

# 寒冷地における防食塗装の 耐久性に関する研究

堀 孝司<sup>1</sup>・高柴 保明<sup>2</sup>・高垣 孟<sup>3</sup>・若林 元<sup>3</sup>・平井 陽一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科(〒760-8526 香川県高松市幸町 1-1)

<sup>2</sup>北海道開発局開発土木研究所 構造部材料研究室(〒062-0931 札幌市豊平区平岸一条 3 丁目)

<sup>3</sup>石川島播磨重工業株式会社 技術研究所 材料研究部 (〒135-8732 江東区豊洲 3-1-15)

本研究では、寒冷地における防食塗装技術の確立に向けて、鋼道路橋塗装便覧の塗装仕様に加えて氷海用塗料や新たに試作した寒冷地用重防食塗料などの超厚膜型塗装系の性能を暴露試験と実橋試験に基づいて評価した。暴露試験 10 年、実橋試験 8 年の結果から、寒冷地用重防食塗装系としては、ジंकリッチペイントを下塗とし、エポキシ+ポリウレタンまたはふっ素樹脂塗料を適用した塗装系が防食性に優れていること、超厚膜型塗装系も耐候性に優れた上塗り塗料を適用すれば重防食塗装系として期待できること、およびフタル酸、塩化ゴム系塗料は、早期に割れ、はがれ等が発生し、寒冷地用塗料として不適であることなどが明らかになった。

*Key Words: steel bridge, exposure test, heavy duty coating, anti-corrosive paints, cold region*

## 1. まえがき

橋梁などの鋼構造物は、防食のため塗装されるのが一般的である。鋼材の腐食の発生とその速度は環境条件によって大きく異なることから、塗装系は構造物が置かれる環境を考慮して選定されねばならない。現在鋼構造物の塗装基準として広く用いられているものに「鋼道路橋塗装便覧」<sup>1)</sup>がある。この便覧の外面用塗装系は、腐食環境の厳しさに応じて、①田園・山間地域に適用する A 塗装系(鉛系さび止めペイント/フタル酸樹脂塗料)、②やや厳しい腐食環境である都市・工業地域に適用する B 塗装系(鉛系さび止めペイント/フェノール MIO/塩化ゴム系塗料)、および③腐食の厳しい海上・海浜地域に適用する C 塗装系(無機ジंकリッチペイント/エポキシ樹脂塗料/ポリウレタン樹脂塗料またはふっ素樹脂塗料)の 3 つに分類されている。

鋼道路橋塗装便覧仕様を中心とした塗装系の有効性に関しては、亜熱帯地域(沖縄)や温帯地域(本州)を対象にした耐久性試験によって検討されている<sup>2)~5)</sup>。

これらの研究結果によると、従来用いられていたフタル酸樹脂系塗料、塩化ゴム系塗料などに比

べ、無機ジंकリッチペイント/エポキシ樹脂塗料/ポリウレタン樹脂塗料のような重防食塗装系は、亜熱帯地域、温帯地域いずれでも良好な防食性能を有することが確認されている。

一方、北海道のような積雪寒冷地における鋼構造物の防食塗装は、塗膜が過酷な低温環境にさらされるために、亜熱帯や温帯地域とは異なった問題の発生が予想される。寒冷地における防食塗装の研究は、これまで幾つかなされている。

稲葉、服部ら<sup>6)・7)</sup>は、極寒地(アラスカ)に架設されたパイプラインに各種塗装系を適用して 13 年間経過した結果について報告している。また、北村ら<sup>8)</sup>は、金属溶射被膜の上にエポキシ、ポリウレタン樹脂塗料を適用した系の耐久性を調査するために、北海道旭川市内で実施された 12 年間の暴露試験結果について報告している。さらに、野原ら<sup>9)</sup>は、本四公団基準、開発局基準などの橋梁塗装仕様を対象として、北海道室蘭市内で実施された暴露試験 2 年後の結果について報告している。

これらの研究結果は、暴露環境、塗装仕様、暴露期間などは異なるが、全体として重防食塗装系の耐久性が優れていることが指摘されている。

寒冷地における塗装系の選定には、寒冷地特有の気象環境を考慮することが重要であり、一般に

以下のような塗膜性能が要求される。

- ①著しい温度変化に追従できること
- ②十分な凍結融解抵抗性があること
- ③種々の気象作用に対して十分な附着性を有すること。

しかしながら、上述の鋼道路橋塗装仕様の寒冷地における有効性について、このような観点からの体系的な検討がなされていないのが現状である。そこで、本研究では、寒冷地における防食塗装技術の確立に向けて、鋼道路橋塗装便覧の塗装仕様に加えて氷海用塗料や新たに試作した寒冷地用重防食塗料などの超厚膜塗装系の性能について検討することにした。そのために、先ず昭和62年に各種塗装系を適用した試験片を道内4ヶ所に暴露した。そして、平成元年には実橋による塗装試験を開始した。本論文は、暴露試験10年および実橋試験8年までの、継続的に測定した各種データの分析評価の結果について述べるものである。

## 2. 実験概要

### (1) 暴露試験

#### a) 試験場所

各種塗装系を塗装した試験片を以下に示す道内4ヶ所(図-1参照)に暴露した。

- ①札幌市;北海道開発局開発土木研究所第3実験棟屋上(札幌市豊平区平岸一条3丁目)
- ②室蘭市;白鳥大橋暴露試験場(室蘭市祝津町:一般国道37号)
- ③留萌市;留萌暴露試験場(留萌市浜中町:一般国道231号)
- ④陸別町;小利別道路工手詰め所跡地(足寄郡陸別町小利別)

#### b) 塗装系の種類

試験塗装系は、鋼道路橋塗装便覧に規定されている塗装系8種および超厚膜型塗料9種(表-1参照)とした。

#### c) 試験片の形状及び寸法

試験片は、太陽光が直接あたる部位と直接当たらない部位ができるよう、図-2に示すようなコの字形とした。

#### d) 試験片の材質及び素地調整

試験片は、塗装前に一般構造用圧延鋼材(JIS G 3101, SS 400)に表面あらさ約 $60\mu\text{m}$ のグリットブラスト処理(Sa-2<sup>1/2</sup>)を施した。

### (2) 実橋試験

北海道における鋼道路橋の防食塗料は、これま



● 暴露試験場所  
△ 実橋試験場所  
図-1 試験場所の位置

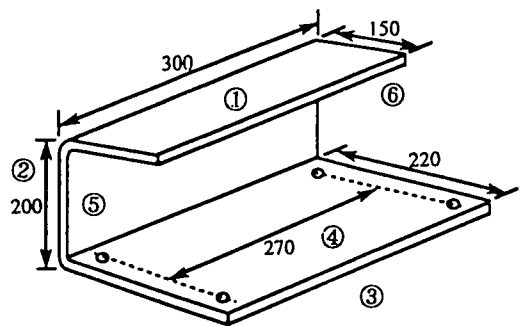


図-2 暴露試験片の形状と寸法

で鉛系さび止めペイント+フタル酸樹脂塗料またはジンクリッチプライマー+塩化ゴム系塗料という塗装系が多かった。これらの塗装系が適用されている鋼道路橋の塗膜状態を昭和62年に調査したところ、凍結・融解による影響で発生したと考えられる、割れ、はがれ等の塗膜異常が発生していることが明らかになった。また、暴露試験の結果でも同様の兆候が認められているので、これらの塗装系は長期防食性に問題があるものと考えられた。また、鉛系さび止めペイント、フタル酸樹脂塗料等は、低温(5℃以下)時には塗装できないため、塗装時期(特に塗替え塗装)が制限されるという問題もある。

これらのことを考慮して本試験では、寒冷地特有の気象環境に耐久的であり、かつ低温時に塗装しても乾燥硬化し、塗装回数(工数低減型)を低減するため試作した寒冷地用塗料を適用し、その経年変化を調査することとした。

#### a) 試験橋梁および塗装系

試験塗装した、橋梁名、架設場所、塗装仕様などを表-2に示した。

本研究用に試作した寒冷地用塗料(ポリウレタ

ン樹脂系)の特長を下記に示す。

1. 無溶剤である(有機溶剤を使用していない)
2. 厚塗りが可能(1回で1000 $\mu\text{m}$ の塗装可能)
3. 低温乾燥性が良い(-5 $^{\circ}\text{C}$ でも乾燥硬化する)
4. 超速乾性である(60秒で乾燥する)
5. 耐衝撃性, 耐海水性が良い

