

鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究

藤原博¹・田原芳雄²

¹ 正会員 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 (〒194 東京都町田市忠生1丁目4番1)

² 財団法人日本塗料検査協会 東支部 (〒251 神奈川県藤沢市宮前428)

本研究は、鋼橋塗装の長期防食性の把握を目的として、10年間程度の屋外暴露試験に相当する塗膜劣化を、短期の促進腐食試験で置き換えられるような試験条件を見いだすために、既存の促進腐食試験6条件に、新たに1条件を加えた計7条件について比較検討したものである。そのために、1988年から腐食環境の異なる3地区(4箇所)において塗装試験板による屋外暴露試験を行うとともに、既に自動車業界などで採用されている促進腐食試験に着目し、試験条件である塩水噴霧・湿潤・乾燥それぞれの温度及び時間について比較試験を行った。その結果、屋外暴露試験結果と相関性の高い促進腐食試験条件を見いだすことができ、この試験条件で6か月間の試験を行うことによって4～15年の屋外暴露結果の推定が可能となった。

Key Words : steel bridge, actual exposure test, accelerated corrosion test, cyclic corrosion test, salt-spray test, humidity test, correlation, heavy duty anti-corrosive paint

1. まえがき

鋼橋用塗料の開発は日進月歩であり、長期防食性に優れたジンクリッチペイントを下塗りに、上塗りに耐候性の良いウレタン樹脂塗料やふっ素樹脂塗料などを用いた重防食塗装系が開発されてきた。

従来、事前に、その塗装系の長期防食性を確認して塗装されることは極めて少なく、塗料の持つ性質や組み合わせによって長期的な防食性を推定し、塗装系や塗装仕様が決定されている現状である。

塗装の長期防食性を推定する方法として、従来より一般的に用いられているものに塩水噴霧試験がある。

塩水噴霧試験は、1928年にDr.Cappによって紹介されて以来、ASTM、ISO、JISの各規格に採用され、長い間、金属表面処理皮膜の腐食試験方法として広く使用されてきた。ただ、初期の段階では、塩水噴霧試験方法はあくまでも品質管理のみに使用され、屋外暴露試験結果とは無関係とされていたが、他に適当な試験方法がなかったことから促進腐食試験方法として一部で使用されてきた。しかし、近年、塩水噴霧試験を促進腐食試験方法として使用することへの疑問が国内外の文献¹⁾で発表され、新しい促進腐食試験方法の確立が望まれていた。

自動車業界では、連続法の塩水噴霧試験に代わって塩水噴霧、湿潤・乾燥それぞれの条件を変えて行

われる複合腐食試験方法が研究され、既に自動車工業界統一規格(JASO)²⁾として取り入れられている。

一方、橋梁などのような大型の鋼構造物を対象とした塗膜の促進腐食試験方法は未だ確立されておらず、1980年頃に建設省土木研究所で検討された促進腐食試験条件(DS)³⁾や、20日間の促進腐食試験で海岸地区の6か月の暴露に相当する試験法を検討した例⁴⁾などがあるものの、腐食環境や塗装仕様などが限定されていたり、塗装系によっては屋外暴露との相関性に問題があった。

また、最近のように重防食塗装仕様となりつつある鋼橋塗装の場合には、塗膜劣化は短期間では発生しない⁵⁾ことも分かっている。

しかし、鋼橋の重防食塗装の長期防食性を適切に評価できる促進腐食試験方法がない現在、塗装の防食性はこれまでと同様に屋外暴露試験でしか評価できないとなると、新たな塗料や塗装仕様の採用までには、長期間の屋外暴露試験が必要となる。

そこで我々は、この問題を解決するために、昭和63年(1988)から腐食環境の異なる3地区(4暴露場)において実施している屋外暴露試験結果と、上記3条件を含んだ既存の6条件に、噴霧液を人工海水に置き換えた1条件を加えた、以下の7条件による促進腐食試験結果を比較検討した。なお各試験条件については、2.(2)a)①～⑦に詳述する。

①塩水噴霧試験(JIS Z 2371)

- ②S 6⁸⁾ (JIS K 5621 油性さび止めペイント)
- ③DS³⁾
- ④NS⁷⁾
- ⑤JASO²⁾
- ⑥海水NS (海水を用いたNS)
- ⑦ASTM⁹⁾

検討の結果、屋外暴露試験結果と高い相関性を示す促進腐食試験条件を見いだすことができた。

2. 屋外暴露試験と促進腐食試験の概要

促進腐食試験に先だって、促進腐食試験で用いるものと同一塗料で同一塗装系の試験板（以下「暴露試験板」という）による屋外暴露試験を行い、その経時変化を記録しておき、後述する促進腐食試験結果と比較検討した。

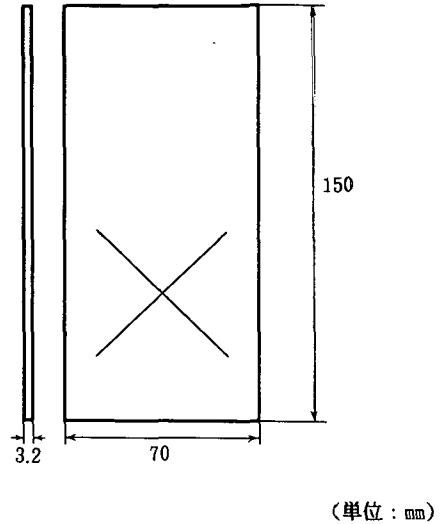


図-1 暴露試験板及び促進試験板

(1)屋外暴露試験

a)暴露場の選定

暴露台の設置場所（暴露場）は、国内での鋼橋の腐食環境を代表する次の3地区（4暴露場）と、促進暴露場（藤沢）の合計5暴露場を選定した。

①東京（温暖・田園地区）

気候が温暖で、海塩粒子がほとんど飛来せず田園、山間及び都市部など腐食が厳しくない環境（従来は油性系塗装仕様が主体である）の代表地区として、日本道路公団試験研究所屋上（東京都町田市忠生1-4-1、東経139° 25' 36"、北緯35° 34' 14"）を選定した。

