

重防食塗装系の耐候性に関する変遷

技術委員会 製作小委員会 防食部会員（賛助会員 大日本塗料㈱）

宮下 剛

1. はじめに

平成 17 年 12 月に発刊された「鋼道路橋塗装・防食便覧¹⁾」では、新設および塗替えの塗装仕様として、防食下地には防せい性の優れたジンクリッチペイントを、上塗り塗料には耐候性の優れたふっ素樹脂塗料を用いた重防食塗装系が採用されており、さらに平成 26 年 3 月に発刊された「鋼道路橋防食便覧²⁾」においても同仕様が採用されている。この重防食塗装系は、近年、道路橋のみならず腐食環境の厳しい塩害地区における電力設備の煙突や貯蔵石油設備のタンクなど様々な鋼構造物塗装の基本仕様となっている。

重防食塗装系の基本的な塗膜構成を図-1 に、塗膜各層の主な役割を表-1 に示す。重防食塗装に求められる機能としては、一般には鋼材の腐食を防止すること、構造物(被塗物)に目的の色彩を付与することであり、さらにはこれらの機能を長期間維持することである。こうした機能を単一の塗膜で満たすことは困難であるため、通常は防食下地、下塗り塗料、中塗り塗料、上塗り塗料のように数種類の塗料を塗り重ねて塗膜全体(塗装系)で目的とする機能の維持を達成している。

上塗り塗膜
中塗り塗膜
下塗り塗膜
防食下地
鋼材

図-1 重防食塗装系の塗膜構成

表-1 塗膜各層の主な役割

	主な役割
防食下地	鋼材に対する良好な付着性、鋼材の電位を下げる、腐食性物質の遮断によって鋼材の腐食を防ぐ。
下塗り	防食下地との付着性を確保する。 水分や塩化物イオンなどの腐食性物質を遮断する。
中塗り	下塗り塗膜と上塗り塗膜の付着性を確保する。 色相を調整することで、上塗り塗膜の隠蔽性を補助する。
上塗り	長期間にわたって美観（光沢や色相）を維持する。 下層塗膜を紫外線から保護する。

本稿では、耐久性の高い重防食塗装系が求められる社会的背景および重防食塗装系の上塗りとして採用されているふっ素樹脂塗料の優れた塗膜性能、ふっ素樹脂塗料が防食便覧に採用されるに至った経緯について説明する。また、ここ数年の JIS、防食便覧における耐候性塗料規格内容の変遷および塗料配合上の耐候性低下に関する懸念点を示し、今後、重防食塗装系の上塗りとして必要であると考えられる塗膜性能について述べる。さらには、今後、重防食塗装系において期待される上塗り塗料について紹介する。

2. 重防食塗装系が求められる社会的背景

近年、橋梁等の鋼構造物、タンク、各種プラント設備の維持管理においては、ライフサイクルコスト(LCC)の低減が求められている。LCC とは、建設に関わる初期コストおよび維持管理に関わるメンテナンスコスト、さらに老朽化した施設の撤去・更新コストまでを考慮したトータルコストを意味する。

道路橋の場合、高度経済成長期に数多くの橋梁が建設されていることから、建設後 50 年以上経過した高齢橋は、2023 年度には 43%、2033 年度には 67%を占めると推計されている³⁾。その後、さらに高齢橋の数は急速に増えると予測されているが、現在のわが国の財政事情を考慮すると、これらの高齢化した橋梁すべてを新たに建設しなおすことは現実的ではなく、既設の橋梁に対して適切な維持管理、補修、補強を施し、長期にわたり供用していくことが重要である。

こうした背景から、LCC の低減を目的として、近年の防食塗料には長期耐久性が求められている。耐久性の高い重防食塗装系は、鋼構造物を長期にわたって腐食から護り、美観性を維持していくことにより、塗り替え周期を延長するなど LCC の低減に寄与し、その長寿命化を支えていく役割を担っている。そして、その役割を果たしていく為、重防食塗装系の上塗りには高い耐候性が必要であり、これまでふっ素樹脂塗料が数多く採用されている。