### (3) 試験項目

#### a) 膜厚

防食塗装系の耐久性能は, 塗膜厚によりかなり左右されるので, 暴露試験片に適用した17種塗装系の膜厚を電磁式膜厚計で測定した。

#### b) 塗膜の外観及び顕微鏡観察

各塗装系の防食性能を判定するため, 目視によりさび, ふくれ, われ, はがれ等の経年変化を鋼橋塗膜調査マニュアル<sup>10)</sup>に準じて判定した。また, 本試験に適用した塗装系は, 重防食塗装系が大部分であるため, さび, ふくれ, はがれ等の劣化が目視で観察されるようになるまでは, かなりの年月が必要となる。このため, 暴露2年後に素地に達する傷(加サット)を入れ, この部分からのさび, ふくれ等の進行程度から塗膜の防食性能を判定した。

比較用として用いたフタル酸樹脂塗装系は, 暴露1.5年経過後よりわれが発生した。このわれの状況を観察するため, 表面及び横断面の顕微鏡観察を行った。

#### c) 光沢

塗膜は大気中に暴露されると太陽光線(特に紫外線), 水分, 熱, 各種ガスなどの影響を受けて表面から徐々に劣化が進行し, 光沢が減る。

本試験では, 各種上塗り塗膜の耐候性を判断するため, 携帯用光沢度計(JIS Z 8741)により60度鏡面光沢度の経年変化を測定した。

#### d) 白亜化

塗膜の初期劣化現象である, 上塗り塗膜の白亜化の経年変化を, 鋼橋塗膜調査マニュアルに準じて測定した。

#### e) 塗膜インピーダンス

塗膜インピーダンスは, 防食塗膜の劣化程度を定量的に判断する一手法として利用されている<sup>10)</sup>。この方法は, 各周波数(通常0.2, 0.5, 1.0KHz)における交流抵抗値と電気容量値を測定し, それらの経時変化から塗膜の劣化程度を推定しようとするもので, 本研究においてもこの測定法を用いて劣化の判定を試みた。

#### f) EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)分析

塗装鋼板の劣化を誘因する因子として, 水, 酸素の他に, 海岸地域での飛来海水中に含まれる塩

素イオン(Cl<sup>-</sup>)や, 自動車の排気ガスに含まれるNO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>がある。これらは塗膜の表面に付着し, 徐々に内部に侵入し母材の腐食を促進する。EPMA分析は, 電子線を試料表面に照射し, そこから出てくる特性X線のエネルギーを検出することによって元素の同定と定量を行うものであり, ここでは暴露開始後10年を経過したNo.1塗装試験板の断面について元素の2次元分布を測定し, 塗膜内に侵入したCl<sup>-</sup>の同定を行った。

#### g) FT-IR(Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy)分析

塗膜の主成分は大きく顔料と樹脂に分けられる。このうち, 樹脂成分は一般に有機系高分子化合物で形成され, 様々な要因(紫外線, 水分, 熱, 各種ガスなど)によって影響を受け表面から劣化が進行していく。樹脂の劣化は本質的には化学結合の分解であると考えられるが, これらを微視的に捉える必要がある。この劣化メカニズムを明らかにするために, 本研究では, FT-IRによって赤外領域における分子の振動スペクトルを測定し, 塗膜の樹脂成分の化学構造変化を調べた。

#### h) 塗膜の付着性試験

前述した様に, 塗膜は大気中に暴露されると紫外線, 水分, 熱, 各種ガスなどの影響を受けて劣化し, それに伴い, 付着力も徐々に低下することが考えられる。このことから本研究では, 長期間(暴露試験10年, 実橋試験8年)屋外暴露された塗膜の付着性を, 一般的に用いられている基盤目試験法と引張り試験法<sup>10)</sup>により測定した。

#### i) 塗膜付着物の分析

塗膜表面に付着する物質は, 橋梁が設置される環境条件によって特徴のある傾向を示す。例えば, 海岸地域に設置されている橋梁ではCl<sup>-</sup>が多く付着し, 車の通行量が多い所ではSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>等が多く付着する。Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>などは腐食促進物質であるため, その多寡は塗膜劣化に重要な意味をもつ因子となる。塗膜付着物の種類を知ることは橋梁が設置されている環境条件を把握できることから, 塗替塗装を行う際の塗装系選定に当たっての重要な情報となる。本研究では, 実橋試験実施場所の環境条件を把握するため, 塗膜付着物の分析を行った。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 暴露試験

#### a) 塗膜の外観状態

本試験に適用した17種塗装系の大部分は重防食

表-1 暴露試験片の試験塗装系

塗装系No.	塗装系の種類	膜厚(平均μm)
No. 1	WPL+鉛系さび止め <sup>°</sup> イ <sup>ト</sup> ×2+長油性 <sup>°</sup> フタル酸樹脂塗料×2	229
2	WPL+鉛系さび止め <sup>°</sup> イ <sup>ト</sup> ×2+7 <sub>1</sub> /- <sup>°</sup> MI0+塩化 <sup>°</sup> ジ <sup>°</sup> ム系塗料×2	265
3	[ZP+WPS+7 <sub>1</sub> /- <sup>°</sup> ル <sup>°</sup> ン <sup>°</sup> ソ <sup>°</sup> ク <sup>°</sup> 7 <sub>1</sub> /- <sup>°</sup> MI0+塩化 <sup>°</sup> ジ <sup>°</sup> ム系塗料×2	313
4	[ZP+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> HB×2+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン用中塗+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン樹脂塗料上塗	302
5	[ZP+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> HB×2+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン用中塗+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン樹脂塗料上塗	386
6	変性 <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ×3+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン用中塗+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン樹脂塗料上塗	319
7	[ZP+塩化 <sup>°</sup> ジ <sup>°</sup> ム系塗料下塗×2+塩化 <sup>°</sup> ジ <sup>°</sup> ム系塗料中塗+塩化 <sup>°</sup> ジ <sup>°</sup> ム系塗料上塗	191
8	[ZP+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> 下塗×2+ふっ素樹脂塗料用中塗+ふっ素樹脂塗料上塗	300
9	氷海用塗料( <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン樹脂系)	460
10	氷海用塗料( <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> 樹脂系)	598
11	寒冷地用重防食塗料-A( <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン樹脂系)	407
12	寒冷地用重防食塗料-B( <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン樹脂系)	910
13	寒冷地用重防食塗料-C( <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン樹脂系)	705
14	寒冷地用重防食塗料-D( <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン樹脂系)	633
15	寒冷地用重防食塗料-E( <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ウレタン樹脂系)	813
16	[ZP+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ラスフレク( <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> 樹脂系)	598
17	[ZP+ <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> ラスフレク( <sup>°</sup> イ <sup>°</sup> キ <sup>°</sup> 樹脂系)	578

注：1) 塗装系の略記号は次のとおりとする。

WPL;長期暴露型<sup>°</sup>ウレタン<sup>°</sup>プライマー  
 WPS;短期暴露型<sup>°</sup>ウレタン<sup>°</sup>プライマー  
 IZP;無機<sup>°</sup>シリケート<sup>°</sup>イ<sup>°</sup>ト  
 MI0;雲母状酸化鉄塗料

注：2)

塗装系No. 1～8; 鋼道路橋塗装便覧に規定されている塗装系  
 塗装系No. 9～17; 超厚膜型塗装系

表-2 実橋の試験塗装系

橋梁名	苫前	小磯子	札の内
架設場所 (図-1参照)	留萌郡苫前町 (一般国道239号)	留萌郡小平町 (一般国道232号)	樺戸郡浦臼町 (一般国道275号)
橋長(m)	150	30	25
試験対象部位	山側ウェブ内・外面	山側ウェブ内・外面	ウェブ内・外面
塗装面積(m <sup>2</sup> )	1.5~2	3~4	1.5~2
素地調整	St3	Sa2.5	St3
試験 塗装 系	①	鉛系さび止め×2 フェノールMI0×1 フタル酸(中・上塗)	—
	②	変性エポキシ×3 ポリウレタン(中・上塗)	変性エポキシ×3 ポリウレタン(中・上塗)
	③	—	有機ジンク×1 変性エポキシ×2 ポリウレタン(中・上塗)
	④	プライマー×1 寒冷地用塗料(C)×1 ふっ素上塗×1	プライマー×1 寒冷地用塗料(C)×1 ふっ素上塗×1

注) ①塗装系: 暴露試験に適用したNo.1塗装系に相当する塗装系

②塗装系: 暴露試験に適用したNo.6塗装系と同一仕様

③塗装系: 暴露試験には適用していない。鋼道路橋塗装便覧の塗替え塗装系

④塗装系: 暴露試験に適用したNo.13塗装系にふっ素樹脂塗料を上塗りとした塗装系

表-3 塗膜われとさびの経年変化(①,②,④面の平均値で評価)

