タールエポキシ塗装した造船用鋼の腐食疲労挙動

正員	江	原	隆一郎*		山	田	義	和*
	紀	博	徳**	正員	多	田	益	男**
正員	橋	本	州 史***		今	城	康	臣****
正員	伏	見	彬*****					

Corrosion Fatigue Behavior of Tar Epoxy Resin Coated Ship Structural Steel

by	Ryuichiro Ebara, <i>Member</i>	Yoshikazu Yamada
	Hironori Kino	Masuo Tada, <i>Member</i>
	Kunifumi Hashimoto, <i>Member</i>	Yasuomi Imajo
	Akira Fushimi, <i>Member</i>	

Summary

In this paper it is mainly presented on corrosion fatigue behavior of the tar epoxy resin coated KA 32 (TMCP) steel for ballast tank based on the corrosion fatigue test results for the notched plate specimen and ultrasonic corrosion fatigue test results for the plane round bar specimen with different tar epoxy resin coating thickness of 50 to 300 μm in an artificial sea water. In higher nominal stress range an effect of tar epoxy resin coating for improvement of corrosion fatigue life was not observed. The lower the stress level, an improving effect for corrosion fatigue life increased. An increase of corrosion fatigue life by tar epoxy resin coating with 200 μm thickness was 2.8 times for that of uncoated specimen at nominal stress range of 199.8 MPa. The thicker the tar epoxy resin coating thickness the longer the fatigue life is.

Electric impedance and capacitance were measured for plate specimen during exposure test and for fatigue test specimen during corrosion fatigue test in an artificial sea water. The degradation of tar epoxy resin coating occurs at the notched area or the weld toe where the coating absorbed water.

It can be concluded that the improvement of corrosion fatigue strength is not effective when an interception effect disappear due to the breakage or the degradation of the tar epoxy resin coating.

1. はじめに

バラストタンクの寿命評価を行なうためには、高温多湿又は、海水という苛酷な腐食環境下におけるバラストタンク部材の腐食疲労強度評価が不可欠である。特に、腐食疲労強度におよぼすタールエポキシ塗料の塗膜効果の把握は

重要である。タールエポキシ塗料による防食効果に関してはこれまでに日本造船研究協会 SR 201 部会等で研究されている¹⁾が、バラストタンク用鋼の腐食疲労強度におよぼすタールエポキシ塗膜および塗膜厚さの影響についてはまだ不明な点が多い。そこで、本研究では先ずタールエポキシを塗装した平板切欠試験片を用いて人工海中における腐食疲労試験を行い、バラストタンク用 KA 32 (TMCP) 鋼の腐食疲労強度におよぼすタールエポキシ塗料および塗膜厚さの影響について検討した。また、タールエポキシを塗装した半ダンベル型丸棒平滑試験片を用いて人工海中における超音波腐食疲労試験を実施し、長寿命腐食疲労強度におよぼすタールエポキシ塗料および塗膜厚さの影響について検討した。

一方、塗膜の耐久性評価方法に関しては、これまでに多

* 三菱重工業(株)広島研究所

** 三菱重工業(株)長崎研究所

*** 三菱重工業(株)長崎造船所

**** 中国塗料(株)技術部

***** 東京大学工学部

くの研究がなされ、電気化学的測定法をはじめとする各種測定法の特徴が腐食機構と関連させて整備されつつある²⁾。しかしながら、繰返し応力負荷下における塗膜の劣化に関する情報は極めて少ない。バラストタンクを想定した試験環境下では過去に軟鋼材にタールエポキシ塗膜を施した試験片の低サイクル腐食疲労試験が行なわれ、塗膜劣化におよぼす傷、海水温度、繰返し荷重等の影響について有益な知見が得られている³⁾が、腐食疲労過程における塗膜劣化の詳細は未だ明らかにされていない。そこで、タールエポキシ塗膜の吸水性の静的および腐食疲労過程における経時変化をタールエポキシ塗膜試験片の交流インピーダンスおよび電気容量を測定することにより、腐食疲労過程における塗膜劣化挙動について調査した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材としては Table 1 に示す化学組成と機械的性質を有する板厚 10 mm の KA 32 (TMCP) 鋼を用いた。タールエポキシ塗料としては中国塗料(株)製のビスコン HB-200 を用いた。

