

導電性ポリマーによる金属防食

Corrosion Protection of Metals by Conductive Polymer Coatings

前田重義
Shigeyoshi Maeda

日本パーカラライジング(株)
技術本部 顧問

1 緒言

白川英樹博士によるフィルム状ポリアセチレンの合成(1971年)と、それに続くドーピングによる驚異的な電気伝導度の達成(1977年)を契機として、世界的な導電性ポリマーの研究ブームが巻き起こった。我が国では1981年に導電性高分子プロジェクトがスタートし、その電気伝導度を金属並($\sim 10^5 \text{S/cm}$)に高める研究が産学協同で精力的に行われ、現在では金属銅の値を超えるポリマーも開発されている¹⁾。ポリアセチレンの他にも多くの導電性ポリマーが開発されており、例えばポリピロールがアルミコンデンサの固体電解質に、ポリアニリンがポリマーバッテリーの電極に実用化されている。なかでもポリアニリンは安価で経時安定性に優れ、しかもプロトン付加によりその導電性を大幅に変化できる特性があるため、上記の応用の他にもエレクトロクロミック材料、各種センサ材料あるいは電磁波シールド材など幅広い応用が図られている。

金属防食の可能性はDeBerryが、導電性ポリアニリンの被覆によって硫酸溶液に浸漬したステンレス鋼板の不働態皮膜が著しく安定化することを見出したことに始まる(1985年)²⁾。その後、Wesslingを始めとする多くの研究者によって導電性高分子による金属防食の可能性が、ステンレス鋼、鉄鋼、銅及びアルミニウムなどで研究された。

導電性高分子の中で比較的安価に製造できるポリアニリンは溶剤可溶型や水溶化タイプが開発されて金属表面に被覆が容易になったことから、金属防食用として検討されたが密着性に難点があった。しかしポリアニリン骨格への置換基(有機プロトン酸)の導入、各種の樹脂とのブレンドなどによる改良がなされ、その自己補修作用を生かしてクロメート代替の塗装前処理としての技術開発が行われている。そこでここではポリアニリンを中心にその金属防食への応用に関する最近の進歩を紹介する。

2 導電性ポリマーの特性とその製造

ポリアセチレンは2重結合と単結合とが交互に連なった構造を持つ共役 π 電子結合系に基づく電子伝導性ポリマーである。この系統のポリマーには、この他ポリピロール、ポリアニリン、ポリチオフェンなどがよく知られている。

導電性ポリマーは図1のポリアニリンの例に見られるように、酸化・還元、酸・塩基及び錯体化などの可逆的反応で相互変換が可能であり、これらの状態の中で、少なくとも一つが 1S/cm 以上の高い電気伝導性を有するものを固有導電性ポリマー(Intrinsically conductive polymer)という³⁾。

ポリアニリンの場合、この内で導電性を有するのはEmeraldine saltであり、緑色を呈する。高い導電性を得るためには対イオン(Dopant)となる酸(無機酸または有機酸)が必要である(図では省略されている)。Emeraldine saltからプロトン(H^+)が取れたものがEmeraldine baseで、青色の絶縁体である。またEmeraldine saltの還元体がLeuco型のsaltで、更にこれからプロトンの取れたものがLeuco型のbaseであり、いずれも無色透明の絶縁体である。これらの4種は互いに電子及びプロトンのやり取りを通して分子内転移を行う。

導電性を高めるために必要な物質はドーパントといわれ、正孔をキャリアーとするp型と電子をキャリアーとするn型とがある。ポリアセチレンでは塩素や臭素などのハロゲン元

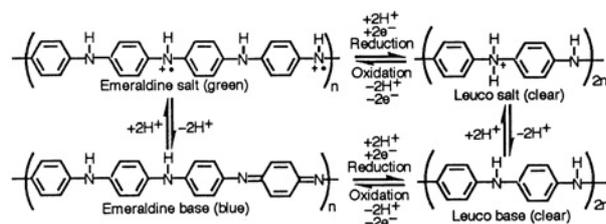


図1 電子およびプロトンの移動によるポリアニリンの分子内転移³⁾

素 (Electron acceptor) がよく知られ、ポリアニリンではプロトン付加型 (Electron donor) のドーパントが用いられる。これには塩酸、硫酸、リン酸などの無機酸、あるいは各種の有機スルホン酸 (すなわち p-トルエンスルホン酸、ベンゼンスルホン酸、メタンスルホン酸、ジノニルナフタレンスルホン酸など) の他、酢酸などの低分子有機酸がある。またポリビニルスルホン酸、ポリスチレンスルホン酸、ポリメタクリルスルホン酸などの水溶性高分子プロトン酸は溶剤や水可溶性の製造に有効である。アルキル基やベンゼン環を持ったスルホン酸ドーパントは樹脂との相性が良いため塗料とのブレンドも容易になる。

