

海上飛沫部に20年暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋の引張性能

(社)プレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○浅井 洋
 (社)プレスト・コンクリート建設業協会 正会員 博(工) 石井 浩司
 独立行政法人 土木研究所 守屋 進
 日本ペイント販売㈱ 大澤 隆英

1. はじめに

1970年代頃より、コンクリート構造物の塩害が深刻化し始めた。塩化物イオンのコンクリート内部への侵入経路は、海砂の使用や海水飛沫による浸透、凍結防止剤の散布による浸透などである。アルカリ環境下では鋼材表面に不動態被膜が生成され、鋼材は保護されているが、塩化物イオンが存在すると不動態被膜が破壊され腐食の原因となる。その具体的対策として鉄筋表面をエポキシ樹脂で保護したエポキシ樹脂塗装鉄筋の使用が考えられた。エポキシ樹脂塗装鉄筋は、1973年に米国においてすでに実橋に適用されていたが、我が国における開発は、1970年代後半になってからである¹⁾。1984年(昭和59年)に「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」が規定され、飛来塩分によって塩害が予想される道路橋の設計・施工の留意事項が示されが、当時としては、塩害対策の耐久性に関して多くの知見は得られていなかった。特に、塗装鉄筋やコンクリート塗装について技術開発が進められていたが、実績が少なく、長期的な耐久性に関する研究が求められた。このような背景において、1984年から建設省土木研究所(現、独立行政法人土木研究所)と社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会は、海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究を開始し、(1)防食技術の基本となるコンクリートのかぶりや配合が腐食の進行に及ぼす影響、(2)コンクリート中の鋼材の防食技術として、樹脂塗装鉄筋の実用化やPC鋼材の防塩処理材料の開発、(3)耐海水コンクリート部材として、コンクリート塗装の実用化、含浸系塗料の開発、耐塩性コンクリートの開発、などについて検討を行ってきた^{2,3)}。本稿は、コンクリート部材中に配置したエポキシ樹脂塗装鉄筋の海上飛沫部での暴露20年後の引張性能について述べる。

2. 試験方法

2.1 供試体

暴露供試体を図-1に示す。エポキシ樹脂塗装鉄筋を補強筋に用いたコンクリート供試体を駿河湾大井川町沖合250mに位置する海洋技術総合研究施設に暴露した。施設を写真-1に示す。コンクリート配合を表-1に示す。供試体はRC構造であるが、プレストレストコンクリート部材を想定して、早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比40% (設計基準強度40N/mm² 想定)で工場製作した。エポキシ樹脂塗装鉄筋は、表-2に示す3種類を供試体の補強筋に使用して暴露した。試験体AおよびBは国内メーカーの加熱硬化型エポキシ系樹脂であり、試験体Cは米国において使用されてい

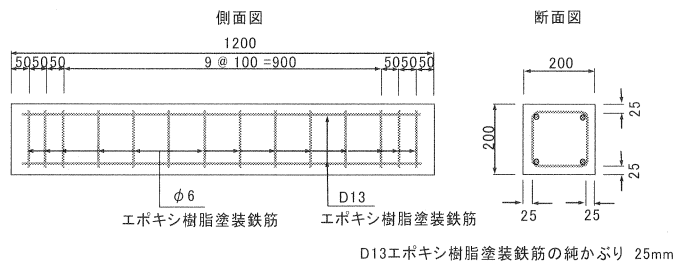


図-1 供試体形状図

表-1 コンクリートの配合

最大粗骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				材齢28日圧縮強度 (N/mm ²)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	
20	8	4.5	40	38	166	415	659	1133	51.0

表-2 エポキシ樹脂塗装材の仕様

試験体記号	材質	径	外観	膜厚			ピンホール	曲げ加工性	硬度
			有害な欠陥なきこと	平坦部180±50 μm			1,000V ≤5個/m		
				平均	最大	最小		鉄筋曲げ内半径2φ 180° (5°C)	(皮膜) ≥2H
A	SD30 (SD295)	D13	Good	181	230	140	2.2	Good	2H
B				170	220	130	1.3		
C				191	230	140	1.3		
NEW	SD295	D13	Good	207	220±40 μm		2.7	0%*)	鉛筆硬度F Good