2.2 腐食疲労試験方法

1) 切欠試験片の腐食疲労試験

腐食疲労試験片は Fig.1 に示すように、平行部の両側に半径約 3.1 mm の切欠を有する厚さ 10 mm の平板切欠試験片 ($Kt=2.0$) である。機械加工後 20 日間の大気暴露(強制水散布処理)の後、切欠部を含む試験片全面に厚さ 200 μ m のタールエポキシ塗料を塗布した。また、このほか塗膜

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of tested steel

Material	Chemical composition (mass%)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
KA32(TMCP)	0.14	0.20	1.14	0.016	0.004	390	496	29

Fig. 1 Fatigue test specimen (unit: mm)

厚さの効果を把握するために、50, 100, 300 μ m のタールエポキシ塗料を塗布した腐食疲労試験片を作製した。

疲労き裂の発生を検知するために、試験片表面の切欠底近くに Fig. 2 に示すように歪ゲージ (共和電業製, 小型防水ゲージ, 型番 KFWS-2 N-120-C 1-11, L 3 M 2 R) を表裏 2 枚ずつ計 4 枚貼付した。タールエポキシ塗装に際しては歪ゲージ貼付箇所をマスキングした。その後歪ゲージを貼付後、その上にタールエポキシ塗料を塗布した。

腐食疲労試験に用いた人工海水循環装置は、Fig. 3 に示すように貯水タンク (60 ℓ)、恒温槽、流量計、試験チャンバーおよび受水槽等から構成される。貯水タンク内で空気をバブリングした人工海水 (pH 8.2) は、恒温槽内で一定温度 (298 ± 1 K) に保持される。その後、フィルター (3 μ m) および流量計を通してポンプにより流量 0.3 ℓ /min で試験チャンバー (0.5 ℓ) へ送られる。人工海水は試験チャンバーから受水槽 (40 ℓ) に一旦送られ、受水槽内の人工海水が一定量になると自動的に貯水タンクにもどされる。このような人工海水循環装置を用いて、試験チャンバー内の人工海水は試験中、一定温度 (298 ± 1 K) に保持される。人工海水は市販のアクアマリンを用いて作製した。また、疲労試験機としては軸荷重油圧サーボ疲労試験機 (98 K N) を用いた。

人工海水中における腐食疲労試験は、試験速度 0.17 Hz, サイン波形, 応力比 $R(\sigma_{\min}/\sigma_{\max})=0.05$ の条件にて実施し

Fig. 2 Location for strain gauge and aluminum foil (unit: mm)

Fig. 3 Flow chart for artificial sea water circulation

た。破断試験片の破面は SEM (JSM-840 A) にて詳細に観察した。

2) 超音波腐食疲労試験

超音波腐食疲労試験片の形状と寸法を Fig. 4 に示す。試験片は厚さ 10 mm の KA 32 TMCP 鋼板から圧延方向に切り出し、機械加工後、タールエポキシ塗料をドブ漬にて塗装した。膜厚は 50, 100, 200 及び 300 μm とした。超音波腐食疲労試験装置の概略を Fig. 5 に示す。試験環境は人工海水 (室温) とした。また、腐食疲労試験は軸力、正弦波、応力比 $R(\sigma_{\min}/\sigma_{\max}) = -1$ 、試験速度 14.9 KHz で実施した。

なお、応力 σ は (3) 式⁴⁾ により算出した。

$$\sigma = \frac{\pi}{2} \times E \times \frac{U}{X_o} \quad (1)$$

$$X_o = \frac{C}{4f} \quad (2)$$

$$\therefore \sigma = \frac{2\pi E f U}{C} \quad (3)$$

ここで、 σ : 公称応力範囲 ΔS (MPa)

U : 試験片先端の振幅 (μm)

E : 縦弾性係数 206010 (MPa)

C : 材料中を伝わる音速 5.9×10^3 (m/s)

f : 共振周波数 14.9 (KHz)

X_o : 試験片中を伝わる縦波の 1/4 波長

2.3 塗膜の吸水性の経時変化

(1) 塗膜の吸水性の静的経時変化

Fig. 4 Ultrasonic corrosion fatigue test specimen (unit: mm)