3. ふっ素樹脂塗料

3. 1 ふっ素樹脂の構造

高い耐久性を実現する重防食塗装系は、優れた防食機能を発現する防食下地と高い耐候性能を発現する上塗り塗膜で構成される。上塗り塗膜は、耐候性の弱い中塗り塗膜以下を護る非常に重要な役割を担っており、上塗り塗膜が健全な間は防食下地の消耗も無い事が発表されている⁴⁾。ポリウレタン樹脂塗料を遥かに超える耐候性を持つのがふっ素樹脂塗料である。重防食塗装系の上塗り塗料として多く用いられている FEVE(フルオロエチレンビニルエーテル)系ふっ素樹脂の構造を図-2 に示す。ふっ素モノマーとその他のモノマーが交互構造を持つふっ素樹脂の主鎖結合エネルギーは紫外線の最大エネルギーよりも大きく、自然光では原理的に分解しない(表-2)。対してポリウレタンなど一般樹脂の主鎖結合エネルギーは紫外線最大エネルギーより小さい為、太陽光により分解が生じてしまう。

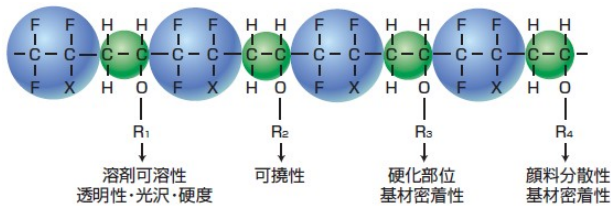


表-2 ふっ素化合物、一般化合物の結合エネルギーと自然光のエネルギー

樹脂	主鎖結合	KJ/mol	主鎖以外の結合	KJ/mol
ふっ素化合物	CF ₃ -CF ₃	414	F-CF ₂ CH ₃	523
	CF ₃ -CH ₃	424	CF ₃ CH ₂ -H	447
一般化合物	CH ₃ -CH ₃	379	CH ₃ CH ₂ -H	411

*自然光の紫外線最大エネルギー411KJ/mol

3. 2 ふっ素樹脂塗料の耐候性

(1) 第一向山橋

ふっ素樹脂塗料が重防食塗装系の上塗りとして使用され始めてから30年以上経過している。写真-1は、防食下地としてジンクリッチペイント、上塗りにはふっ素樹脂塗装を施した、塗装後28年が経過した橋梁の外観である。また、この橋梁では、同時期に塗装系の比較対照として、アプローチ部分へ下塗りにシアナミド鉛さび止めペイント、上塗りにフタル酸樹脂塗装を施しており、塗装後16年を経過した状態が写真-2で

ある。ふっ素樹脂塗料を用いた写真-1の橋梁においては、塗装後21年経過した時点でも光沢保持率は約90%であり、発錆や白亜化を起こしていない健全な塗膜を維持できている状態であった。対して、フタル酸樹脂塗料は塗装後2年の時点で光沢保持率は50%以下、白亜化評点も7点(JIS K5600)であった。塗装後16年経過した時点では、塗膜の著しい劣化が確認された。



写真-1 塗装後28年経過したふっ素樹脂塗装



写真-2 塗装後16年経過したフタル酸樹脂塗装

(2) 中国技術事務所屋上暴露試験

次に、15年間暴露した試験板の膜厚減耗量について説明する。暴露した場所は広島県安芸市の海より1kmほど離れたところにある、中国技術事務所屋上をお借りした(写真-3)。



写真-3 中国技術事務所屋上暴露外観

写真-4、5は、ふっ素樹脂塗膜及びポリウレタン樹脂塗膜をそれぞれ15年間暴露した試験板の断面写真である。ポリウレタン樹脂塗膜は2年を過ぎて大きく白亜化が発生しており、2年目以降の13年間で22~28 μm 以上減耗していると計測された。そのため、ポリウレタン樹脂塗料は1年間あたり約1.7~2.2 μm の膜厚減耗を起こすと推定される。一方、ふっ素樹脂塗料は15年経過後も膜厚減耗はほとんど見られなかった。図-3に膜厚減耗量の測定方法を示す。試験板の塗膜表面の一部に耐候性の良い樹脂テープを用いてマスキングを施すことにより紫外線エネルギーの影響を受けない部分を作製した状態で暴露試験を実施する。経年後、試験板の断面観察を行い、塗膜劣化により膜厚減耗した部分とマスキングにより膜厚減耗していない部分の膜厚差を測定することにより、膜厚減耗量を求めた。

