厚の効果は、公称応力の低下に伴う長寿命側で大きくなる傾向を示し、腐食疲労寿命の改善が見られた(図2.4-1)。特に200 μm以上の膜厚の効果が認められる。さらに、腐食疲労き裂は、繰返し負荷後、母材に生じた腐食ピットから発生し伝播することが分かった。

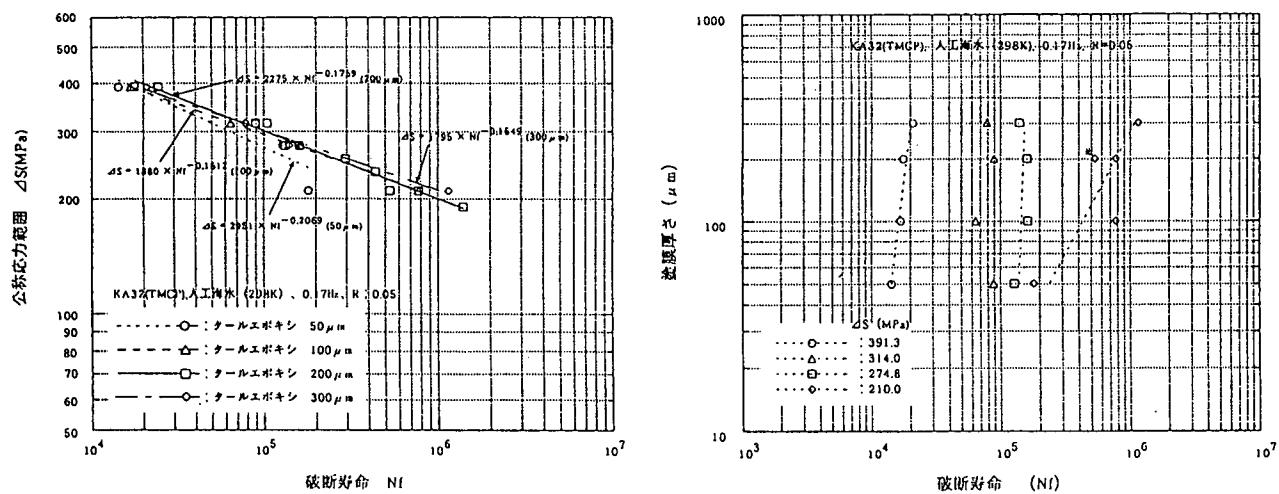


図2.4-1 塗装材の腐食疲労特性に及ぼす塗膜厚さの影響

2.5 塗装材の温度の影響

塗装材の腐食疲労特性に及ぼす海水温度の影響は、温度が25°Cから40または60°Cに上昇すると疲労強度はわずかに低下する傾向を示す。しかし、無塗装材(曝露材)と比較すると、塗装による疲労強度改善効果は維持されることが分かった。また、温度上昇による疲労強度の低下は、腐食係数で表せることが示された。

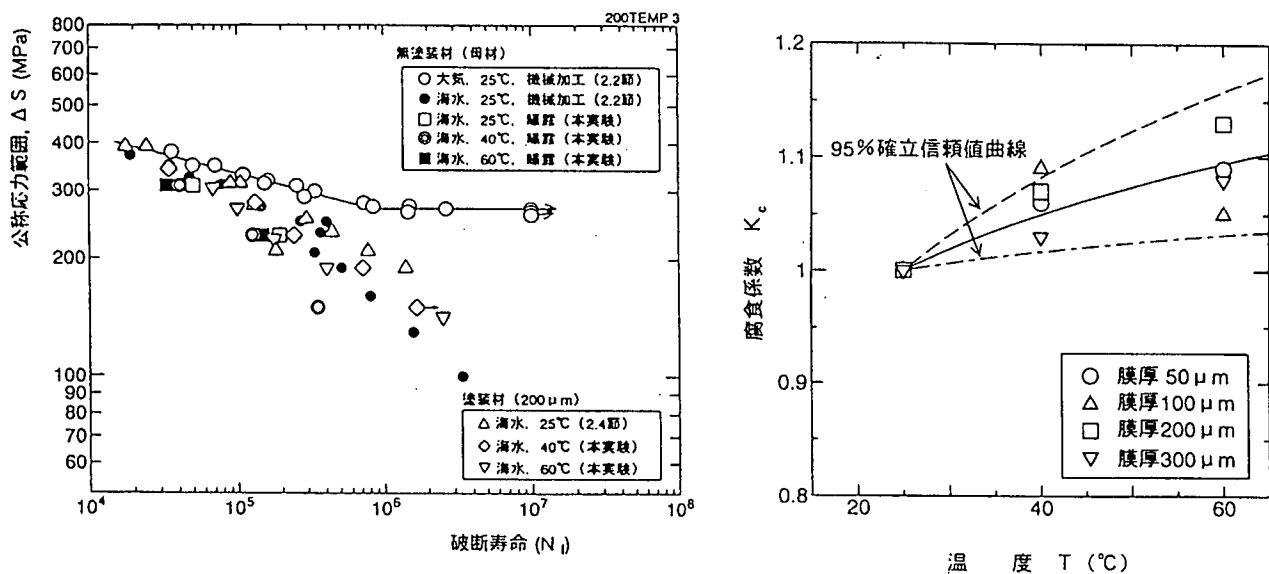


図2.5-1 塗装材の腐食疲労特性に及ぼす海水温度の影響

2.6 突合せ, 角回し溶接継手(軸力)上の塗装の影響

突合せ溶接継手, 角回し溶接継手とも本実験のような比較的応力が高い領域では, 塗膜の影響は明確に現れないことが示された(図2.6-1)。塗膜の効果が現れない理由は, 高応力域では機械的な荷重の繰返しにより, 塗膜下の応力集中部でき裂が発生し, その後塗膜が破断して腐食の影響が及ぶためと考えられる。

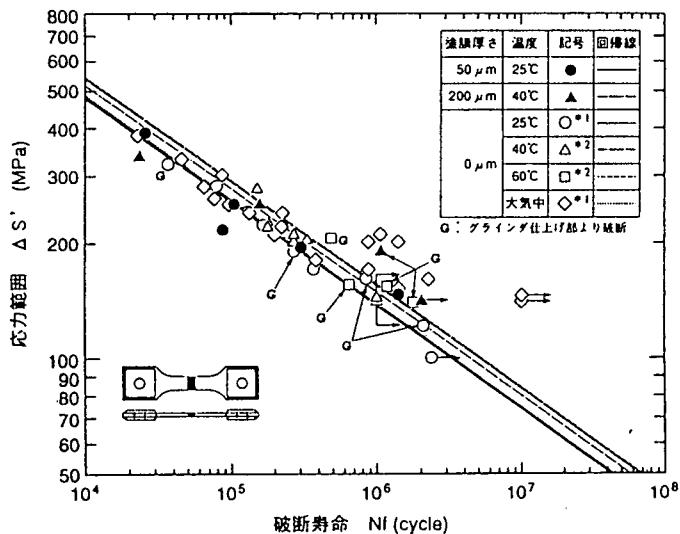


図2.6-1 突合せ溶接継手塗装材の腐食疲労に及ぼす塗膜厚の影響(軸力)

2.7 突合せ, 角回し溶接継手(曲げ)上の塗装の影響

突合せおよび角回し溶接継手試験片における曲げ試験でも塗膜の効果が明らかになり, 塗膜厚の効果は長寿命域で現れることが示された。全体に曲げの方が軸引張より疲労強度は高いが, 塗膜が厚く曲げにより塗膜が割れる高応力の場合に, 疲労強度が低下することも示された。

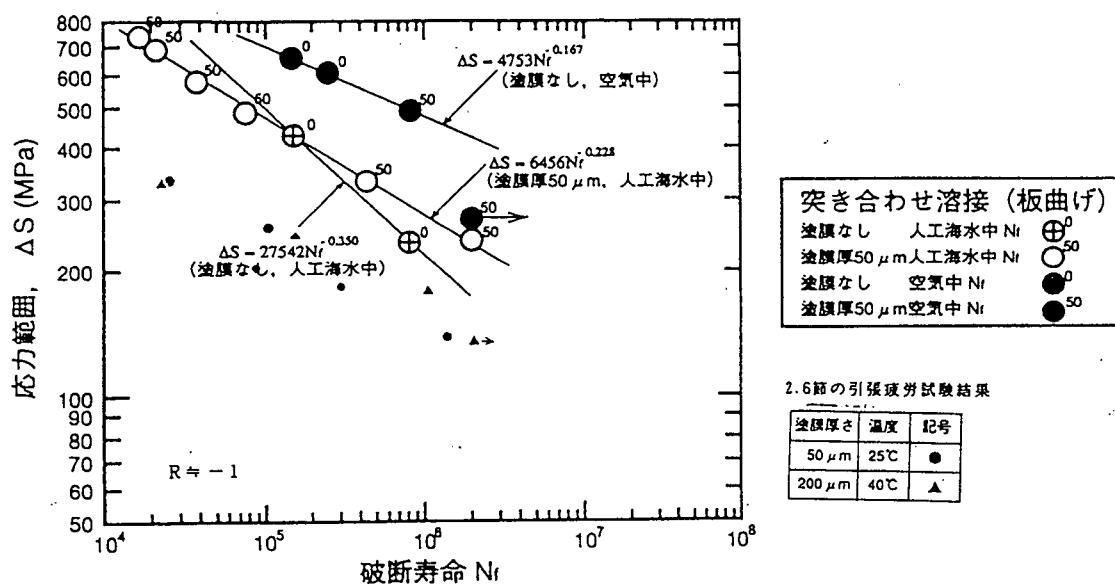


図2.7-1 突合せ溶接継手塗装材の腐食疲労に及ぼす塗膜厚の影響(曲げ)

2.8 電防の影響

電気防食の効果として、連続浸漬およびバластタンクの間欠浸漬を模擬する腐食疲労試験を実施した。間欠浸漬は、2週間毎に海水連続浸漬(電防)と湿度100%で45°C~50°Cの空気とを交互に行なった。その結果、連続浸漬条件下と同様、間欠浸漬下でも電気防食により疲労寿命の改善が見られ、特に低応力域では、自然腐食条件に比べかなり長寿命となり大気中と比べても遜色はないことが分かった。また、Miner則を用いた寿命推定法を検討した。

