

# 鋼構造物の耐候性について

## －鋼鉄道橋用塗装系の耐候性評価－

財団法人 鉄道総合技術研究所 田中 誠

### 1. はじめに

鋼構造物は、長期間の使用を前提とし、その多くには塗装による防食が施されている。古くは明治期に建設された鋼鉄道橋もあり、塗装に用いる材料は、その技術発展に伴い何回か更新されている。現在は「鋼構造物塗装設計施工指針」（以後「指針」と称す）に準じて塗装され、現行の構造物外面に用いられている塗装系の概要を表 1 に示す。外面用塗装系は、架設環境、架設方法や維持管理のし易さ等で選択できるようになっている。架設環境別では大きく 3 区分され、海岸から約 100m 以内等の鋼材腐食のはなはだしいと想定される環境に適用される特殊環境用塗装系、それ以外の鋼材腐食が軽微と想定される環境に適用される一般環境用塗装系と構造部位の特殊性を考慮した特定部位用塗装系に分けられている。

表 1 現行の外面用塗装系概要

塗装系記号	下・中塗り塗料	上塗り塗料	備考	
一般環境用	B	エッチングプライマ、鉛系さび止めペイント、長油性フタル酸樹脂塗料中塗り	長油性フタル酸樹脂塗料	安価、最も多用される塗装系、塗替周期～13年
	D	エッチングプライマ、鉛系さび止めペイント、結露面用塗料中塗り	結露面用塗料	夜間等の結露が想定される環境用
	G	エッチングプライマ、厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	一般環境長期耐久用、塗り替え困難な箇所、環境用、防食重視
特殊環境用	H	厚膜型無機ジンクリッチペイント、厚膜型エポキシ樹脂系塗料下塗り、ポリウレタン樹脂塗料用中塗り	ポリウレタン樹脂塗料	ベント・クレーン架設、ケーブルエレクション用、防食・景観重視
	J	厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチペイント、厚膜型エポキシ樹脂系塗料下塗り、ポリウレタン樹脂塗料用中塗り	ポリウレタン樹脂塗料	ベント・クレーン架設、手延架設、跳出し架設用、防食・景観重視
	K	厚膜型無機ジンクリッチペイント、エッチングプライマ、ジシクロメートさび止めペイント、フェノール樹脂系 MIO 塗料、シリコンアルキド樹脂塗料中塗り	シリコンアルキド樹脂塗料	ベント・クレーン架設、ケーブルエレクション用、施工性重視
	L	無機ジンクリッチプライマ、厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	ベント・クレーン架設、防食重視
特定	S	専用プライマ、ガラスフレーク塗料	ガラスフレーク塗料	まくら木下用
	R	専用プライマ	超厚膜型エポキシ樹脂塗料	桁端部用

鉛系さび止めペイントと長油性フタル酸樹脂塗料を用いた B 塗装系（一般環境用塗装系）は、古くから最も多く適用されており、実構造物における劣化現象に関する豊富な情報がある。しかしながら、その他の塗装系は比較的新しい材料で構成されており施工量が少ないため、実環境での劣化現象に関する情報が少ない。

本報告の前半では、約 20 年前に塗装試験された長期防錆型塗装系（現特殊環境用塗装系に相当）の追跡調査結果から耐候性に関する結果をまとめて報告する。後半では、塗膜耐候性に与えるオゾンの影響についての考察結果を報告する。生活圏である対流圏のオゾン濃度は、近年 NO<sub>x</sub> 等の排気ガス、VOC (Volatile Organic Compounds) の増加により環境基準値である 60ppb を

しばしば超えるようになってきており、将来には恒常的に環境基準値を超えることが懸念<sup>1)</sup>されている。このように、実構造物架設環境中にオゾン等の酸化性化合物や還元性化合物が存在しており、塗膜の構成成分である有機高分子化合物への化学的な影響が想定される。そこで、4種の塗膜を高濃度のオゾン雰囲気中に暴露し得られた塗膜物性変化を紫外線照射、塩水連続噴霧による促進劣化試験での物性変化と比較し、実環境条件下でオゾンが塗膜に与える影響の推定を行ったのでそれらについて報告する。

## 2. 塗装試験塗膜の追跡調査

現「指針」に採用の特殊環境用塗装系確立にあたり、室内試験、暴露試験等を通じ長期防錆の期待できる塗装系を選定した。これらの施工性等の確認を目的に、1976年と1977年に架け替えが予定されていた2橋りょう（A橋梁、Y橋梁）を用いて塗装試験を実施した。その後約15年経過時（1991年、1993年）に、約半分の試験塗装面を用いて塗り替え塗装系の塗装試験を実施した。この間に実施された追跡調査結果について以下に述べる。

### 2.1 塗装試験の概要

#### 2.1.1 新設時の塗装試験

A橋梁は、離岸距離約50m、海水面から5m程度の高さで日本海に面し、冬季に海からの季節風が強く、多量の高塩が飛来（直接海水を被ることもある）する環境に架設されている。Y橋梁はA橋梁から数km離れた位置にあり、離岸距離約100mで海水面から数十mの高さで谷あい架設されている。この付近の一般環境用B塗装系を適用した橋りょうは5年程度で塗り替えられるほどの腐食環境である。

A橋梁の塗装試験では、表2に示す8種の塗装系（現「指針」に5種が採用）を全工場塗装仕様で適用し、Y橋梁には塗装系記号14A-2と14A-3-2の中・上塗りを現場で塗装する仕様で適用した。