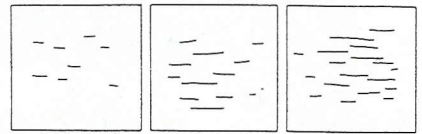
暴露場所	劣化形態	経過年数										
		1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
札幌	われ	なし	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	さび	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
小利別	われ	なし	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	さび	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
室蘭	われ	なし	なし	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	さび	3	3	3	2	2	2	1	1	0	0	0
留萌	われ	なし	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	さび	3	3	3	2	2	1	1	0	0	0	0

注) 評点は鋼橋塗膜調査マニュアル(社)日本鋼構造協会編,(1993))に従った。

さび評価点

- 3: さび発生面積 0.03%未満
- 2: " 0.03~0.3%
- 1: " 0.3~5%
- 0: " 5%以上

われ評価点



2点(8点) 1点(6点) 0点(4点)  
( )内は日塗検評価点を示す。

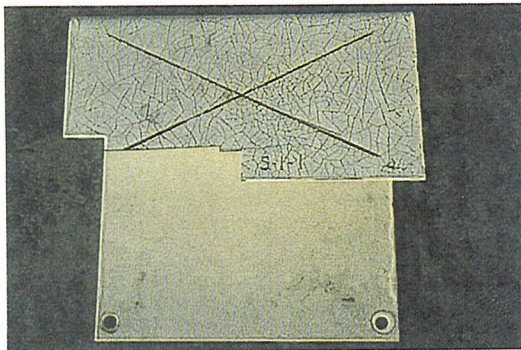


写真-1 No.1 塗装系(WPL+鉛系さび止め+フタル酸)  
暴露10年後の塗膜われの状態(札幌)

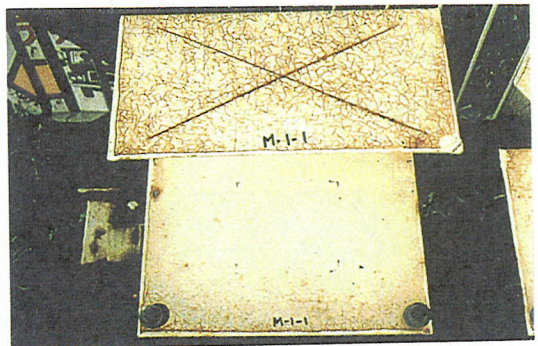


写真-2 No.1 塗装系(WPL+鉛系さび止め+フタル酸)  
暴露10年後の塗膜われの状態(室蘭)

塗装系であるため10年経過後も、さび、ふくれ、われ、はがれ等という塗膜異常は試験片のいずれの面にも発生しておらず、外観的には良好な防食状態を維持していた。しかし、一般塗装系と言われてるNo.1~3塗装系は以下に述べるような塗膜異常が認められた。

No.1 塗装系(WPL+鉛系さび止め+フタル酸)の試験片では、表-3に示すように、暴露1.5~2年の間に太陽光線が直接当たる①, ②, ④面(図-2参照)にわれが発生した。暴露5年後には試験片全面に認められるようになったが、太陽光線が直接当たらない③, ⑤, ⑥面の発生密度は少ない。海岸地域(室蘭, 留萌)では暴露3年後にわれ, さびへと進行(主に①, ②, ④面)した。札幌, 小利別でも同様な傾向でわれを生じたが暴露7年までは、試験片全面にさびは発生しなかった。この

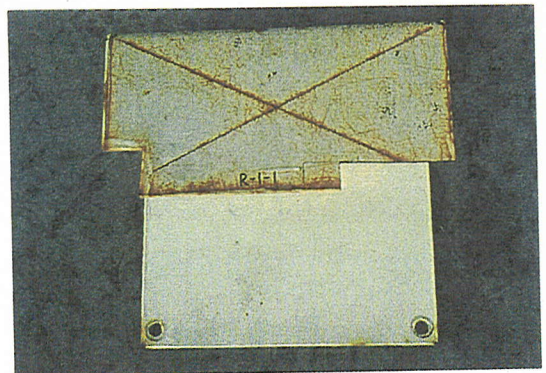


写真-3 No.1 塗装系(WPL+鉛系さび止め+フタル酸)  
暴露10年後の塗膜われの状態(留萌)

塗装系では、低温による塗膜の収縮拘束に加えて、塗膜に浸透した水分が冬期に凍結・融解を繰り返し

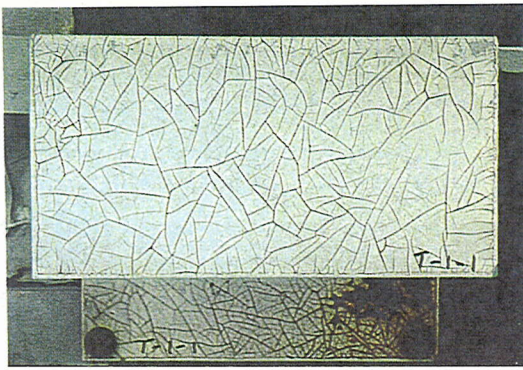


写真-4 No. 1 塗装系(WPL+鉛系さび止め+フタル酸)  
暴露10年後の塗膜われの状態(小利別)

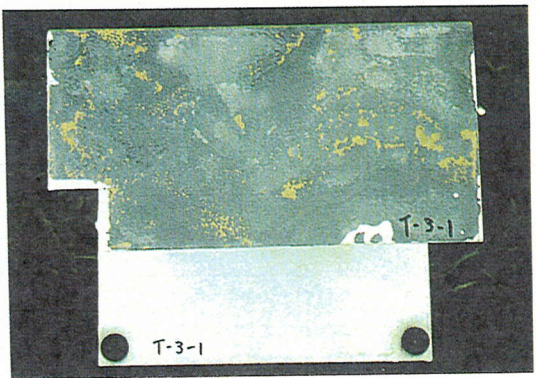


写真-5 No3. 塗装系(WPL+鉛系さび止め+フタル酸)  
暴露10年後の塗膜われの状態(小利別)

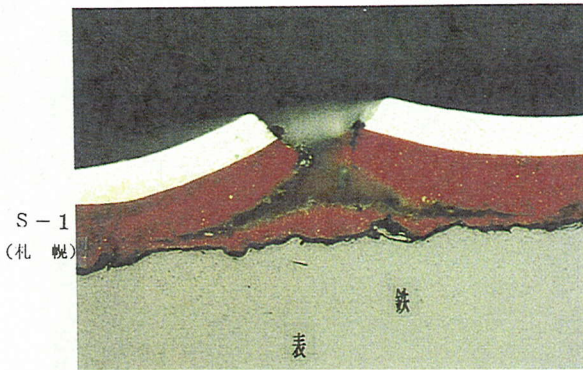
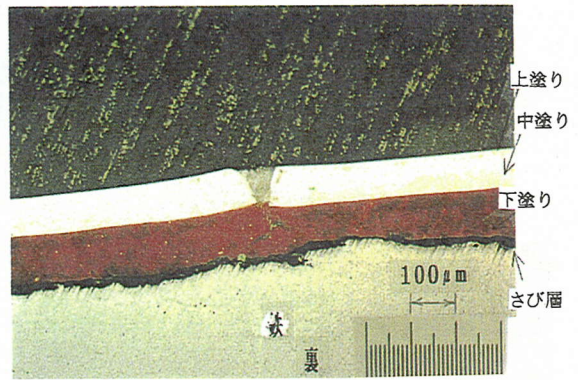


写真-6 塗膜断面の顕微鏡写真(×100)



No. 1 塗装系(WPL+鉛系さび止め+フタル酸)

