

高耐久性防食塗装

— 地球資源の有効利用と経済的なインフラ維持のために —

Durable Protective Coatings



一般塗料 工業塗料部門
General Coating &
Industrial Coating Division

里 隆幸
Takayuki SATO

1. はじめに

新興国の急速な経済発展に伴い、資源枯渇の問題は地球規模で取り組むべき重要な課題として認識されている。この対策として、コストパフォーマンスを考慮した“丈夫で長持ち”する材料の積極的な使用が一番に挙げられるが、この考え方は財源が税収である社会インフラや公共性の高いプラント設備等の分野で一般化しつつある。この動向は塗料・塗装産業においても例外ではなく、取り分け防食塗装の分野で高耐久性仕様による塗り替え周期の延長や塗装工程の短縮等による「ライフサイクルコスト(LCC)の低減」が、もう一つの優先課題である「環境負荷の軽減」と並行して推進されている。

本報では高耐久性塗料の必要性が高まった社会的背景を概説した後、高耐久性塗装の代表例としてふっ素樹脂塗装系を取り上げ、高耐久性塗装の進化の現状および将来展望について、幾つかの調査結果を交えて解説する。

2. 高耐久性塗装の必要性

わが国の防食分野において高耐久性塗装(重防食塗装ともいう)に関心が持たれるようになった背景には1960年代以降の高度経済成長によって、1)大型の鋼構造物の建設が相次いだこと、2)鋼材(または部材)の加工→塗装→仕上げの工程で集約化、効率化が進んだこと、3)大型鋼構造物の多くが海岸近くの重化学工業地帯に建設され、過酷な腐食条件下にあること、等が挙げられる。これ以外にも1977年に社団法人腐食防食協会および社団法人日本防錆技術協会の共同調査¹⁾によって、わが国の腐食損失は生産、製造面からみた腐食対策として年間2兆5千億円強(対GNP1.8%)にも及ぶ巨額な損失を生じていることが推定されたが、このような調査が広い産業分野(エネルギー、運輸、化学、金属、機械、建設)の協力を得て実施されたこと自体、腐食に対する一般社会の認識の高まりを証明していた。また、二度のオイルショック(1973年、1979年)も社会に省資源、省エネルギーの重要性を強く認識させた。

このような社会的背景から、1970年代に入ると当然ながら防食塗装に関する経済性評価が注目されるようになった。それまでの防食塗装の経済性評価は初期投資額に影響される傾向が強かったが、特に本州四国連絡橋の塗装計画が始まった頃から、防食塗装の経済評価はLCCを考慮して行うべきであるとの考え方が一般化し

始めたのである。また、超大型鋼構造物の塗り替え塗装の場合、省資源化による塗料の有効利用もさることながら、高所作業、危険個所作業からの作業者の安全、人命尊重、さらには人件費、足場費、養生費等の物価上昇等、何れの条件を取っても塗り替え周期の長い高耐久性防食塗装の方が一般防食塗装よりも有利であることが認識されるようになったことも大きな要因である。

3. 高耐久性防食塗装の誕生

1962年(昭和37年)、世界的権威を誇る英国ロイド船舶協会はタンカーのcorrosion control ruleを発表した。その内容は同協会が認定した塗料を用いれば船舶の

腐食費用をとらなくても良いというもので、corrosion control用塗料としてジンクリッチペイント、タールエポキシ樹脂塗料等が指定された。この頃、わが国では世界の造船王国を謳歌し、造船ブームの時代でもあって、これらの塗装系を積極的に取り入れるための塗装機開発が活発に行われ、今日の重防食塗装の礎を築いた³⁾。

表1に海外の著名橋梁の中から塗装履歴が明らかなるものを年代順に²⁾、また、表2には国内長大橋の大きさ順位と塗装系を示した³⁾。両表によれば、国内外に拘わらず、1960年代位までは圧倒的に鉛丹さび止め塗料に油性フタル酸樹脂塗料という組み合わせの塗装系が用いられていた。その後、1964年(昭和39年)に英国で長大橋梁の長期防食を目的とした塗装系として、亜鉛溶射(74 μ m)を防食下地とし、ジンクロメートさび止めペイントお