導電性ポリアニリンの合成はモノマーの塩酸水溶液に過硫酸アンモンなどの酸化剤を加えて合成する化学酸化重合か、あるいは電解酸化重合によって容易に得ることができる。

導電性ポリアニリンは一般に不融・不溶の剛直なポリマーであり、そのままでは溶液状のコート剤にできないため種々の方法が工夫されている。実用的には有機プロトン酸 (水溶性ポリマー酸を含む) の共存下でアニリンを酸化重合し、ポリアニリンの主鎖骨格へ有機スルホン酸をドーピングする自己ドーピング型の製造法が主力となっている⁴⁻⁸⁾。

3 金属防食への応用

3.1 ポリアニリンの防食機能

DeBerry はフェライト系ステンレス鋼の 410SS (11.6% Cr) と 430SS (16.2% Cr) をポリアニリン水溶液 (1M HClO₄, pH1.0) 中で陽極酸化で成膜したものを 0.2M H₂SO₄ の溶液中で Cyclic voltammetry の測定を行った。その結果各サイクルにおいて -0.2V ~ +1.1V の範囲内で 3 個の酸化及び還元電流のピークが見られ、可逆的な Redox (酸化還元) 反応を示すことが分かった。更にポリアニリンを被覆した 410SS を空気飽和の 2NH₂SO₄ に浸漬すると、無処理の場合は数分で活性化するのに対し、少なくとも 50 日間は不動態が維持されること、並びに 430SS では、NaCl を添加した H₂SO₄ の溶液中で 30 日間孔食が発生しないことなどを見出した²⁾。

ポリアニリンの防食作用に着目し、金属に被覆してその効果を広く検討した Wessling は、ポリアニリンを塗布した銅板、ステンレス鋼板及び銅について 0.1M NaCl 及び 0.1M H₂SO₄ 溶液中でアノード分極を測定し、いずれの金属の場合も腐食電位が著しく貴になることを見出した (図2)⁹⁾。このときポリアニリン皮膜の下に分厚い酸化膜が生成していることが分かった。彼は電位が数百 mV も貴になるのはポリアニリン皮膜自体の酸化還元電位が Ag に近い貴な値を有し、貴金属として振る舞うためと考えた¹⁰⁾。

Wei らはポリアニリンを被覆した冷延銅板の NaCl 溶液中

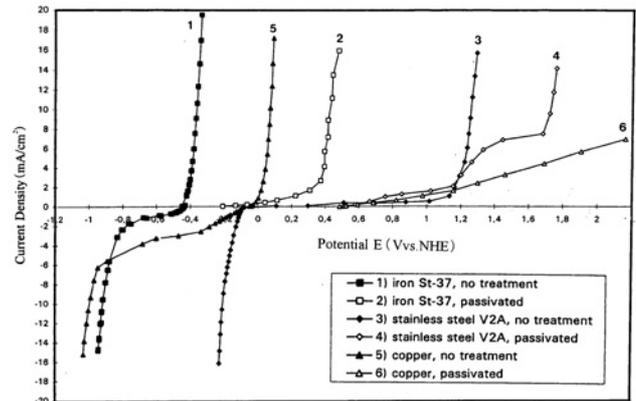


図2 各種金属のポリアニリン被覆による分極曲線の変化 (1M NaCl 水溶液、ただしステンレス鋼は 0.1M H₂SO₄ 水溶液)⁹⁾

での腐食を分極測定によって調べ、絶縁体である Emeraldine base 型のポリアニリンの方が、HCl ドーピングした導電性の Emeraldine salt のポリアニリンより腐食抑制に効果があったことを報告している¹¹⁾。