*) 曲げ条件1: 温度20±2°C, 曲げ内半径1.5φ, 角度180°
 曲げ条件2: 温度5±1°C, 曲げ内半径3.0φ, 角度180°
 曲げ条件1および2における塗膜割れの発生率

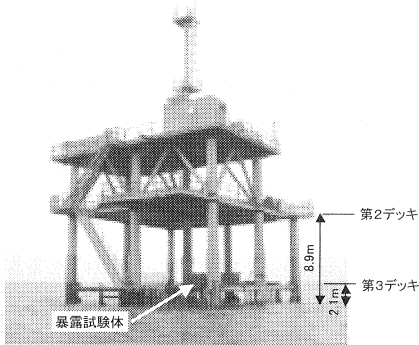


写真-1 海洋技術総合研究施設

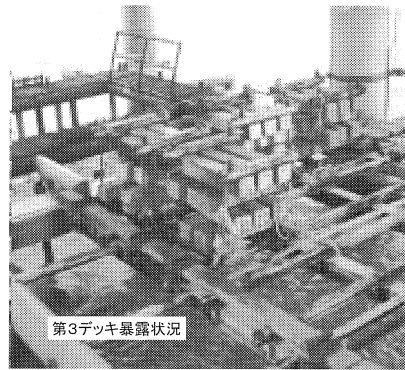


写真-2 試験体暴露状況

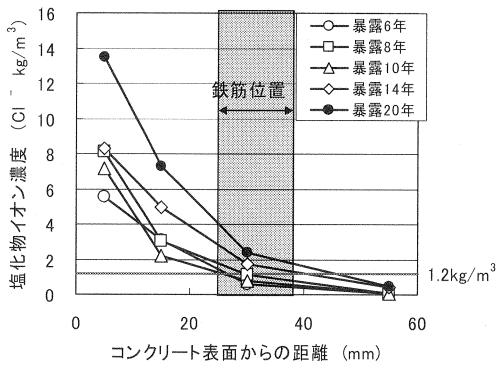


図-2 塩化物イオン濃度経時変化

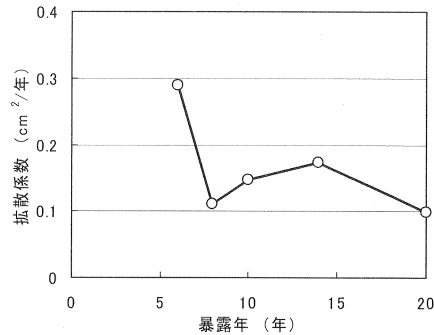


図-3 拡散係数経時変化

た加熱硬化型エポキシ系樹脂である。試験体 NEW は、現在生産されている加熱硬化型エポキシ系樹脂であり、試験体 A の継承品である。

2.2 暴露環境

供試体は海面から約2.1mに位置する第3デッキに暴露した。暴露状況を写真-2に示す。今回採取した暴露供試体と同じデッキに暴露した供試体のコンクリート中の塩化物イオン濃度の経時変化および拡散係数の経時変化を図-2および図-3に示す。拡散係数は、測定して得られた各深さの塩化物イオン濃度をフィックの拡散方程式④を用いて回帰して得たものである。エポキシ樹脂塗装鉄筋の純かぶりは25mmであり、暴露14年頃に鋼材腐食発生限界濃度とされる1.2kg/m³を超える環境にあった。また、普通ポルトランドセメントの拡散係数予測式④を用いて算出した拡散係数は0.57cm²/年であり、試験体コンクリートは予測値に比べ若干塩化物イオンが浸透しにくい材料であったと言える。

暴露 20 年後に供試体からエポキシ樹脂塗装鉄筋を取り出し、始めに、エポキシ樹脂塗装材の状況を目視により観察した。次に、目視では観察しにくいエポキシ樹脂塗装材の損傷をピンホール検出装置により調査した。検知した損傷部位は、疲労試験や引張試験に及ぼす影響を観察するため、マーキングして明示した。

2.3 疲労試験

採取したエポキシ樹脂塗装鉄筋を各 1 体、および現行品 1 体の計 4 体について疲労試験を実施した。疲労試験体は、コンクリートから取り出したときに付いた損傷が少ない部分を選定した。試験体のつかみ間隔は試験途中でピンホール調査を行う長さを確保するため、通常の引張試験長の 3 倍、390mm (30φ) とした。上限応力度は許容応力度 180N/mm² とし、PRC 構造における活荷重による変動量 σ を想定して応力振幅を 30N/mm² とした。繰り返し速度は 10Hz である。繰り返し荷重による塗膜損傷の進行状況を、試験前、1 万回、10 万回、50 万回、100 万回、200 万回において調査した。