表1 海外の著名橋梁塗装系概要

橋梁名	完成年	橋長(m)	所在地	環境	塗装系
ジョージワシントン橋	1931	1,451	アメリカ ニューヨーク市	ハドソン河	油性さび止め + 油性フタル酸
シドニーハーバー橋	1932	1,150	オーストラリア シドニー市	河口	鉛丹さび止め + 油性フタル酸
オークランドベイ橋	1936	6,925	アメリカ サンフランシスコ	サンフランシスコ湾	鉛丹さび止め + 油性フタル酸 (無機ジンクリッチペイント + H.Bビニルに塗り替える予定)
マキナクストレイト橋	1957	2,543	アメリカ マキノ市	マキノ峡	油性さび止め + 油性フタル酸
ニューポート橋	1960	3,430	アメリカ コネチカット アイランド	海岸	無機ジンク + H.Bエポキシ
ベラザノナローズ橋	1964	2,039	アメリカ ニューヨーク市	ハドソン河口	油性鉛丹 + 油性フタル酸
フォースロード橋	1964	2,063	イギリス エジンバラ市	フォース河口	亜鉛溶射 + W/P + Z/C + MIO
セバン橋	1965	1,579	イギリス プリストル市	河口	亜鉛溶射 + W/P + Z/C + MIO
サンメテオハイワード橋	1967	3,200	アメリカ サンフランシスコ	海岸	無機ジンク + H.Bビニル
オークランドハーバー橋	1969	1,098	ニュージーランド オークランド	海峡	亜鉛溶射 + W/P + Z/C + MIO
ボスポラス橋	1973	1,560	トルコ トルコ市	ボスポラス海峡	亜鉛溶射 + W/P + Z/C + MIO
南海橋	1973	660	韓国 南海島	海峡	有機ジンクリッチ + W/P + Z/C + MIO + CR

(注) H.B ; 厚塗り型、W/P ; ウォッシュプライマー、Z/C ; フェノールジンクロメート、MIO ; 雲母状酸化鉄、CR ; 塩化ゴム塗料

表2 国内の長大橋の大きさ(完成時)順位と塗装系

順位	橋梁名	完成年	中央支間 (m)	適用塗装系
1	明石海峡大橋	1998	1991	(無)ジンクリッチプライマー + エポキシ樹脂(下) + ふっ素樹脂(中)(上)
2	南備讃瀬戸大橋	1988	1100	ジンクリッチプライマー + エポキシ樹脂(下) + ポリウレタン樹脂(中)(上)
3	来島第三大橋	1999	1000	(無)ジンクリッチプライマー + エポキシ樹脂(下) + ふっ素樹脂(中)(上)
4	北備讃瀬戸大橋	1988	990	(無)ジンクリッチプライマー + エポキシ樹脂(下) + ポリウレタン樹脂(中)(上)
5	下津井瀬戸大橋	1988	940	(無)ジンクリッチプライマー + エポキシ樹脂(下) + ポリウレタン樹脂(中)(上)
6	多々羅大橋	1999	890	(無)ジンクリッチプライマー + エポキシ樹脂(下) + ふっ素樹脂(中)(上)
7	大鳴門橋	1985	876	(無)ジンクリッチプライマー + エポキシ樹脂(下) + エポキシ樹脂MIO + ポリウレタン樹脂(上)
8	来島第一大橋	1999	860	(無)ジンクリッチプライマー + エポキシ樹脂(下) + ふっ素樹脂(中)(上)
9	関門橋	1973	712	亜鉛溶射 + フェノールジクロメート + フェノールMIO + 塩化ゴム(中)(上)

(注) MIO：雲母状酸化鉄、(無)：無機、(中)：中塗り、(上)：上塗り

よびMIO塗料を組み合わせた塗装系がFreeman Fox & Partners社によりフォースロード橋に適用され、続いて1965年(昭和40年)にセバン橋に適用し、10年以上のメンテナンスフリーが提唱された。

一方、わが国では1969年(昭和44年)にニュージーランドへ輸出されたオークランドハーバー橋に亜鉛溶射11万㎡、これにジクロメートさび止めペイントおよびMIO塗装を23万㎡という大面積に塗装したことから、急速に亜鉛を防食下地とする考え方が広まり、1973年に関門

橋に亜鉛溶射／フェノールジクロメート／フェノールMIO／塩化ゴム塗装という前者に類似の塗装系が用いられた。同じ頃、本州四国連絡橋公団では橋梁建設のプロジェクトが発足し、土木学会に本四連絡橋の防食法を諮問していたが、1974年(昭和49年)に防食塗装基準(案)が答申された⁴⁾。その内容の要約は表3の通りであるが、鉛丹さび止めペイントから今日のジンクリッチペイントを防食下地とした近代防食塗装系の大方が示されており、わが国防食塗装の基本形ともいえるもので