表2 A橋梁の塗装試験に用いた塗装系概要

塗装系記号	相当の現塗装系	下・中塗り塗料	上塗り塗料
13A	L	無機ジnkクリッチプライマ、厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料下塗、中塗	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料
14A-1	H	厚膜型無機ジnkクリッチペイント、厚膜型エポキシ樹脂系塗料、ポリウレタン樹脂塗料用中塗	ポリウレタン樹脂塗料
14A-2	J	厚膜型エポキシ樹脂ジnkクリッチペイント、厚膜型エポキシ樹脂系塗料、ポリウレタン樹脂塗料用中塗	ポリウレタン樹脂塗料
14A-3-1		亜鉛溶射、エッチングプライマ、フェノール樹脂系ジnkクロメートさび止め、フェノール樹脂系MIO塗料、塩化ゴム系塗料中塗	塩化ゴム系塗料
14A-3-2	K	厚膜型無機ジnkクリッチペイント、エッチングプライマ、フェノール樹脂系ジnkクロメートさび止め、フェノール樹脂系MIO、塩化ゴム系塗料中塗	塩化ゴム系塗料
14A-4		厚膜型無機ジnkクリッチペイント、ミストコート、厚膜型ビニル樹脂塗料下塗、厚膜型ビニル樹脂塗料中塗	ビニル樹脂塗料
14A-5		厚膜型無機ジnkクリッチペイント、ミストコート、厚膜型塩化ゴム系塗料下塗、塩化ゴム系塗料中塗	塩化ゴム系塗料
14A-6	B	金属前処理塗料、鉛丹さび止め、長油性フタル酸樹脂塗料中塗	長油性フタル酸樹脂塗料

#### 2.1.2 塗り替え塗装試験

塗り替え塗装試験は、1991年にA橋梁で1993年にY橋梁で実施した。現時点で塗り替え塗膜の防食性を比較検討できる段階に至っていないため、本報告では上塗り塗膜の耐候性を中心に

述べる。このため塗装系の詳細は割愛するが、A橋梁、Y橋梁には上塗り塗料としてポリウレタン樹脂塗料、フッ素樹脂塗料、シリコンアルキド樹脂塗料、厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料を用いている。

## 2.2 塗膜の追跡調査結果

新設時の塗膜に関しては外観調査を中心に、塗り替え塗膜は上塗り塗膜の表面特性である 60 度鏡面光沢度と色変化の測定結果について述べる。

### 2.2.1 新設塗膜の追跡調査結果

追跡調査結果を上塗塗料の特性である白亜化、変色等の外観上の変化と塗装系としての性能である防食性の変化について分けて以下に示す。

#### (1) 塗膜外観の変化

上塗塗料は、ポリウレタン樹脂塗料 (2 社)、長油性フタル酸樹脂塗料 (1 社)、厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 (1 社)、塩化ゴム系塗料 (3 社)、ビニル樹脂塗料 (1 社) の 5 塗料種で、色は「指針」に示す施・灰色 2 号 (マンセル N-5.0) を用いている。外観評価は白亜化程度の変化と外観色の変化について実施した。

白亜化の評価は、外観観察と塗膜表面拭い取りで程度を 4 段階 (無し、小、中、大) に分けて評価した。しかし、10 年経過時に白亜化大と評価された材料において、程度に違いが認められるようになったため、評価を 5 段階 (無し、小、中、大、中塗り露出) に変更した。このため、一部材料の評価結果が改善されることとなった (図 1 の矢印)。

外観色の評価は、約 50m ほど離れた位置からの外観観察により、色変化の程度を 5 段階 (無し、やや変色、変色、特に変色、著しく変色) に分けた官能評価とした。このため外観色の評価は、白亜化や表面付着の汚れを含む評価となっている。

図 1 に示すように、白亜化程度の変化は、材料種のみならず塩化ゴム系塗料では製造会社間の差も大きい。厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料、ビニル樹脂塗料および一部の塩化ゴム系塗料 (1 社) は、数年で明らかな白亜化が観察された。特に厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料は、12 年程度経過した段階で中塗り塗膜が透けて見えるほどの塗膜消耗に至った。ポリウレタン樹脂塗料、長油性フタル酸樹脂塗料および一部の塩化ゴム系塗料 (2 社) は、白亜化が徐々に起こり、明らかな白亜化が認められるまで 5~8 年要した。厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料以外の塗料については、約 10 年経過後以後に著しい変化が観察されず、現時点 (20 年以上経過) でも同様の様子を維持している。

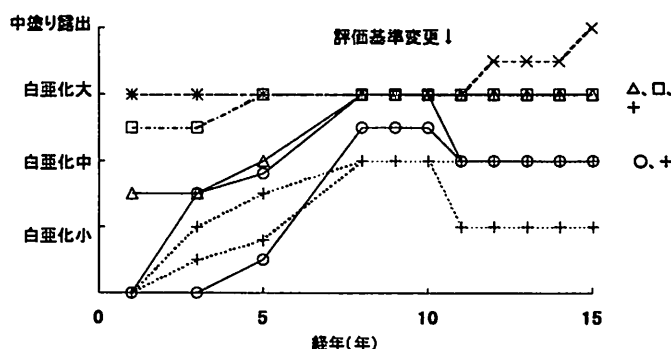


図1 白亜化に関する評価結果

○:ポリウレタン樹脂塗料 △:長油性フタル酸樹脂塗料  
×:厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 +:塩化ゴム系塗料  
□:ビニル樹脂塗料

外観色の調査結果を図 2 に示す。塗料色灰色 2 号に用いられる顔料の多くは化学変化を受け難いものが多く、色の変化は主に樹脂の白亜化と表面の付着汚れによると考えられる。外観色の変化は数年で現れ始め、約 10 年ほどで一定となった。ポリウレタン樹脂塗料の評価が 9 年目に下がったのは、白亜化が進み表面に付着した汚れが雨洗などで除去されやすくなったためと考えられ

