

[要旨]

日本の鋼製橋梁の歴史は、1868年に登場した長崎市“くろがね橋”に始まると言われている。それから既に140年になる。鋼の防錆に用いる塗料として、明治期の輸入塗料(洋式ペイント)及びその後の国産品を含めて、鉛丹(光明丹)さび止めペイント、油性調合ペイント系塗料が100年を越える長い間使用されていた。塗料技術の大きな変革は、第二次世界大戦後の石油化学工業の大きな発展で登場した油変性アルキド樹脂、エポキシ樹脂やポリウレタン樹脂などの合成樹脂塗料によってもたらされた。

鋼橋の設計も明治期から長い間は、錬鉄、ベッセマー鋼、SS材のリベット接合構造が用いられていた。第二次世界大戦後には、溶接接合、高力ボルトによる摩擦接合の採用、鋼材もSM材に代わり、最近では耐候性鋼や溶融亜鉛めっき鋼の適用が増大するなど大きく変わってきている。

塗装技術についても、黒皮鋼板にはけ塗りの時代が長く続いていたが、ローラ塗り、スプレー塗装技術の採用やブラスト処理鋼板の適用など50年ほど前から大きく変貌してきた。

本講演では、鋼鉄道橋を中心として、橋梁の歴史と防食塗装の変遷、次いで鋼橋の防食塗装における課題及び将来に望まれる防食技術について、次の要領で述べる。

1 鋼鉄道橋及び防食塗装の変遷

・鋼鉄道橋の変遷(概要)

鉄道建設の歴史、鋼橋に適用された技術及び材料の変遷について概説する。

・防食塗装の変遷(概要)

1950年代に始まった防食塗装技術に関する本格的な研究事例の概説等を交えながら塗料・塗装技術の変遷について概説する。

・2005年「鋼構造物塗装設計施工指針」改訂

2005年改訂では、長期防錆型塗装系(重防食塗装系)の適用を中心とした1993年改訂後に実施した成果を盛り込んでいる。この成果、すなわち耐候性鋼や溶融亜鉛めっき鋼の延命化を目的とした塗装、環境問題等の社会情勢変化に対応可能な塗料技術(有害化学物質削減、VOC削減)の検討事例を概説する。

2 今後の塗装

架設後70年を超える鋼鉄道橋をさらに100年以上使用すること、を考える時代になってきている。そこで、既設鋼鉄道橋をさらに使用し続けるために必要な防食塗装技術の開発を念頭において、既設鋼鉄道橋の塗膜劣化実態を調査してきた。また、構造物維持管理者においても、今後の維持管理の在り方について見直しを行っている。そこで今後の塗装の在り方を模索するために、これまでに実施した検討概要を紹介する。

以上

## 鉄道橋 防錆技術の50年の変遷と これからの新たな方向

### 進め方

- 鋼鉄道橋及び防食塗装の変遷
  - 鋼鉄道橋の変遷 (概要)
  - 防食塗装の変遷 (概要)
  - 2005年「鋼構造物塗装設計施工指針」改訂
- 今後の塗装
  - 経年の多い鋼鉄道橋の課題
  - 今後の維持管理と塗装

(財)鉄道総合技術研究所 田中 誠

## 橋梁の変遷(1872年～1940年 建設期)

- 1872年: 鉄道開業(品川－横浜間の橋梁は木製)
- 1874年: 初の鋼鉄道橋(大阪－神戸間)  
錬鉄製の輸入橋梁  
その後に、官営鉄道(東海道本線、奥羽本線など)、  
民営鉄道(東北本線、山陽本線など)の建設始まる
- 1907年: 鉄道国有法(全国一元の輸送目的)  
17の私鉄(現在の函館本線、東北本線、山陽本線など)
- 明治末期～1940年  
大正末期までに主要在来鉄道網が整備される

1906年  
鉄道国有化直前



1926年 大正末

鉄道建設の歴史  
(鉄道総研ホームページより)

1941年  
第二次世界大戦前



1976年  
在来線

鉄道建設の歴史  
(鉄道総研ホームページより)

