

検査用塗料による疲労き裂の検出

海上安全研究領域 材料信頼性研究グループ
輸送高度化研究領域 インテリジェント加工法研究グループ長
研究統括主幹付（技術開発担当）
重点研究支援協力員

*高橋一比古、牛嶋 通雄
秋山 繁
高田 篤志
古谷 典干

1. はじめに

船体検査における疲労き裂の検出は、現在、その殆どが目視検査に依っている。しかしながら、骨材と桁材の取合い部等、重要箇所の溶接構造ディテールは非常に複雑であり、このような箇所に発生したき裂を現場で発見し、その形状・寸法を把握することは容易でない。ばら積み貨物船の疲労損傷と保守点検に関するあるアンケート調査によれば、現状の検査によって発生したき裂の約60%が発見され、残り40%は見落とされていること、また発生したき裂の約3割が200mmを越え、約1割が500mmを越えて成長するという回答が得られている¹⁾。このようなき裂の見落としは、ダブルハルトンカーの目視検査においても同様に起こりうるものであり、構造信頼性の観点から極めて有害であると考えられる。従って、き裂の検出率および検出精度を高めるためには、現場における目視検査を有効に支援しうるような新たな方策を講ずる必要がある。

一方、1990年から約十年間に渡り、米国Lehigh大学においてSmart Paintと呼ばれる特殊な塗料によるき裂検出技術の研究が行われた²⁾。Smart Paintは、通常のメンテナンス用エポキシ樹脂系塗料中に、染料を内包するマイクロカプセルを混合して金属母材に塗布することにより、き裂の発生・伝播に伴うカ

プセルの破壊と共に染料が流出して塗膜表面に発色し、目視によるき裂検出を容易にするというシステムである。システムの概念図を図-1に示す。Smart Paintの開発に携わったDr. Miron²⁾によれば、大型の構造モデル試験体による検証試験の後、米国Pennsylvania州にある鋼橋においてフィールドテストを行い、これまでにほぼ良好な結果が得られているという。橋梁と船舶とでは、その構造形態や使用環境が異なるとしても、共に大型溶接構造物であり、また検査は主に目視に依っているという点でも共通している。従って、検査用塗料を船舶に適用できれば、目視検査におけるき裂の検出が容易になり、検出率が飛躍的に向上する可能性がある。そこで、本研究では、Smart Paintのコンセプトに基づいた検査用塗料を国内技術により試作し、船舶への適用性を実験的に検証することを主な目的とした。

2. 実験

2. 1 染料オイル入りマイクロカプセルとエポキシ樹脂系接着剤とを用いた予備試験

まず、染料オイル入りマイクロカプセル（スリーボンド社製）と2液混合型エポキシ樹脂系接着剤を用いて予備試験を行った。

2. 1. 1 供試材・試験片及び塗料の調整・塗布

き裂進展試験に用いた供試材はAl-Mg系合金A5083P-Oで、試験片の形状寸法を図-2に示す。板厚5mmの平板試験片で、放電加工により試験片中央部に長さ10mmの人工切欠きを導入した。

一方、マイクロカプセルのシェル材はゼラチン、コア材はスピンドル油に溶いた赤色有機染料であり、カプセルはコアセルベーション法により調整した。調整後、洗浄・乾燥したカプセルのSEM像を図-3に示す。塗料としては2液混合型のエポキシ樹脂系接着剤（セメダイン製、HI-SUPER 5）を用い、白