る。厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料も同様に評価が下がっているが、これは白亜化が全面均一に生じ、汚れや色むらが少なく、遠景からは変化が少ないと認識されるような状態に至ったためと考えられる。ビニル樹脂塗料は不均一な白亜化により灰色の濃淡がまだらに現れ著しい変色と評価され、長油性フタル酸樹脂塗料は塗膜表面のさび面積の増加により著しい変色と評価されるようになった。

(2) 塗膜防食性（腐食面積）の変化

構造部位で最も腐食が激しいのは、部材接合部の境界部であった。これは、当時の塗装設計が接合部を無塗装仕様としたためであったこと、汚れ等が堆積しやすいなど塗装仕様と構造上の問題が大きく影響していると考えられる。次いで腐食が大きい部位は、桁端部、シュー周り、スティフナー端とフランジ等の接触箇所等の汚れが溜まりやすい箇所や部材エッジで塗膜厚みが不足しやすい箇所、ボルト頭等であった。

A 橋梁の平面部の防食性能に関わる変化をまとめ表 3 に示す。A 橋梁は、冬季に海方向からの風速 20m/s を超える風があり、海岸からの飛来物による塗膜傷が発生する環境にある。従って、表中のさび発生開始時期は、飛来物による外因性の塗膜傷が原因となったさび以外のさびが観察された時とした。

一般にいわれるように、フランジ下面

が腹板より早期に腐食することがこの試験でも確認された。この原因として、飛来塩分の蓄積程度（雨洗効果の有無）や濡れ時間の違いが想定される。

鉛系さび止めペイントと長油性フタル酸樹脂塗料を用いた塗装系 14A-6（現塗装系 B で一般環境に最も多く適用されている）は全工場塗装であっても架設後 3 年でさびが発生し、5~8 年で塗り替えるべき状態まで進行した。塗装系 14A-3-1 と 14A-5 は、比較的早い時期にフランジ下面にさびが発生し、さびの数とさび面積が年々増加した。これは、15~20 年で塗膜そのものの

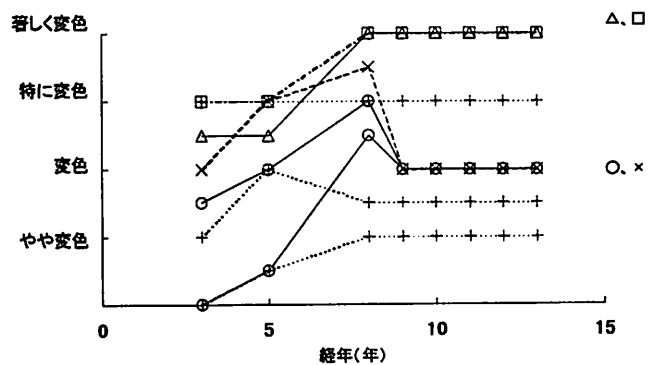


図 2 外観色の経年変化

O: ポリウレタン樹脂塗料 Δ: 長油性フタル酸樹脂塗料  
×: 厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 +: 塩化ゴム系塗料  
□: ビニル樹脂塗料

表 3 塗膜（平面部）の経年変化（腐食傾向）

部位・塗装系		さび発生開始時期	20 年後の腐食面積	変化の様子
フランジ下面	13A	8 年	0.03% 以下	さび箇所数、面積の増加率小
	14A-1	5 年	数% 程度	初期に発生したさび箇所の面積増大
	14A-2	10 年	0.03% 程度	さび箇所数、面積の増加率小
	14A-3-1	3 年	30% 以上*	白さび数と面積増大(15 年目に塗替)
	14A-3-2		0.03% 以下	傷さび散見程度
	14A-4	5 年	0.3% 程度	さびが局部的集中発生
	14A-5	5 年	数% 程度	さび箇所数、面積の増加率中
腹板	14A-6	3 年	80% 程度	さび箇所数と面積増大
	13A		0.03% 以下	傷さび散見程度
	14A-1	10 年	0.03% 程度	さび箇所数、面積の増加率小
	14A-2		0.03% 以下	傷さび散見程度
	14A-3-1	12 年	数% 程度*	白さび数と面積増大(15 年目に塗替)
	14A-3-2		0.03% 以下	傷さび散見程度
	14A-4	8 年	0.03% 以下	さび箇所数増無し、面積の増加率中
14A-5		0.03% 以下	傷さび散見程度	
14A-6	3 年	20% 程度	さび箇所数と面積増大	

注 1 さび発生開始時期は、傷さび以外のさびが明らかに観察された時期を示す。

注 2 \*: 14A-3-1 は 15 年目に塗り替えたため腐食状況は 15 年後の結果を示す。

防食能が喪失したことを示す。塗装系 14A-1 (現塗装系 H) と 14A-4 は、比較的初期にさびが発生しその箇所面積が増加しているが、その後新たなさび箇所の増加は少ない。これは、目視での確認が困難な何らかの塗膜欠陥を内在していたため、その箇所の腐食が初期に発生し進行したが、他の多く箇所の塗膜は 20 年経過後も十分な防食能を有していた。他の塗装系では、20 年経過後もこれといった経年での腐食増加が観察されていない。特に塗装系 13A (現塗装系 L) は、上塗塗膜が消失するほど白亜化が進行しているが腐食の進行に至っていない。