Fig. 5 Ultrasonic corrosion fatigue testing apparatus

幅 70 mm, 長さ 150 mm, 厚さ 2.3 mm の KA 32 (TM-CP) 平板試験片の表面にサンドブラスト処理を施した後、タールエポキシ塗料 (ビスコン HB-200) をスプレー塗装法により塗装した。塗膜厚さは 50, 100, 200, 300 μm とした。また、塗装後 293 K の恒温室内にて 7 日間乾燥した。

次に、塗膜試験片を 313 K の人工海水中に最長 240 日間浸漬し、3 ヶ月毎に試験片を取り出し、塗膜の交流インピーダンス (以下インピーダンスと記す) および電気容量を測定した。インピーダンスは JIS K 5400 8.15 に従い、三田無線研究所製のインピーダンスメーター (型式 D-55 A) を用い、3% 食塩水にカルボキシルメチルセルロースを 3% 溶解させて作成した電解質の糊で塗膜表面に 5 cm $\times$ 5 cm のアルミ箔を貼付し、一時間経過後周波数 200, 500 及び 1000 Hz にて測定した。

また、塗膜の吸水率, $\tan \delta$ はそれぞれ (4) 式および (5) 式から算出した⁵⁾。

$$X_v = 100 \log(C_m/C_{m0}) / \log 80 \quad (4)$$

ここで、 X_v : 吸水率 (vol %)

C_m : 浸漬後の塗膜の容量

C_{m0} : 浸漬開始時の塗膜の容量

$$\tan \delta = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C \cdot R} \quad (5)$$

ここで、 π : 円周率

f : 周波数 (Hz)

C : 容量 (F)

R : 抵抗 (Ω)

(2) 腐食疲労過程における塗膜の吸水性の経時変化

Fig. 2 に示すように Fig. 1 に示した平板切欠疲労試験片の切欠部 2 ヶ所および平面部 1 ヶ所にアルミ箔を貼付し、任意の繰返し数毎に腐食疲労試験を中断し、インピーダンスおよび電気容量を測定した。

塗膜厚さは 50, 100, 200 μm とした。また、塗膜の作製およびインピーダンスの測定方法は 2.3 (1) で述べた方法と同様である。

3. 実験結果

3.1 腐食疲労試験結果

人工海水中における厚さ 200 μm のタールエポキシ塗膜平板切欠試験片の腐食疲労試験結果を Fig. 6 に示す。同図には船研にて実施した母材の大気および人工海水 (298 K) 中の S-N 線図⁶⁾ も併せて示している。

腐食疲労寿命におよぼすタールエポキシ塗料の効果は公称応力範囲が高い領域ではわずかに認められるが、公称応力範囲の低下にともなわずに少しずつ大きくなる傾向を示している。公称応力範囲が 199.8 MPa の試験片では約 2.8 倍の腐食疲労寿命の改善がみられる。

人工海水中における厚さ 50, 100 および 300 μm のタールエポキシ塗膜平板切欠試験片の腐食疲労試験結果を厚さ

Fig. 6 S-N curve for tar epoxy coated notched specimen in artificial sea water

Fig. 7 S-N curve for tar epoxy coated notched specimen with various thickness in artificial sea water

200 μm の試験片と比較して Fig. 7 に示す。さらに、塗膜厚さと腐食疲労寿命との関係を Fig. 8 に示す。両図から、腐食疲労寿命におよぼす塗膜厚さの影響は $N_f < 10^5$ ではわずかに認められる。しかしながら、 $10^5 \leq N_f \leq 10^6$ では膜厚効果は顕著に現れ、膜厚 200 μm では 50 μm に比較し約 2.5 倍の寿命延長が見られる。今後は、さらに長寿命域での塗膜効果について検討する必要がある。

腐食疲労試験後のタールエポキシ塗膜平板切欠試験片の外観観察の結果、破面には赤錆が著しく付着していた。また、破断部以外のタールエポキシ塗膜は健全であった。

SEM による破面観察の結果、Fig. 9 に示すように起点部には腐食ピットが多数観察された。又、腐食疲労き裂伝播部には延性ストライエーションが支配的に観察された (Fig. 10)。ただし、き裂の深い領域の破面は粗く、擬へき開的で、脆性的なストライエーション状模様や腐食溶解が特徴的に観察された (Fig. 11)。なお、塗膜厚さが変化して

Fig. 8 Relation between tar epoxy coating thickness and number of cycles to failure