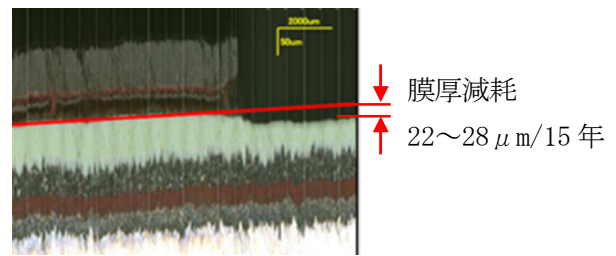


写真-4 ポリウレタン樹脂塗膜の断面（暴露15年）

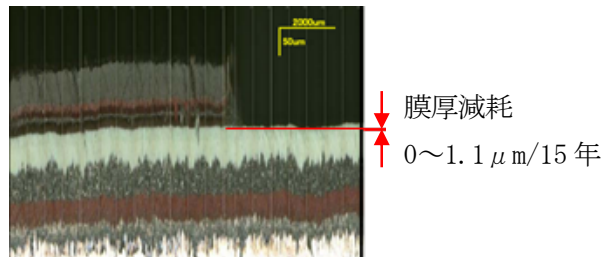


写真-5 ふっ素樹脂塗膜の断面（暴露15年）

4. 重防食塗装系における耐候性

現在、鋼構造物の多くの塗装仕様の基本となっている「鋼道路橋防食便覧」において、ふっ素樹脂塗料が上塗り塗料の基本となったのが、平成17年である。塗膜の耐候性について、過去、様々な場で議論、研究発表等がされてきたが、重防食塗装系の確立に向けての大きな研究の一つに、国立研究開発法人土木研究所が行った「海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究⁴⁾」が挙げられる。ここでは、構造物の耐久性向上に向けて、種々の塗装仕様の耐候性評価が行われている。その結果の一つである駿河湾における20年の暴露結果を図-4、5に示す。ふっ素を始め、ウレタン、シリコンアルキドなど様々な樹脂の評価を行った結果、ふっ素樹脂が最も耐候性に優れていることがわかっている。また、当時と同様のふっ素樹脂塗料を促進耐候性試験(キセノンランプ法: JIS K5600-7-7)に供した結果を図-6に示す。暴露15,000時間経過しても高い光沢を保持出来ていることがわかる。このように、現在、規定化されているふっ素樹脂塗料は研究当時の様々な評価結果によって、性能の裏打ちがなされていることがわかる。このような高い耐候性能を有した上塗り塗膜と防食下地を組み合わせた重防食塗装系を用いることにより、LCC(ライフサイクルコスト)の低減が期待できる。

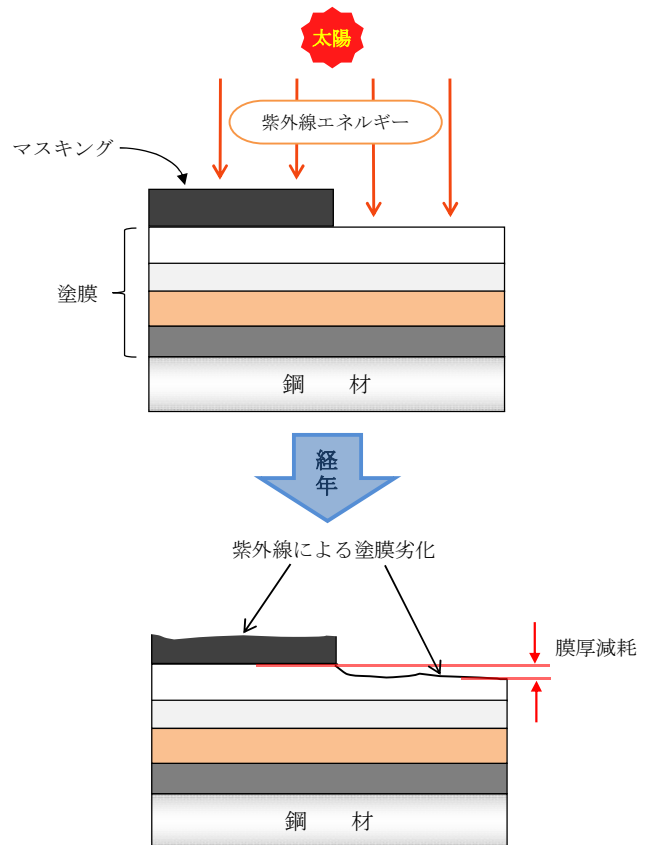
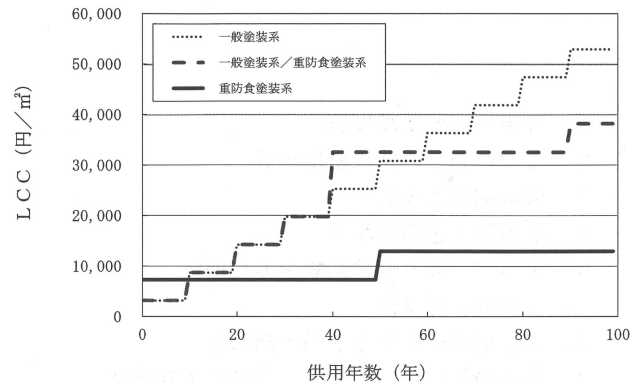