同じく Brusic らは Cu 及び Ag の水浸漬腐食におけるポリアニリンの効果を分極測定によって調べ、導電性 (1s/cm) の HCl 型 Emeraldine salt より絶縁性 (10⁻¹⁰s/cm) の Emeraldine base の方が防食効果が大きく、Cu の場合で、前者の腐食速度は無処理の 1/2、後者のそれは 1/50 の 3 × 10⁻⁷ A/cm² であったことを示している¹²⁾。この理由について彼らは導電性がよいと酸素の還元 (カソード反応) が容易となって腐食抑制の効果が減殺されるためと解釈している。また Fahlman らも Emeraldine base の方がドーピングした Emeraldine salt より鉄に対する防食効果が大きいことを認め、その理由について素地鉄から Emeraldine base への電荷移動 (charge transfer)、すなわち Emeraldine base によって電子が引き抜かれ、アノード酸化を生じ不動態化がもたらされたためと考えている¹³⁾。

また白川博士とノーベル化学賞共同受賞者の MaDiarmid 教授らは Emeraldine base によるステンレスの防食で、リン酸やポリリン酸による前処理が極めて有効なことを示し、この理由はステンレス表面に生成した FeHPO₄ からプロトンが Emeraldine base 側に与えられることで両者間に相互作用が働き、密着力が向上したためと考えた¹⁴⁾。

Emeraldine salt の場合、最初は緑色を呈していた表面が腐食液に浸漬したことで青白色に変化する事実は、皮膜が還元されて無色の Leuco 型に変わったことを示すもので、この着色の変化は紫外-可視スペクトルの測定によって定量的に評価可能である^{15,16)}。

ポリアニリン単独被覆による金属の腐食抑制は Fe、Cu、Ag のほか Al でも顕著に認められている^{16,17)}。Epstein らは Al 合金の防食において、スルホン化したポリアニリン (salt)

のNメチルピロリドン溶液を2000系及び3000系Al表面にスピコートして、ドーピングなしのもの (Emeraldine base) と防食効果を比較した¹⁷⁾。それによると無塗布の2024Alでは0.1NNaCl中に66時間浸漬後に顕著な腐食が観察されたが、ポリアニリン (base) 塗布のものは僅かしか腐食していなかった。また分極測定によると腐食速度はEmeraldine baseもEmeraldine saltのいずれも無塗布の約1/10に低下し、その程度は前者の方が若干優れていたが腐食電位には著しい差があり、baseの方がsaltより400mVも貴な値を示した。更にXPSによる表面分析によって、腐食後の表面に裸の2024Alでは認められなかったCuの濃縮がドーピングなしのポリアニリンを塗布したAlの表面皮膜中に顕著に認められたことから、ポリアニリンが合金成分のCuを選択的に皮膜内に抽出することによって腐食促進因子であるAl-CuのGalvanic cellの形成を抑制したものと解釈している¹⁷⁾。このことはこのGalvanic cellに起因する糸状腐食を生じやすい2000系Alにおいて、ポリアニリン被覆が特に有効なことを示唆する。

3.2 プライマーとしての応用

導電性ポリマーは単独被覆より、むしろ塗料の下地処理 (プライマー) として用いると、より優れた防食効果を発揮する。Wesslingはポリアニリンを含有したプライマーを施した後、ポリウレタンを上塗りした鋼板の塩水噴霧試験 (SST) で、288時間でもカット部にアンダーカッティング腐食がほとんど認められなかったことを報告している¹⁵⁾。しかしポリアニリンは金属との密着性が必ずしもよくないことが知られており、その改善策としてKinlenらは金属との密着性のよい塗料 (特に非熱可塑性樹脂) にブレンドすることで密着性を向上させ、更にこの上に通常の塗料 (非導電性) を上塗りする方法を提案している¹⁸⁾。