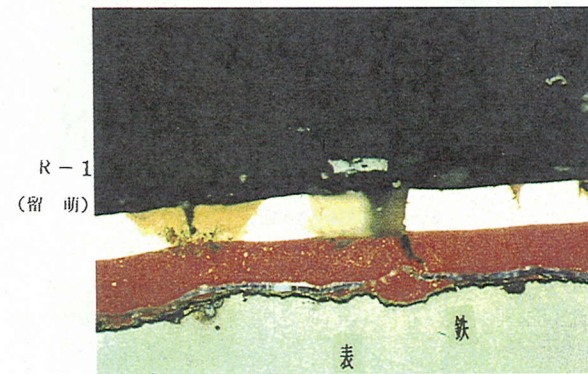
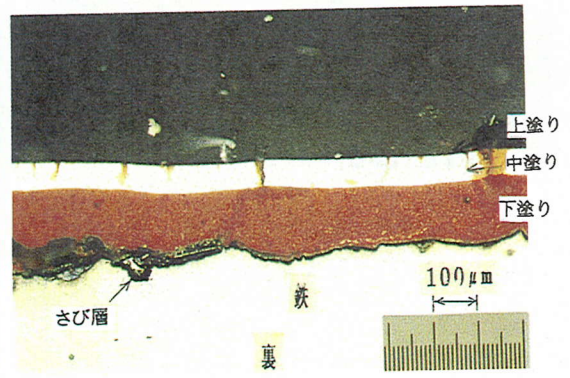


写真-7 塗膜断面の顕微鏡写真(×100)



No. 1 塗装系(WPL+鉛系さび止め+フタル酸)

たことによって早期にわれが発生し、塗膜のわれた部分より水分がさらに塗膜下まで浸透してさびを発生させたものと推察される

4試験場に10間暴露した塗膜の外観状態を写真-1~4に示す。

小利別に暴露した、No. 3塗装系(IZP+WPS+フェノールノックロ+フェノールMI0+塩化ゴム系塗料)では、暴露1年後に②面に2~5mm程度のふくれが発生し、その後①、③方向に著しく振興して2年後には、はが

れへと進行した。この原因を明らかにするため実験室で低温環境試験を行った結果、本塗装系は-30℃以下になると、塗膜にわれを生じることが明らかになった<sup>11)</sup>。小利別は、日本国内で最も低温となる地域として知られている。小利別に10年間暴露した塗膜の外観状態を写真-5に示す。

No. 2塗装系(WPL+鉛系さび止め+フェノールMI0+塩化ゴム系塗料)も小利別に暴露した試験片のみに暴露3年目に試験片の全面に小さなわれが発生し、

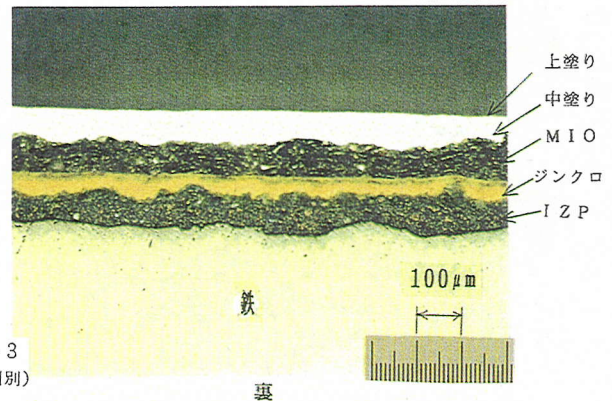
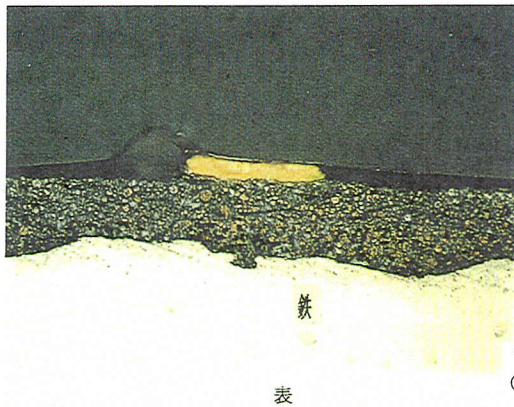


写真-8 試験片断面の顕微鏡写真

(×100)

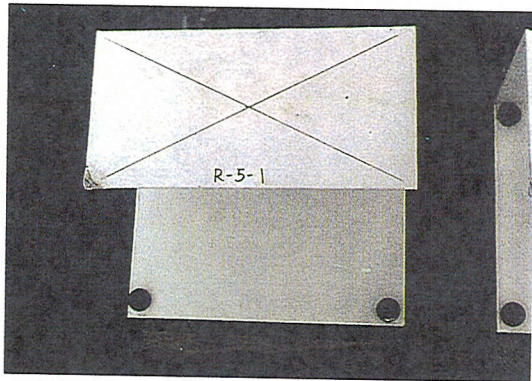


写真-9 No. 5 塗装系 (IZP+珪酸樹脂+MIO+ポリアウレタン)  
クロスカット部からの発錆が少ない塗膜の状態

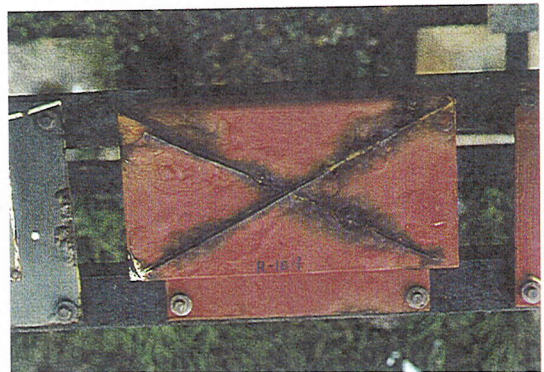


写真-10 No. 10 塗装系氷海用塗料(珪酸樹脂系)  
クロスカット部からの発錆が著しい塗膜の状態

その後徐々に進行したがはがれには至らなかった。このわれもNo. 3塗装系と同様低温によるわれと推察される。

塗膜にわれを生じたNo. 1塗装系(札幌, 留萌)の塗膜断面の顕微鏡観察により, われは鉄面まで達していることがわかった(写真-6, 7参照)。また, われの大きさ(幅)は, 札幌に暴露された試験片のほうが大きいことがわかった。塗膜にはがれを生じたNo. 3塗装系(小利別に暴露した試験片)の断面顕微鏡観察の結果, ジンクリッチペイントとフェノールMIOの層間で剥離していることが判明した(写真-8参照)。

札幌, 室蘭, 留萌の3試験場には, 同一塗装系を2枚暴露したが, その1枚に暴露2年後に素地に達する傷(クロスカット)を④面に入れ8年経過したが, その結果次のようなことが判明した。

鉄素地面に無機ジンクリッチペイント(IZP)を適用した塗装系は, クロスカット部からのさび発生が非常に少ない。しかし, No. 1塗装系(フタル酸樹脂塗料), No. 2塗装系(塩化ゴム系), No. 10塗装系

(氷海用塗料)などのように, IZPを適用していない塗装系は, さびの発生が多く, 著しい場合は, はがれまで進行していた(写真-9, 10参照)。

#### b) 光沢

図-3に光沢値の経年変化を示す。塗料の種類によって経年変化に明らかな差が認められる。超耐候性塗料として注目されているふっ素樹脂塗料は, 今回試験を行った塗料の中で最も光沢低下が小さいことが明らかになった。しかし, この場合であっても, 暴露後5年および10年で, 光沢値はそれぞれ60および40以下に低下している。

ポリアウレタン樹脂塗料は, フタル酸, 塩化ゴム系塗料等より優れているが, 後述するように暴露3年後に白亜化が認められるようになり, その後光沢低下が著しくなった。

フタル酸樹脂塗料, 氷海用塗料, ガラスフレーク塗料, 寒冷地塗料などは, 暴露1.5年でほとんど光沢がなくなり, 耐候性に劣る塗料であることが明らかとなった。なお, フタル酸樹脂塗料については, 暴露場所(札幌, 室蘭, 留萌, 小利別)によ

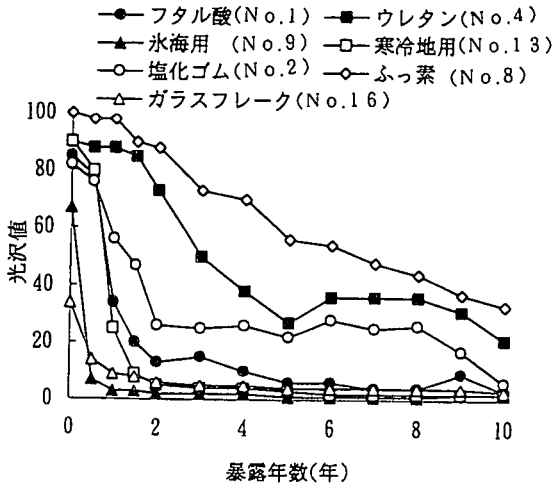


図-3 光沢の経年変化(暴露地:札幌)  
(①,②,④面の平均値で評価)