図-3 膜厚減耗量の測定方法

図-7 は一般塗装系と重防食塗装系の LCC 比較である。一般塗装系は、新設塗装後 10 年ごとに塗替塗装(下塗り(補修)+下塗り×2+中塗り+上塗り)を、重防食塗装系は、新設塗装後 50 年ごとに塗替塗装(下塗り+中塗り+上塗り)を実施した場合の値(それぞれ素地調整、足場・防護工費用を含む)を示している。また、一般塗装系については、塗替塗装によって塗り重ねられた膜厚の合計が 500 μm 以上となる供用 40 年目に重防食塗装系に切り替えた場合の値についても示している。構造物を 100 年の供用年数で考えた場合、重防食塗装系を用いることにより一般塗装系と比較して LCC を 1/5 程度まで低減出来ることが予測される。



※ --- では 40 年目に重防食塗装系に塗り替えている

図-7 一般環境での一般塗装系と重防食塗装系 LCC 比較⁵⁾

5. JISの変遷

鋼構造物塗装上塗りに用いられる塗料用 JIS 規格については 2008 年に大きな変更がなされている。これまで材料規格であった JIS K5657 鋼造物用ポリウレタン樹脂塗料(2002 年)と JIS K5659 鋼造物用ふっ素樹脂塗料(2002 年)が統合され、JIS K5659 鋼構造物用耐候性塗料(2008 年)として性能規格化されている。材料規定から性能規定に変更されたことにより、材料規定の一つであった JIS K5657(2002 年)記載の NCO 基の定性の表記や JIS K5659(2002 年)記載の主剤の溶剤可溶物中のふっ素の定量(%)は記載がなくなった(表-3)。適用とする樹脂種はふっ素樹脂、シリコン系樹脂又はポリウレタン樹脂でありそれぞれ 1~3 級まで等級分けされている。1~3 級の等級分けについては主に耐候性性能によって分けられており、その等級分けを表-4 に示す。促進耐候性試験にはキセノンランプ法が用いられており、それぞれ 1 級が 2000 時間、2 級が 1000 時間、3 級が 500 時間となっている。