## 橋梁の変遷(1950年～1970年代 変革期)

- 1950年代  
太平洋戦争(1941年12月～1945年9月)及びその後の物資不足から塗替え塗装されずに構造物が荒廃していた。  
戦後復興、電化、複線化による橋梁架け替え
- 1960年代  
海上橋(本州四国連絡道路・鉄道併用橋)計画具体化  
1964年: 東海道新幹線開業(プラスト鋼板採用,  
溶接接合の採用: 1970年代には全面採用)
- 1970年代  
新幹線網の整備進む、高力ボルト接合の採用  
1972年: 山陽新幹線開業(大阪・岡山間)  
(1979年: 大三島橋 道路: 瀬戸内しまなみ街道)

## 橋梁の変遷(1980年～ 成長期)

- 1980年代  
1980年: 耐候性鋼の裸使用(旧会津線 第三大川橋)  
1982年: 東北・上越新幹線(大宮以遠)開業  
(1983年: 因島大橋完成 道路: 瀬戸内しまなみ街道)  
(1985年: 大鳴門橋完成 道路: 神戸淡路鳴門自動車道)  
1988年: 瀬戸大橋開通(鉄道併用: 本四備讃瀬戸線)
- 1990年代  
耐候性鋼、溶融亜鉛めっき鋼の適用拡大  
1998年: ニッケル系高耐候性鋼の採用(北陸新幹線)

### 防食塗装の変遷(1874年～1940年 建設期)

- 1874年:初の鋼鉄道橋(大阪-神戸間)  
 錬鉄+洋式ペイント(輸入塗料)(明治末期まで)  
 東京帝国大学で鉛丹などの顔料製造方法の研究開始  
 明治14年 洋式ペイントの国産開始(光明社)  
 明治31年 量産化始まる(日本ペイントなど)  
 明治末期～大正に多くの塗料メーカー設立
- ~1940年代  
 1943年:土木工事標準示方書(国鉄)初の塗装基準  
 現場調査鉛丹さび止めペイント+現場調査赤錆ペイント

### 防食塗装の変遷(1950年代～1970年 変革期)

- 1950年代(戦後荒廃からの脱出, 電化等増強)  
 塗料用の各種合成樹脂の開発進む  
 防食塗装の本格研究(塗替え塗装の原型)  
 1956年:現場プラストの初試験
- 1960年代(長期防錆型塗装系の研究)  
 長期防錆型塗装系の研究(海上暴露試験など)  
 海上橋(本州四国連絡道路・鉄道併用橋)を想定  
 プラスト処理鋼板採用開始

### 塗替え塗装の本格研究(1954年から11年間) 室内試験・実橋(11橋)を用いた大規模試験実施 (鋼鉄道橋の平均使用年数40年程度)



塗替え塗装試験例  
(サンドブラスト)

- 塗膜耐久性と素地調整  
 素地調整の寄与率大(50%以上)  
 活膜残存度の大きい低級ケレンほど良好  
 ↓  
 現行の活膜残す素地調整法確立  
 (現在見直しが迫られている)
- 塗膜耐久性と塩害  
 塩害地区用塗装系の必要性指摘

### 海岸、海上における長期暴露試験

	暴露期間	暴露場所	
第1次	1959年4月～1964年2月	鳴門市、淡路島	Aルート
第2次	1964年4月～1970年4月	鳴門市	
第3次	1965年4月～1971年 1971年～1982年	高松港内いかだ 児島市海上に移動	Dルート
第4次	1967年9月～1982年	児島市	
第5次	1975年3月～1985年3月	児島市	

鉄道併用橋の計画ルート  
 Aルート:淡路島ルート, Dルート:児島・坂出ルート

### 防食塗装の変遷(1970年～1993年代 成長期)

- 1970年代  
 工場塗装エアレススプレー, プラスト全面採用  
 1976年:長期防錆型塗装系の全工場塗装試験、試用
- 1980年代  
 長期防錆型塗装仕様(重防食)の全工場塗装本格採用  
 京葉線(1982年)  
 東北新幹線(上野・大宮間:1985年)
- 1990年代  
 1990年:道路分野でふっ素樹脂塗料採用  
 1993年:鉄道分野で塩化ゴム系塗料廃止  
 (製造時の四塩化炭素、塗重ね後の塗膜割れ問題のため)  
 この頃より環境問題がクローズアップ