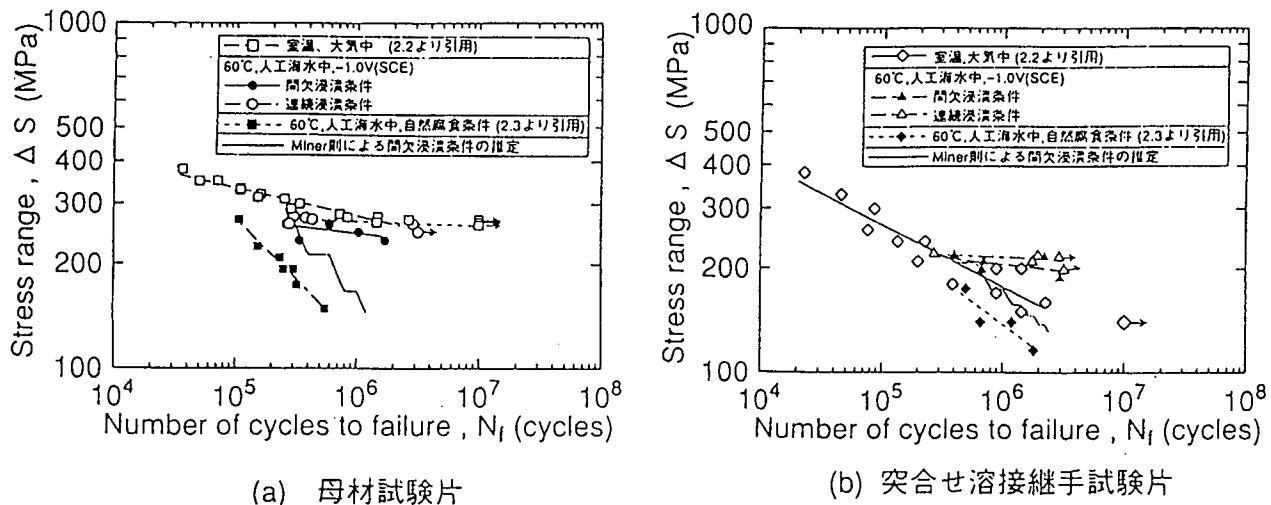


図2.8-1 連続浸漬および間欠浸漬における電気防食の効果

2.9 中間型試験片の腐食疲労試験

中間型試験片を用いた腐食疲労試験を実施した。その結果、大気中および海水中において、構造モデルである中型試験片とほぼ同一の疲労寿命が得られた（図2.9-1）。これより、短寿命域データから得られた結果ではあるが、溶接構造体の疲労特性の把握が適切な形状寸法の模擬試験片を製作することにより、比較的経済的な軸荷重制御試験で実現できることが分かった。

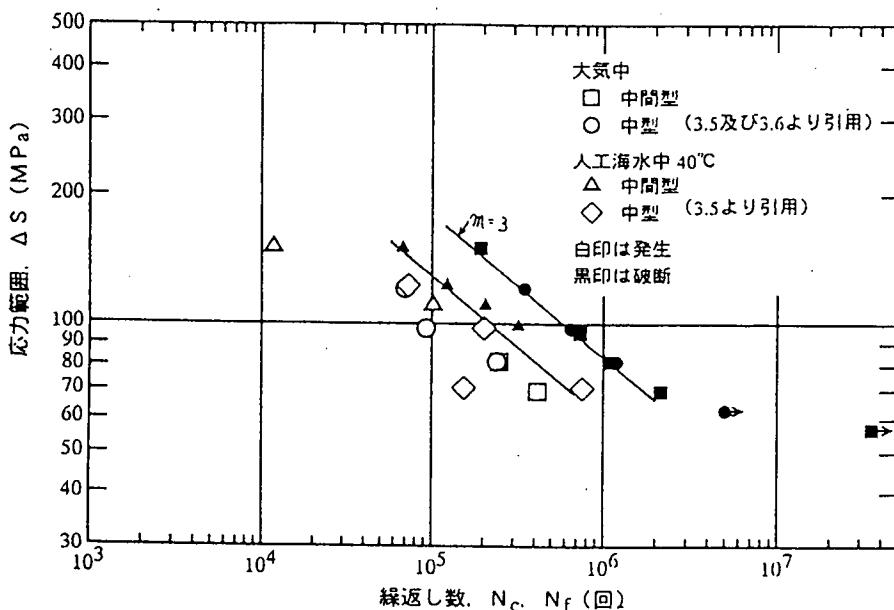


図2.9-1 中間型試験片における腐食疲労試験結果

2.10 実験結果のまとめ

船体用鋼板K A 32の小型及び中間型試験片を用いた海水中腐食疲労試験を行い、バラストタンクの腐食疲労特性に及ぼす各種要因について種々の検討がなされた。試験片は、母材切欠き試験片および溶接継手試験片（突合せ、角回しおよび中間型試験片）であり、無塗装材およびタールエポキシ塗装材が用いられた。海水環境および繰返し速度(0.17 Hz)などの共通試験条件の下腐食疲労試験を実施し、以下に示す結論を得た。

- (1) 基準となる母材切欠き試験片の大気中および海水中S N線図が得られた。さらに、切欠き効果がK_t（応力集中係数）を変数として定式化できることが示された。
- (2) 無塗装材の腐食疲労特性に及ぼす海水温度の影響を検討したところ、母材の疲労強度は、室温（25°C）から温度上昇に伴い低下するが、40~60°C程度になると飽和する傾向がみられた。一方、突合せ溶接継手及び角回し溶接継手試験片では海水温度の影響がほとんど現れなかった。また、腐食ピットの成長を考慮した腐食疲労寿命予測法を提案した
- (3) 塗装材の腐食疲労特性に及ぼす塗膜厚の影響が検討され、母材に対する塗膜の効果として、公称応力の低下に伴う長寿命側で効果が大きくなる傾向を示し、腐食疲労寿命の改善がみられることを示した。観察の結果、腐食疲労き裂は、繰返し負荷後母材に生じた腐食ピットから発生し伝播することが分かった。一方、突合せ溶接継手、角回し溶接継手とも本実験のような比較的応力が高い領域では、機械的な荷重の繰返しにより、塗膜下の応力集中部でき裂が発生し、塗膜の効果は明確に現れないことが示された。
- (4) 塗装材の腐食疲労特性に及ぼす海水温度の影響が検討され、海水温度が25°Cから40または60°Cに上昇すると疲労強度はわずかに低下するが、無塗装材（曝露材）と比較すると、塗装による疲労強度改善効果は維持されることが分かった。さらに、温度上昇による疲労強度の低下は、腐食係数で表せることが示された。溶接継手塗装材については温度の影響はほとんどみられなかった。
- (5) 連続浸漬条件下、間欠浸漬下共々電気防食により疲労寿命が改善され、特に低応力域では、自然腐食条件に比べかなり長寿命となり大気中と比べても遜色がないことが明らかになった。電気防食の効果は、母材のみならず突合せ溶接継手においてもみられた。
- (6) 突合せおよび角回し溶接継手試験片における曲げ試験でも塗膜の効果が明らかになり、塗膜厚の効果は長寿命域で現れることが示された。
- (7) 中間型試験片による腐食疲労を行い、大気中および海水中において、構造モデルである中型試験片（第3章）とほぼ同一の疲労寿命が得られた。これより、短寿命域データから得られた結果ではあるが溶接構造体の疲労特性の把握が適切な形状寸法の模擬試験片を製作することにより、比較的経済的な軸荷重制御試験で実現できることが明らかになった。

以上より、小型および中間型試験片を用いたK A 32鋼(315 N/mm²級T M C P鋼)の海水中腐食疲労試験を行って各種因子の影響が明らかにされ、腐食疲労寿命評価を行なうための従来得られていないかった種々の基盤データおよび新しい知見が得られた。ところで、本研究では試験期間の制約があり、繰返し数として最大 5×10^6 回程度（繰返し速度0.17 Hz）までのデータが主流である。実機の応力レベルを考慮すると、腐食疲労寿命評価に対する精度向上のためには、今後それ以上(10^7 回以上)の繰返し実験データが必要であり、同時に長寿命域での塗装の効果や劣化、き裂発生のメカニズム等を検討することが重要な課題になると考えられる。

3. 構造モデルを用いた腐食疲労試験

3.1 中型試験片による試験の目的

応力集中、溶接形状および防食劣化状態に関し実構造の要素を模擬した中型の試験片を用いて、海水環境下で疲労試験を行い、実構造により近い条件下での腐食疲労挙動を調査するとともに、腐食疲労寿命推定法の構築・検証のためのデータを取得する。

3.2 試験片および試験内容

船体構造のスチフナやプラケット基部およびスカラップ周辺部は、応力が集中するとともに規定の塗装条件の確保が困難な部位であり、腐食疲労き裂の発生が最も懸念される。そこで、本試験では、トランスとロンジとの交差部をモデル化対象部位として選定し、ウェブスチフナとロンジフェースの角回し溶接部からの腐食疲労き裂を対象とした。

図3-1に中型試験片の形状および寸法を示す。試験片は、実船を想定して、T M C P型K A 32鋼板と炭酸ガス半自動溶接の組合せで製作した。供試材は、各年度の共通供試材（2.1.2項参照）である。また、角回し溶接部の溶接条件は、小型試験片および中間型試験片とほぼ同等（2.1.3, 2.1.5項参照）である。

中型試験には、海水腐食環境中における塗装の影響を確認するため、無塗装と塗装した試験片を供試した。無塗装の試験片は、溶接まで供試した。塗装で供試する試験片は、造船所での建造工程を考慮し、溶接組立て後大気暴露（10日間屋外に放置し、毎朝夕に散水）した。所定の大気暴露終了後に下地処理を行い塗装（タールエポキシ）した。下地処理および塗装仕様は、小型試験片とほぼ同等（2.1.4項参照）である。