LuらはNメチルピロリドンに溶かした中性のポリアニリン溶液を鋼板表面に塗布・乾燥したものと、続いてドーパントであるp-トルエンスルホン酸水溶液に数時間浸漬して水洗・乾燥したものとを試料として、この上に通常のエポキシ塗料を塗布・焼付し、表面から素地の鉄面に達する幅1.2mmのカットを入れ、0.1NHCl及び3.5%NaCl溶液中で分極曲線の測定を行っている。その結果を図3に示した¹⁹⁾。これからHCl溶液中ではドーピング有り、無しにかかわらずポリアニリンプライマーを有するものでは顕著な不動態化が起こっていることが分かる。一方NaCl溶液中ではドーピングありポリアニリン (Emeraldine salt) では不動態化が起こらず、ドーピングなしポリアニリン (Emeraldine base) で顕著な腐食抑制作用が認められた。この時鉄面露出部には灰色の酸化膜が生成し、図4に示すようにFe2p電子のXPS

スペクトルの形状から推定して、下層にFe₃O₄を有するγ-Fe₂O₃と同定された^{15,19)}。

同様な2層皮膜、すなわちγ-Fe₂O₃ (~15 Å) / Fe₃O₄ (~35 Å) の存在をFahlmanらもXPSの分析によってEmeraldine baseを塗布した冷延鋼板の湿気槽試験後の剥離界面に認めている¹³⁾。表1はSchauerらによるFTIRによる結果で、エポキシ樹脂/ポリアニリン (下地) 被覆鋼板の塩水浸漬後の剥離面に存在したγ-Fe₂O₃/Fe₃O₄層が時間とともにα-Fe₂O₃とγ-Fe₂O₃に、最終的にγ-Fe₂O₃とγ-FeOOHに変態

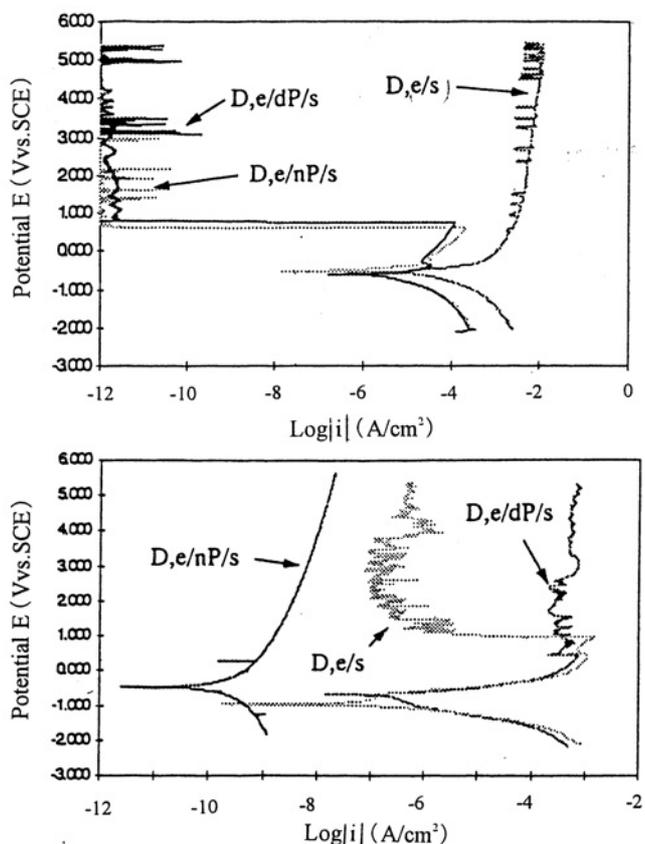


図3 ポリアニリン前処理・エポキシ塗装鋼板 (スクラッチあり) の定電位分極曲線 (上: 0.1NHCl, 下: 3.5%NaCl溶液) D,e/s: ポリアニリンなし、D,e/dP/s: ドープありポリアニリン、D,e/nP/s: ドープなしポリアニリン¹⁹⁾