2.4 引張試験

引張試験は、疲労試験を実施した試験体と実施していない試験体を各々 1 体ずつ実施した。引張試験では、エポキシ樹脂の亀裂や割れなどの発生を調査した。

3. 試験結果

3.1 暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋の外観

試験体から取り出したエポキシ樹脂塗装鉄筋の外観を写真-3 に示す。また、比較用に現行品(試験体 NEW)も示す。試験体 A は、鉄筋表面のエポキシ樹脂の光沢が試験体 NEW より低下しているが、外観上顕著な劣化は認められない。ピンホール測定結果では、390mm あたり 40 箇所の損傷部位が検出された。損傷部位を観察した結果、その多くは試験体のコンクリート打設時、または鉄筋をはつり出した際に損傷したものと判断された。試験体 B は、試験体からはつり出した際、鉄筋を被覆していたエポキシ樹脂の一部がコンクリート側に付着しているのが観察された。試験体の表面は、試験体 A に比べて白化が著しく、光沢がない状態であった。ピンホール試験では損傷箇所が多数検出され、鉄筋ふしの頂部に位置する部分に集中している。試験体 C の表面は、光沢が失われているが、顕著な剥離等の損傷は認められない。ピンホールによる損傷検出箇所は、390mm あたり 15 箇所の損傷部位が検出された。外観観察の結果より、20 年間コンクリート中に配置されたエポキシ樹脂の表面は、光沢の低下や剥がれが生じる場合が認められた。しかし、腐食が発生する環境にありながらも、本環境下ではエポキシ樹脂塗装鉄筋には腐食は認められないことが確認できた。

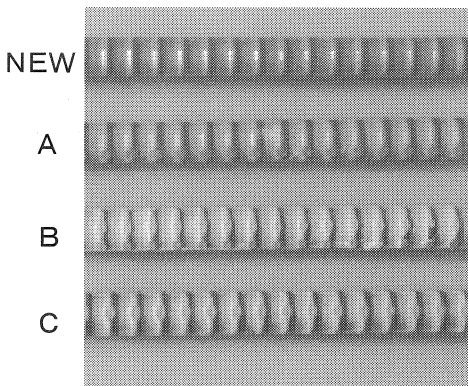


写真-3 エポキシ樹脂塗装鉄筋外観

3.2 疲労試験結果

疲労試験の繰り返し回数と累計疲労損傷数の関係を図-4 に示す。ここで疲労損傷とは、疲労試験前のピンホール調査で検出できなかった部位が、繰り返し荷重を作用したことにより、検出されるようになることと定義する。図より全ての塗装材料において、疲労回数の増加に伴い疲労損傷する傾向が認められた。試験体 A および試験体 B は、疲労試験初期に疲労損傷が検出