### 吾妻川橋梁塗装(全工場塗装1976年)

塗装系	概要
13A	無機シソクプライマ/厚膜変性エポキシ3回
14A-1	厚無機シソク/ミストコート/厚膜エポキシ2回/ ボリケタン中・上
14A-2	厚膜エポキシ/厚膜エポキシ2回/ボリケタン中・上
14A-3(1)	亜鉛溶射/エッチングプライマ/フェノールシソク/ フェノールMIO2回/塩化M中上
14A-3(2)	厚無機シソク/エッチングプライマ/フェノールシソク/ フェノールMIO2回/塩化M中上
14A-4	厚膜無機シソク/ミストコート/厚膜エポキシ2回/ 厚膜エポキシ中/ビニル樹脂上
14A-5	厚膜無機シソク/ミストコート/厚膜塩化M2回/ 塩化M中上
14A-6	金属前処理塗料/鉛丹2回/フタル酸中・上塗り

網掛けの塗装系は、現在「塗装指針」で実用されている塗装系を示す。

吾妻川橋梁(全工場塗装)  
各種長期耐久型塗装系の試験環境



吾妻川橋梁 30年後(2006年)の塗膜外観



「鋼構造物塗装設計施工指針」  
1993年版の改訂に向けた検討

- 劣化溶融亜鉛めっき用塗装仕様検討 (1993年～)
- JIS耐候性鋼異常腐食対策検討 (1996年～)
- 環境負荷低減型塗装系検討 (1996年～)  
鉛・クロムフリー化、発がん性物質フリー化、低VOC化  
水系塗料を用いた塗装系ECOの塗替え塗装での実用
- 2005年5月：「鋼構造物塗装設計施工指針」改訂

JIS耐候性鋼の異状腐食事例



東北地方、北側100mに跨線橋(国道)  
1987年架設、1993年異状腐食発見  
1996年塗装による延命化試験

耐候性鋼の延命化塗装試験(1996年)

異状腐食箇所：部材下面のみ  
 塗装対象：部材下面のみ  
 検討項目：素地調整程度、塗装種の影響  
 素地調整種：浮きさび除去、動力工具、プラスト処理  
 塗装仕様：エポジック系、変性エポ系、さび安定化処理



エポジック系は現塗装指針の塗装系WS1-6、変性エポ系は塗装系WS2-6

延命化塗装試験結果(10年後調査)

素地調整：プラスト≫動力工具≧浮きさび除去  
 塗装仕様：エポジック≧変性エポ≫さび安定化処理  
 健全部塗重ね：数mm以上の塗重ねで十分

プラスト処理箇所で10年目に点さび発生  
 異状“さび”(塩化物イオンネスト)を残した箇所は、  
 塗装仕様によらず5~10年の耐久



## 塗装系ECO開発の背景 健康, 環境問題

- 有害化学物質  
「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」PRTR法  
400種以上の化学物質を有害性ありとして指定
- 揮発性有機化合物(VOC)  
光化学オキシダント, 大気酸性化, 浮遊粒子状物質  
「大気汚染防止法」改正で規制対象(平成16年5月26日公布)

## 環境負荷低減型塗装系の開発方針

- 有害化学物質削減の基本  
鉛・クロムフリー化  
タール成分など発がん性物質フリー化  
その他有害化学物質量の削減
- VOC低減の基本  
塗装面積当たりの使用量、耐久性を考慮した削減  
VOC総量評価+オゾン発生寄与度(MIR値)評価

## 比較対象の従来塗装系

塗装系	特徴
B7	鉛系さび止め+フタル酸樹脂 期待耐久性 15年程度(鉛・クロム使用)
G7	変性エポキシ樹脂系塗料仕上げ 耐久性 30年程度(強溶剤タイプ)
J7	有機ジンク+エポキシ+ポリウレタン 耐久性 35年以上(強溶剤タイプ)