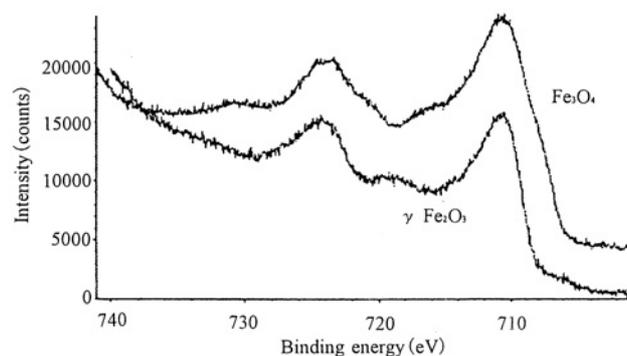


図4 ポリアニリン被覆鋼板の表面に形成された不動態皮膜のXPSスペクトル¹⁹⁾

表1 ポリアニリン被覆の鉄面に各段階で形成された鉄酸化膜のFTIR分析結果²⁰⁾

For immersion	During active protection (green PAni-P)	After active protection (blue PAni-P)
Fe ₃ O ₄ (570 cm ⁻¹) γ-Fe ₂ O ₃ (640 cm ⁻¹)	γ-Fe ₂ O ₃ (640 cm ⁻¹) α-Fe ₂ O ₃ (555 cm ⁻¹)	γ-FeOOH (1020 cm ⁻¹) γ-Fe ₂ O ₃ (640 cm ⁻¹)

することを示している²⁰⁾。ただしポリアニリンによる防食効果はこの安定な酸化膜の生成にのみ依存するものではなく、Kinlenによれば界面のRedox反応で生成したFe・ポリアニリン錯体の存在も寄与しているという²¹⁾。

最近では下地金属との密着性向上の目的で、塗料にブレンドしたプライマーとしての用途開発が多い。一例としてエポキシ樹脂にブレンドしたものはNaCl溶液中の鋼板の腐食電位を500mVも貴にし、同時に腐食速度を著しく低減すること(10⁻⁵A/cm²→10⁻¹⁰A/cm²)が報告されている²²⁾。またこのとき皮膜下にFe₃O₄もしくはFe(OH)₂と推定される安定な酸化膜が生成していた。ただしSitaramらによるとエポキシ架橋のポリアミド樹脂及びアクリル・メラミン樹脂の場合、ポリアニリンを樹脂にブレンドしたものとポリアニリンをプライマーとして下塗りに用いたものを比較すると、前者の方は後者に比べ塩水噴霧試験(SST)の耐食性が劣っていた²³⁾。

またポリアニリンを防錆顔料の一種と見なし、これを塗料に加えたものを従来のクロム系顔料の代替に用いる環境対応型防錆塗料の特許なども出願されている²⁴⁾。ここではEmeraldine baseが導電性のEmeraldine saltより防食効果が大きい事実を基に、非導電性(<10⁻⁸S/m)のポリアニリンに限定した内容となっている²⁴⁾。

一方前述のWesslingらは、ポリアニリンの鉄面露出部に対する防食作用が塗膜のカット面の2mm幅まで及ぶこと、また塗膜カット端面から更に8mmの奥まで酸化膜の生成が認められることを見出した¹⁵⁾。腐食環境で塗膜下に同時進行的に緻密な酸化膜が生成することはポリアニリンに一種の自己補修作用のあることを意味し、従って塗膜下腐食(アンダーカッティング腐食や糸状腐食の抑制)に有効なことを期待させる。事実、エポキシ系塗料及びウレタン系塗料においてポリアニリンを下地塗装したものは塩水噴霧のクロスカット腐食の低減に有効なことが示された¹⁵⁾。

このため塗膜下腐食が起りやすい亜鉛めっき鋼板やアルミニウムの防食被覆としても注目され、最近ではクロムフリー前処理として注目されている^{10,20,25-29)}。例えばジナフチルメタン・ジスルホン酸でドーピングしたポリアニリンを亜鉛めっき鋼板の塗装前処理に使うと、塩水噴霧試験におけるカットエッジからの耐食性がクロメート処理より優れていると

いう報告があり²⁶⁾、また山崎らはスルホン基、カルボキシル基あるいは水酸基を導入して水溶性または水分散性にしたポリアニリンに、密着性と耐食性の向上を狙ってコロイド状のSiO₂、Al₂O₃、ZrO₂、TiO₂などの無機酸化物をブレンドし、これをエポキシなどの水溶性樹脂に分散したものを亜鉛めっき鋼板のクロメート代替とする特許を公表している²⁷⁾。またWesslingによると下地塗装に単独のポリアニリンを用い、この上にエポキシ樹脂を上塗りしたアルミニウムには糸状腐食が全く生じなかったという¹⁰⁾。