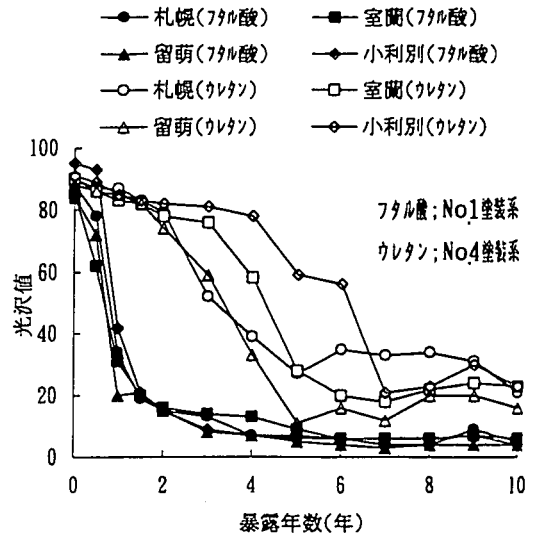


図-4 光沢の経年変化

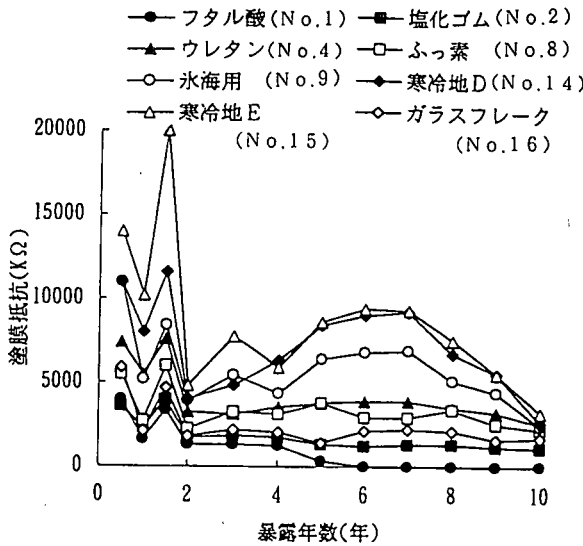


図-5 塗膜抵抗の経年変化(暴露地:札幌)

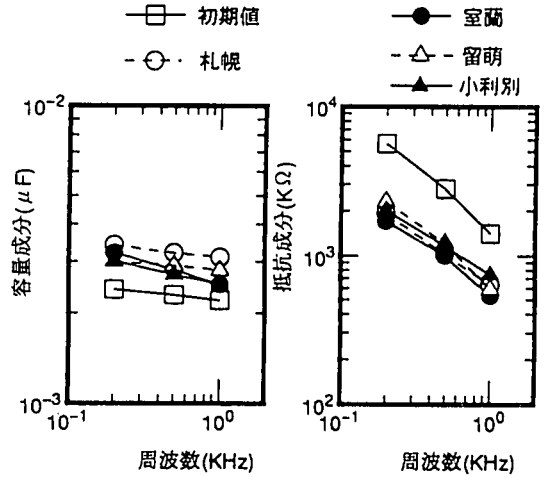


図-6 塗膜インピーダンスの周波数特性  
(塗装系:IZP+エポキシ+ポリウレタン)

る差はほとんど認められなかった。また、ポリウレタン樹脂塗料は暴露3~6年の間に差が認められたが、7年目以降では差がほとんど認められなくなった(図-4参照)。

c) 白亜化

各塗料の白亜化発生までの年数を、表-4に示す。光沢値と同様、塗料の種類により白亜化が生じるまでの期間にかなり差のあることが判明した。

d) 塗膜インピーダンス

各塗装系の塗膜抵抗の経年変化を図-5に示す。暴露初期(0.5~1.5年)は測定値にバラツキが認められる。また、一部の塗装系は暴露7年位まで塗膜抵抗値が増加する傾向が認められる。しかし、

表-4 塗料白亜化発生までの年数

塗料の種類	白亜化発生までの年数
水海用塗料	0.5~1年
フタル酸樹脂塗料	1~1.5年
試作寒冷地用塗料	1~1.5年
塩化ゴム系塗料	1.5~2年
ポリウレタン樹脂塗料	3~4年
ふっ素樹脂塗料	8~9年

注) 白亜化の評価は、①,②,④面で判定した。

いずれの塗装系もその時期は異なるが塗膜抵抗値が低下しているので、塗膜劣化は徐々に進行しているものと考えられる。



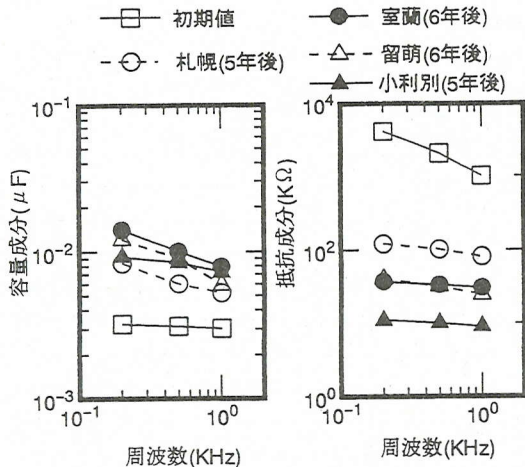


図-7 塗膜インピーダンスの周波数特性  
(塗装系:鉛系さび止め+フタル酸)

重防食塗装系 (IZP+エポキシ+ポリウレタンおよびふっ素) ならびに超厚膜型塗装系 (氷海用塗料, 寒冷地用塗料等) の周波数特性は (図-6参照), 初期に比べ抵抗値の低下, 容量値の増加が僅かに認められる. しかし, 健全塗膜が有する周波数特性と同様の傾向を示しているの, 未だ劣化は軽微であると推察される. 一方, フタル酸樹脂塗料は, われさびが発生しているため暴露5年後に抵抗値が急激に低下し, 6年目を以降は抵抗値がゼロ (測定不能) となった (図-7参照)

フタル酸樹脂塗装系は, 重防食塗装系および超厚膜型塗装系に比べ防食性能に劣ることが, 本測定結果からも明らかになった.

e) EPMA分析

No.1塗装系は, 4試験場いずれでもわれを生じたが, このわれの中に腐食促進物質である $\text{Cl}^-$ がどのように浸透しているのかを, 飛来塩分の影響を多く受ける海岸地域 (留萌) と影響の少ない一般市街地 (札幌) について, EPMA分析を行った. その結果, 写真-11, 12に示すように海岸地域 (留萌) に暴露された試験片には, われ内部まで塩分が確認されたが, 一般市街地 (札幌) に暴露した試験片からはほとんど検出されなかった.

f) FT-IR分析

ポリウレタン塗膜の暴露10年後のFT-IR測定結果を図-8に示す. 暴露後のIRスペクトルは未暴露塗膜と比較して,  $1540\text{cm}^{-1}$ 付近の吸収強度が減少している. この吸収はウレタン結合中の炭素-窒素間の結合に帰属されることから, ポリウレタン塗膜の屋外暴露による劣化機構は太陽光中の紫外線あるいは大気環境中の水分によるウレタン結合の分解によるものと推定することができる. 一方,

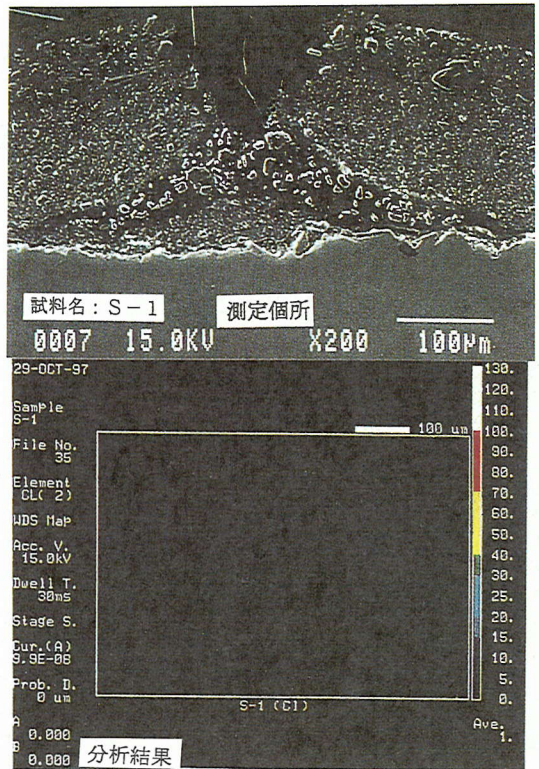


写真-11 EPMA分析 (札幌)