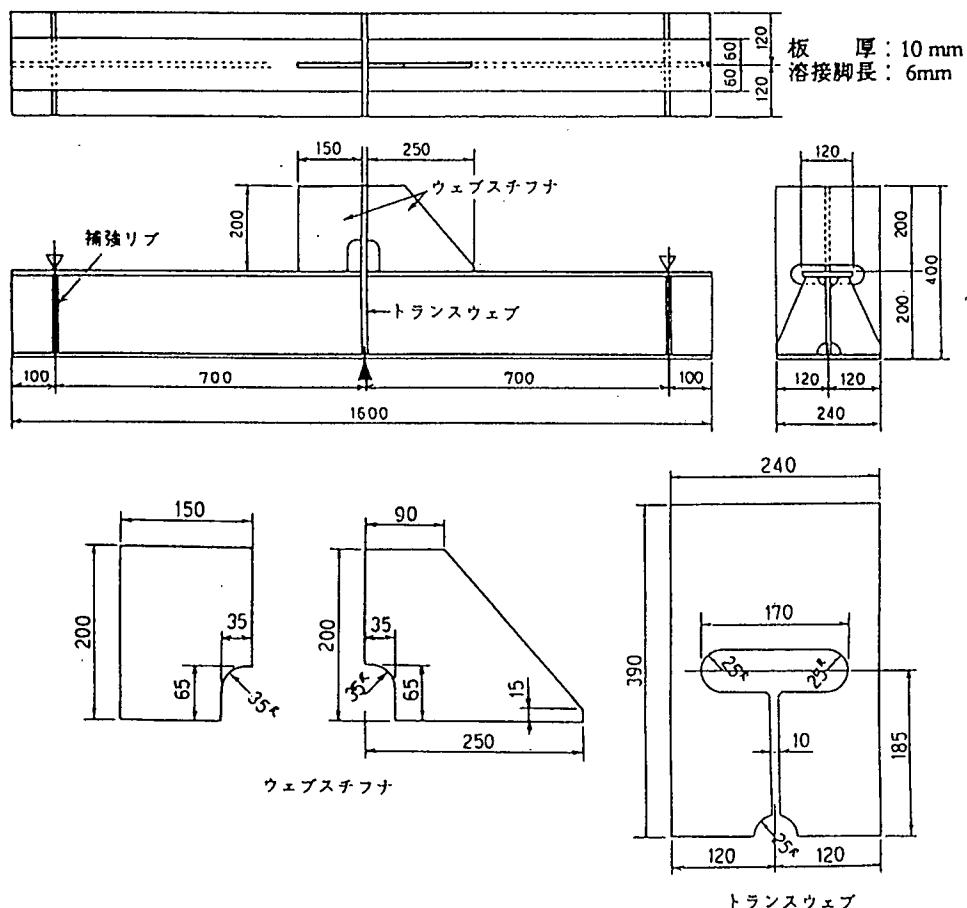


図3-1 中型試験片形状・寸法

試験内容の一覧を、表3-1に示す。腐食疲労試験は、バラストタンク内より厳しい腐食条件を想定し、温度40°Cの人工海水条件で実施した。なお、構造モデルの高温海水中での腐食疲労試験は本研究が初めてである。また、中型試験片の基礎データを取得するために、大気中の試験も行った。

さらに、中型試験片の構造特性の把握および試験結果の解析に供するため、三次元FEM応力解析および溶接残留応力計測(X線法、応力弛緩法)を実施した。

表3-1 中型試験の内容

試験条件				供試試験片数		
環境	試験温度	塗装の有無	塗膜厚さ	H5	H6	H7
人工海水	40°C	有	200 μm	—	3	1
			50 μm	—	—	2
		無	—	—	2	3
大気中	室温	無	—	—	3	1
備考				試験計画	FEM解析	
					残留応力計測(1体)	

3.3 応力解析および溶接残留応力計測結果

角回し隅肉溶接部を有する、小型(図2.1.3-3), 中間型(図2.1.5-1)および中型の3種の試験片のFEM応力解析結果を、図3-2(σ :計算値, S_0 :公称応力)に示す。同図は、スチナ角回し溶接ビード止端近傍のフェース上の試験片長手方向応力分布である。ビード止端部の構造的応力集中は、高い順に中型、中間型、小型である。なお、ビード止端部に着目した場合、中間型試験片はほぼ中型試験片の構造要素を模擬している。また、FEMによる応力解析結果と試験片で実測した応力とは一致していた。

上記、3種の試験片の応力弛緩法(ひずみゲージ貼付)による溶接残留応力計測結果を、図3-3に示す。角回し溶接ビード止端部の溶接残留応力は、試験片によらずいずれも降伏点相当と推定される。

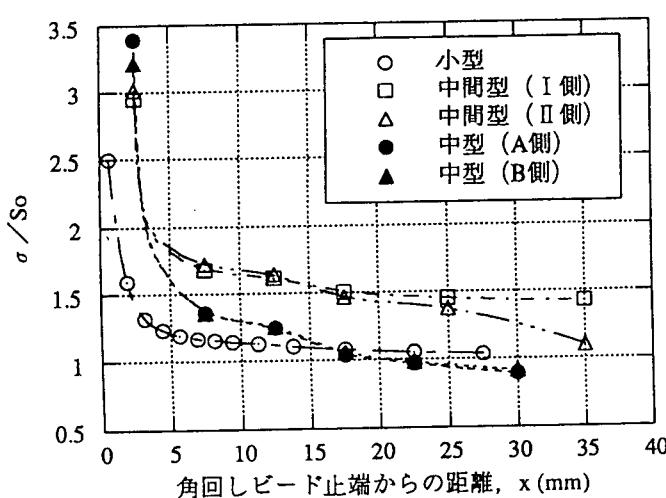


図3-2 FEM解析によるフェース上の応力分布

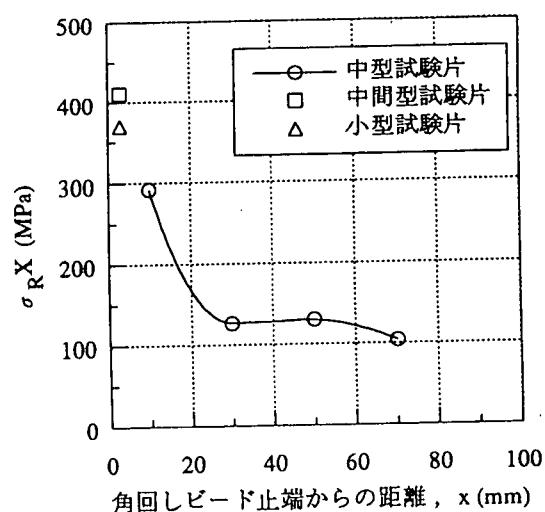


図3-3 フェース上の残留応力計測結果

3.4 疲労試験結果

疲労試験は、片振・三点曲げ負荷（荷重比R = 0.1）の条件で実施した。腐食疲労試験は、腐食水槽中で、

試験環境：人工海水（アクアマリン）、40°C、

空気飽和状態

繰返し速度：0.17Hz

の条件で実施した。試験期間中は、pH、電気電導度および水位を測定・管理した。

図3-4に、公称応力範囲(ΔS)と破断寿命(Nf)との関係を示す。大気中に比べ40°C人工海水中の疲労強度は低下しており、寿命比で、

無塗装：50%（腐食係数Kc:1.3）

塗装：60%（腐食係数Kc:1.2）

程度である。

塗装による腐食疲労寿命改善効果が少ない原因として、き裂発生位置である角回し溶接部の高い応力集中（図3-2）と高い残留応力（図3-3）の影響を受けて早期にき裂が発生し、き裂発生に対する腐食環境の影響が小さかったためと考えられる。また、塗装試験片では、大気暴露による予備腐食時に腐食ピットが発生し、疲労き裂の発生を早めた可能性もあるが、試験後には破面が腐食しており確認はできなかった。

なお、塗膜厚さ(200μm, 50μm)の影響に関しては、有意なデータが得られなかった。

3.5 小型および中間型試験片による試験結果の検証

2章では、腐食疲労強度に及ぼす各種要因の影響を小型試験片で明らかにしたが、小型試験片の結果を構造物の腐食疲労寿命評価に適用することの妥当性を検証するために、中型、中間型および小型試験結果の相関について検討した。

構造的応力集中の異なる試験片の統一的疲労強度評価法として、ホットスポット応力が提案されている。図3-5は、大気中で実施した、小型、中間型及び中型試験片の結果を、SR202B法に基づくホットスポット応力（ビード止端からの距離が板厚tの0.5tと1.5tの2点の応力を直線外挿し求めたビード止端相当点の応力）範囲($\Delta \sigma_{hs}$)と破断寿命(Nf)との関係で整理したものである。

3種の試験片の結果は、ほぼ同一範囲内にあり、ホットスポット応力で統一的に疲労強度が評価できる。

一方、図3-6は、海水中的試験結果の $\Delta \sigma_{hs}$

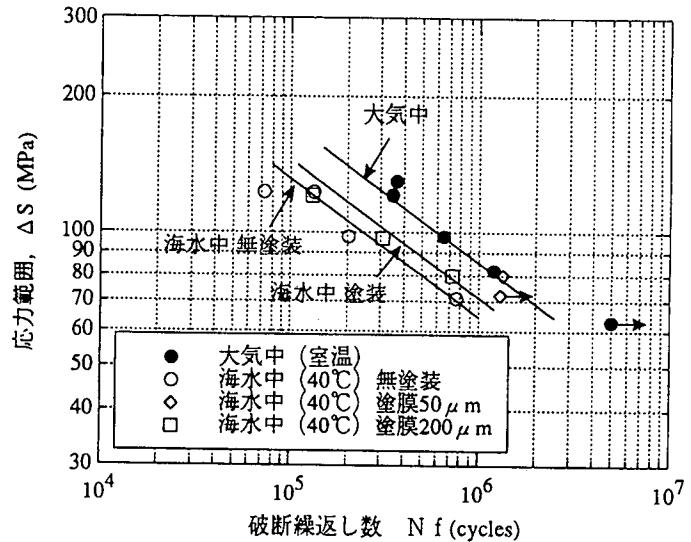


図3-4 中型試験片の応力範囲 $\Delta \sigma_S$ と
繰返し数Nfとの関係

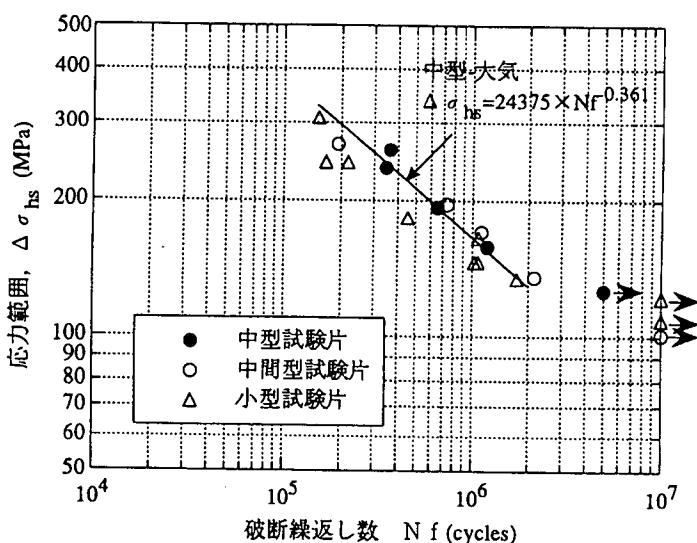


図3-5 角回し溶接継手試験片（小型、中間型、中型）の疲労試験結果の比較（大気中）

と N_f との関係を示したものである。腐食疲労試験においても、ホットスポット応力による整理が有効である。

図 3-5 および図 3-6 から明らかなように、小型試験片と中型試験片の結果には相関性があり、小型試験結果から中型試験結果の推定が可能である。すなわち、小型試験片による試験結果を構造物の腐食疲労寿命評価に適用することの妥当性が確認できたといえよう。