### 2. 2. 2 塗り替え塗膜の追跡調査結果

Y 橋梁のポリウレタン樹脂塗膜、フッ素樹脂塗膜及びシリコンアルキド樹脂塗膜 (何れも灰色 2 号) について、60 度鏡面光沢度計と色彩計による測定を表面処理せずにあるがままの状態を実施した。6 年経過後にあるがままの測定に加え塗膜表面付着の汚れや粉化物を乾燥ウェスで拭き取り光沢度と色の回復程度の評価を行った。A 橋梁では、ポリウレタン樹脂塗膜とフッ素樹脂塗膜について、8 年経過時に 60 度鏡面光沢度計と色彩計による測定をあるがままと乾燥ウェス拭き後に行った。測定部位は、Y 橋梁では図 3 に示す腹板の 3 箇所、A 橋梁は海側の 2 箇所である。

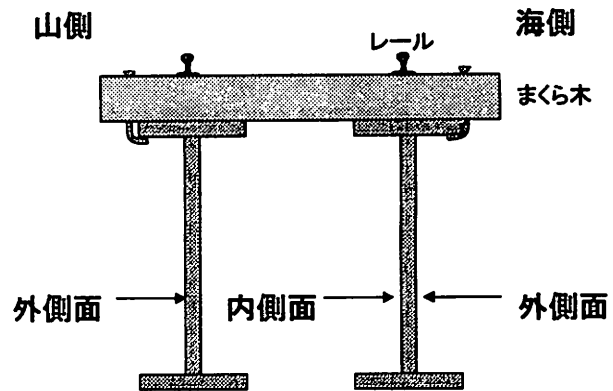


図 3 光沢、色の測定箇所

図 4、5 に示すように、フッ素樹脂塗膜は、部位により変化傾向が異なり、海側の外側面は 3 年経過時から光沢度の低下と  $L^*a^*b^*$  表色系での  $L^*$  値の増加が始まっている。海側の内側面と山側の外側面では 5 年経過時から変化が現れ始めている。乾燥ウェス拭き取り後の測定で、海側の外側面は初期の値まで回復しなかった。海側の外側面では、乾燥ウェスで除去できない  $L^*$  値を増す表面変化 (表面の荒れ、固着した白色の汚れ等が推測される) が生じていることを示す結果が得られた。