Fig. 9 Corrosion pit observed at crack initiation area, artificial sea water (298 K)
 ΔS : 314 MPa, N_f : 1.05×10^5 cycles
 tar epoxy coating thickness 200 μm

も破面形態に大差は認められなかった。

このように、タールエポキシ塗膜平板切欠試験片では塗膜の劣化後、塗膜にき裂が発生し母材に腐食ピットが発生する。その後腐食ピットから腐食疲労き裂が発生しストライエーションを伴いながら腐食疲労き裂が伝播し、破断に至るものと思われる。なお、腐食疲労き裂の発生は貼付した歪ゲージにて検出できたが、 N_c は N_f に近い値であり、貼付位置から推定してき裂がかなり進展した状況で N_c を検出したものと考えられる。また、比較的高応力領域では、約 10^4 回繰返し後歪ゲージがはがれてしまい、 N_c 値の検出はできなかった。

Fig. 12 に母材およびタールエポキシ塗膜丸棒平滑試験片の超音波腐食疲労試験結果を示す。同図から KA 32 (TMCP) 鋼母材の人工海水中における 10^{10} 回時間強さはイオン交換水 (大気に相当) 中に比較し約 75 % 低下することが明らかである。また、人工海水中では母材に比較し膜厚 50 μm の試験片でも塗膜による腐食疲労強度の改善効果がわ

Fig. 10 Corrosion fatigue fracture surface, 0.55 mm from crack initiation area
 ΔS : 314 MPa, N_f : 1.05×10^5 cycles
 tar epoxy coating thickness 200 μ m
 Arrow shows crack propagation direction

Fig. 11 Corrosion fatigue fracture surface, 4.85 mm from crack initiation area
 ΔS : 314 MPa, N_f : 1.05×10^5 cycles
 tar epoxy coating thickness 200 μ m
 Arrow shows crack propagation direction

ずかに認められる。しかしながら、膜厚 100, 200 及び 300 μ m の試験片の腐食疲労強度の改善効果は著しい。母材に比較し 10^{10} 回時間強さで約 3 倍の腐食疲労強度の改善が認められる。

超音波腐食疲労では 10^{10} 回には約 240 時間 (10 日) を要する。後述のように約 240 時間 (10 日) 程度の浸漬では膜厚 100 μ m でも吸水による塗膜の劣化はほとんど認められないので、塗膜にき裂が生じないかぎり腐食疲労強度の改善効果が十分得られたものと思われる。

すなわち、高応力レベルでは、塗膜が早期に破断するために塗膜による腐食疲労寿命の改善効果はほとんど見られない。しかし、応力が低下するにつれて、塗膜のき裂発生

Fig. 12 Ultrasonic corrosion fatigue test results

時期が遅延するために、塗膜による腐食疲労寿命の改善効果が十分に認められるものと思われる。超音波腐食疲労試験片においても前述のタールエポキシ塗膜平板切欠試験片の場合と同様に破面の起点部には腐食ピット、進展部にはストライエーション、擬へき開破面、脆性ストライエーションおよび腐食溶解が特徴的に観察された。

このように、超音波腐食疲労ではタールエポキシ塗膜平板切欠試験片の場合とは異なり、塗膜の破断が主因で腐食疲労が生じたものと考えられる。

3.2 塗膜の吸水性の経時変化

(1) 塗膜の吸水性の静的経時変化

周波数 200 Hz で測定した平板試験片の塗膜のインピーダンス、吸水率および $\tan \delta$ の経時変化をそれぞれ Fig. 13, Fig. 14 および Fig. 15 に示す。

インピーダンスの測定は A), B), C) 3 枚の塗膜試験片で行なったが、試験片間のバラツキはほとんど見られない。膜厚 50 μ m の試験片ではインピーダンスは浸漬日数と共に急激に低下し、約 360 時間 (15 日) で 10^3 Ω 程度となる。膜厚が 100 μ m になるとインピーダンスの低下の傾向は膜厚 50 μ m に比較し緩やかになるが、約 1440 時間 (60 日) で 10^3 Ω 程度まで低下する。一方、膜厚 200 μ m および 300 μ m では 5760 時間 (240 日) 経過後もインピーダンスの低下は全く見られず、塗膜が健全であることが明らかである。このように、膜厚の相違によるインピーダンスの経時変化の相違については、アルキドエナメル塗料についても同様の結果が得られている⁷⁾。