一方、溶接部の疲労強度には、溶接残留応力が応力比 (R) 効果として影響する。ただし、疲労試験負荷応力と溶接残留応力の和が降伏点に達するような応力状態では、残留応力の影響は飽和する。図 3-3 に示したように、供試された 3 種の試験片の角回し溶接部近傍には既に降伏点に相当するような残留応力が存在しており、疲労限を越えるような負荷応力の場合には残留応力の和が降伏点に達していると考えられる。したがって、供試された 3 種の試験片の疲労試験結果には、実際の構造物と同等の溶接残留応力効果が反映されていると判断できる。

3.6 まとめ

応力集中、溶接形状および防食状態に関し実構造の要素を模擬した中型試験片を用いて、バラストタンクの実構造および実環境 (40°C 海水中) により近い条件下での腐食疲労特性に関しての知見を得るとともに、腐食疲労寿命推定法検証のためのデータを取得した。さらに、中型試験片およびこれと同様の角回し隅肉溶接部を有する小型、中間型試験片の FEM 解析および溶接残留応力の計測を行い、疲労試験結果と合わせ腐食疲労寿命推定法構築のための基礎検討を実施した。

結果の概要は、次のとおりである。

- 1) 40°C 海水腐食環境中の寿命は、大気中に比べ無塗装の場合 50%, 塗装の場合 60% 程度まで低下することを明らかにした。
- 2) 小型、中間型および中型試験片の疲労試験結果には、大気中ならびに 40°C 海水腐食環境中ともに相関性があり、2 章で小型試験片を用いて得られた試験結果を構造物の腐食疲労寿命評価に適用することの妥当性が確認できた。構造モデルの高温 (40°C) 海水中での腐食疲労試験は本研究が初めてであり、貴重な知見が得られた。しかしながら、最大繰返し数が 100 万回程度までであり、腐食疲労寿命推定法のさらなる精度向上のためには、さらに長時間のデータの取得が必要であると考える。

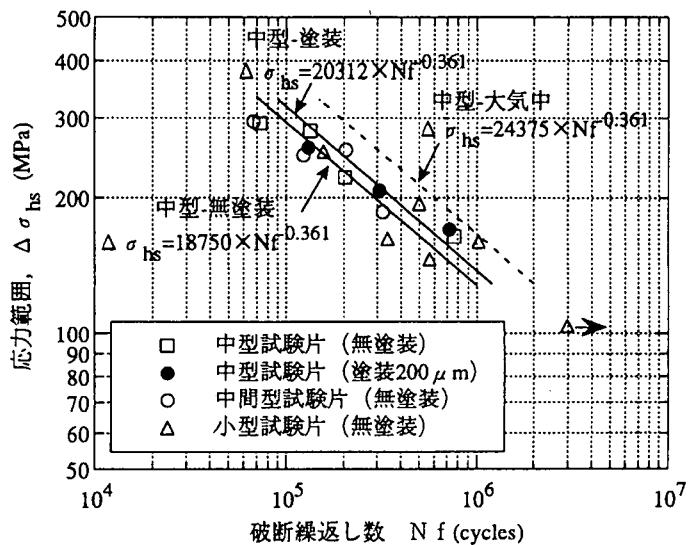


図 3-6 角回し溶接継手試験片（小型、中間型、中型）の疲労試験結果の比較（人工海水中 40°C）

4. 腐食疲労のメカニズムの研究

腐食疲労寿命の総合的な評価方法を確立する上で、腐食疲労のメカニズム及び塗膜劣化との複合メカニズムの解明は、必要不可欠である。本章では、これらの解明を目指した研究成果について述べる。

4.1 溶接部からの疲労き裂発生と腐食き裂発生

溶接止端部には、目視で発見できないような潜在的な初期欠陥が存在し、この微小き裂が目に見える大きさになるまでに費やす時間は、部材の疲労寿命の大部分を占めると考えられている。そこで、数十 μm 程度の初期欠陥を起点に、工学的にき裂発生と呼べる深さ1mm程度になるまでのき裂進展を、溶接ビード形状、板厚をパラメータとして検討した。

また、腐食疲労き裂の多くが、腐食ピットを起点としていることから、腐食ピットを鋭いき裂と見なして、き裂進展解析により、寿命予測する手法が提案された。

一方、供試鋼材について、大気中および海水中における疲労き裂伝播速度を測定した。その結果、海水中の伝播速度は、大気中のそれの2倍以上であることが判った。

4.2 腐食環境下での疲労強度シミュレーション

船舶に作用する変動荷重に関して、平穏海象と嵐海象に船舶はランダムに遭遇すると仮定した変動荷重モデルが提案されている。この変動荷重モデルに対応した腐食疲労強度シミュレーション法として、経過時間と表面状態（ピット深さ）の関係式及び、各表面状態に対するS-N線図を求め、線形累積被害則を適用して、表面状態の時間変化に対応させて、疲労被害度の時間積分を行い、疲労寿命を推定する手法が提案された。

4.3 腐食疲労過程における塗装劣化のメカニズム

繰り返し応力状態における腐食疲労と、塗膜劣化の複合メカニズムに関する解明の試みとして、静的及び繰り返し荷重下でのタールエポキシ塗膜の吸水性の経時変化を測定した。超音波起振による高サイクルの疲労試験も併せて実施した。平坦部に比べて応力集中部では、塗膜劣化が顕著であることと、劣化速度は膜厚に依存することが判った。測定結果を図4.1に示す。

また、腐食疲労試験後的小型試験片について、塗膜断面の顕微レーザーラマン分光分析を実施した。

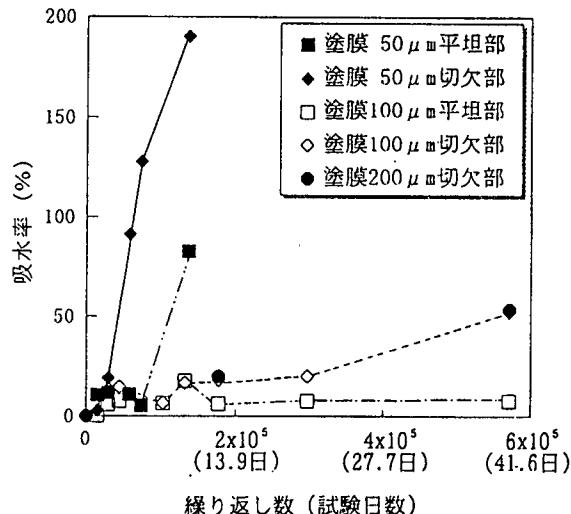


図4.1 切欠疲労試験片の塗膜吸水率

4.4 まとめ

バラストタンクにおける腐食疲労の進行過程は、研究成果より次のように想定される。

- (1) 溶接部の初期欠陥や、塗膜下に残留する腐食ピットが起点となり、き裂成長が始まる。
- (2) 高応力部では塗膜劣化しやすく、防食性が失われると、き裂進展が促進される。低応力部では塗膜劣化を生じた場合でも、腐食衰耗が支配的原因ため、腐食疲労とはならない。
- (3) 検査で発見されるまで、き裂成長し続け、最悪の場合、貫通き裂や構造破壊に至る。実用的な腐食疲労寿命予測技術を確立するためには、今後も、腐食疲労と塗膜劣化との複合メカニズム解明を目指した継続的な取り組みが必要である。

5. その他の因子の影響の検討

前章までで述べてきた環境因子以外に、腐食疲労に影響を及ぼす可能性のある因子についても、研究を行なった。その成果について、以下に説明する。

5.1 初期腐食因子の影響

腐食衰耗が発見された構造部材の、部材許容荷重の検討や信頼性評価に当たって、一般には、腐食経年による材料強度低下は無いものとして扱われる。この仮定を検証するため、建造後17年を経過したORE/OIL CARRIERから母材試験片（A級鋼）を採取して、静荷重試験及び疲労試験を実施した。試験結果より、降伏点、引張強さとも現行の規格値を上回る。しかし、疲労強度は、表面を平滑研磨すれば、非腐食材と同程度だが、腐食ピットを残したままの状態では、海水中の時間強度が1/2以下に低下することが判った。

5.2 湿潤硫化水素の影響

硫化水素の存在が及ぼす影響について検証するため、SS41鋼を対象に定負荷、腐食割れ試験を実施し、負荷応力の増加とともに、母材の耐力、引張強さ、延性とも著しく低下することが確認された。なお、疲労強度に関しては、サワー原油中のKA36及びKAS鋼の場合、比較的高応力レベルで、母材、溶接継手部とともに、大気中に比べて疲労き裂伝播速度が著しく加速されるとの研究結果も報告されている。

5.3 変動荷重因子の影響

船体のような大型溶接構造物では、応力集中部に、降伏点程度の引張残留応力が存在しており、作用荷重によっては、塑性変形を生じて、残留応力が緩和される。疲労寿命は荷重履歴の影響を受け、初期に大荷重が作用すれば長寿命になる傾向がある。安全余裕のある設計を行うには、残留応力の緩和影響を含まない疲労データが必要であり、そのため、最大応力を降伏点に一致させた変動応力疲労試験を実施した。その結果、等価応力範囲と等価繰返し数で整理すれば、変動応力と一定応力振幅に対するSN線図は一致すること、応力比=0の試験結果と比較して、大気中では疲労限が低くなるが、海水中では有意な差は見られないことが判った。

5.4 電気防食下における電位分布

通常バラストタンクには、防食塗装と併用して、犠牲陽極による電気防食が施されている。現在、経験的に行なわれている電気防食設計の信頼性を向上させ、合理的な設計を実現するためのツールとして、3次元境界要素法による電位分布解析の適用を検討した。解析例を図5.1に示す。