ポリウレタン樹脂塗膜は、図 6、7 に示すように、光沢度の初期値のばらつきが大きく明確で

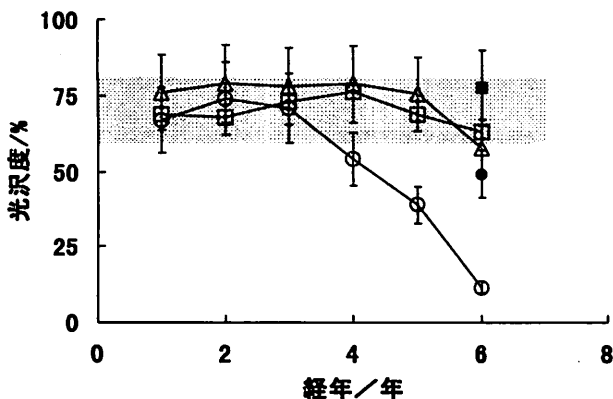


図 4 フッ素樹脂塗膜の光沢度経年変化

○: 外側面(海側)、△: 外側面(山側)、□: 内側面  
黒塗りの印は、乾燥ウェス拭き後の測定値

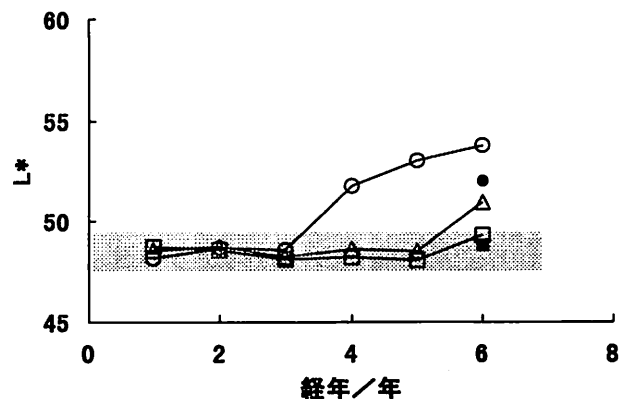


図 5 フッ素樹脂塗膜の  $L^*$  値の経年変化

○: 外側面(海側)、△: 外側面(山側)、□: 内側面  
黒塗りの印は、乾燥ウェス拭き後の測定値

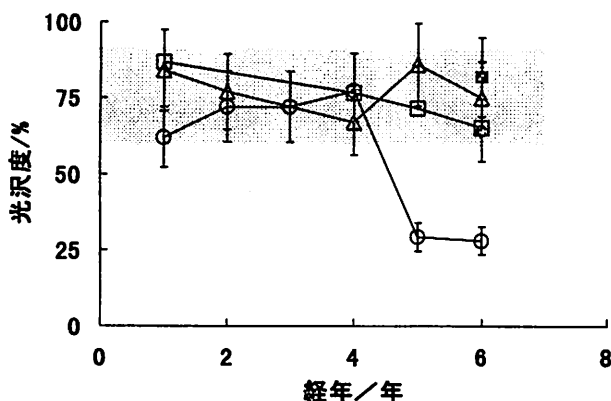


図6 ポリウレタン樹脂塗膜の光沢度経年変化

○:外側面(海)、△:外側面(山)、□:内側面  
黒塗りの印は、乾燥ウェス拭き後の測定値

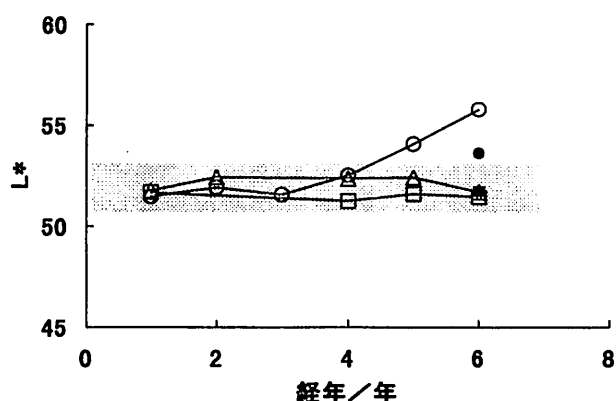


図7 ポリウレタン樹脂塗膜のL\*値の経年変化

○:外側面(海)、△:外側面(山)、□:内側面  
黒塗りの印は、乾燥ウェス拭き後の測定値

ないが、4年経過後から海側の外側面で低下している。L\*値は海側の外側面でわずかに増加した。乾燥ウェス拭き取り後は、海側の外側面の回復程度が低い結果となった。

シリコンアルキド樹脂塗膜の6年間の変化は、ポリウレタン樹脂塗膜と同程度であった。

A橋梁で8年経過した上塗り塗膜の測定結果を表4に示す。ポリウレタン樹脂塗膜、フッ素樹脂塗膜とも海側の外側面が著しく変化している。

A橋梁とY橋梁の配置を模式的に図8に示す。図から明らかなように、A橋梁は、方位的に海側と山側で日照量に大きな差がないと考えられる。一方、Y橋梁の日照は山側のみとなる。

測定結果は、A橋梁、Y橋梁とも海側の外側面が変化しているが、日照条件を考えると、海側の外側面の光沢度や色の変化は紫外線以外の要因に大きく影響されていることが推察される。

そこで、この地区の風に注目し、過去2年間の気象データから日平均の風速とその日の最多風向(16方位)を橋梁の海方向からの風(5方位)、橋梁の山方向からの風(5方位)と橋梁に並行する風(6方位)に分割してそれぞれの頻度を求めた。図9に示すように、A橋梁、Y橋梁ともに海方向からの風の頻度が山方向からの風より高いことが分かる。Y橋梁はA橋梁に比較して海方向からの風と山方向からの風の差が少ないが、地形条件を考慮すると山方向からの風や橋梁に並行する風が遮られると考えられ、調査した橋梁はともに海方向からの風の影響が大であるといえる。

橋梁付近の海岸線は、直径数cm以上の砂利や岩礁で構成されており、砂浜で観察されるような風による砂塵が生じない環境である。

以上より、塗膜表面の光沢や色変化に与える影響として、紫外線以外に大気中の化学成分との

表4 8年経過塗膜(A橋梁)の光沢及びL\*測定結果

測定部位	塗膜	ウェス拭き前		ウェス拭き後	
		光沢度	L*	光沢度	L*
外側面(海)	ポリウレタン樹脂	2.9	54	27	51
	フッ素樹脂	1.9	56	28	54
内側面(海)	ポリウレタン樹脂	33	51	48	50
	フッ素樹脂	39	53	69	52

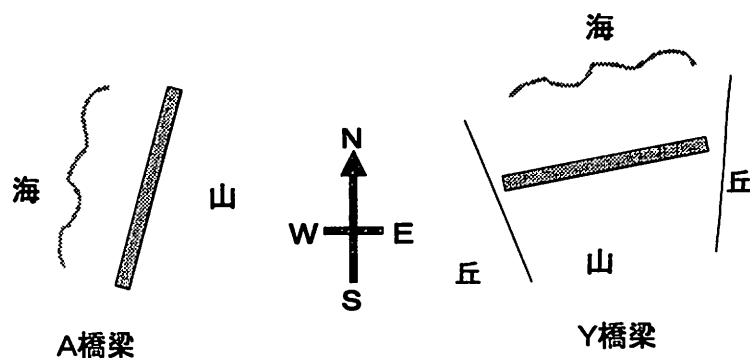


図8 橋梁の位置関係

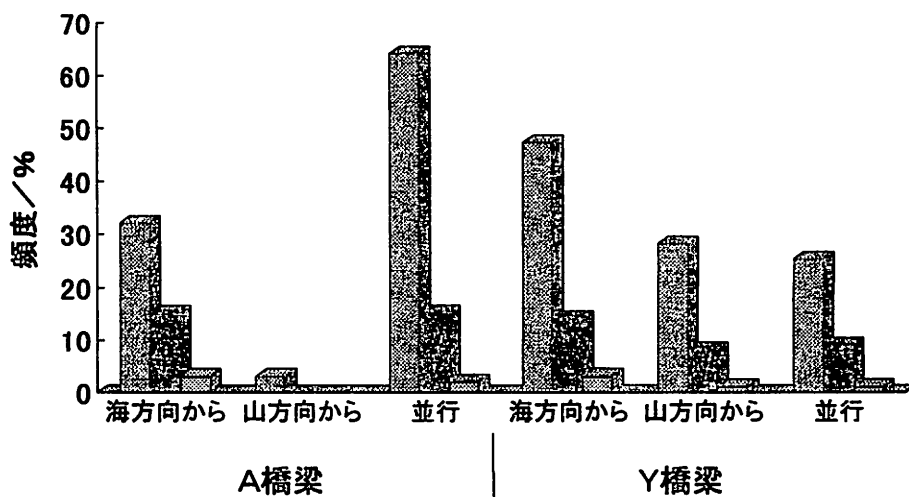


図9 橋梁に吹く風の方向別頻度分析結果

□: 全ての風、▨: 日平均風速 4m/s 以上、▩: 日平均風速 6m/s 以上

反応（反応量は風で運ばれ塗膜表面に到達する物質質量に比例）や海塩粒子による摩耗・損傷（飛来中に乾燥固化した微結晶による）が推測される。

### 3. 塗膜耐候性に与えるオゾンの影響に関する考察

既に述べたように、環境中のオゾン濃度が年々増加傾向にある。オゾンが塗膜に与える影響について、これまでほとんど評価されていなかった。実環境に存在するオゾンが塗膜の耐候性に与える影響の推定を性質の異なる塗料の促進試験結果との比較で検討した。