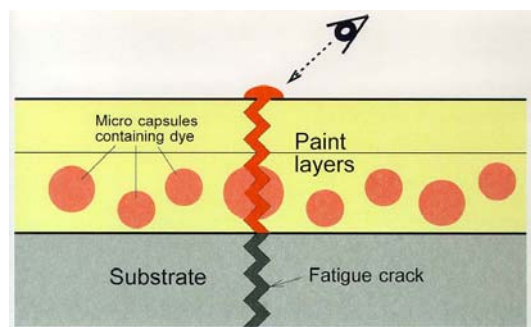
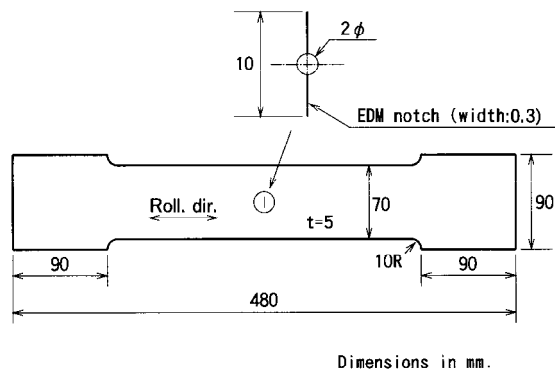
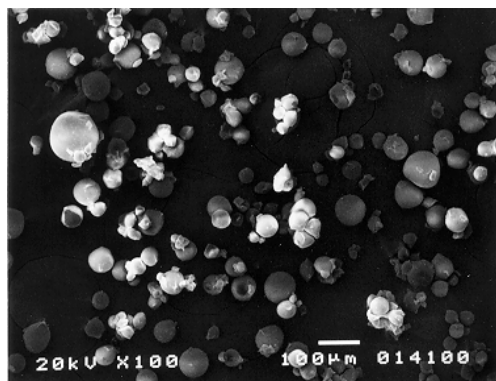


図-1 Smart Paint システムの概念図



図－２ 切欠き付平板試験片

く着色するために酸化チタン粉末（チタンホワイト）を混合した。2液混合後、マイクロカプセルを混合し、切欠き部及びき裂進展予想経路にヘラを用いて塗布し、固化させた。破断後の測定によれば、切欠き端部を除く平均膜厚は116 μm であった。



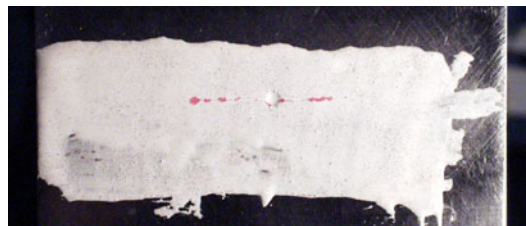
図－３ 染料オイル入りマイクロカプセル
（予備試験用）

2. 1. 2 疲労き裂進展試験

電気－油圧サーボ疲労試験機（島津サーボパルサー、動的容量10 tonf）を用い、周波数4 Hzの繰り返し引張荷重により疲労き裂進展試験を行った。所定の繰り返し数毎に、荷重振幅を変化させて破面にビーチマークを導入すると共に、CCDマイクروسコープ（ $\times 25 \sim \times 175$ ズーム）による観察を行った。

2. 1. 3 検査用塗料の発色状態

き裂進展に伴い、マイクロカプセルが破壊して染料が流出し、赤く発色することが確認された。図－４に発色状況のマクロ写真を示す。き裂の進展と共に発色域も伸びており、十分目視により視認するこ