表3 本四連絡橋防錆防食塗装系案

記号	塗装系の概要
1	(1) E/P(短) + 鉛丹#1 + 鉛丹#2 + フタル酸(中)(上)
	(2) E/P(長) + 鉛丹#1 + 鉛丹#2 + フェノールMIO + 塩化ゴム(中)(上)
	(3) E/P(長) + 鉛丹#1 + 鉛丹#2 + フェノールMIO × 2
2	H.B(無)ジンクリッチ + E/P(短) + フェノールジクロ + フェノールMIO × 2 + 塩化ゴム(中)(上)
3	亜鉛溶射 + E/P(短) + フェノールジクロ + フェノールMIO × 2 + 塩化ゴム(中)(上)
4	H.B(無)ジンクリッチ + ミストコート + H.Bエポキシ or ポリウレタン × 2 + ポリウレタン(中)(上)
5	亜鉛溶射 + E/P(短) + H.Bエポキシ or ポリウレタン × 2 + ポリウレタン(中)(上)
6	H.B(無)ジンクリッチ + ミストコート + タールエポキシ or タールウレタン × 3
7	(無)ジンクリッチ + タールエポキシ or タールウレタン × 3
8	(無)ジンクリッチ + タールエポキシ or タールウレタン × 2
9	(無)ジンクリッチ

注) 1-(1)、2~6塗装系の下地処理は製品プラスト、7、8、9は原板プラストによる。

E/P(短)：短期暴露型エッチングプライマー、E/P(長)：長期暴露型エッチングプライマー、H.B：厚塗り型、MIO：雲母状酸化鉄

あった。

ところで、このように塗装履歴を調査してみると、塗装系の変遷は橋梁のそれが最も明瞭であり、その時代の最新技術を採用していることが判る。その理由は橋梁という構造物の大部分が公共のものであり、しかも50年以上の長期にわたって使用されるためである。換言すれば、橋梁塗装の歴史そのものが陸上鋼構造物の防食塗装の歴史を物語っているといっても過言ではない。

4. 高耐久性防食塗装の進化の現状

高耐久性防食塗装系において、十分な防食性を維持するためには防食下地としてのジンクリッチ塗膜が健全である必要がある。里ら⁵⁾は防食塗装系の耐久性を支配する要因の把握を目的に、21年間の海洋暴露実験により、ふっ素樹脂塗装系の高耐久化への効果を確認した。即ち、本検討では下塗り～上塗りまでの塗膜の劣化状況を調べることでジンクリッチ塗膜に対する保護性能を、また、塗装鋼板の防食状況を調べることでジンクリッチ塗膜の健全度を調査した。以下にその概要を記す。なお、この暴露実験は独立行政法人土木研究所が設置した「海洋技術総合研究施設」において実施したもので、この施設は駿河湾内の大井川河口付近の沖合250mに位置し、ISO 12944⁶⁾が規定する腐食環境C4(厳しい環境)に分類されている。また、試験片には寸法100(w)×300(h)×3.2(t)mmのサンドブラスト鋼板の両面に表4に示す仕様で塗装したものをを用いている。

表4 塗装仕様

工 程	ふっ素樹脂塗料塗装系	ポリウレタン樹脂塗料塗装系
防食下地	無機ジンクリッチペイント(75)	
ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗(一)	
下塗り	エポキシ樹脂塗料下塗(60×2回)	
中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗(30)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30)
上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗(20×2回)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30)

注1: ()内の数字は膜厚/ μm

注2: 上塗の色相は橙系

((社)日本塗料工業会 塗料用標準色: E09-50X)

4.1 表面劣化の状況

4.1.1 光沢変化

図1は上塗り塗膜の光沢保持率の経時変化であるが、ポリウレタン樹脂塗装系の場合、5年後に保持率が10%程度にまで低下していたのに対し、ふっ素樹脂塗装系では21年後も35%程度の保持率を維持していた。

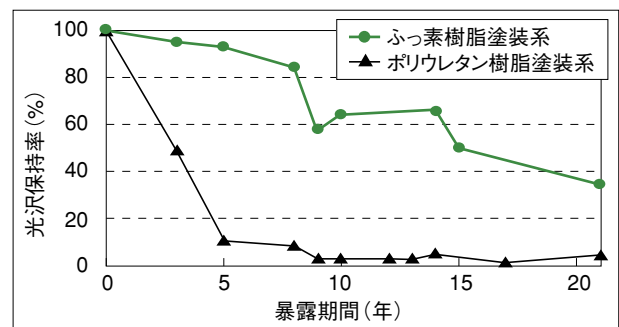


図1 光沢保持率の経時変化

4.1.2 膜厚の減耗状況

写真1は暴露後塗膜断面の走査型電子顕微鏡(SEM)像を膜厚減耗量と共に示したものであるが、この結果から、ポリウレタン樹脂塗装系の減耗量 $11\mu\text{m}$ に対し、ふっ素樹脂塗装系では僅か $0.4\mu\text{m}$ であり、光沢変化の結果と共にふっ素樹脂塗装系の高い耐候性が確認された。