5.5 まとめ

- 上述の研究成果より、次の知見が得られた。
- (1) 経年によっても、鋼材そのものの強度特性は変わらないが、腐食ピットの存在が母材の疲労強度に影響を及ぼす。
 - (2) 硫化水素の存在は、疲労強度を低下させる。
 - (3) 海水中では、変動荷重下の疲労強度に及ぼす応力比の影響は、明瞭ではない。
 - (4) 電気防食設計に、2次元境界要素法による電位分布解析が適用可能である。

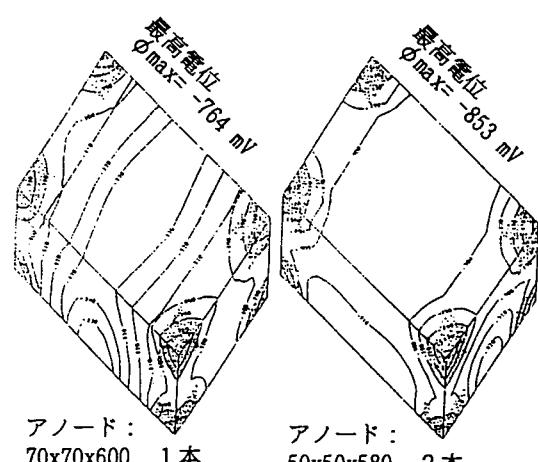


図5.1 タンクコーナーに塗膜剥離を生じた場合の電位分布

6. 環境模擬試験法に関する調査

小型及び中型試験片を用いた腐食疲労試験により、バラストタンク内の環境因子の個々の影響について把握することができたが、今後は、これらの各種要因を組み合わせ、実際のバラストタンク内の環境を模擬した疲労試験を行うことが望まれる。

バラストタンクの腐食疲労過程は、塗膜の劣化・き裂発生に続く鋼材の腐食・き裂発生・き裂伝播と考えることができる。そこで、バラストタンク内の環境について文献調査を行い、塗膜劣化及び鋼材の腐食に及ぼす影響度の大きい環境因子を次のように明らかにした。

6.1 塗膜劣化に大きい影響を及ぼす環境因子

- (1) 海水、酸素などの腐食性物質の浸透に影響する温度の高低、勾配の影響が最も大きい。**2.5 塗装材の温度影響の疲労試験**でも温度が高いほど寿命が低下する結果が得られている。
- (2) 空倉時のように温度変化の大きい場合や乾湿が繰り返される場合には塗膜劣化が促進されることからバラスト漲水率、漲排水周期も塗膜劣化に影響を及ぼす。

6.2 鋼材の腐食に大きい影響を及ぼす環境因子

- (1) 海水による炭素鋼の腐食は鋼表面への酸素の拡散に律速されるために、溶存酸素と温度が最も大きい影響を及ぼす。
- (2) 鋼表面に薄い水膜が形成されている場合には、大気中の酸素をたやすく供給できるため腐食量が大きい。すなわち、海水に浸食されているよりも水滴が付着するような状態の方が厳しい腐食環境になる。したがって、鋼材の腐食に関してもバラスト漲水率、漲排水周期が大きい影響を及ぼす。
- (3) 電気防食や流速も腐食速度に及ぼす影響が大きい。**2.8 電防の影響を考慮した疲労試験**でも電気防食によって寿命が大きく改善された結果が得られている。

6.3 環境模擬試験に取り上げられるべき環境因子

以上より環境模擬試験の環境因子として水質（溶存酸素濃度）、温度（高低）、バラスト漲水率、漲排水周期および電気防食を取り上げるべきであるという結論を得た。

しかし、これらの環境を模擬できたとしても、腐食疲労試験では長期の試験期間を必要とし実際的でないため、腐食を加速する必要が生じる。腐食を加速する方法として、試験片を50°Cの人工海水中の6時間おきの乾湿交番にさらす試験が塗膜の耐久性確認のために使われているが、実船との比較から、時間にして15倍程度促進されることが確認されている。この試験では塗膜耐久性の確認を目的としていることから、応力を作用させていないが、実際のバラストタンクでは変動応力が作用している。したがって、腐食の加速に応じて作用応力の繰り返し数を増加させる技術の開発が腐食環境模擬試験法確立の重要な課題である。

7. 実船の塗装劣化・腐食疲労の調査および評価

7.1 就航船の調査事例

7.1.1 塗装劣化状態の予測

老朽船の重大事故が相次いだことに鑑み1993年より船級協会では検査強化規則を発効した。

その規則の一部に「塗装劣化状態の予測」がある。それは、IACSによりGood, FairおよびPoorに分類され、状態に応じて次の点検までに事故が起きないように適切な処置を行うように配慮されている。日本においてはIACSに従うことは勿論であるが、NKの技術研究所ではcA～cEのより詳細な5段階に分類し予測の精度を向上するように配慮した。また、20隻以上の船について塗装劣化の実態を調査した。本SRにおいても劣化に関し特色のある船について調査した。調査結果は図7.1に集約することができる。点で表わした領域は各船の環境や塗装仕様による偏差の範囲である。PoorもしくはcD/cE以下は自由に腐食が進行する範囲であり、放置する場合それ以後より密な検査が要求される。cA/cBは大部分の領域で塗装の効果が完全である領域である。

7.1.2 腐食疲労き裂事例

実船の腐食疲労損傷に関する統計量については、1.1(2)に概説されており、損傷の事例は平成7年度の総合報告書に多くの事例が紹介されている。詳細はこれらを参考することにして1.1(2)で述べた各期の腐食疲労の予測を念頭にした特色を述べる。

第1期：（標準的に建造後8年まで）は図7.1よりも判るように、塗装状態はcCまでであり、損傷事例も詳細構造の良くないことに起因したものが多く、き裂の発生に関して腐食の影響は少ないと推定される。

第2期：（建造後12～13年まで）の塗装状態はcC/cDであり、局部的腐食を散見し、疲労き裂の発生しやすい溶接部は比較的腐食が多い。き裂の発生は自由腐食ほどではないが、なにがしか腐食の影響を受けていると推定される。

第3期：（建造後13年以上）は特に防食に配慮した場合でなければcD/cEであり、自由腐食が進行する。き裂損傷も腐食衰耗と混在している場合がほとんどである。

VLC CのSide Longitudinalの損傷もこの時期では第1期と比較しWBTでの比率が増える。き裂は無垢材の腐食疲労試験と同等な腐食影響を受けていると推定できる。

7.2 就航船のき裂発生箇所の応力状態

第2世代のVLC Cに就航後1～3年で荷油タンクの縦通肋骨に疲労き裂が多数発見された。この損傷およびほぼ同じ応力レベルにある非損傷をデータよりS-N線図が描ける。

同船でのバラストタンクの損傷は少なかったがこれは平均応力の影響と考えられる。

第1世代のVLC Cでも就航14年程度で同種類の損傷を経験しているが、この場合はバラストタンクにも比較的疲労損傷が多い。これは老齢船での塗装の劣化による腐食疲労と考えられる。

バラストタンク(WBT)の平均応力を荷油タンク(COT)と同等になるように修正を施し、COTのS-N線図（損傷時の超過確率 10^{-6} のホットスポット応力範囲）の平均および標準偏差の2倍の図にWBTのデータを記入すると図7.2となる。高繰返しでの強度の低下は高齢時の腐食疲労の影響と考えられる。

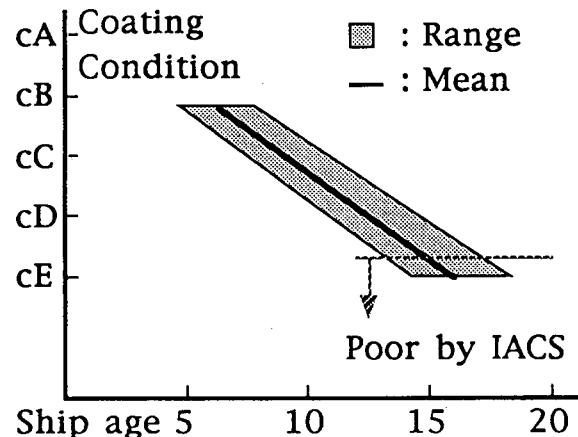


図7.1 WBT内防腐状態の標準的経年変化
(Ballast Time Ratio 50%, Tar Epoxy 1 Coat)

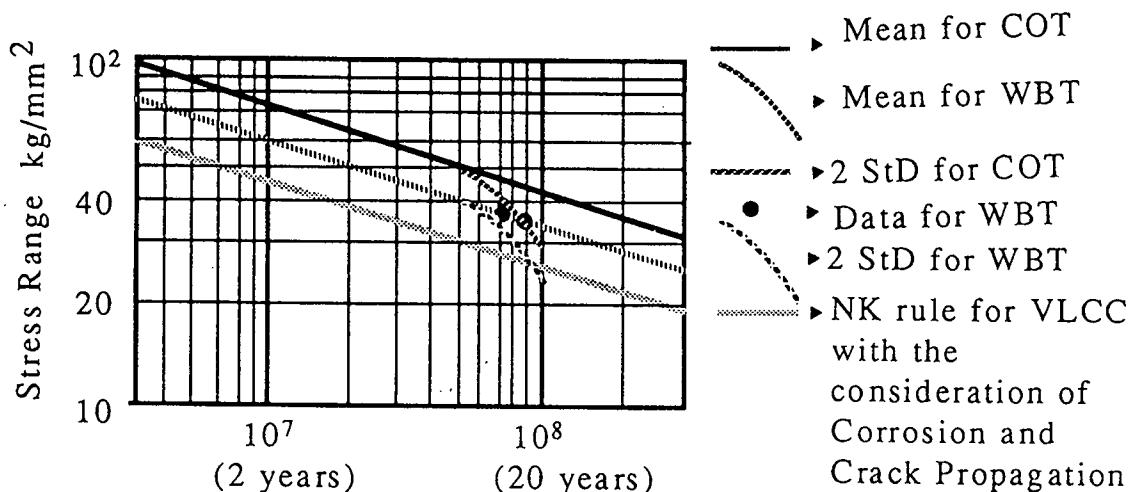


図7.2 WBTとCOTのSide Longitudinalの損傷S-N線図の比較

7.3 腐食に関する塗装および電防の影響

7.3.1 塗装の影響

現在バラストタンクにはタールエポキシ塗料が使用され、仕様に注意すれば優れた防食性能を発揮する。最近ではいく例かの事故を契機により高い仕様を規則化する動きがあり、またタールの公害性と検査のしやすさから黒いタールに変わって变成エポキシなどを素材とした明るい塗料が開発・使用されつつある。