## 開発目標の設定 有害化学物質量、VOC量

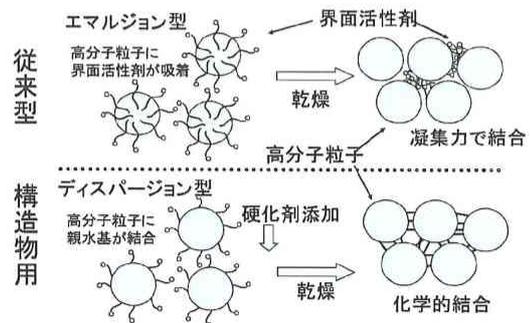
塗装系	有害化学物質量 g/(㎡・y)	VOC量(MIR) g/(㎡・y)	塗装コスト 円/(㎡・y)
B7	2.2	13	390
G7	6.9	50	220
J7	4.5	32	190

塗装系B7: 成分規定で鉛・クロム化合物の使用  
開発目標は、鉛・クロム化合物を含まず  
塗装系B7以下の環境負荷、塗装系G7程度のコスト

## 各種環境負荷低減技術の検討

- 金属溶射  
長期耐久性に関する技術課題が多い  
(素地調整, 耐はがれ, 環境影響等)
  - 塗装仕様変更時の課題  
鉛・クロム顔料の代替(防食性低下)  
ハイソリッド(低溶剤)塗料化(有害物質削減に限界)  
弱溶剤塗料化(防食性低下)  
水系塗料化(下塗り材料未完成)
- ⇒ 水系の塗装仕様が優位と判断  
(室内促進試験→従来型塗料と水系塗料の  
ハイブリット化で耐久性, 環境負荷低減を確認)

## 鋼構造物用水系塗装塗料の硬化機構



## 最終候補の水系塗装系

工程		塗料種	
		一般環境用	腐食環境用
下塗	第1層	変性エポキシ樹脂	ジンクリッチペイント
	第2層	同上	変性エポキシ樹脂
中塗	第3層	水系エポキシ樹脂	
上塗	第4層	水系上塗塗料(ウレタン系, 変性アクリル系)	

## 今後の課題抽出のための調査

2004年から塗膜劣化状況の調査を実施した。

### ・ 調査の背景 (これまでの塗替え塗装方法)

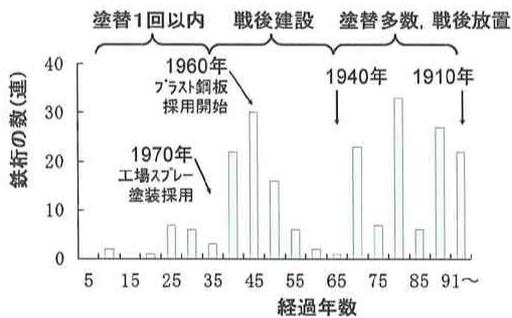
日本：活膜を残して塗装

- ・ 旧塗膜除去より塗膜耐久向上 (1950年代の研究成果)  
(全面塗膜除去では、塩害地区で腐食による損傷が増加)
- ・ 1990年より、残した旧塗膜の“割れ・はがれ”が急増

欧米：旧塗膜の完全除去 (プラストが基本)

- ・ 環境負荷増⇒養生規制⇒コスト激増
- ・ 環境面・コスト面から日本式に注目

## 調査対象の鉄桁架設後経年



在来線では鋼鉄道橋の平均使用年数70年に達する。

## 塩害地区の塗膜劣化

腐食による塗膜劣化

- ・ 塗装後数年で劣化開始、塗装仕様の違い小
- ・ 劣化は、前回腐食箇所と同一箇所に発生

キーワード

塩化物イオンネスト、塗膜下腐食、素地調整



写真例：架設1919年、塗替え塗装後3～5年

## 非塩害地区の塗膜劣化(塗膜割れ・はがれ)

塗膜割れによる塗膜劣化

- ・ 過去に残した活膜 (旧塗膜) は経年50年以上
- ・ 塗膜割れ多数発生、鋼材腐食軽微、割れ→はがれ

キーワード

旧塗膜の老化、黒皮鋼板、活膜の判定



からす足状割れ+部分的にはがれ

架設後77年, 塗装後18年



架設後86年, 塗装後20年

## 非塩害地区の塗膜劣化(早期塗膜はがれ)

塗膜はがれによる塗膜劣化

- ・ 鉛丹さび止めの工場スプレー橋梁の一部
- ・ 厚膜型無機ジンクリッチペイント仕様の橋梁の一部

キーワード

塗膜欠陥、施工欠陥、塗替え塗装時の強溶剤、乾燥収縮



2004年はがれ発見  
鉛丹層間でのはがれ

1971年製作(工場スプレー塗装)  
1996年塗替え塗装(変性エポ)