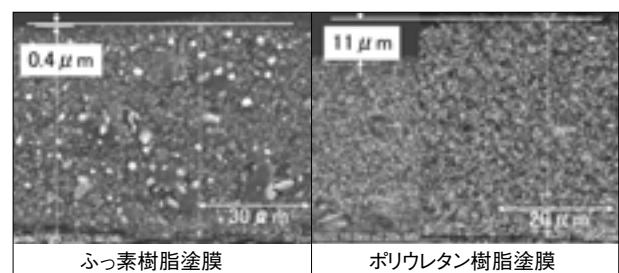


写真1 塗膜厚の減耗状況

4.2 防食性の状況

4.2.1 電気化学的測定結果

電気化学的測定にはカレントインタラプタ法を原理とした塗膜下腐食診断装置「HL202」⁷⁾を用いた。表5は暴露試験片の電気化学的測定結果を項目毎の健全度の目安と共に示したものであるが、この結果から、健全度に

関する全般的な傾向はポリウレタン樹脂塗装系よりもふっ素樹脂塗装系の方が優れているが、何れの塗装系も厳しい腐食環境での長期間の暴露にも拘わらず、十分

表5 塗膜下腐食診断装置による電気化学的測定結果

測定項目 塗装系	分極抵抗 log ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	分極容量 log (F/cm ²)	塗膜抵抗 log ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	塗膜容量 log (F/cm ²)
ふっ素樹脂 塗装系	9.46	-9.32	8.66	-10.22
ポリウレタン 樹脂塗装系	8.24	-9.61	7.57	-9.95
健全度の目安	>6.0	<-6.0	>6.0	<-6.0

な防食性を維持していることである。

4.2.2 防食下地の健全度

写真2はふっ素樹脂塗装系の暴露前後における亜鉛粒子断面のSEM像およびエネルギー分散型X線分光法による元素のマッピング像であるが、まずSEM像からは暴露前後での亜鉛粒子の形態的な変化は認められず、健全な状態を維持していた。また、酸素のマッピング像には亜鉛粒子表面に酸素の存在は認められず、亜鉛粒子に酸化劣化は生じていないものと推定された。

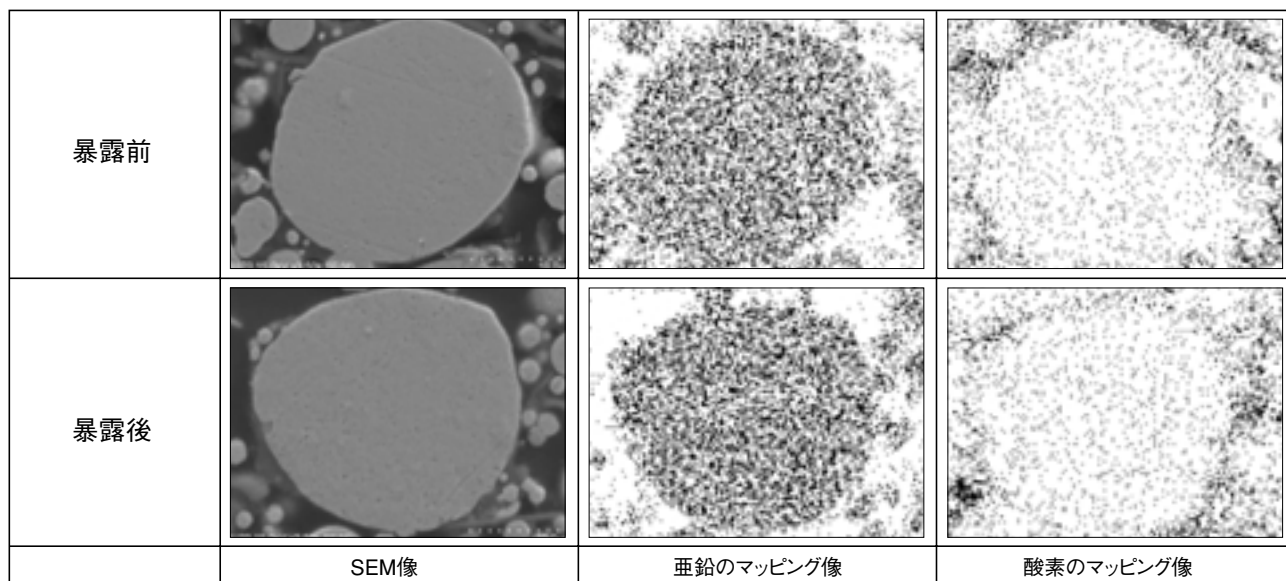


写真2 ふっ素樹脂塗装系の亜鉛粒子断面のSEM像およびEDXによる元素マッピング像

5. おわりに(高耐久性塗装の将来展望)