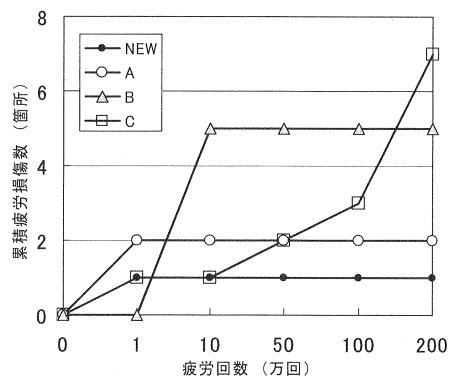


図-4 繰り返し回数と累計疲労損傷数の関係

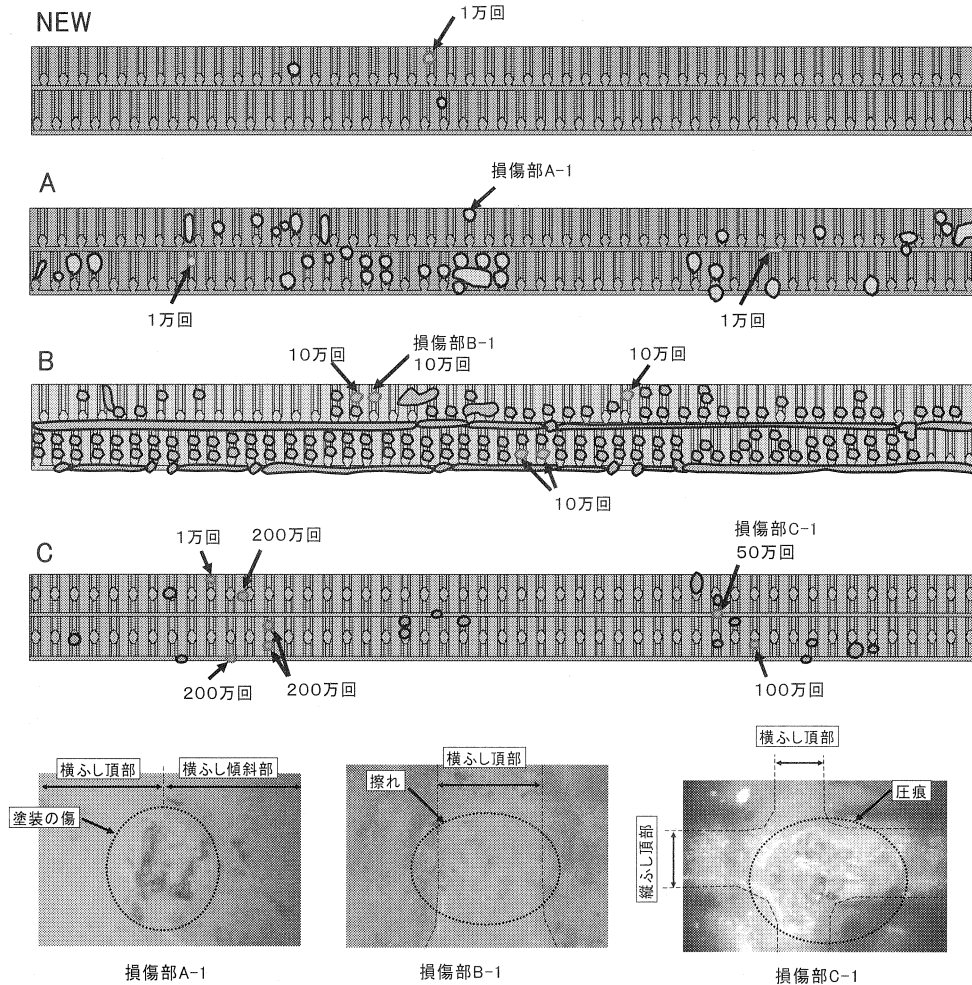


図-5 エポキシ樹脂損傷図

されたが、その後継続して発生する傾向は認められない。一方、試験体Cは、疲労回数の増加に従って疲労損傷箇所も増加していることが確認できた。ここで、図-5に各試験体の疲労損傷図を示し、図中に検出したときの疲労回数を示す。また、表示がない損傷部は疲労試験前に検出された部位である。損傷が認められる多くの部位は、鉄筋のふし頂部であり、塗膜の割れではなく圧痕または擦れによる損傷が多かった。損傷部A-1は、試験体Aにおいて試験前に検知された部位であり、樹脂表面に小さな損傷が認められる。損傷部B-1は、鉄筋ふし頂部であり、擦れた痕跡が認められる。損傷部C-1は、縦ふしと横ふしの交点に位置し、圧痕と判断できる。このように、疲労損傷部は鉄筋運搬時、コンクリート試験体製作時または鉄筋取出時に受けた損傷のうち、疲労試験前に検出できない程度の損傷を受けたものが、繰り返し荷重により塗膜に僅かな変形等が生じ検出できるようになったものと推察される。この結果より、エポキシ樹脂塗装鉄筋の取り扱いには注意を要し、疲労損傷による鋼材腐食を招く恐れがあることを示唆している。

3.3 引張試験結果

疲労試験を行っていない試験体の破断状況を写真-4に示す。試験体NEWは、破断に至るまでエポキシ樹脂に損傷部は認められなかった。破断後も、損傷したのは破断位置のみで、鉄筋の破断伸びに追従すること