塗膜外観の目視観察結果では、膜厚が 50 μ m の場合には浸漬開始後 7 日前後でフクレ、錆の発生が見られた。その時点から急激な容量の増加、抵抗値の減少が見られ、 $\tan \delta$ が非常に大きくなった。膜厚 100 μ m の場合には浸漬開始 30 日前後でフクレ、錆の発生が始まり、膜厚 50 μ m の場合と同様にその時点より $\tan \delta$ が急激に増加した。

また、浸漬時間 2160 時間 (90 日)、2880 時間 (120 日) になると、膜厚 50 μ m, 100 μ m いずれの場合も塗膜の全面

Fig. 13 Impedance/Time curve for tar epoxy coated specimen with various coating thickness
Artificial sea water, 200 Hz

Fig. 14 Water absorption rate/Time curve for tar epoxy coated specimen with various coating thickness

Fig. 15 $\tan \delta$ /Time curve for tar epoxy coated specimen with various coating thickness

Fig. 16 Impedance/Time curve for 200 μm tar epoxy coated specimen for three different frequencies

にフクレ、錆が発生した。また、塗膜の欠陥箇所も明らかになり、測定位置により試験データにバラツキが生じやすくなることが判明した。特に膜厚 50 μm の試験片では 3600 時間 (150 日) 前後には全面に錆が発生し、母材表面がむきだしとなりその後のインピーダンス測定が不可能となった。

膜厚が 200 μm の試験片では浸漬時間 2880 時間 (120 日) 後でもフクレ、錆の発生は見られず外観は良好であっ

た。しかし、3600 時間 (150 日) 後には試験片 C) に部分的にフクレが発生し、測定位置による試験データにバラツキが見られた。膜厚 300 μm の試験片では塗膜の劣化は全く観察されなかった。

なお、大気中におけるインピーダンス測定時の気温、湿度及び測定位置の影響の為かいずれの膜厚においても浸漬時間 1440 時間 (60 日) 後のインピーダンス測定試験結果が 2160 時間 (90 日)、2880 時間 (120 日) のインピーダンス測定試験結果に比較し劣化する結果となった。

又、Fig. 16 には周波数 500 及び 1000 Hz によるタールエポキシ塗膜平板試験片の膜厚 200 μm の塗膜のインピーダンスの測定結果を周波数 200 Hz の場合と比較して示す。同図から、各周波数ともに同様な経時変化を示していることが明らかである。この傾向は膜厚 50, 100, 300 μm の試験片でも全く同様であった。Fig. 17 にはインピーダンスの周波数依存性を示す。同図から、各膜厚試験片のインピーダンスの周波数依存性は一般的に言われているような⁸⁾ 塗膜の健全性を良く表している。

(2) 腐食疲労過程における塗膜の吸水性の経時変化

膜厚 50, 100, 200 μm のタールエポキシ塗膜平板切欠試験片の腐食疲労試験を公称応力範囲 210 MPa で実施した。腐食疲労試験を中断して切欠部 2 ヲ所および平面部にて測定した周波数 200 Hz によるインピーダンスの経時変化を

Fig. 17 Impedance/Frequency curve for tar epoxy coated plate specimen

Fig. 19 Impedance/Number of cycles curve for tar epoxy coated fatigue test specimen with 200 μ m coating thickness

Fig. 18 Impedance/Number of cycles curve for tar epoxy coated fatigue test specimen with 50 μ m coating thickness

Fig. 20 Ratio of impedance decrease/Number of cycles curve for tar epoxy coated specimen

タールエポキシ塗膜厚さ 50 μ m, 200 μ m の試験片について Fig. 18 および Fig. 19 にそれぞれ示す。

両図から膜厚の大小にかかわらず、平面部に比較し、切欠部のインピーダンスの低下率が著しいことが明らかである。また、インピーダンスの低下は各膜厚試験片共にタールエポキシ塗膜平板試験片に比較し、短い時間で生じていることが明らかである。例えば、膜厚 50 μ m の試験片ではインピーダンスが $10^3 \Omega$ に低下するのは平板試験片では約 360 時間 (15 日) 経過後であるが、切欠部では 208.8 時間 (8.7 日) となり 45 % 短縮されている。