2000年の米国化学会のFall meetingで、McCarthyらはドーピング剤となる水溶性ポリアクリル酸と2重らせん構造にすることでポリアニリンを水溶化し、これを水溶性エポキシ樹脂に数%ブレンドしてアルミ合金(AA2024、AA6061、AA7075)にカチオン電着塗装した例を発表している。それによるとSST1000時間でアンダーカッティング腐食もブリストアも発生せず、また糸状腐食も起こらなかった²⁸⁾。同じくStofferらは前処理としてCe塩の電解処理+リン酸ソーダ溶液ポストリンスを施したアルミ合金(AA7075)を用い、これに水溶性アクリル樹脂とブレンドしたポリアニリンプライマーを塗装、乾燥後クロムフリー顔料を含有するエポキシ樹脂トップコートを施した。このものはSST2000時間で塗膜面のブリストア及びスクラッチ部からの腐食は全く認められず、ストロンチウムクロメート防錆顔料のエポキシ樹脂トップコートに十分代替できることを示した²⁹⁾。

4 導電性高分子による防食メカニズム

すでに述べたように、ポリアニリンの防食作用は下地金属の酸化とポリアニリンの還元によるRedox反応によって界面に安定な酸化膜を形成するアノード防食に基礎を置いており、図5のようなプロセスが提案されている¹⁰⁾。

Tallmanらは界面の安定化をインピーダンス測定(ESI)によって観測した^{3,25)}。図6にジノニルナフタレンスルホン酸をドーピングしたポリアニリン(Emeraldine salt)を塗布した軟鋼の3%NaCl溶液中での交流インピーダンス測定結果(Nyquist Plot)を示す³⁾。通常のバリアー型の防食塗料の場合、浸漬時間と共に分極抵抗(R_{ct})に対応した半円形の直径が小さくなり(塗膜欠陥の拡大による抵抗減少に起因)、かつ拡散による直線部分(Diffusion tail)が消失していくのが特徴であるが、導電性ポリマーの場合は逆に半円形の直径が時間とともに大きくなり、かつDiffusion tailが長時間にわたって観測されることである。分極抵抗の増大は塗膜下界面に抵抗となる酸化膜が成長したこと(鋼板の酸化とポリアニリンの低導電性のLeuco型への部分的還元)を意味し、

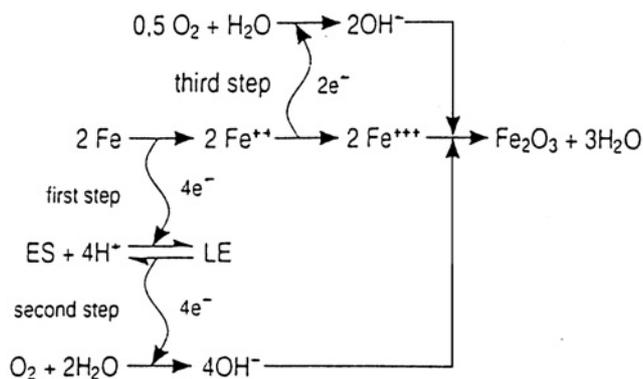


図5 ポリアニリンによる鉄表面の触媒的不働態化を示す模式図 (ES : Emeraldine salt、LE : Leuco emeraldine salt)¹⁰⁾

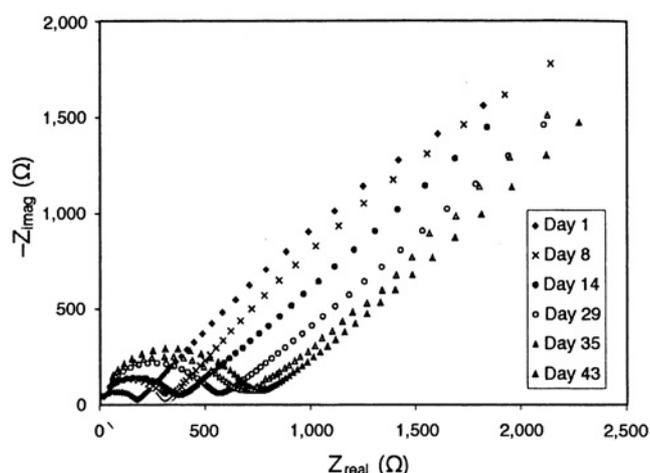


図6 ポリアニリン被覆銅板の3% NaCl溶液中でのインピーダンス (Nyquist plot) の経時変化 (周波数範囲: 5,000Hz~0.01Hz)³⁾

Diffusion Tailの残存はRedox過程の存在 (対イオンは界面近傍のポリアニリンから提供) を示している。この現象はアルミ合金の場合にも認められ²⁵⁾、導電性ポリマー被覆の特性と見なされる。