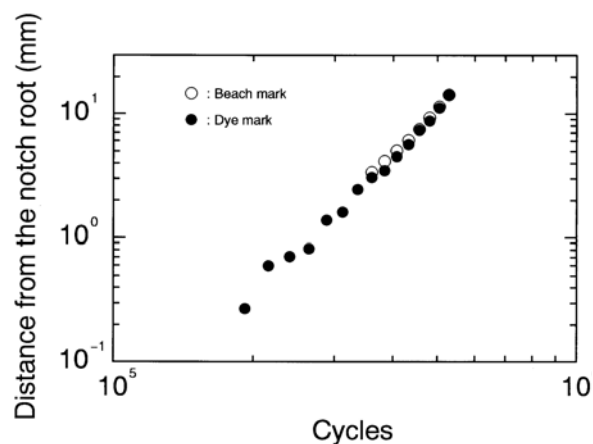
(a) き裂進展に伴う発色（ $N=456,000$ ）



(b) き裂進展に伴う発色（ $N=528,000$ ）

図－４ エポキシ樹脂系接着剤＋チタンホワイト
＋マイクロカプセル（母材 A5083P-O、
試験片幅＝70mm、平均塗膜厚＝116 μm ）

とができた。図－５は、中央切欠き端から進展した疲労き裂について、試験片破断後の破面から読みとったビーチマーク位置（表面）と、試験中に読みとった染料発色の先端位置とを比較したものである。き裂長さ1mm以下の段階から発色があり、き裂長さ3mm以上での実き裂長さ（ビーチマーク位置）との対応は良好であった。



図－５ ビーチマーク位置と発色位置との比較

2. 2 染料オイル入りマイクロカプセルとエポキシ樹脂系防食塗料を用いた検証試験

上記予備試験の後、船体用のエポキシ樹脂系防食塗料を用いた検証試験を実施した。塗料としては、中国塗料製のタンク用防食塗料エピコンT-500（エポキシ樹脂系、白色）を用いた。また、マイクロカプセルは上記予備試験に使用したものより大きめに調整したもので（スリーボンド社製 平均径 $139.2\text{ }\mu\text{m}$ 、最頻径 $153.8\text{ }\mu\text{m}$ ）、そのSEM像を図-6に示す。供試材は高張力鋼SM490Aとし、切欠き付平板試験片の形状寸法は予備試験と同一である（図-2参照）。

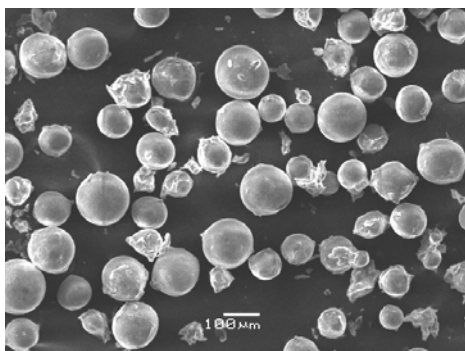


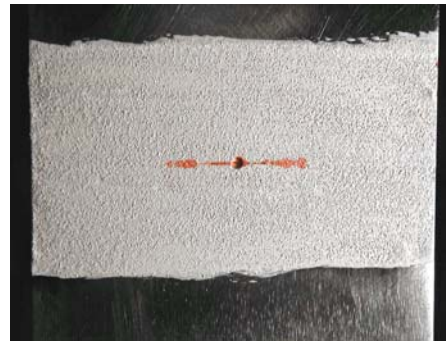
図-6 染料オイル入りマイクロカプセル
(検証試験用、平均径 $139.2\text{ }\mu\text{m}$ 、
最頻径 $153.8\text{ }\mu\text{m}$)

2. 2. 1 1層塗りの場合

エピコンT-500の主剤に硬化剤を加え、マイクロカプセルを主剤に対する容積比2：1の割合で混合した後、SM490Aを母材とする平板試験片の切欠き部及びき裂進展予想経路に刷毛を用いて塗布し、固化させた。塗布後1週間置いてから疲労試験に供し、疲労き裂進展に伴うカプセル破壊および発色を観察した。結果を図-7に示す。き裂進展に伴う発色は明瞭であり、目視により容易に視認することができた。(d)図は破断面を示しているが、平均塗膜厚は $73\text{ }\mu\text{m}$ とやや薄く、最頻径 $153.8\text{ }\mu\text{m}$ のカプセルを覆い隠すには不十分であった。

2. 2. 2 2層塗りの場合

1層塗りの場合、塗料の固化後であっても、塗膜表面に物がぶつかったり力が加わったりするとカプセルが壊れ、誤って発色してしまう恐れがある。従って、実機への適用という観点からみると、表面に現れたカプセルを保護するため、塗料だけの第2層