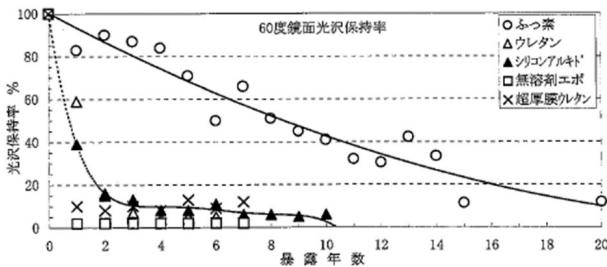


図-4 駿河湾海上暴露 20 年の光沢保持率⁴⁾

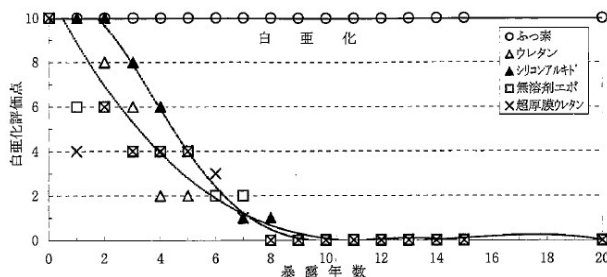


図-5 駿河湾海上暴露 20 年の白亜化評点⁴⁾

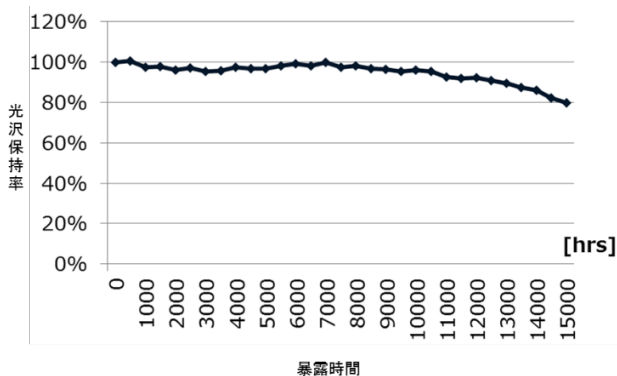


図-6 ふっ素樹脂塗料の促進耐候性試験結果

表-3 JIS と防食便覧の変遷

年	規格名	主な耐候性規格
2002年	JIS K5657 鋼構造物用ポリウレタン樹脂塗料	・キセノンランプ法500時間で光沢保持率70%以上 ・屋外暴露2年で光沢保持率30%以上 ・NCO基の定性 など
	JIS K5659 鋼構造物用ふっ素樹脂塗料	・キセノンランプ法1000時間で光沢保持率80%以上 ・屋外暴露2年で光沢保持率60%以上 ・ふっ素の定量15%以上 など
2005年	鋼道路橋塗装・防食便覧 (C-5、Rc-Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Rzc-Ⅰ)	上塗りは(弱溶剤)ふっ素樹脂塗料 塗料性能は2002年JIS K 5659に準ずる
2008年	JIS K5659 鋼構造物用耐候性塗料	2002年のJIS K 5657及びJIS K 5659を統合 NCO基の定性、ふっ素の定量は無くなり性能規格となる など(表-4参照)
2013年	鋼道路橋防食便覧 (C-5、Rc-Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Rzc-Ⅰ)	上塗りは(弱溶剤)ふっ素樹脂塗料 塗料性能は2008年JIS K 5659に準ずる

表-4 2008年 JIS K5659 の上塗り等級

項目	上塗り塗膜		
	1級	2級	3級
促進耐候性	照射時間2000時間の促進耐候性試験に耐える。 光沢保持率 $\geq 80\%$	照射時間1000時間の促進耐候性試験に耐える。 光沢保持率 $\geq 80\%$	照射時間500時間の促進耐候性試験に耐える。 光沢保持率 $\geq 70\%$
屋外暴露耐候性	暴露2年で光沢保持率が60%以上、白亜化の等級が1又は0	暴露2年で光沢保持率が40%以上、白亜化の等級が2, 1又は0	暴露2年で光沢保持率が30%以上、白亜化の等級が3, 2, 1又は0

* 促進耐候性試験：キセノンランプ法

* 耐える：割れ・はがれ・膨れがなく、色の変化が見本品と比べて大きくなく、白亜化等級が1又は0

6. 耐候性低下の懸念

6.1 アクリルブレンド

前述の通り、高い耐候性を示すふっ素樹脂塗料であるが、ふっ素の定量(%)規定がなくなった現在の JIS 規格においては、配合によって耐候性の低下を引き起こしてしまう。図-8 は、塗料配合中のふっ素樹脂とアクリル樹脂の比率を変え、サンシャインウェザーメーターを用いて光沢保持率を比較した結果である。塗料中の樹脂成分にふっ素樹脂を 100%用いたものと比較し、アクリル樹脂の比率を高めるほど、暴露時間に伴う光沢保持率が低下することがわかる。

現在、鋼構造物に普及しているふっ素樹脂塗料は、その多くが塗料中の樹脂成分に一定以上のふっ素樹脂を使用している。さまざまな規格で期待されている耐用年数、LCC などは過去の JIS で規定されたふっ素の定量(%)項目を満足した製品にて得られたデータを基に算定されていると思われ、今後、更なる耐候性が期待される中、ふっ素の定量(%)は本来の塗膜を形成するために重要であり、高耐候性確保の一要因となると考える。