また、膜厚 200 μ m の場合、平板試験片ではインピーダンスは 5760 時間 (240 日) 経過後も全く変化していないのに比較し、平板切欠疲労試験片では繰返し数と共に低下する傾向にある。

Fig. 20 に塗膜厚さ 200 μ m の平板切欠試験片に関して平面および平板切欠疲労試験片切欠部のインピーダンス低下率の経時変化を比較して示す。ここで、インピーダンス低下率は [(初期値 - 測定値) / 初期値] $\times$ 100 % で計算して

求めた。何れの膜厚共に平面に比較し平板切欠疲労試験片切欠部のインピーダンスの低下率が著しいことが明らかである。

このように、タールエポキシ塗膜平板切欠試験片の腐食疲労過程においては平板試験片の場合とは異なり、膜厚が 200 μ m の場合においても塗膜の劣化は応力繰返し数と共に生じ、しかも切欠部で著しいことが明らかとなった。

4. 考 察

以上の実験結果から、タールエポキシ塗膜平板切欠試験片の腐食疲労過程における塗膜劣化と腐食疲労強度の改善効果の機構は次のように考えられる。

まず、高応力レベルでは応力集中が生ずる切欠部で塗膜に早期に腐食疲労き裂が発生し、タールエポキシ塗膜による人工海水の遮断効果が消失する為に腐食疲労寿命の改善効果はほとんど期待できない。

永井等もビニル系塗料を施した軟鋼材の 3 % NaCl 水溶液中における疲労試験を実施し、塗料が損傷すれば交流イ

ンピーダンスが急激に変化し、腐食疲労強度の改善効果が消失することを明らかにしている⁹⁾。

エポキシ樹脂皮膜試験片の疲労き裂伝播速度が皮膜の破断により、大気遮断効果を消失し大気中と同程度に加速され、皮膜による改善効果がその時点で消失すること¹⁰⁾を考慮すると、切欠試験片の腐食疲労強度の改善効果がタールエポキシ塗膜の破断による腐食疲労き裂伝播速度の加速により消失したことが容易に想像できる。本研究の結果では、塗膜試験片の腐食疲労き裂発生寿命 N_e は破断寿命 N_f に近いとの測定結果が得られている。しかしながら、 N_e 値は切欠部から 1 mm 内部に入ったところの値であり、今後タールエポキシ塗膜平板切欠試験片切欠部の N_e 値を精度良く測定し、切欠部からの腐食疲労き裂の発生および伝播におよぼすタールエポキシ塗膜の影響を定量的に評価することが必要である。

次に、応力の低下にしたがって、塗膜にき裂が生じにくくなることにより、環境遮断効果のために腐食疲労寿命の改善効果が認められるようになる。しかしながら、時間の経過とともに塗膜の吸水率が増加すると塗膜が劣化し、腐食疲労寿命の改善効果が小さくなるものと思われる。

事実、応力集中による切欠部における塗膜の破断が生じにくく、また、比較的短時間の試験のために吸水による塗膜劣化が少ない丸棒平滑試験片による超音波腐食疲労の結果、実験に供したすべてのタールエポキシ塗膜丸棒平滑試験片で腐食疲労強度の改善効果が認められている (Fig. 12)。なお、平板切欠疲労試験と超音波疲労試験では、塗装の前処理、応力比が異なるが、腐食疲労強度への影響はわずかであると考えられる。

塗膜の劣化は塗膜厚さに支配されるので、少なくとも 200 μm の厚さが必要であるが、切欠部で塗膜の劣化が見られたことから溶接継手趾端部でも平面部に比較し塗膜の破断や塗膜の劣化が生じやすくなるものと考えられ、十分な腐食疲労寿命の改善効果が得られにくくなる。

本研究においても塗膜の交流インピーダンスおよび電気容量を測定し、塗膜の劣化が繰返し応力の切欠部で加速されとの結果を得ている。

このように、交流インピーダンスや電気容量の測定はタールエポキシ塗膜の健全度評価に極めて有用な手法であることが明らかになった。今後は、塗膜の吸水機構、低応力、長寿命域における塗膜による腐食疲労強度改善効果の解明等、更に詳細な検討が必要と思われる。

本研究結果を考慮すると、実船バラストタンクにおいて厚さ 200 μm 程度のタールエポキシを塗装していることは妥当なことであると言える。綿密な塗装により著しい腐食疲労強度改善効果が得られることは良く知られており¹¹⁾¹²⁾ 平面部のみならず腐食疲労の観点からは特に応力集中部や溶接部の塗装を注意深く実施することが重要と思われる。