#### 3.1 試験方法

塗装試験片は、市販のフッ素樹脂塗料、ポリウレタン樹脂塗料、エポキシ樹脂系塗料、フタル酸樹脂塗料（何れも灰色）を鋼板にエアースプレーで約  $40\mu\text{m}$  に一回で塗装したものをを用いた。塗装後、1ヶ月以上室内放置で乾燥させた試験片を、以下に示す条件で劣化させた。

##### (1) 紫外線連続照射

キセノンランプを用い、試験面放射照度  $160\text{W}/\text{m}^2$ 、ブラックパネル温度  $63^\circ\text{C}$ 、相対湿度 50%での連続照射とした。

##### (2) オゾン雰囲気暴露

オゾン発生装置から1時間当たり  $0.5\text{g}$  のオゾンと外気  $0.3\text{ m}^3/\text{h}$  を容積  $0.44\text{m}^3$  の  $35^\circ\text{C}$  に保たれた試験槽内に導入した。なお、試験片表面を濡れた状態に維持するため、0.01% NaCl 水を噴霧した。

##### (3) 0.01%塩水連続噴霧

オゾン雰囲気暴露での試験片表面の濡れの寄与を評価するため、噴霧条件は JIS K 5400 耐塩水噴霧性試験 ( $35^\circ\text{C}$ ) に準拠し、噴霧液を 0.01% の NaCl 水溶液とした。

塗膜の評価は、塗膜表面性状を 60 度鏡面光沢度測定で、塗膜内部性状を交流インピーダンス測定による吸水量比較<sup>2)</sup>で行った。さらに、塗膜表面からナイフを用いて採取した塗膜片の赤外線吸収スペクトル測定を行った。

#### 3.2 試験結果

##### 3.2.1 60度鏡面光沢度測定結果

初期の光沢度に対する比率から光沢度保持率(%)を求めた。図 10 に紫外線連続照射による変

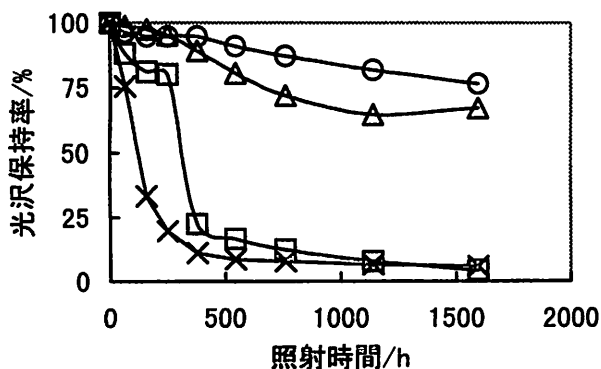


図 10 光沢保持率に与える紫外線照射の影響  
 ○:フッ素樹脂塗膜、△:ポリウレタン樹脂塗膜  
 ×:エポキシ樹脂系塗膜、□:フタル酸樹脂塗膜

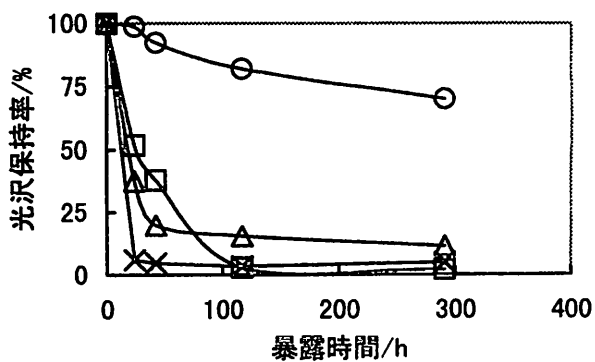


図 11 光沢保持率に与えるオゾン雰囲気暴露の影響  
 ○:フッ素樹脂塗膜、△:ポリウレタン樹脂塗膜  
 ×:エポキシ樹脂系塗膜、□:フタル酸樹脂塗膜

化を、図 11 にオゾン雰囲気暴露による変化を示す。オゾン接触で塗膜表面は紫外線照射と同様に表面の光反射性能が低下していた。特に、ポリウレタン樹脂塗膜のオゾン雰囲気での変化が大きく、ポリウレタン樹脂塗膜表面のあらさがオゾン雰囲気ですぐに増加しているものと考えられる。塩水噴霧では、フタル酸樹脂塗膜のみが数十時間経過後から低下したが他の塗膜は 1000 時間経過後も変化がなかった。フタル酸樹脂塗膜は、早期に目視で確認できるふくれ発生があり、このための保持率が低下したと考えられる

### 3. 2. 2 交流インピーダンス測定による塗膜吸水量(容量法)の測定

交流インピーダンス測定で得られる塗膜等価容量変化から計算される塗膜の吸水量(容量法)の変化は、塗膜内部の吸水し易さの変化を評価できることを示した<sup>2)</sup>。オゾン雰囲気暴露、紫外線照射と塩水噴霧後の試験片を用い、電解液接触後の吸水量(容量法)の経時変化を求めた(図 12、13)。変化は、4 種の塗膜とも、概ねオゾン雰囲気暴露>塩水噴霧>未劣化 $\geq$ 紫外線照射の順であった。