塗装性能に影響を及ぼす要因としては、下地処理、塗回数、膜厚および湿度、換気、乾燥などの施工条件がある。高性能を維持するにはほぼ以下の条件が推奨される。下地処理はJSRA Sh2のショットブラストを一次処理とし、ショッププライマとパワーツールによる二次処理が良い。塗り回数は一回より二回の方がよいが、乾燥膜厚200~300μ程度で比較的良い防食性が保持できる。施工においては5℃以上の気温と結露しない湿度および乾燥しすぎぬ塗装インターバル、主剤と硬化剤の機械混合によるむらのない配合を配慮する必要がある。

塗装不良の生じやすい箇所は、フリーエッジ、隅肉溶接部や骨部材の裏面などである。

フリーエッジはシャープになり膜厚が薄くならぬようにコーナーに2~3cのグラインダ掛けなどをするような配慮が望まれる。隅肉溶接部や複雑な箇所は塗りにくさから被膜が保持しにくく先行刷毛塗もしくは後塗などの処理が好ましい。骨部材の裏面は時として所定の半分の膜厚になることがあるが、施工時期と方法の工夫により上向きの塗装施工にならぬような配慮が望まれる。

バラストタンクの塗装は全面塗装が一般的であるが、温度の高くなるトップサイドタンクや相対的に腐食代の小さい高張力鋼では特に全面塗装が望まれる。またタールエポキシは50℃を超えると防食性能が急激に落ちるが、荷油の加熱管の近傍では配置・防熱により塗装部分の温度を50℃以下にするような配慮が望まれる。

7.3.2 電気防食の影響

電気防食は周知のように没水部分のみに有効な防食手段である。電気防食のみでの防食が有効な場合もあるが、一般的には乾湿の繰返される部分での腐食例が多く最近の規則では原則として塗装による防食手段が講じられる。しかし、塗装との併用は防食に有効な方法である。タールエポキシ塗料は防食性は優れているが、タンク内の構造は複雑であり所定の膜厚の得られない箇所も多い。また塗装作業などのメカニカルダメージは避けられない。従って欠陥部分の発錆を防止するために電気防食の併用が望ましい。

バックアップアノードとして電気防食をタールエポキシ塗料と併用する場合の適正電流密度は5mA/m²程度である。

さらに、7.1で示した経年変化でcC以下になった時点では電流密度を見直すなど適正なメンテナンスにより船令20年程度の良好な防食状態を保持できる。

8. 腐食疲労強度評価法の提案

本研究の成果を使用したバラストタンク内構造部材の疲労強度評価法を以下に提案する。

7章に掲げる推定法による概略検討の上、本手法による検討が望ましい。

バラストタンク内構造部材の腐食疲労強度評価法の提案－S R 220の手法－

(1) 適用条件

- (1.1) タールエポキシ塗料（2種）を造船所の通常の方法で塗装された、一般船舶のバラストタンク内の鋼構造部材の疲労強度算定に適用する。
ただし、塗膜の状況が第1期（解説参照）である期間に限定する。

（解説）＊試験片は実際の工程を模擬するために、製鋼所で圧延後、ウォッシュプライマーを塗装された板から切断加工し、さらに母材は20日間、溶接継手部10日間真水を散布した。平板の部分と溶接継手部についてそれぞれJSRA IR Pt-3とIR Pt-2の表面処理を行っている。

*塗膜の状況とき裂発生の時期を次の3期に分類する。

第1期

塗膜の状態は比較的良好（NKの塗装状況cCよりよい。）

（建造後8年間位まで）

第2期

鋼板の角や溶接継手の塗膜が破損し局部的には腐食が生じており（同cD）腐食した箇所にき裂が発生している。（建造後9乃至12年）

第3期

全体腐食が進行している。（建造後13年以上）

第2期以降は無塗装の腐食疲労となるが、この時期は塗装のメンテナンスに依存し不確定があるので、検討の対象から除外した。

(2) 荷重計算

- (2.1) バラストタンク内の構造部材には次の繰り返し荷重が作用する。

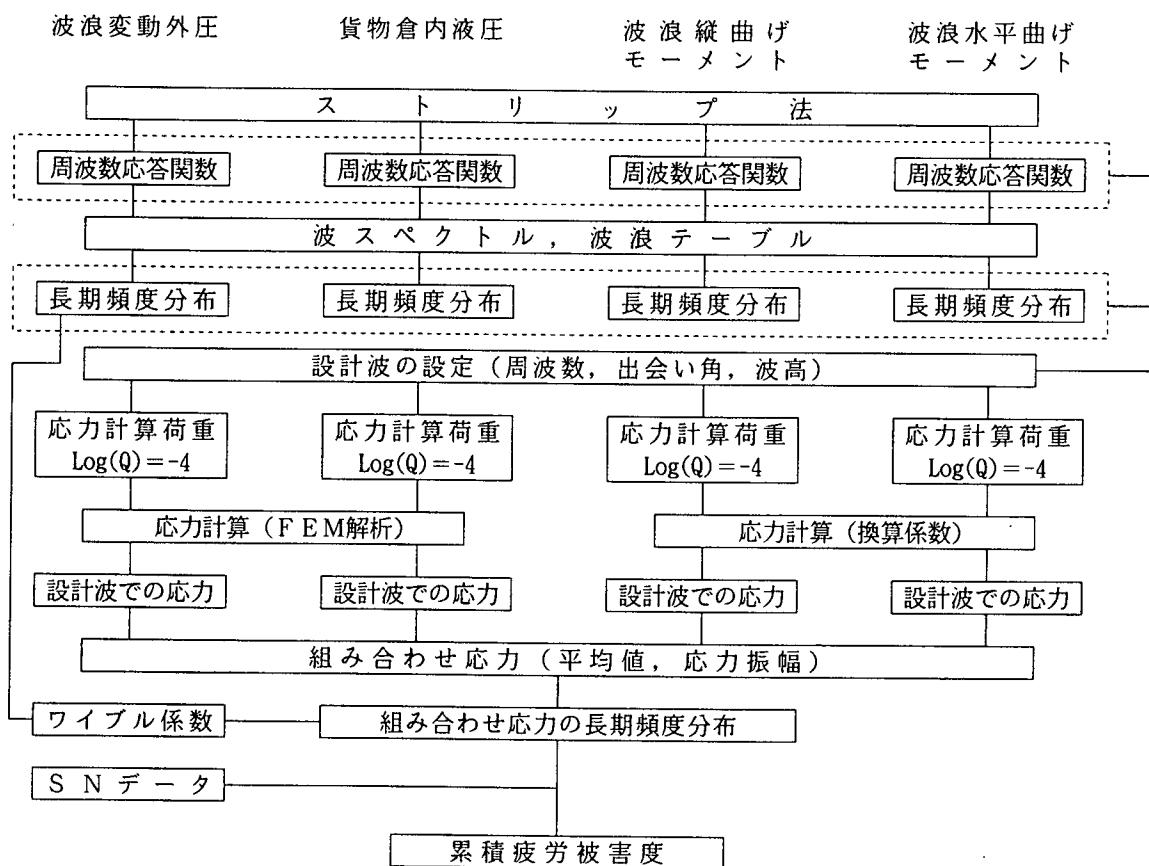
ストリップ法を用いて、各荷重成分の周波数応答関数を求める。

- ① 波浪変動外圧
- ② タンク内液圧  内外変動差圧
- ③ 波浪縦曲げモーメント
- ④ 波浪水平曲げモーメント

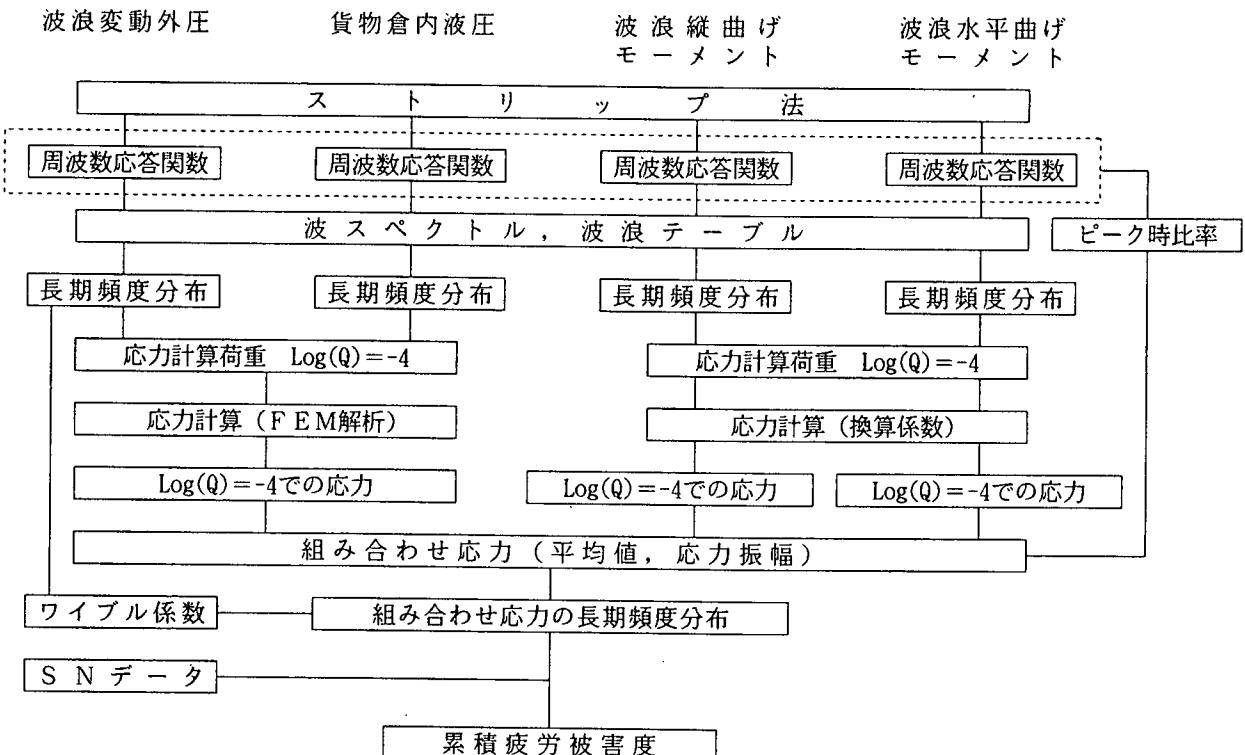
- (2.2) これらの荷重は位相が異なるために構造部材にそれぞれの荷重によって生ずる応力をそのまま加算すると応力を過大に評価することになる。