本文中にも触れたように、1970年代における世界的な腐食損失調査への関心の高まりを受けて、わが国においても腐食損失が推定されたが、この調査¹⁾が契機となって国民経済上から、また、省資源、省エネルギーの観点から腐食防食に関する知識の啓蒙と研究開発の重要性が認識されるようになった。

本調査が行われた1976年から25年が経過した2001年(平成13年)に腐食防食協会と日本防錆技術協会は

約20年余りの経済変動を考慮に入れた腐食損失調査を実施した。この調査報告書⁸⁾では諸外国の動向および調査方法の概要をまとめるとともに、わが国の腐食コストを1) 塗装等の防食方法から推定するUhlig方式と、2) エネルギー、運輸、化学、金属、機械、建設等各産業分野別に推定するHoar方式による調査に加えて、3) 産業連関表を用いるIn/Out方式による予備的推算を行った結果と、これらに基づいた腐食防食技術の発展の戦略提言について述べている。

表6はUhlig方式とHoar方式による腐食コストの推定

表6 腐食コスト調査結果の比較

	1997 (10億円)	1974 (10億円)	Ratio of 1997/1974
GNP (1990年基準)	514,343	148,170	3.47
腐食コスト (Uhlig方式) %GNP (1990年基準)	3937.69 0.77%	2550.93 1.72%	1.54 0.45%
腐食コスト (Hoar方式) %GNP (1990年基準)	5258.20 1.02%	1038.10 0.70%	5.07 1.46%
腐食コスト (In/Out方式) %GNP (1990年基準)	9694.72 1.88%		

結果、およびIn/Out方式による予備的検討結果をGNPと比較して示したものである⁸⁾。1997年におけるUhlig方式による腐食コストは約3.9兆円であって、GNPの0.77%を占めた。一方、Hoar方式によって算出した腐食コストは1974年の調査と異なって、Uhlig方式による推定結果よりも多く、約5.3兆円となってGNPの1.02%であった。さらにUhlig方式による推定値を用い、In/Out方式によって(直接+間接)腐食コストを予備的に検討した結果は約9.7兆円となって、GNPの1.88%とさらに大きな値となると推定された。In/Out方式による調査をさらに詳細に行うならば、(直接+間接)腐食コストはここで推定した値よりも大きくなり、GNPの3~4%を占める巨額なものになると推定された。

高耐久性防食塗装の誕生から30年以上が経過するが、この間の産業構造の変化は際だって大きい。第二次産業の比率は年々低下し、代わりに第三次産業の占める比率が大きくなってきている。また、エレクトロニクスや情報産業の興隆は目覚ましく、かつての臨海工業地帯立地から高速道路や空港立地等交通インフラの整った地域に工場が立地するようになってきた。高速道路について見ると、21世紀に入ってからには殆どの高速道路会社で建設費よりも維持管理費が多くなっている。米国の腐食コスト調査⁹⁾が運輸交通に重点を置いていることを見ると、日本の次の10年はこの分野での維持管理に関係した腐食防食技術の展開が益々重要になると推察される。当社においても、この分野を含めた高耐久性防食塗装技術の発展に益々貢献していきたい。

参考文献

- 1) 腐食損失調査委員会：わが国における腐食損失調査報告, 防食技術, Vol.25, No.7 (1977)
- 2) 菅野照造：色彩協会誌, Vol.55, No.1 (1982)
- 3) 大日本塗料株式会社編：『橋梁塗装システムガイド』(2001)
- 4) 土木学会 本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会・塗装分科会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査報告書『別冊3 本州四国連絡橋の防錆塗装』(1974)
- 5) 里ほか：ふっ素樹脂塗料による重防食塗装系の高耐久化, 第57回材料と環境討論会講演集, pp324 - pp327 (2010)
- 6) ISO 12944-2：Paint and varnishes-Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part2：Classification of environments (1998)
- 7) 大日本塗料株式会社：塗膜下金属腐食診断装置(現場測定用)「HL202」, DNTコーティング技報, No.3 (2003)
- 8) 腐食コスト調査委員会：『わが国の腐食コスト』, 腐食防食協会, 日本防錆技術協会 (2001)
- 9) EUROCORR 2000, 発表内容については、Brit. Corr. J., Vol.35, No.4 (2000) に紹介がある