オゾン雰囲気暴露は、塩水噴霧単独より大きく変化しており、明らかにオゾンの影響が認められる。この結果から、オゾンと水により塗膜内部が吸水し易い構造に変化(樹脂の分解や樹脂・

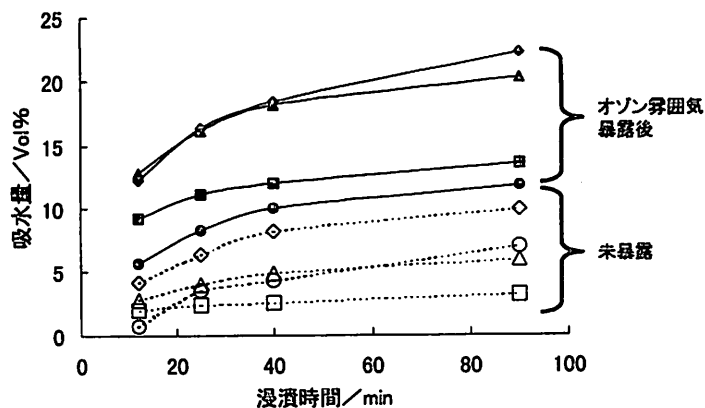


図 12 オゾン雰囲気暴露試験片の吸水量(容量法)経時変化  
 オゾン雰囲気暴露時間: 257 時間  
 ●:フッ素樹脂塗膜、▲:ポリウレタン樹脂塗膜、  
 ⊗:エポキシ樹脂系塗膜、◆:フタル酸樹脂塗膜

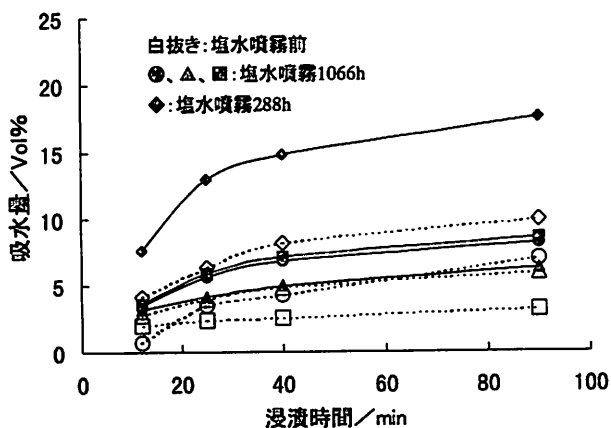


図 13 塩水噴霧試験片の吸水量(容量法)経時変化  
 ●:フッ素樹脂塗膜、▲:ポリウレタン樹脂塗膜、  
 ⊗:エポキシ樹脂系塗膜、◆:フタル酸樹脂塗膜



顔料界面の付着低下等が想定される) している可能性が見出された。

### 3. 2. 3 赤外線吸収スペクトル測定結果

図 14 にポリウレタン樹脂塗膜の赤外線吸収スペクトル測定例を示す。塩水連続噴霧試験片は、未劣化と同等のスペクトルを示したが、紫外線照射、オゾン雰囲気暴露でウレタン結合を示すピークが減少している。他の 3 種の塗膜も、紫外線照射とオゾン雰囲気暴露で明らかなスペクトル変化が認められた。反応機構の詳細な検討を実施していないが、少なくとも紫外線による高分子鎖の開裂と同様に、オゾンの酸化力による高分子鎖の酸化分解が生じていると考えられる。

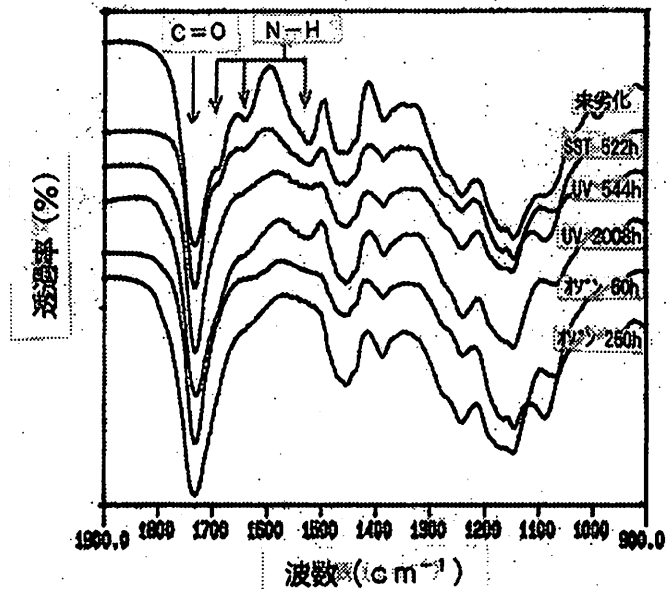


図 14 ポリウレタン樹脂塗膜表面の赤外線吸収スペクトル図  
SST: 塩水噴霧、UV: 紫外線照射、オゾン: オゾン雰囲気暴露

### 3. 3 大気中オゾンの塗膜に与える影響度推定

今回の試験は、高濃度のオゾン雰囲気下で行った。実環境において、大気中のオゾンが塗膜性状変化に与える影響度を推定するため以下の仮定で考察した。

[仮定]