が確認できた。試験体 A は、降伏荷重において目視で観察できない程度の損傷部が 1 箇所発生した。その後、鉄筋破断まで損傷部の発生は認められず、鉄筋の伸びに追従していることが確認できた。試験体 B は、鉄筋の伸び 3.3%程度から鉄筋軸直角方向に亀裂が生じ始めた。亀裂は、鉄筋ふしの頂部や谷部の位置に関係なく発生した。伸びの増加に伴い亀裂は増加し、鉄筋破断位置付近で剥離した様子が観察された。試験体 C は、鉄筋の伸びが 1.0%を越えるとエポキシ樹脂の破壊音が鉄筋全長にわたって発生し、伸び 5%程度になると損傷部位近傍の樹脂が鉄筋から剥離している様子が観察された。また、亀裂が発生すると伸びの増加に伴って亀裂幅が増大し、試験体 B と比べると軸方向への分散は少ない。疲労試験を行った試験体の損傷は、疲労試験を行わなかった試験体と概ね同じ傾向を示した。試験体 NEW と試験体 A は破断まで塗膜は追従した。試験体 B は、10%で塗膜に亀裂が生じ始めた。試験体 C は、4%程度よりエポキシ樹脂の破壊音が発生し始め、9%で亀裂が生じ始めた。このように、エポキシ樹脂の伸び性能の低下が認められたが、亀裂の発生は上降伏伸び(実測伸び 0.20%)を十分超えるものであり、使用状態で亀裂は生じないと考えられる。

各試験体のエポキシ樹脂追従率を図-6 に示す。追従率とは、JIS G 3112 に規定される最小伸び 16%に対するエポキシ樹脂に亀裂が生じた伸びの割合と定義する。

すなわち、暴露前のエポキシ樹脂は試験体 NEW に見られるように、鉄筋破断に至るまで追従できていたと考えられ、暴露後のエポキシ樹脂の伸び能力の低下を表す指標とすることができる。疲労試験を実施しなかった試験体では、試験体 A は破断に至るまでよく追従しており、試験体 B および試験体 C では 20%程度以下に低下することが確認できた。疲労試験を行った試験体では、試験体 B および試験体 C で鉄筋の破断伸びに追従しない結果が得られた。追従率が疲労試験を行わない試験体に比べて、いずれの試験体もよい結果が得られている。これは、試験体は各 1 体であることや 1 箇所でも弱点部が存在すると追従率は小さく評価されることなどが原因と考えられる。以上の結果より、20 年前のエポキシ樹脂塗装材では、A~C の塗膜の種類によって伸び性能の低下に大きな差が生じることが確認できた。

3.4 エポキシ樹脂内部の塩化物イオン量

エポキシ樹脂塗膜内に塩化物イオンが浸透しているかを確認するためエポキシ樹脂断面を電子線マイクロアナライザー (EPMA) で調査した。各試験体の測定結果を図-7 に示す。EPMA 測定では、分析面の平坦性が重要であるため、鏡面になるまで研磨を行う。その際、エポキシ樹脂が鉄筋から剥離しないように周囲を樹脂で固着した。図-7 に示すように鉄筋断面の一部の範囲を対象とし、電子ビームを照射し塩素元素特有の波長の X 線の強度を測定する。X 線強度 (カウント数) は、そこに存在する元素の量 (濃度) を示しているが、塩化物イオン濃度への換算は困難である。そこで、外周を固着した樹脂中の塩素原子濃度に対する塗