Kinlenらは走査型参照電極法 (Scanning Reference Electrode Technique, SRET) を用いて、ポリアニリンを下地処理した塗装鋼板の電位分布 (カラー表示) を調べ興味ある結果を得た³⁰⁾。すなわちドーパントとして硫酸系のp-トルエンスルホン酸 (PTSA)、ジノニルナフタレンジスルホン酸 (DNNSA) 及びリン酸系のアミノトリメチレンホスホン酸 (ATMP) とメチレンホスホン酸 (MPA) を用いたポリアニリン (Emeraldine salt) をポリビニルブチラール (PVB) にブレンドしてプライマーとし、エポキシ塗料を上塗りした鋼板をサンプルとし、塗膜面に人工的にピンホールを作って水道水に浸漬し、アノードとカソードの位置と、その経時変化を走査型参照電極 (SRET) で測定した。エポキシ塗膜単独及びPVB単独の場合は、ピンホールがそれぞれアノード (2個) とカソード (3個) に分離し、浸漬時間による変化は認められなかったが、ポリアニリン-PVBをプライマーにした

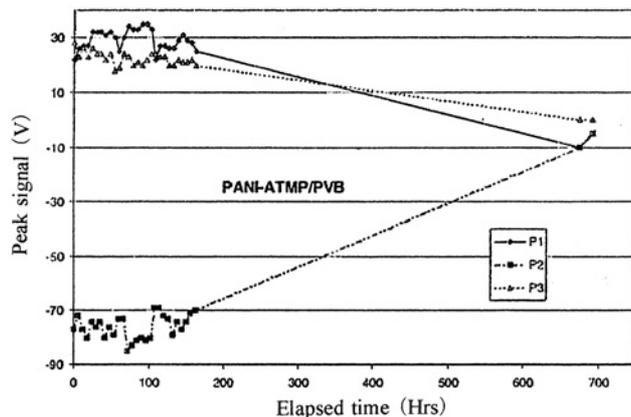


図7 走査参照電極法 (SRET) で測定されたホスホン酸ドーパポリアニリン-PVB系プライマー/エポキシ樹脂トップコートの人工ピンホール部の電位の経時変化 (P1、P2、P3は任意にマークした3点を示す。浸漬直後に1個のアノードと2個のカソードが形成された)³⁰⁾

場合は、時間とともにアノード電位の上昇とカソードの電位の低下が起こり全体的に均一になる場合 (リン酸系) とアノード電位の上昇がカソードの電位を越えて逆転する場合 (硫酸系) とが観察された。図7にリン酸系の例を示した³⁰⁾。これから塗膜下では、ポリアニリンの存在で初期に生成したアノード (ピンホール部) が時間とともに補修されて行くことが分かる。

5 おわりに

ポリアニリンによる表面処理は数年前に新しい防食法として注目されたが、その後、その防食性能に限界があるとして関心が薄れた時期があった。しかし極最近になって皮膜の自己補修作用に注目したクロムフリー技術として再び注目されている。特に単独で用いるより樹脂とのブレンドによる方法やプライマーとしての応用が検討され、亜鉛めっき鋼板やアルミニウムなどの塗膜下腐食の対策としての実用化が期待されている。

引用文献

- 1) 弘岡正明：導電性高分子プロジェクトと次世代展開，白川英樹博士ノーベル化学賞 受賞記念講演会要旨集，経団連会館，(2001，1)，5。
- 2) D. W. DeBerry and J. Electrochem : Soc. , 132 (1985), 1022.
- 3) D. E. Tallman, Y. Pae and G. P. Bierwagen : Corrosion, 55 (1999), 779.
- 4) J. Yue, E. J. Epstein, J. Am. Chem. Soc., 112 (1990), 2800.
- 5) 特開平1-254264，日東電工，(1989)