- ・ 今回の試験で用いたオゾン濃度は、オゾン発生量から 800ppm (オゾンの寿命、消費量は考慮していない) と仮定する。
- ・ オゾンは塗膜との接触後直ちに反応に関与すると仮定すると、塗膜への影響は塗膜表面に接触するオゾン量に比例すると考えられる。オゾンを含む空気の流れを以下のように仮定し計算すると、今回の試験条件の影響度は大気環境の約 330 倍となる。

大気環境: 地表の平均風速を約 2m/sec、オゾン濃度 60ppb

試験槽内: 試験片周りの空気流速 5cm/sec (目視観察 5cm/sec 以下)、オゾン濃度 800ppm

単位面積当りのオゾン接触量比 =  $(800\text{ppm} \times 5\text{cm}) \div (0.06\text{ppm} \times 200\text{cm}) = 333$

- ・ 紫外線照射試験に用いたキセノンランプの紫外域照射照度は  $160\text{W}/\text{m}^2$  であり、紫外線量は実環境の平均値 (年間紫外線照射量約  $200\text{MJ}/\text{m}^2$ )<sup>9)</sup> の 25 倍となる。一方、一般に JIS 規定の促進耐候試験と実際の暴露との比較から紫外線照射 500~1000 時間 (暴露地や塗料種で異なる) が 1 年に相当するといわれており、促進倍率は 9 倍~18 倍となる。ここでは、今回の試験条件を実環境の 10 倍と仮定する。
- ・ JIS 規格の塩水噴霧試験は、実暴露との相関が低く問題の多い試験とされているが、一般に海岸暴露の 10 倍、内陸部の 40~50 倍の促進倍率といわれている。噴霧液組成の違いがあるが、ここでは促進倍率を 20 倍と仮定する。
- ・ 実施した促進試験では、塗膜表面の光沢保持率と赤外線吸収スペクトル変化に関してオゾン雰囲気暴露が紫外線照射試験より 10 倍以上早い結果が得られている。塗膜内部の吸水量 (容量法) 変化は、早期にふくれが発生したフタル酸樹脂塗膜は塩水噴霧試験単独よりオゾン雰囲気

気暴露がわずかに早く変化し、他の塗膜では塩水噴霧試験より 5 倍以上早く変化した。

ここでは、紫外線照射試験に対するオゾン雰囲気暴露の影響の大きさを 10 倍、塩水噴霧試験に対しては 5 倍と仮定する。

塩水噴霧試験は低濃度の塩を用いているので、この試験は水の塗膜に与える影響の試験と考えることができる。以上より、実環境のオゾン、紫外線、水の塗膜に与える影響の割合は

$$\text{オゾン：紫外線} = 10/330 : 1/10 = 0.3 : 1$$

$$\text{オゾン：水} = 5/330 : 1/20 = 0.3 : 1$$

となり、塗膜の性状変化に与えるオゾンの影響が紫外線や水に比較して無視できないと考えることができる。

#### 4. まとめ

塗料の耐候性は、自然環境条件（日光、風雨、乾湿、寒暖など）に抗して耐える性質である。この性質を塗膜外観の変化と鋼索地の保護の観点から、特殊環境用塗装系に採用されている各種塗料、塗装系の実構造物における追跡調査結果をまとめた。

鋼索地の保護については、試験した塗装系は大きく 2 種に分けられる。長油性フタル酸樹脂塗料や比較的環境遮断性に劣ると想定される塗料を用いた塗装系では、当該環境で 15 年程度以内に経年とともに腐食箇所数や面積が増加し、塗膜全体の防食能が失われた。一方、現行の特殊環境用塗装系に採用されているような環境遮断性に優れるエポキシ樹脂系塗料等を用いた塗装系では、初期塗膜欠陥部を除き 20 年以上の防食能が期待できると考えられる。

塗膜外観の変化は、光沢の維持、建設当初の色の維持を景観の大きな要素と考えた場合には、フッ素樹脂塗料を含め試験した塗料は全て 5 年程度以下の耐久性しか得られない結果となった。しかし、鉄道の鋼構造物の場合、職員以外に構造物に近接できず、構造物の景観は比較的距離を置いた位置からの評価が主であり光沢や建設当時の色の維持より汚れや変退色による不均一な外観とならないようにすることが重要と考えるならば、白亜化進行による中塗露出、不均一な白亜化による色むら、腐食や外来汚れ付着等による汚れ感の増加が生じない塗膜では約 10 年経過後の変化が少なく 20 年以上にわたり外観上に大きな問題を起こさないと考えられる。

さらに、塗膜の耐候性に影響する環境因子として、紫外線、水については広く知られているが、今回の調査結果から塗膜外観変化に紫外線、水以外の要因が大きく影響していることが分かり、オゾンの塗膜に与える影響の推定を行い、実環境のオゾンが塗膜に実用上無視できない影響を与えていることなども分かった。

鉄道事業者にとってトータルコスト低減の観点から塗膜寿命の更なる延伸が望まれる。社会からは、生活環境の質向上に対する要請の高まりから景観問題が浮上し、建築や道路を中心に種々の試みがなされている。このような、性能向上への要求に答えられる材料開発を遅滞なく進めるために、適切な促進試験法の確立が望まれている。このためにも、実環境で生じている塗膜劣化に与える環境因子について再度詳細に検討する必要があると考える。

#### 参考文献

- 1) 出雲 正矩: 月刊地球環境、11 月号、1998 年
- 2) 田中、町田: “交流インピーダンス測定による塗膜吸水性変化の評価”、第 46 回材料と環境討論会 予稿集、D-209、1999 年
- 3) 富板崇ら: 日本建築学会構造系論文報告集、第 381 号、昭和 62 年 11 月