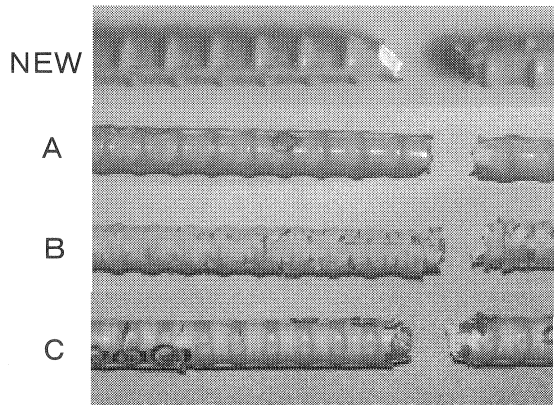


写真-4 鉄筋破断時のエポキシ樹脂損傷状況

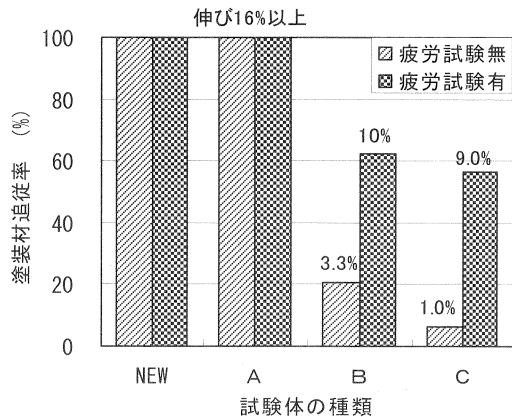


図-6 エポキシ樹脂追従率

膜内の濃度を比較することで塗膜内への塩化物イオンの浸透の有無を判断した。試験体 A および試験体 C は、樹脂に含まれる塩素元素より濃度が小さいことがわかる。また、塗膜外部から内部にかけて濃度勾配も認められない。試験体 B は、樹脂と同程度の濃度を示しており、顕著な含有量は認められなかった。この結果より、いずれのエポキシ樹脂塗装鉄筋においても、塗膜内に顕著な塩素元素の移動は認められないことが示された。

4. まとめ

- (1) 今回の環境下では、20年の暴露期間の間にエポキシ樹脂塗装鉄筋が腐食することはなかった。
- (2) 20年暴露の結果、エポキシ樹脂表面の光沢が失われたり、白化したり、鉄筋から剥離したりするものが認められた。
- (3) エポキシ樹脂が外力による損傷を受けた部分は、繰り返し荷重によって損傷部位として検出される場合がある。しかし、健全な部位の疲労損傷はほとんど認められなかった。
- (4) コンクリート中に20年間配置したエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜は、伸び能力が低下するものがあることが確認できた。しかし、亀裂が生じるときの鉄筋伸びは降伏ひずみより大きく、使用時に亀裂が生じることは無いと考えられる。
- (5) 塗膜の伸び能力の低下に与える繰り返し荷重の影響は認められなかった
- (6) エポキシ樹脂鉄筋の塗膜内に塩化物イオンの顕著な移動は認められない。

謝辞：本暴露試験を行った海洋技術総合研究施設を長期間にわたって維持管理していただいております国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所の関係各位に謝辞を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針 [改訂版]，2003
- 2) 大谷悟司，浅井洋，守屋進：長期暴露試験によるコンクリート構造物の耐久性評価に関する実験的考察，第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.569-572，2003
- 3) 大谷悟司，浅井洋，守屋進，大澤隆英：暴露20年経過したコンクリート表面被覆材の性能，第14回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.139-142，2005
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，2002
- 5) プレストレストコンクリート技術協会：PPC 構造設計規準 (案)，1996

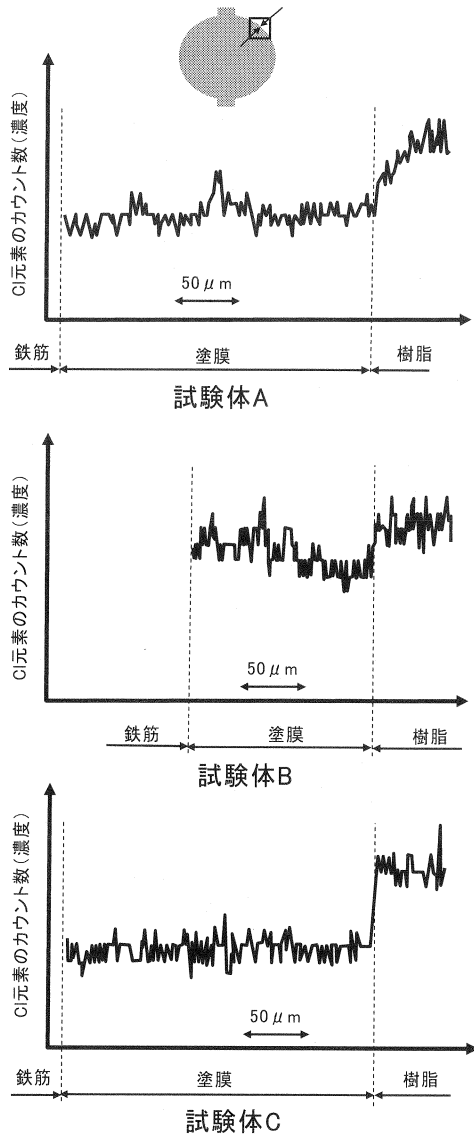


図-7 エポキシ樹脂 EPMA 測定結果