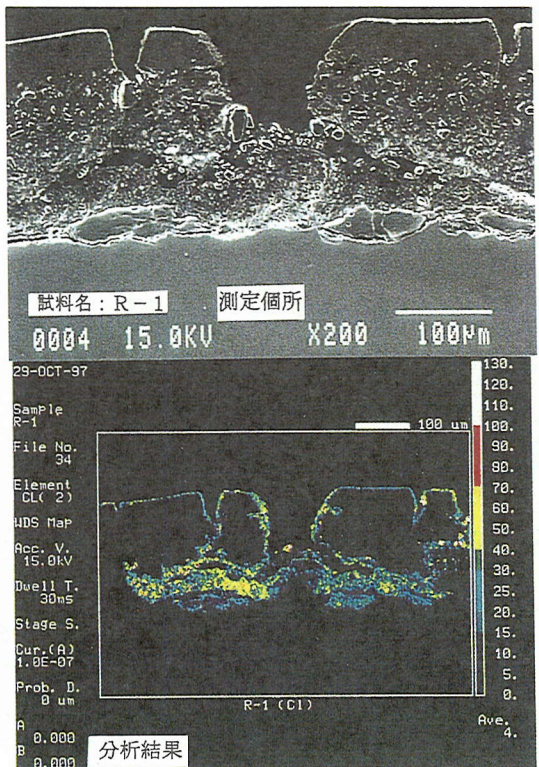


写真-12 EPMA分析 (留萌)

表-5 塗膜の付着性試験結果

暴露場所 試験片No.	札幌		室蘭		留萌		小利別	
	基準目 試験(RN)	引張り試験 (N/mm <sup>2</sup> )	基準目 試験(RN)	引張り試験 (N/mm <sup>2</sup> )	基準目 試験(RN)	引張り試験 (N/mm <sup>2</sup> )	基準目 試験(RN)	引張り試験 (N/mm <sup>2</sup> )
1	2	2.5	2	2.0	2	3.0	2	2.0
2	3	3.5	3	2.5	3	5.0	3	2.0
3	3	3.0	2	2.5	3	3.0	-	-
4	3	4.0	3	3.5	3	5.0	3	2.0
5	3	3.0	2	3.0	3	3.0	3	3.0
6	3	3.0	3	4.0	3	6.0	3	3.0
7	3	3.0	2	2.5	3	5.0	2	2.5
8	3	3.0	3	3.0	3	3.0	3	2.5
9	3	3.0	3	3.0	3	3.5	3	5.0
10	3	3.0	3	4.0	3	4.0	3	4.0
11	3	4.0	3	4.0	3	3.5	3	5.0
12	3	4.5	3	5.0	3	6.0	3	6.0
13	3	4.0	3	5.0	3	8.0	3	4.0
14	3	4.0	3	4.0	3	5.0	3	4.5
15	3	4.0	3	4.0	3	6.0	3	6.0
16	3	3.5	3	4.0	3	5.0	3	4.0
17	3	4.0	3	3.5	3	5.0	3	5.0

注) 評点は鋼橋塗膜調査マニュアル(社)日本鋼構造協会編, (1993)に従った。

基準目試験評価点

はく離状態				はく離 50%以上
評価点(RN)	3	2	1	0

暴露場所による吸収強度の差異はそれほど大きくないが、留萌に比べると札幌に暴露された塗膜の方がやや分解が進んでいると判断される。これは、留萌は札幌に比べ海岸に近いので、埃の付着が多く、太陽光線の照射が弱くなったことによるものと考えられる。

e) 塗膜の付着性

暴露10年経過後に測定した基準目試験ならびに引張り試験の測定結果を表-5に示す。

①基準目試験

No. 1塗装系(フタル酸)は、4暴露場所の何れもRN. 2という結果が得られており、やや付着性が低下していると判断される。また、No. 3, 5, 7塗装系(塩化ゴム系)は、暴露場所によって異なるが、RN. 2という結果が得られているものがあることから、付着性低下の傾向があると評価される。

②引張り試験

本測定法では、引張り強度が2N/mm<sup>2</sup>以上であれば実用上問題ないといわれており、17種塗装系い

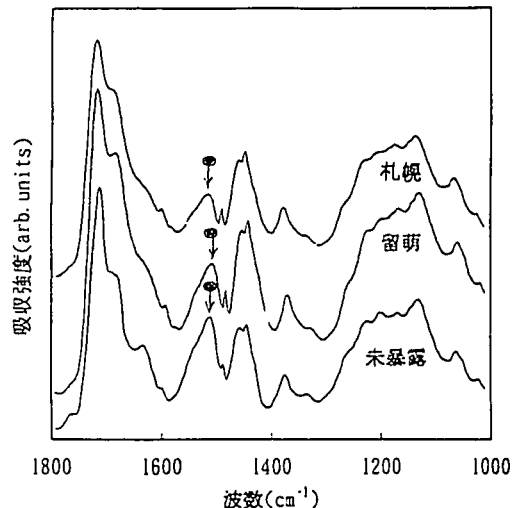


図-8 ポリウレタン塗膜のFT-IRスペクトル

ずれもこの値を満足するが、基準目試験で結果が悪かった塗装系(フタル酸、塩化ゴム系)は、引張り試験でも重防食塗装系に比べ、やや低い値となっている。

表-6 暴露10年後の試験片の防食性・耐候性評価一覧

塗装系No.	防食性				防食性 評点	耐候性				耐候性 評点	総合点
	札幌	室蘭	留萌	小利別		札幌	室蘭	留萌	小利別		
No.1	××	××	××	××	3	×	×	×	×	8	11
2	◎	◎	△	◎	18	×	×	×	×	8	26
3	◎	◎	××	◎	16	×	×	×	××	7	23
4	◎	◎	◎	◎	20	×	×	△	×	9	29
5	◎	◎	◎	◎	20	×	×	△	△	10	30
6	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	8	28
7	◎	○	◎	◎	19	×	×	×	×	8	27
8	◎	◎	◎	◎	20	○	○	○	○	16	36
9	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	6	26
10	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	6	26
11	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	6	26
12	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	6	26
13	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	6	26
14	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	6	26
15	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	6	26
16	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	6	26
17	◎	◎	◎	◎	20	×	×	×	×	6	26

注1) 防食性の評価は下記の基準で行った。

注2) 耐候性の評価は下記の基準で行った。

【評価点】 【評価記号】

【評価点】 【評価記号】

- 5 ◎ ; 塗膜に異常が認められないもの
- 4 ○ ; 塗膜に僅かな異常が認められたもの
- 3 △ ; 塗膜の異常が小程度のもの
- 2 × ; 塗膜の異常が中程度のもの
- 1 ×× ; 塗膜の異常が大きいもの

- 5 ◎ ; 塗膜に異常が認められないもの
- 4 ○ ; 塗膜に僅かな異常が認められたもの
- 3 △ ; 塗膜の異常が小程度のもの
- 2 × ; 塗膜の異常が中程度のもの
- 1 ×× ; 塗膜の異常が大きいもの

表-7 実橋塗膜の外観評価

橋梁名	苫前橋						小根子橋						札幌内橋					
	①		②		④		②		③		④		②		③		④	
部位	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面
1年後	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
2年後	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
3年後	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
4年後	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
5年後	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
6年後	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
7年後	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
8年後	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3

注) 評点は鋼橋塗膜調査マニュアル(社)日本鋼構造協会編, (1993))に従った。

さび評価点 3: さび発生面積 0.03%未満, 2: 0.03~0.3%, 1: 0.3~5%, 0: 5%以上

h) 総合評価

塗膜の外観観察および白亜化, 光沢測定結果から, 暴露10年経過した, 各試験片の防食性, 耐候性の評価を表-6に示す。ふっ素樹脂塗料の評価が最も高い結果となった。

(2) 実橋試験

a) 塗膜の外観

暴露後8年経過した各橋梁の外観状態を表-7に示す。苫前橋では,

①鉛系さび止ペイント+2フェノール系樹脂塗料

表-8 実橋塗膜の光沢測定結果

橋梁名	苫前橋						小椴子橋						札的内橋					
	①		②		④		②		③		④		②		③		④	
部位	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面
初期値	80	80	83	83	90	90	83	83	89	89	90	90	83	83	89	89	90	90
1年後	33	32	62	61	66	59	46	66	52	62	65	75	73	69	66	73	67	72
2年後	34	14	60	60	61	58	42	62	50	65	61	74	65	72	59	72	61	62
3年後	24	11	51	61	53	60	42	57	49	53	60	74	66	75	60	75	70	70
4年後	29	13	48	59	51	69	38	59	45	57	56	86	64	80	77	76	54	83
5年後	28	16	45	55	48	67	37	34	31	34	61	73	71	70	73	58	71	71
6年後	27	16	59	60	66	71	43	28	46	31	63	83	50	70	60	71	77	73
7年後	25	12	59	58	62	72	45	22	48	28	68	75	66	72	69	72	75	76
8年後	23	20	57	56	62	73	41	19	47	22	59	64	62	72	64	68	75	74