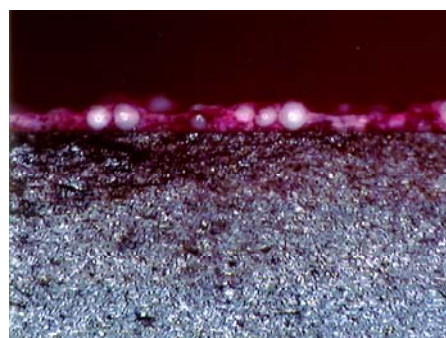
(a) き裂進展に伴う発色 (N=480,000)



(b) き裂進展に伴う発色 (N=576,000)



(c) 画像幅=12 mm



(d) 破断面

(画像幅=1.7 mm、平均塗膜厚= $73\text{ }\mu\text{m}$)

図-7 エピコン T-500 + マイクロカプセル
(母材 SM490A)

を上塗りする必要があると思われる。そこで、カプセル入りの第1層を前項2. 2. 1と同様の手順で塗布した後、24時間以上経過してからエピコンT-500のみを上塗りし、塗布後1週間置いてから疲労試験に供し、疲労き裂進展に伴うカプセル破壊および発色を観察した。

母材に SM490A を用いた場合の結果を図-8に示す。(a)図に示す通り、上塗りによってカプセルは完全に覆われており、表面はほぼ通常の塗膜面となっている。(b)、(c)図から明らかな通り、上塗りをした場合でもき裂進展に伴って明瞭な発色が見られ、検査用塗料の有効性が確認できた。

3. まとめ

本研究では、検査用塗料を船舶に適用する事を念頭に、染料オイル入りマイクロカプセルの調整、エポキシ樹脂系塗料の選定、これらを混合した検査用塗料を塗布した切欠き付平板試験片によるき裂進展試験を行い、検査用塗料の有効性について検証した。

その結果、1層塗り・2層塗りの両ケースにつき、き裂進展に伴う塗料の明瞭な発色を確認し、目視検査の支援ツールとしての有用性を実証できた。

今後は、染料の耐候性、タールエポキシ塗料等既存塗膜上への適用性、溶接継手部への適用性等につき、研究を進めていく予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、株式会社スリーボンド 研究所 研究部 カプセル課の小野口 富夫 課長ならびに内田 光彦氏には、マイクロカプセルの製作に関して貴重な御助言および御協力を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

また、当所 輸送高度化研究領域 新材料利用研究グループの千田 哲也 グループ長、植松 進 上席研究員、高橋 千織 主任研究員には、研究全体を通じて貴重な御示唆および御協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本造船研究協会 第226部会: ばら積み貨物船の合理的な船体構造の調査研究、成果報告書 (1996).

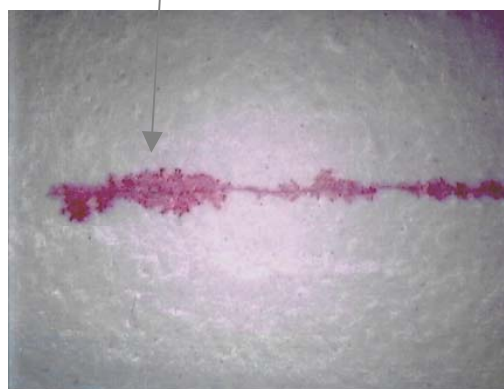
- 2) Roy R. Miron, Wayne Bilder and William Lademan, SmartPaint Structural Crack Monitoring Technique, NACE Northern Area Eastern Conference (1999).



(a) 上塗り、乾燥後



(b) き裂進展に伴う発色 (N=816,000)



(c) 画像幅=12 mm

図-8 (エピコン T-500 + 染料オイル入りマイクロカプセル) + エピコン T-500 上塗り
(母材 SM490A)