無機ジンクリッチペイント  
凝集破壊による“はがれ”

1995年架設, 塗替え塗装なし

## 非塩害地区の塗膜劣化(塗膜減耗)

### 塗膜減耗による塗膜劣化

- ・塗装後20年以上経過で上・中塗り塗膜消耗
- ・減耗箇所は、日射に加えて風、水の影響も大

### キーワード

上塗り塗膜種、紫外線、水分、風(エロージョン)



1979年塗装、2004年撮影



1977年塗装、2007年撮影

## 塗膜劣化要因と対策(腐食)

- ・塩害地区  
塗替え後5年程度で前回腐食箇所からの早期劣化腐食は、隅角部、部材下面など素地調整困難箇所  
原因: 塗膜初期欠陥部からの腐食が出發  
さび残存で塗替え塗装→「塗膜下腐食」  
対策: 腐食箇所の素地調整(プラスト以上が必要)  
課題: 現行の素地調整法の限界・制限
- ・非塩害地区  
腐食は、塗膜割れ、減耗箇所が中心  
原因: 塗膜の環境遮断性低下  
対策: 塗膜割れ、減耗対策

## 塗膜劣化要因(割れ・はがれ)

- ・塗膜割れ・はがれ  
塗膜割れ・はがれ現象に2種あり  
①塗膜老化、②建設時施工不良及び塗料性能不良  
原因: ①50年以上前に活膜として残した塗膜の老化  
②1970年前後のスプレー塗装の鉛丹層間はがれ  
厚膜型無機ジクリッチペイントの凝集破壊  
旧塩ゴム塗膜へのエポキシ樹脂系塗料の塗り重ね  
対策: 老化塗膜、不良塗膜の除去  
課題: 活膜判定法、効率的塗膜除去法

## 塗膜劣化要因(減耗)

- ・塗膜減耗(非塩害地区の上塗り塗膜で問題)  
長油性フタル酸樹脂塗膜、変性エポキシ樹脂塗膜は20~30年で問題化  
原因: 表面劣化(光劣化、加水分解、エロージョン)  
対策: 耐減耗性に低い上塗り塗膜への変更  
(ポリウレタン樹脂塗膜では、30年経過で1/3以上の厚み残存を確認している)  
課題: 耐減耗性評価法  
(JIS促進耐候性試験では評価困難)

## 維持管理の体制見直し

2006年: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)鋼・合成構造物

- ・通常全般検査(2年を超えない範囲) 徒歩巡回・目視評価
- ・特別全般検査(通常全般検査の整数倍) 重要構造物は、疲労き裂の危険性を考慮し 塗装足場を用いた定期検査(8年、10年又は12年)の考え方を導入した。

- ・架設後70年を超える構造物を、さらに100年使い続けるには! 塗装技術、検査技術、補強・補修技術の進展が求められている。

## まとめ(今後の塗料・塗装)

1. 塗料の環境負荷低減(深度化)
  - ・直接: 低VOC塗料、使用量削減(薄膜化)が可能な塗料
  - ・間接: 耐久性向上  
(老化し難く、酸素透過性の低い下・中塗、減耗し難い上塗)
2. 塗膜耐久性の適正化  
構造物維持管理全体で環境負荷低減  
構造物検査周期との整合(過小、過大性能とならない仕様)
3. 塗装時の環境影響低減も対象に?  
廃棄物? CO<sub>2</sub>削減? 騒音? 臭気?
4. 塩害地区での塗膜・構造物延命化  
隅角部などの作業困難箇所に適用できる素地調整手法