表-9 実橋塗膜の白亜化調査結果

橋梁名	苫前橋						小椴子橋						札的内橋					
	①		②		④		②		③		④		②		③		④	
部位	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面
1年後	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2年後	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3年後	1	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4年後	2	0	3	3	3	3	3	2	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3
5年後	2	1	3	3	3	3	3	1	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3
6年後	2	1	3	3	3	3	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3
7年後	1	0	3	3	3	3	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3
8年後	1	1	2	2	3	3	3	0	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3

注) 評点は鋼橋塗膜調査マニュアル(社)日本鋼構造協会編, (1993)に従った。

白亜化評価点 3:ほとんど変化なし, 2:僅かに白っぽい, 1:かなり白っぽい, 0:ほとんど真っ白である

②変性エポキシ+ポリウレタン樹脂塗料(中, 上塗)

④プライマー+寒冷地用塗料+ふっ素樹脂塗料

の3種類の塗装系を試験塗装したが, ①塗装系以外は, まったく塗膜異常が認められず, 良好な塗膜状態を維持していた。①塗装系は, 暴露4年後にウェブ内面の下部に僅かに点さびが発生し, 徐々に進行した。また, 暴露6年後にはウェブ外面にも点さびが認められるようになった。

小椴子橋では, 以下の3種類の塗装系を適用した。

②変性エポキシ+ポリウレタン樹脂塗料(中, 上塗)

③有機ゾル+変性エポキシ+2+ポリウレタン(中上塗)

④プライマー+寒冷地用塗料+ふっ素樹脂塗料

小椴子橋は, 海岸の波打ち際から20m程度の所に架設されているため, 海塩粒子の影響を著しく受ける。このため, 苫前橋, 札的内橋に比べ腐食環境が厳しく, 外観的な変化が判然と認められた。②, ③塗装系は, 塗り分け線部分で薄膜となった部分

に1年後に点さびが発生し, その後さびは徐々に進行して, フランジ面にも認められるようになった。本橋梁は, 試験塗装を行った3橋の中で最も厳しい腐食環境にあることは, 後述する塗膜付着物の分析結果でも明らかであり, 試験当初より最も早期に塗膜異常が生じるものと予想されたが, これが実証された。

札的内橋では小椴子橋と同じ3種類の塗装系を試験塗装したが, 暴露8年経過後も, 塗膜異常はまったく認められず, 良好な塗膜状態を維持している。これは, 苫前橋と小椴子橋が日本海に面して架設されているのに対して, 札的内橋は内陸に架設されていることおよび気象環境的にも比較的穏やかであることによると考えられる。

b) 光沢および白亜化

光沢値の経年変化を表-8に, 白亜化の変化を表-9に示す。

表-10 実橋塗膜の引張り試験測定結果

橋梁名	舌前橋						小椴子橋						札の内橋					
	①		②		④		②		③		④		②		③		④	
塗装系	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面	内面	外面
1年後	5.0	7.0	4.0	5.0	5.5	4.5	5.0	7.0	6.0	7.5	4.0	4.0	7.0	8.0	4.5	5.5	5.0	5.0
2年後	6.0	5.5	6.5	4.0	5.0	4.0	7.0	5.0	6.5	5.0	6.0	4.5	5.0	3.5	5.5	4.0	5.0	4.0
3年後	6.0	7.0	7.5	4.5	4.5	5.0	7.0	5.0	5.0	6.5	4.0	4.0	5.0	6.0	4.0	4.0	4.0	4.0
4年後	6.0	7.0	7.0	5.8	4.0	5.0	8.5	5.5	9.0	8.5	3.5	5.0	3.0	5.0	4.0	3.5	4.0	4.5
5年後	3.0	3.0	3.5	5.5	3.5	3.5	5.5	6.0	5.0	7.0	5.0	4.0	5.0	3.5	4.5	4.5	3.0	3.5
6年後	3.3	6.0	8.0	6.5	5.0	3.5	6.5	5.0	8.5	8.0	5.0	7.5	9.0	5.0	3.5	3.5	3.0	3.0
7年後	4.0	6.0	5.0	6.0	3.0	5.0	6.0	5.0	6.5	6.0	3.5	4.0	7.0	5.0	5.0	6.0	3.5	4.0
8年後	5.0	3.0	6.5	7.0	6.0	6.0	7.0	10.0	9.5	9.0	5.5	4.0	3.0	4.0	5.0	5.0	3.0	3.0

注)表中の数値の単位はN/mm<sup>2</sup>

舌前橋においては、フタル酸樹脂塗料は、暴露1年で光沢値が著しく低下し、白亜化が生じており、この塗料は耐候性に難点のあることが、本試験でも明らかになった。ポリウレタンおよびふっ素樹脂塗料は暴露8年経過後も56および62以上の光沢値が得られ、塗膜にはまだ艶があった。ポリウレタンはウェブ外面でやや白亜化が認められたものの、ふっ素樹脂塗料はまったく白亜化を生じておらず、耐候性に優れた塗料であることが本試験でも確認された。

小椴子橋においては、②、③塗装系(ポリウレタン)は、点さび部からのさび汚れ、ならびに砂ほこり、白亜化などにより、かなり光沢値が低下している。しかし、ふっ素樹脂塗料は8年経過後も59以上の光沢値を示し、耐候性に優れた塗料であることが実証された。

札の内橋においては②、③、④塗装系いずれも白亜化が生じておらず、光沢値も62以上の値が得られ、良好な塗膜状態を維持しているものと評価できる。

これらの結果から、塗膜の光沢や白亜化は環境条件に大きく影響されることが明らかとなった。

#### c) 塗膜の付着性

試験橋梁3橋の引張り試験の経年変化を表-10に示す。いずれも3N/mm<sup>2</sup>以上の値が得られており、良好な付着状態にあると評価できる。なお、基盤目試験は、3橋ともすべてRN.3という良好な結果であった。

#### d) 塗膜インピーダンス

小椴子橋に試験塗装した3塗装系の塗膜インピーダンスの周波数特性を図-9に示す。塗装系の種類により塗膜インピーダンス、すなわち防食性能に差のあることがわかる。また、図-10に、腐食環

- 変性エポ+ポリウレタン(暴露直後)
- 変性エポ+ポリウレタン(暴露8年後)
- OZP+変性エポ+ポリウレタン(暴露直後)
- OZP+変性エポ+ポリウレタン(暴露8年後)
- ▲ 寒地塗料C+ふっ素(暴露直後)
- △ 寒地塗料C+ふっ素(暴露8年後)

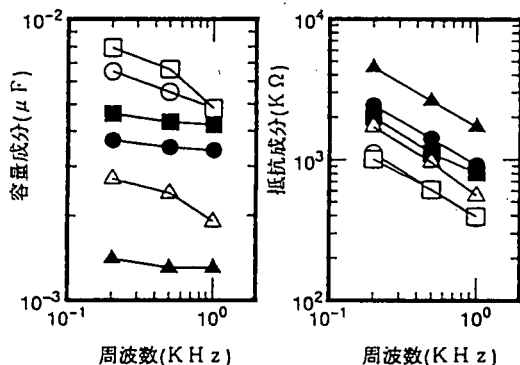


図-9 塗膜インピーダンスの周波数特性 (暴露地:小椴子橋)

- 暴露直後:小椴子橋
- 暴露8年後:小椴子橋
- 暴露直後:札の内橋
- 暴露8年後:札の内橋

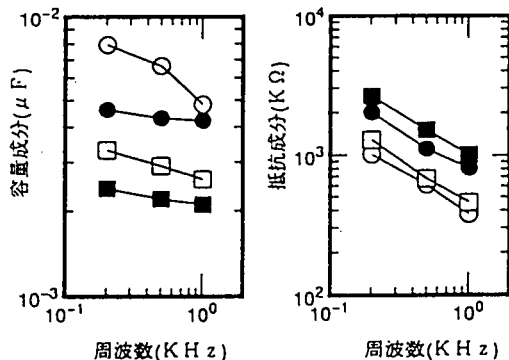


図-10 塗膜インピーダンスの周波数特性 (塗装系:OZP+変性エポ+ポリウレタン)