- 6) 特開平5-262981, 日本カーリット, (1993)
- 7) 特開平5-178989, 日東化学工業, (1993)
- 8) S. Simizu, T. Saito, M. Uzawa, M. Yuasa, T. Maruyama, and K. Watanabe : Synth. Met, 83 (1997), 1337.
- 9) B. Wessling : Adv. Mater., 6 (1994), 226.
- 10) B. Wessling : Synth. Met, 85 (1997), 1313.
- 11) Y. Wei, J. Wang, X Jia, Jui-M Yeh, and P. Spellane : Polymer, 36 (1995), 4535.
- 12) V. Brusica, M. Angelopoulos and T. Graham : J. Electrochem. Soc., 144 (1997), 436.
- 13) M. Fahlman, S. Jasty and A. J. Epstein : Synth. Met., 85 (1997), 1323.
- 14) N. Ashmad, and G. MacDiarmid : Synth. Met., 78 (1996), 103.
- 15) B. Wessling : Mater. Corros., 47 (1996) 439, Metaloberflach, 50 (1996), 474.
- 16) B. Wessling : Synth. Met., 93 (1998), 143.
- 17) A. J. Epstein, J. A. O. Amallfield, H. Guan, and M. Falman : Synth. Met., 102 (1999), 1374.
- 18) P. J. Kinlen, D. C. Silverman, E. F. Tokas, and C. J. Hardiman : U. S. Pat. 5532025 (1996)
- 19) W. K. Lu, R. I. Eisenbaumer and B. Wessling : Synth. Met., 71 (1995), 2163.
- 20) T. Schauer, A. Joos, L. Dulog, and C. D. Eisenbach : Prog. Org. Coat., 33 (1998), 20.
- 21) P. J. Kinlen, D. C. Silverman, and C. R. Jefferys : Synth. Met., 85 (1997), 1327.
- 22) A. Talo, P. Passiniemi and S. Ylasaari : Synth. Met., 85 (1997), 1333.
- 23) S. P. Sitaram, J. O. Stoffer and T. J. O'Keefe : J. Coat. Technol., 69 (1997) 866, 65.
- 24) G. B. Miller, L. W. Shacklette, R. L. Elsenbaumerl and W. Wessling : U. S. Pat. 5648416 (1997)
- 25) D. E. Tallman, Y. Pae and G. P. Bierwagen : Corrosion, 56 (2000), 401.
- 26) 特開平8-92479、東洋紡績、(1996)
- 27) 特願平9-52644、新日本製鐵、(1997)
- 28) P. McCarthy, W. Li and S. C. Yang : Poly. Mat. Sci. Eng., 83 (2000), 315.
- 29) J. O. Stoffer, M. Pittman, T. J. O'keefe, E. Morris and Z. Zhang : ibid, 83 (2000), 317.
- 30) P. J. Kinlen, V. Menon and Y. Ding : J. Electrochem. Soc., 146 (1999), 3690.

(2001年6月12日受付)

ブックレビュー

材料学シリーズ 鉄鋼材料の科学 鉄に凝縮されたテクノロジー

谷野 満、鈴木 茂 著

2001年7月 内田老鶴園発行(Tel. 03-3945-6781)

A5判 292頁 定価3,800円(消費税別)

本書は、社会の土台を支える最も基本的な材料である鉄鋼材料について、その最新技術までを網羅した教科書である。鉄鋼材料は身近過ぎてその有り難みを忘れがちであるが、常に先端技術開発が行われている材料である。用途によって異なるバラエティに富んだ性質は、材料に関わる多くの技術の巧妙な組み合わせで実現されている。本書はこのことを改めて思い出させてくれる。

本書は鉄鋼材料の材質と特性の制御技術に関して、基本的なメカニズムにまで遡って記述されており、膨大な内容を含む。当然、個別の問題を深く調べるには参考書が必要になるが、それぞれの章末にまとめられており、大変便利である。鉄鋼材料に関しては、常に先端の技術開発が行われており、新しい教科書が必要とされている。本書はこれに答えるとともに、鉄鋼材料の本質を教える優れた教科書であり、学生や研究者には是非お勧めしたい。

(物質・材料研究機構 材料研究所 小野寺秀博)