- (2.3) 線形理論により下記条件のもとに各荷重成分の短期予測及び長期予測を行う。

- I S S C 1964波スペクトラム
- $\cos^2 \chi$ 方向スペクトラム



(A) レベル2 A疲労強度解析フロー



(B) レベル2 B疲労強度解析フロー

図8.1 疲労強度解析フロー

• Global Wave Statistics航路別波浪表

(2.4) 各荷重成分の応力計算時 ($\log(Q) = -4$ の期待値) と応力の組み合わせの方法として次の方法を使用する。

「9. 縦通肋骨材の疲労強度評価法と設計への適用－S R 216手法の提案と解説－」 S R 216部会総合報告書 平成6年3月

(解説) *サイドロンジを対象とするとこれらの荷重を考慮しなければならないが、他の部材については別途考慮が必要である。

*応力の組み合わせ方法として、S R 216手法ではA法(ピーク時比率法)とB法(設計波法)が採用されているが、この他に「部材の荷重による応力の相関係数を用いる方法」もある。(A法とB法については図8.1参照)

(3) 疲労強度評価応力

(3.1) シェル要素の表面応力(膜力+曲げ応力)を用いる。

(3.2) 解析対象部位近傍の応力分布を求め、S R 202の計算法によりホットスポット応力を計算し、これを疲労強度評価のための応力とする。

(解説) *上記S R 202の手法に従い、表面応力に基づくホットスポット応力(溶接止端より0.5tと1.5t(t:板厚)の位置の応力を結んで延長した直線の溶接止端における応力)を用いる。

(4) 組み合わせ応力の長期頻度分布

(4.1) 組み合わせ応力の長期頻度分布は $\log(Q) = -4$ の組み合わせ応力と支配的荷重のワイブル分布を用いて推定する。

(解説) *上記S R 216の手法に従う。

(5) 累積疲労被害度の計算

(5.1) 静水状態、変動荷重最大、変動荷重最小の3ケースの応力の最大差を応力変動範囲とする。

(5.2) マイナー則による累積疲労被害度の値は、まず図8.2に示すS R 216のS-N線図を使用して求める。

大気中に比べ、疲労強度の低下が腐食係数(kc)で表される場合にはこの値に $(kc)^{2.77}$ を乗じて累積疲労被害度とする。新造後8年以内についてこの値が1.0に達する場合には寿命は失われるものとする。

(解説) *(1.1)の解説に記述したように、塗膜の状況は第1期のみを対象としており、この期間の寿命について検討する。

*海水中のS-N線図が、3.5章に述べられているように、大気中と勾配が同じで、疲労強度の低下が腐食係数(kc)で表される場合には同じ応力について寿命の比は一定となり、前者は後者の $(1/k)^{1/0.361} = (1/k)^{2.77}$ 倍となる。

従って S R 216の S - N 線図を使用して得た累積疲労被害度の値に $(kc)^{2,77}$ の値を乗じたものがこの部材の累積疲労被害度となる。

*一般にバラストタンク内部材が200 μm の膜厚で塗装されているので、海水温度40°C、200 μm 塗装の S - N 線図（図8.3）を使用すると、 $kc=1.2$ となる。そこで S R 216の S - N 線図を使用して得た累積疲労被害度の値に $(1.2)^{2,77}=1.67$ 倍してバラストタンク内部材の累積疲労被害度とする。

* S R 216の解析手法の検証に使用した船のうちからB/Cとコンテナ船のバラストタンク内肋骨についてこの手法によりそれらの累積疲労被害度を計算した結果からこの判定値を1.0とする。

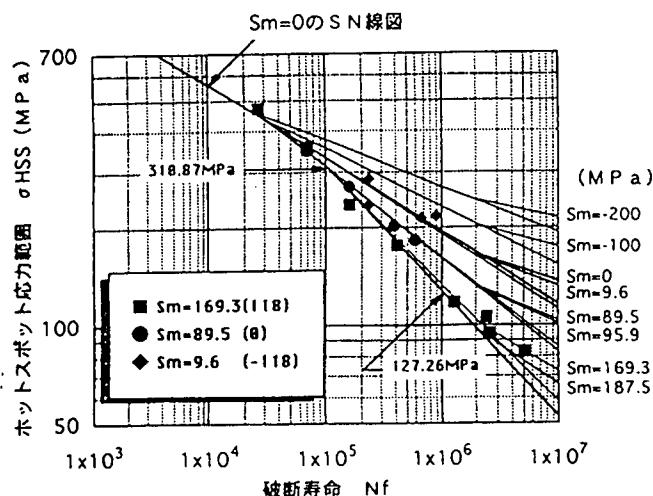


図8.2 S R 216のS - N 線図

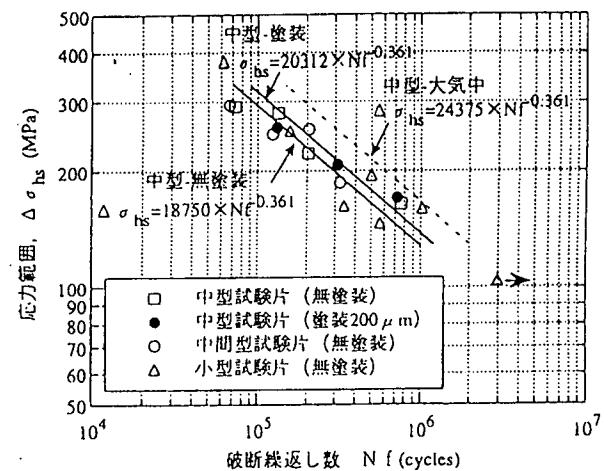


図8.3 中型試験片の疲労強度

9. 腐食疲労試験データベース

9.1 まえがき

構造用鋼材の海水中の腐食疲労試験についてはこれまで多くの実験的研究がなされている。そこで過去の腐食疲労に関するデータを調査し、さらに本SRにおける実験結果を加えてデータベース化を図った。

9.2 データ調査

図9.1に示すような腐食疲労データの調査シートにより、データの収集を行った。調査文献の一覧を表9.1に示す。全部でシート枚数190データ総数880となった。

9.3 調査データのデータベース化

収集したデータを汎用ソフト“ACCESS”を利用してデータベース化した。データは汎用ソフト“ACCESS”により図9.1のデータシートと同じイメージで操作することが出来る。また、任意の項目に関する検索条件を設定することにより該当するデータを検索し、その結果をアスキーファイルに書き出すことが出来る。

9.4 調査結果

調査の結果、50キロ級高張力鋼T M C P材(H T 50-C R), 軟鋼材の母材及び軟鋼材、80キロ、60キロ高張力鋼の隅肉溶接継手および50キロ高張力鋼T M C P材(H T 50-T M C P)の突き合わせ溶接継手の人工海水中の腐食疲労データが得られた。これらの調査データと本研究で得られて実験結果を基にして、海水中の腐食疲労強度データベースを作成した。

さらに、調査データについてS-N線図表示を行い結果を図示するとともに表にまとめた。

S-N線図表示の例を図9.2に示す。

表9.1 調査文献

- | | |
|---------------|---|
| 1) 日本鉄鋼協会 | 「鉄鋼材料の海水中腐食疲労・応力腐食割れデータ集」 1986年9月 |
| 2) SR 128研究部会 | 「船殻の腐食と腐食疲労による損傷防止対策に関する研究」 第77号
1980年5月 |
| 3) 江原ほか | 「低温海水環境下における海洋構造物用高張力鋼の腐食疲労挙動」
三菱重工技報 Vol. 23 No. 4 (1986) |
| 4) 矢島ほか | 「T M C P型50キロH T鋼板大入熱溶接鋼の海水中疲労強度について」
西部造船会会報 第71号 (1985) |
| 5) 大内ほか | 「高張力鋼溶接継ぎ手の人工海水中疲労強度におよぼす温度、溶存酸素および
カソード防食の影響」 鉄と鋼 75-1 (1989) |
| 6) SR 220研究部会 | 「バラストタンクの腐食疲労に関する研究」 1996年 |

資料名	材料名	試験方法
シート番号: 100 資料番号: 2	材料名: SW41A	寿命: NF
資料名: SR128/5.1	降伏応力: MPa	負荷形式: R
機関名: KII	引張応力: MPa	制御量: L
年代: 1973	伸び: %	波形: □
試験環境	試験温度: °C	繰り返し速度: 0.17 Hz
	D.H.: □	応力比: -1
電気伝導度:	ns/cm	平均応力: MPa
溶存酸素:	ppm	接合: 焊手形式: □
電位:	V	溶接法: □
電流密度:	mA/cm ²	脚長(L): mm
比流量:	mL/cm ² 分	高さ(H): mm
比液量:	L/cm ²	付加物板厚(T): mm
環境: NA	状態方法: □ 防食方法: □	シート番号: σ_a [MPa]: N: R:
塗装 塗料の種類: □		試 100 392 3310
下地処理: □		驗 100 292 13800
角加工: □		結 100 196 299000
塗装膜厚: μm		100 147 420000
		100 245 57200
		100 343 4930
		データ一覧