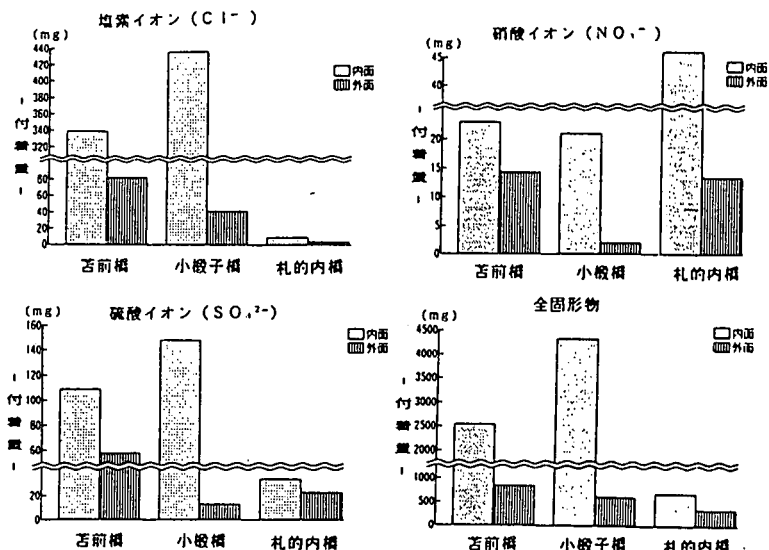


図-1-1 塗膜付着物の分析結果 (8年間に採取した総量を示す)

境の厳しい小椴子橋と腐食環境の穏やかな札の内橋に試験塗装した、有機ジンク+変性エポキシ+ポリウレタン樹脂塗装系の塗膜インピーダンスの周波数特性を示すが、腐食環境の厳しい小椴子橋は容量成分の増加が大(塗膜の吸水量が多いと考えられる)であり、塗膜劣化が進んでいることがわかる。

#### e) 塗膜付着物の分析

実橋の腐食環境を把握するため、ウェブ内外面に付着した物質をガーゼ拭き取り法で採取し、これをJIS K 0101(工業用水試験方法)により分析した。分析項目の中から、腐食促進物質といわれている塩素イオン(Cl<sup>-</sup>)、硫酸イオン(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、硝酸イオン(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)と塗膜に付着する汚れの量(全固形物)について、8年間に付着した総量を図-1-1に示す。

小椴子橋は、波打ち際約20m程度の所に架設されているため波しぶきが直接当たるような環境下にある。このため、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の付着量が、内陸に架設されている札の内橋に比べると著しく多くなっている。特に内面は、降雨などによって付着物が洗い流されることがないため付着物は濃縮され、Cl<sup>-</sup>の量は、札の内橋の実に50倍となっていた。また、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の量は4.9倍であった。

小椴子橋の特徴は、Cl<sup>-</sup>の付着が内面に多いため塗膜表面は常にべたついた状態になっている。このため、埃(主として、砂ほこり)の付着量が非常に多い。しかし、自動車の排気ガスの影響と考えられるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>が比較的少ない。

苫前橋は小椴子橋ほどCl<sup>-</sup>およびSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の付着量

は多くない。しかし、札の内橋と比べるとそれぞれ39倍および3.2倍であった。

札の内橋は、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の付着量が3橋の中で極端に少ない。また、埃の付着量も少ない。しかし、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>は3橋の中で最も多く付着していた。これは、札の内橋は他の2橋と比べ自動車の通行量が非常に多いことによると考えられる。

塗膜付着物の分析結果から、3橋の腐食環境を評価すると、小椴子橋の環境が最も厳しく、次いで苫前橋で、札の内橋は他の2橋に比べかなり穏やかな腐食環境にあると言える。このことは、塗膜の外観観察結果ならびに塗膜インピーダンスの測定結果に対応するものである。

#### 4. 結論

各種塗装系の10年間に亘る暴露試験とその分析評価から得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 一般用塗装系(フタル酸、塩化ゴム系塗料)は、厳しい寒冷地環境下では比較的早い時期に、白亜化、われ、はがれが発生し、海岸地域に暴露された場合は、われた部分より塩分が浸透し、早期にさびを発生させることから、寒冷地用防食塗装としては不適と判断される。

(2) 重防食塗装系(IZP+エポキシ+ポリウレタン又はふっ素樹脂塗料)は、暴露10年経過後も良好な防食性を維持すると共に、白亜化の発生もポリウレタン樹脂塗料で3~4年、ふっ素樹脂塗料で8~9と耐候性に優れており、寒冷地用重防食塗装系として適している。

(3) 超厚膜型塗料(氷海用, ガラスフレーク, 試作寒冷地用塗料)は、耐候性に劣るが防食性に優れているので、上塗にふっ素樹脂塗料のような耐候性に優れた塗料を適用すれば、寒冷地用重防食塗装系として期待できる。

(4) ジンクリッチペイントを下塗とした場合は、傷(クロスカット)の部分からのさびの進行は遅い。しかし、ジンクリッチペイントを適用していない塗装系は(例えばNo.10氷海用塗料)、さびの進行が早く、著しいものは塗膜がはがれることがある。

(5) 塗膜インピーダンスの経年変化を測定することにより、塗膜劣化の進行を評価することは可能である。しかし、測定時の天候に測定値が大きく左右されるので、同一条件で測定できるような工夫が必要である。

(6) 暴露10年経過したポリウレタン樹脂塗料の塗膜表面をFT-IR分析した結果、未暴露塗膜と比較して、塗膜が分解していることが明らかになった。このことから、本分析法は塗膜の耐候性評価に利用できること考えられるが、さらに多くの検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，1990年6月。
- 2) 斎藤良算，中塚勲夫：腐食環境の厳しい場所(沖縄地区)における鋼構造物試験体の暴露試験報告 鋼道路橋塗装便覧仕様による塗装系の耐久性実験，防錆管理，Vol. 41, No. 8, pp. 274-284, 1997。
- 3) 日本橋梁建設協会：腐食環境の厳しい場所(沖縄地区)における構造物試験体の塗装試験報告—新設橋梁塗装系の耐久性試験，鋼橋塗装，Vol. 25, No. 1, pp. 6-13, 1997。
- 4) 片脇清，山里将展：沖縄建設材料耐久性試験施設における塗装試験，鋼橋塗装，Vol. 23, No. 2, pp. 12-22, 1995。
- 5) 藤原博，田原芳雄：新設鋼道路橋に適用する重防食塗装系に関する研究，土木学会論文集，No. 563/I-39, pp. 23-34, 1997. 4。
- 6) 稲葉泰一，服部正司，玉田明宏：極寒冷地における鋼構造物の防食塗装，塗料・塗装研究発表会講演予稿集，Vol. 9th, pp. 51-55, 1991。
- 7) 服部正司，庄司憲生，玉田明宏，稲葉泰一，中村雄治：極寒冷地構造物の防食塗装 13年暴露試験，NKK技報，No. 135, pp. 129-134, 1991。
- 8) 北村義治，島貢，長坂秀雄，吉田真一，関雅雄，石川量大：北海道工業大学研究紀要，No. 18, pp. 33-42, 1990。
- 9) 野原他喜男，小賀俊昭，大橋猛：白鳥大橋の塗装暴露試験，北海道開発局技術研究発表会論文集，Vol. 28th, pp. 411-422, 1984。
- 10) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜調査マニュアル，JSS IV 03-1993。
- 11) 堺孝司，平井陽一，高垣孟：寒冷地用重防食塗装試験，第14回 鉄構塗装技術討論会発表予稿集，pp. 1-6, 1991。

(1998. 4. 1受付)

## DURABILITY OF ANTI-CORROSIVE COATINGS IN COLD REGIONS

Koji SAKAI, Yasuaki TAKASHIBA, Takeshi TAKAGAKI,  
Tsukasa WAKABAYASHI and Yoichi HIRAI

In order to establish anti-corrosive coating technologies in cold regions, exposure tests and actual bridge tests on performance not only of coating systems specified in steel bridge coating manuals, but also of ultra-thick film coating systems, including coatings for frozen sea and heavy-duty anti-corrosive paints developed for cold regions, were conducted. The results of 10-year exposure tests and 8-year actual bridge tests showed that a coating system in which zinc-rich paints were used as primer and epoxy+polyurethane or fluorine-contained resins were applied had excellent corrosion resistance; the ultra-thick film coating system, if top coats with excellent weather resistance were applied, is promising as a heavy-duty anti-corrosive coating system; and phthalic and chlorinated rubber paints were unsuited for cold regions because clacking and peeling occurred at early age.