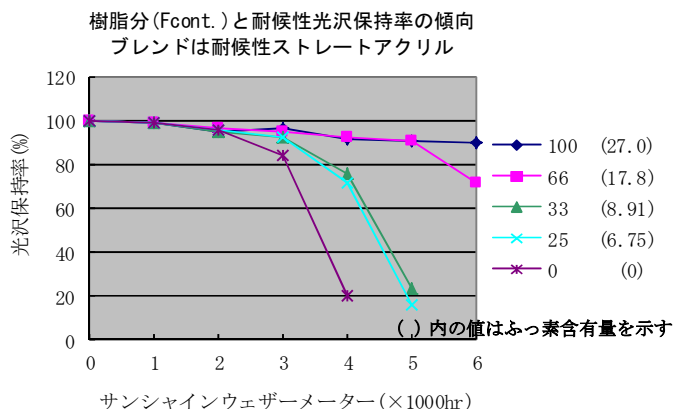


図-8 ふっ素含有量と耐候性の関係性

6.2 適切な塗膜の耐候性について

促進耐候性試験と実暴露試験

ウレタン樹脂塗料とふっ素樹脂塗料について、図-9 に促進耐候性試験(キセノンランプ法)、図-10 に千葉県銚子市にて実施した暴露試験の結果を記す。キセノンランプ法では市販のウレタン樹脂塗料とふっ素樹脂塗料のどちらにおいても JIS K5659 の 1 級の条件である暴露時間 2000 時間で光沢保持率 80%以上を満たしているが、暴露時間 2000 時間を過ぎたあたりからウレタン樹脂塗料は急激な光沢低下が見られている。また、銚子での暴露試験においても、ウレタン樹脂塗料及びふっ素樹脂塗料は 1 級の規格である暴露期間 2 年で光沢保持率 60%以上を満たしているが、暴露期間 2 年を過ぎたあたりからウレタン樹脂塗料は急激な光沢低下が起こっている。

前述の通り、現在の重防食塗装系が規定された背景において、重防食塗装系に求められる上塗り塗膜の耐候性は JIS 規格で規定されている耐候性規格に比べ、高い性能である。重防食塗装系により、多くの鋼構造物の長寿命化に貢献してきた現在、JIS 規格の塗料、塗膜性能を満たしながら、上塗り塗膜の耐候性においては、さらに高い品質の確保に期待したい。

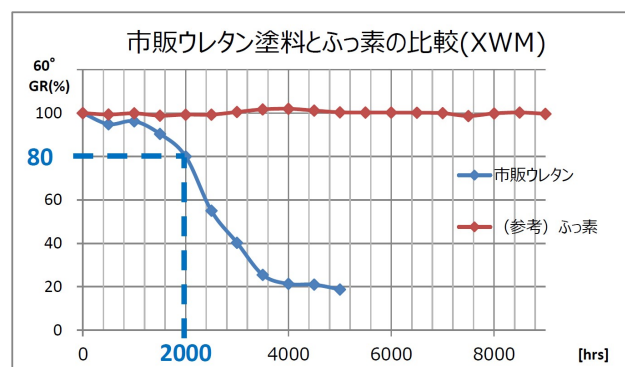


図-9 市販ウレタン塗料とふっ素の比較(キセノンランプ法)

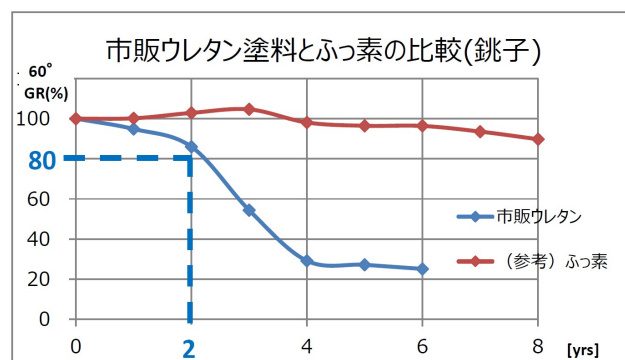


図-10 市販ウレタン塗料とふっ素の比較(銚子暴露)

7. 近年実用化されている技術

7. 1 厚膜形ふっ素樹脂塗料

厚膜形ふっ素樹脂塗料とは、従来よりも厚膜での施工が可能となるように配合設計されたふっ素樹脂塗料である。1回の塗装で乾燥膜厚 55 μm の厚塗りが可能であり、従来の重防食塗装系における中塗り塗装 (30 μm)、上塗り塗装 (25 μm) という2回の工程を1回に短縮する省工程仕様が可能となる。厚膜形ふっ素樹脂塗料を適用した新設時の塗装仕様例を表-5に示す。

耐候性の優れた(塗膜の減耗速度の遅い)ふっ素樹脂塗料を厚膜で施工することにより、防食下地であるジंकリッチ塗膜等の下層塗膜をより長期間に渡って健全な状態で維持できると考えられる。その結果、塗り替え周期の長期化が可能となり、塗装系の更なる高耐久化が期待される。厚膜形ふっ素樹脂塗料は、その優れた耐候性が認められ、長期的な耐久性と景観保持が求められる「東京スカイツリー®」にも採用されている。

7. 2 高耐久性ふっ素樹脂塗料

一般的に淡彩系の色相においては、塗膜中に白色顔料の酸化チタンが多量に配合されている。紫外線、水、温度や塩分などの環境影響を受けた酸化チタンの光触媒作用に起因すると推測される上塗り塗膜の劣化が想定以上に早いことが課題であった。その課題を克服することによって、従来のふっ素樹脂塗料よりも優れた耐候性を有するふっ素樹脂塗料を開発した。本州四国