図9.1 データシートの編集画面

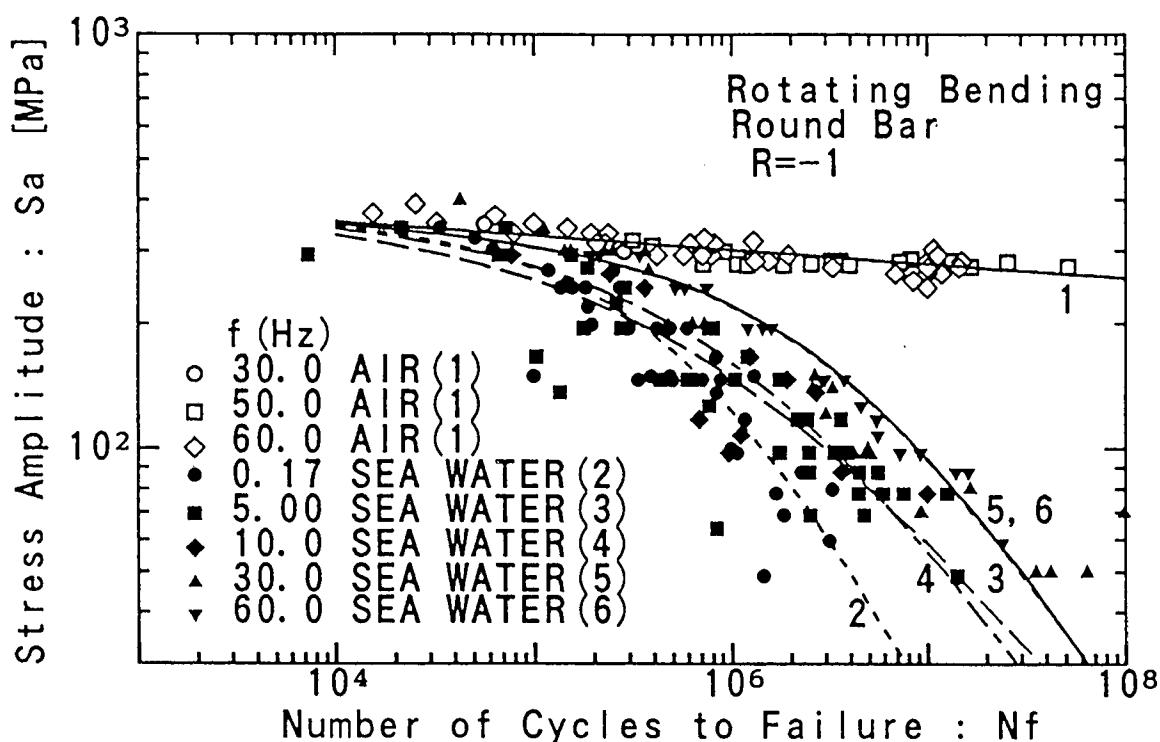


図9.2 S-N線図表示の例 (HT-50CRの腐食疲労データ)

10. 研究成果の総括

10.1 得られた成果

3年間に渡り、KA32鋼（315N/mm²級TMC P鋼）の試験片を用いた系統的な腐食疲労試験の結果多くの知見を得た。以下にその成果の概要を述べる。

(1) 小型及び中間型試験片を用いた腐食疲労試験によって次の成果が得られた。

1) 基準となる母材切欠き試験片について大気中のS-N線図が得られた。

2) 無塗装の母材切欠き試験片、突合せ溶接継手試験片、角回し溶接継手試験片について海水温度の影響を調べた所、つぎのことが分かった。

a) 母材の疲労強度は25°Cから温度上昇に伴い低下する。

b) 突合せ溶接継手試験片及び角回し溶接継手試験片については海水温度の影響はほとんど見られなかった。

3) 同種の試験片について塗膜厚を50, 100, 200, 300 μmと変化させ、また人工海水中の温度を25, 40, 60°Cと変化させて疲労試験を行った所、つぎのことが分かった。

a) 母材については低応力の長寿命側で腐食疲労強度の改善が見られた。

また海水温度が25°Cから上昇すると疲労強度は僅かに低下するが無塗装材に比較すると塗装による疲労強度改善効果は維持されている。

b) 突合せ溶接継手、角回し溶接継手とも本実験のような高応力域では塗膜厚の影響は明確に現れなかった。

4) 電気防食を実施して人工海水中で疲労試験を行った結果、電気防食は有効で、低応力域では大気中とほぼ同等の疲労強度が得られた。

5) 腐食損傷面の検査の結果、ピットの発生が腐食疲労強度に大きな影響を及ぼすことが分かった。

6) 小型試験片と中型試験片及びその中間の形状の中間試験片の角回し溶接止端部付近では降伏点に達する残留応力が発生していることが判明した。

(2) 実物を模擬した中型試験片について塗装の有無に分けて疲労試験を実施し、小型試験片の試験結果との対比を行った。その結果つぎのことが分かった。

1) 無塗装試験片について人工海水中試験の寿命は大気中の寿命の50%となった。

2) 塗膜厚を200 μm 40°Cの人工海水中で疲労試験を行った結果、大気中に比較して60%まで低下した。

3) 塗膜は構造物の海水腐食に対しては効果があるが、応力の大きい領域では小型試験片と同様に疲労強度低下には効果が小さいことが確認された。

4) 小型試験片、中型試験片及び中間型試験片の結果をホットスポット応力(SR202のB法)で整理するとこれらはほぼ一致した。小型試験片の結果を構造物の腐食疲労寿命の評価に適用可能である。

(3) パラストタンクの実環境と実験室での環境条件とを比較した結果、水質、温度、パラスト濃水率などが今後検討を要することが分かった。

(4) 就航中のタンカー、バルクキャリアのパラストタンクの腐食、損傷状況を調査した結果、これらの状況は第1期から第3期に分かれ、塗膜が健全であるにも拘らずき裂のある場合があることが判った。

(5) 以上の研究成果を基につぎの提案をした。

1) 各種条件下のS-N線図

2) 船体構造部材の腐食疲労強度評価法

(6) 本研究の成果と従来の腐食疲労の実験データを収集しデータベース化を行った。

10.2 成果の活用

以上の研究成果は今後の船舶の設計、建造、保守、点検等のライフサイクルに渡って次のように活用される。

(1) 腐食疲労の寿命予測法の精度向上が図れる。

- 1) 高張力鋼を用いた小型試験片について膜厚、温度変化等の影響による S-N 線図が得られた。今後各種の構造物の設計に有用となる。
- 2) パラストタンク内構造部材の疲労強度評価法の適用によって塗膜が比較的健全である建造後 8 年間程度の寿命予測が可能となる。

(2) 実船の検査保守技術の方向付けが可能となる。

- 1) 塗膜のき裂の発生により構造部材のき裂の進展が発見される。
- 2) き裂を伴わない腐食または塗膜劣化が発見された場合、以後の検査保守を検討する上で、提案された余寿命予測手法が適用可能となる。
- 3) 電気防食は腐食疲労寿命改善にも有効であり、又、局部的な防食電位分布の推定に基づくバックアップアノードの効果検討も保守点検計画の重要な項目である。

(3) 実船パラストタンクの信頼性向上及び長寿命化が実現する。

- 1) 雨水によるピットの発生を防止するために溶接ビード部は内業での溶接加工直後にプライマー塗装を施すなど、曝露環境にさらさない防錆対策が重要である。
- 2) 疲労強度上重要な箇所については溶接ビード形状の重点管理を行う。

10.3 成果の制約条件と今後の課題

本研究は主として実験室において試験片を用いた実験及び理論解析により行われたために多くの制約があり、実環境を十分模擬しているとは言い難い面もある。そこで以下のように研究上の制約をまとめて研究の性格を明確にすると共に、未解決の課題を抽出して、今後の研究の参考としたい。

(1) 長期間腐食疲労実験

腐食疲労には時間の影響が大きいために実際と同じ繰返し速度 0.17 Hz で最長 6 ヶ月の実験を実施した。今後は数年間に及ぶ腐食疲労強度実験が必要である。

(2) き裂発生検出法の開発

試験片のき裂発生を人工海水中で発見することは、特に塗膜がある場合の検証が困難であった。
今後き裂発生の確認方法と腐食環境中のき裂伝播係数の確保が必要である。

(3) 塗膜の技術データの確保

塗装された構造部材の腐食疲労は塗膜を浸透した海水による腐食疲労である。今後は塗膜に関する技術的なデータの採取が必要である。

(4) 塗装部材の疲労強度改善策

塗装された部材の海水中疲労強度は大気中の疲労強度よりもかなり低減した。

船舶や海洋構造物の合理的な設計のために大気中の疲労強度まで向上させる局部的な施工法の開発が必要となる。

結 言

一般に船舶で鋼板腐食という時に、塗装の有無、大気中と海水中などの環境の違い、或いは温度差などが一緒になって論じられており、科学的な判断が乏しかった。そして腐食が年単位で進行するため、腐食の現象はこれらの因子の影響をしっかりと認識した上で把握されておらず、諸々が定量化されていないのが現状である。

船体内で最も腐食環境の厳しいバラストタンク内の構造部材の腐食による損傷の防止対策としてタールエポキシ塗料の塗装が船級協会規則により義務付けられており、建造時の下地処理や塗装工事、更に就航中の良好な保守・点検の実施が要求されている。

そこで本研究部会では研究の主眼を塗装されたバラストタンク内構造部材の腐食疲労強度に絞って研究を実施した。

本研究部会ではK A 32鋼（T M C P）を使用した小型試験片により大気中と人工海水中で疲労試験を行い、塗膜の厚さ、試験温度、電気防食の影響について実験及び理論計算により研究し、さらに実構造を模擬した中型試験片を用いて小型試験片の結果の検証を行った。また中間型試験片で中型試験片の代替の可能性を検討した。

疲労強度では時間の影響が大きいので、繰り返し速度を実構造と同じく0.17Hzとした。現実に塗膜が比較的健全な期間である8年間の様子を忠実に再現するには8年間の実験期間を必要とするが、本研究では1個の実験点の最長期間は6ヶ月であった。

本研究では短い研究期間ながら、従来、ほとんど研究実績のなかった上記のようなT M C P張力鋼を用いた系統的な実験研究を行い、腐食疲労強度について以下に示すような多くの有益な成果を得た。

- (1) 小型試験片の母材については低応力の長寿命域では塗膜厚の増加に伴い疲労強度改善が見られたが、溶接継手部、角回し溶接継手部とも本実験のような比較的応力の高い領域では塗膜厚の増加による疲労強度の改善が明確ではなかった。
- (2) 電気防食が予想以上に疲労強度低下防止に有効で、低応力域では海水中の疲労強度も大気中とほぼ同等である。
- (3) 小型試験片、中型試験片及びその中間の形状の中間型試験片の試験結果から、ホットスポット応力を使用して腐食疲労の寿命推定が可能であることが分かった。
- (4) 腐食疲労のメカニズムやその他の因子について多くの知見を得た。また腐食疲労データの収集によるデータベースは今後の研究に大いに役立つものである。
- (5) 本研究成果を使用してバラストタンク内構造部材について、腐食疲労強度評価法を提案した。本研究では主として第1期を対象としたが、設計時に腐食疲労強度の寿命推定が可能となり、重点検査箇所の特定や保守点検の方向付けが可能となった。

塗装された構造部材の腐食疲労という観点から系統的な実験研究に取組み、以上の成果を得たが、腐食の問題は更に果しなく前面に広がっている。今後は合理的な船体構造設計と保守・点検技術の向上のために、数年間に渡る長寿命側の実験とデータの積重ねを行い、更に信頼性の高い腐食環境下の腐食及び疲労強度の評価法の確立が望まれる。

以上。