本研究の結果、タールエポキシ塗膜平板切欠試験片にお

いては塗膜の破断、あるいは塗膜の劣化が生ずると塗膜による環境遮断効果が消失し、母材に生じた腐食ピットから腐食疲労き裂が発生し進展し破断に至ることが明らかになった。

しかしながら、本研究では平板切欠試験片で腐食疲労き裂が発生した腐食ピットが、水かけにより生じた静的腐食ピットか腐食疲労過程で生じた腐食ピットかは判断できなかった。

実船バラストタンクの寿命を見積るにあたっては、海水温度の影響等更に詳細な検討が必要である。

5. 結 言

本研究の結果得られた主たる結論は下記のとおりである。

- 1) 平板切欠試験片の腐食疲労寿命におよぼすタールエポキシ塗料の影響は、公称応力範囲が高い領域ではわずかに認められるが、公称応力範囲の低下にともなって少しずつ大きくなる傾向を示している。公称応力範囲が 199.8 MPa の試験片では約 2.8 倍の腐食疲労寿命の改善がみられる。
- 2) 平板切欠試験片の腐食疲労寿命におよぼすタールエポキシの塗膜厚さの効果は $N_f < 10^5$ ではごくわずかに認められるが、 $10^5 < N_f < 10^6$ は顕著に現れ、膜厚 200 μm では膜厚 50 μm に比較し、約 2.5 倍の寿命延長となる。
- 3) 最長試験期間約 10 日の丸棒平滑試験片による超音波腐食疲労試験の結果、膜厚 50 μm でもタールエポキシの効果がわずかに見られた。膜厚 100, 200, 300 μm の試験片では 10^{10} 回時間強さで約 3 倍の腐食疲労強度の改善効果が認められた。
- 4) タールエポキシ塗膜の劣化は吸水率の経時変化により生ずるが、膜厚 200 μm 以上であれば劣化しない。
- 5) 腐食疲労過程における塗膜の劣化は切欠部あるいは溶接継手趾端部の応力集中部で生じ、繰返し応力に依存する。低応力レベルでは塗膜による腐食疲労寿命の改善効果が認められ、改善効果は膜厚に依存する。
- 6) 塗膜試験片の腐食疲労強度改善効果は、塗膜の破断および吸水による塗膜の劣化により塗膜による環境遮断効果が無効になると消失する。
- 7) 腐食疲労き裂は、タールエポキシ塗膜の劣化後、母材に生じた腐食ピットから発生し、ストライエーションを伴いながら伝播する。

謝辞

本研究は、日本造船研究協会 SR 第 220 研究部会「バラストタンクの腐食疲労に関する研究」の一環として実施されたものである。藤田部会長（東京理科大学）はじめ委員各位に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) SR 201 研究部会“塗膜の耐久性評価法に関する調査

- 研究”総合報告書, 1990, 日本造船研究協会.
- 2) 第99回腐食防食シンポジウム資料, 塗膜下腐食および塗膜の耐久性と評価技術, 腐食防食協会, 1994.
- 3) 文献1)のp.127~168.
- 4) 小倉敬二; 大阪大学学位論文, 1966, p. 19.
- 5) 佐藤靖; 生産技術 22 (1967), p. 21~25.
- 6) 小林佑規, SR 220 研究部会 “バラストタンクの腐食疲労に関する研究” 平成7年度総合報告書, p. 37~50, 日本造船研究協会.
- 7) 永井昌憲; 文献2)のp. 27.
- 8) 関根功; 防食塗膜の最新評価法, 榎書店, p. 227~228, 1991.
- 9) 永井欣一, 竹内信彦, 赤石徹; 日本機械学会論文集 39 (1973), p. 510~515.
- 10) 益本功, 江原隆一郎, 溶接学会誌 41 (1972), p. 283~290.
- 11) 岡崎章三, 日本造船研究部会報告第77号, 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”, 1975, p. 65~72.
- 12) 井野幸雄, 在田正義; 鉄鋼の環境強度部会, 第3回シンポジウム前刷集, 鉄鋼の海洋環境共通試験とその解析, p. 278~291, 1987, 日本鉄鋼協会.
-