連絡高速道路株式会社では、宮古島、大鳴門橋における暴露試験および瀬戸大橋で行った実橋試験塗装の結果を踏まえ、高耐久性ふっ素樹脂塗料上塗(暫定)の塗料規格を制定している⁷⁾。同規格における屋外暴露耐候性の品質に含まれる光沢保持率については「宮古島試験場での光沢保持率が、暴露期間3年で50%以上」となっている。

従来のふっ素樹脂塗料および高耐久性ふっ素樹脂塗料の宮古島暴露試験結果⁸⁾を図-11、12に示す。暴露期間3年(36ヶ月)での光沢保持率は、高耐久性ふっ素が50%以上であるのに対して(図-12)、従来のふっ素は大半が20%以下であることから(図-11)、同規格における屋外暴露試験が非常に厳しい条件であることが伺える。

7. 3 水性ふっ素樹脂塗料

水性ふっ素樹脂塗料とは、塗料配合中の溶媒が水である環境対応型のふっ素樹脂塗料である。耐候性について、従来の溶剤形ふっ素樹脂塗料とキセノンランプ法にて比較した結果、溶剤形と同等の性能を示した(図-13)。

また、水性ふっ素樹脂塗料の下層となる防食下地から中塗りをすべて水性化した水性重防食塗装仕様(表-6)を用いた場合、塗装時における揮発性有機化合物(VOC: Volatile Organic Compounds)の排出量を従来の溶剤形と比べて、約90%削減することができる(図-14)。

表-5 厚膜形ふっ素樹脂塗料を適用した塗装仕様例(新設時)

		東京都VOC対策ガイド ⁶⁾ 記載 C-5塗装系(現行)		厚膜形ふっ素樹脂塗料システム (省工程仕様)		厚膜形ふっ素樹脂塗料システム (環境負荷低減省工程仕様)	
		塗料名	標準膜厚 (μm)	塗料名	標準膜厚 (μm)	塗料名	標準膜厚 (μm)
工程	素地調整	プラスチック処理ISO Sa2 1/2	—	プラスチック処理ISO Sa2 1/2	—	プラスチック処理ISO Sa2 1/2	—
	プライマー	無機ジंकリッチプライマー	(15)	無機ジंकリッチプライマー	(15)	無機ジंकリッチプライマー	(15)
	2次素地調整	プラスチック処理ISO Sa2 1/2	—	プラスチック処理ISO Sa2 1/2	—	プラスチック処理ISO Sa2 1/2	—
	防食下地	無機ジंकリッチ ⁹⁾ イント	75	無機ジंकリッチ ⁹⁾ イント	75	有機ジंकリッチ ⁹⁾ イント	75
	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	—	エポキシ樹脂塗料下塗	—	—	—
	下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	120	エポキシ樹脂塗料下塗	120	エポキシ樹脂塗料下塗	120
	中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	30	厚膜形ふっ素樹脂塗料上塗	55	厚膜形ふっ素樹脂塗料上塗	55
	上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	25	—	—	—	—
	合計	—	250	—	250	—	250
	塗装工程数	6工程		5工程		4工程	
	VOC排出量(g/m^2) ^{*1}	899		773		618	
	VOC削減率(%) ^{*2}	基準		14%		31%	

[注意]

*1: VOC排出量は「鋼道路橋防食便覧」規定の最大希釈量でそれぞれ希釈した場合の値を算出。但し、便覧に記載のない塗料は塗料メーカーの社内基準値の最大値で算出。

*2: VOC削減率は「東京都VOC対策ガイド」記載のC-5塗装系のVOC量899 g/m^2 を基準値として算出。

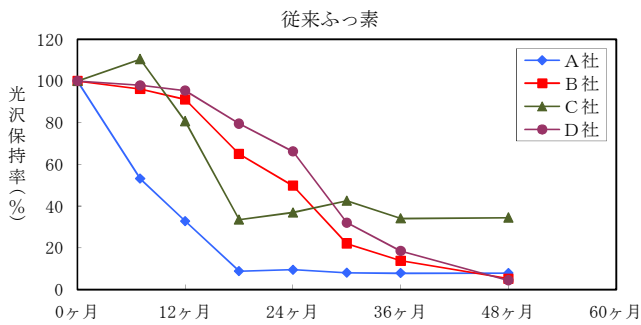


図-1 1 従来ふっ素の光沢保持率(宮古島暴露)

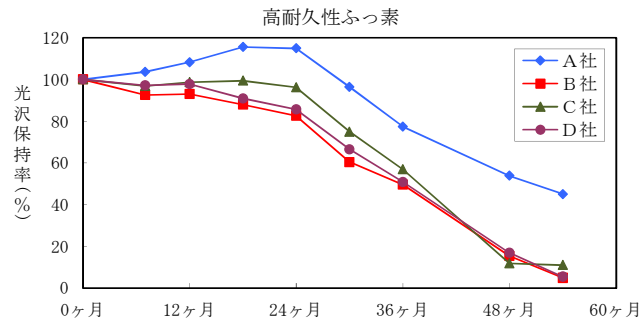


図-1 2 高耐久性ふっ素の光沢保持率(宮古島暴露)

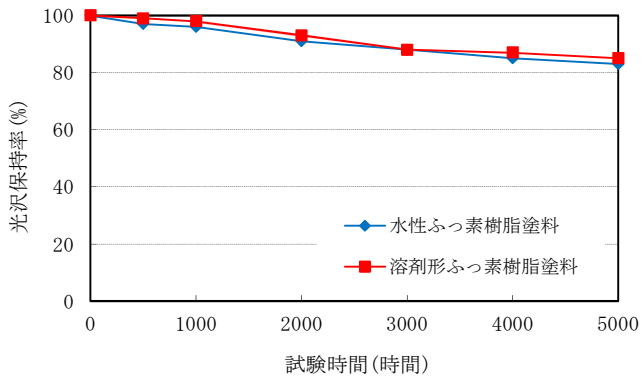


図-1 3 水性ふっ素樹脂塗料の促進耐候性試験結果

表-6 水性重防食塗装仕様

		塗料名	標準膜厚 (μm)
工程	素地調整	プラスト処理ISO Sa2 1/2	—
	防食下地	水性有機ジンクリッチペイント	75
	下塗第1層	水性ポキシ樹脂塗料下塗	60
	下塗第2層	水性ポキシ樹脂塗料下塗	60
	中塗	水性ふっ素樹脂塗料用中塗	30
	上塗	水性ふっ素樹脂塗料上塗	25
合計膜厚		—	250

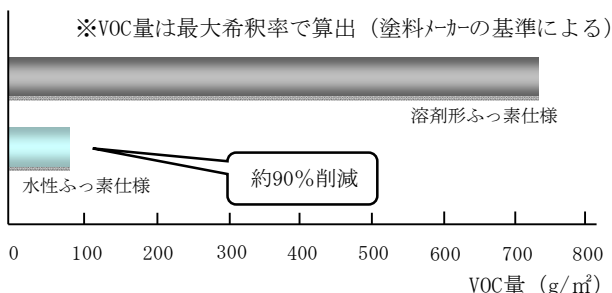


図-1 4 VOC排出量の比較

8. まとめ

高齢化橋の数が急速に増加していく社会的背景において、これらを長期間腐食から護り、美観性を維持していくことにより、その長寿命化を支えていくことが重防食塗装系の役割である。本稿では、重防食塗装系の上塗りとして採用されているふっ素樹脂塗料の優れた塗膜性能について説明した。また、近年実用化されている技術として、耐久性向上を期待した厚膜形ふっ素樹脂塗料、高耐久性ふっ素樹脂塗料および環境に配慮した水性ふっ素樹脂塗料について紹介した。いずれも地球環境に配慮したLCC低減を果たす技術として、今後の活躍が期待される。

一方、現在の重防食塗装系が規定された背景において上塗り塗膜に求められた耐候性はJIS規格で規定されている耐候性規格に比べ、高い性能であった。本来のふっ素樹脂塗料のもつ高い耐候性能を今後も役立てていけるような適切な品質規格が必要であると考え。重防食塗装系の信頼性が重要視される状況において、JIS規格の塗料、塗膜性能を満たしながら、上塗り塗膜の耐候性においては、さらに高い品質を確保することが望まれる。

[参考文献]

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧 (2005)
- 2) (公社)日本道路協会：鋼道路橋防食便覧 (2014)
- 3) 国土交通省道路局：道路構造物の現状 (橋梁) (2013)
- 4) (国研)土木研究所 共同研究報告書 354 海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書 (2007)
- 5) (社)日本塗料工業会：重防食塗料ガイドブック第4版 (2013)
- 6) 東京都 VOC 対策ガイド [建築・土木工事編] (2013)
- 7) 栗野純孝, 矢野賢晃, 籠池利弘：高耐久性ふっ素樹脂塗料上塗 (暫定) 規格の制定, 本四技報 (2011)
- 8) 大塚雅裕, 蔵森和生：環境に配慮した塗料の開発, 本四技報 (2014)