②北陸（海岸・積雪地区）

北陸から新潟、秋田にかけての海岸地帯は、日本海から強い風が吹きつけ多量の海塩粒子が飛来する。さらに冬期には積雪があり、道路に岩塩等融雪剤の散布が行われるため鋼構造物の腐食が著しく進行する。このような代表地区として、北陸自動車道親不知高架橋下（新潟県西頸城郡青海町、東経137° 43' 54"、北緯36° 98' 91"、海岸からの距離は約50 m）を選定した。

③沖縄内陸（亜熱帯地区・海塩粒子飛来地区）

沖縄は熱帯地区で高温多湿なうえ、周囲が海に囲まれており、海塩粒子の飛来は全島に及んでいる。このため鋼構造物の腐食は著しく、また日射量も本州に比べて多く、塗膜の紫外線劣化と塗膜下腐食が同時に強く進行するものと予想された。このような地区の代表として沖縄自動車道許田料金所構内（沖縄県名護市許田、海岸からの距離約600m、東経127° 84' 93"、北緯26° 31' 80"）を選定した。

④沖縄海岸（亜熱帯地区・海塩粒子飛来地区）

この暴露場は海岸からの距離が約10mと近いために飛来塩分が多く、かつ湿度が高いことから前記③の沖縄内陸暴露場に比べて鋼構造物の腐食は著しく進行するものと予想された。このような地区として沖縄自動車道許田高架橋下（沖縄県名護市手水、東経127° 86' 64"、北緯26° 32' 27"）を選定した。

⑤藤沢（海水散布による促進暴露）

財団法人日本塗料検査協会東支部（神奈川県藤沢市宮前428）の屋上で行った促進暴露試験では、江ノ島（神奈川県藤沢市）で採取した海水を毎日1回試験板表面に散布した。この暴露試験結果は海浜部に設置された千倉暴露場（関西ペイント所有：千葉県千倉市忽戸農協、岸壁より約3mで暴露試験板に時々波しぶきがかかる）の暴露結果と高い相関を示すことが確かめられており⁹⁾、腐食環境の比較用に用いた。

b)暴露試験板の形状・寸法、材質及び処理

暴露試験板は、一般構造用圧延鋼材（JIS G 3101, SS400）に、表面粗さ約60 μ mのショットブラスト処理（Sa-2・1/2）を施した平板で、寸法は縦150 mm×横70 mm×厚さ3.2 mmである。

試験板の形状及び寸法を図-1に示す。

c)暴露台

暴露台は、幅200 cm×長さ132 cmの鋼製で地面からの設置高さを75 cmとした。なお暴露試験板は、水平暴露とし雨水による滞水の影響を受けやすい状態にした。

d)使用塗料

試験に用いた塗料の品種及び規格等を表-1に示す。

e)暴露試験板の塗装系及び仕様

暴露試験板の塗装系は、表-2に示すように単膜10仕様、複合膜5仕様とした。

複合膜仕様は、使用実績の多い日本道路公団規格のA塗装系 (Na11)、B塗装系 (Na12)、C塗装系 (Na13)、本州四国連絡橋公団規格のNa5塗装系 (Na14) 及び鋼道路橋塗装便覧 (社団法人日本道路協会、平成2年6月) (以下「便覧」という) のc-1塗装系 (Na15) の計5仕様を選定し、単膜仕様 (Na1~10) では、これら複合膜仕様を使用される塗料を選定した。

なお、Na15はジンクリッチペイントを下塗りに用いた重防食塗装系に代わるものとして、変性エポキシ樹脂塗料を下塗りに用いた重防食塗装系であり、便覧の補修塗装仕様にあるc-1塗装系の仕様を準用した。

なお、c-1塗装系では変性エポキシ樹脂塗料のタッチアップ1層、下塗り2層としているが、本試験では、他の複合膜仕様と塗装設計の考え方を合わせるために、タッチアップを行わず下塗りを3層とした。

複合膜仕様は、各規格に示されているとおりの塗装工程で塗装したが、単膜仕様は実際の塗装仕様ではないため、プラストした鋼板に直接塗装した。

なお試験板は、それぞれの塗装仕様について各暴露場毎に各4枚作成し、内2枚については同一時期に鉄素地に達するクロスカットを入れた。

クロスカットを入れた理由は、塗膜の劣化を促進させるためである。本研究の対象としている重防食塗装系では、腐食環境の厳しい場所に暴露しても2~3年程度では塗膜劣化が生じないと考えられる。同様に、実用的に許容される試験期間内での促進腐食試験においても劣化が生じないと考えられる。

また、JIS規格等で規定されている促進腐食試験方法においても、カット部からの劣化度で防食性の評価が行われていることから、本研究でもカット部を設け評価することにした。

f)暴露試験板の調査及び評価方法

暴露試験板は、一般部のさび、ふくれ、われ、はがれの発生状態を調査するほか、塗膜カット部からのさび、ふくれの進入幅をノギスで測定し数値に換算し評価点とした。

塗膜の劣化現象を評価するには、①各種の機器分析法により、塗膜の分子レベルの変化を検討する室内測定法と、②主として目視観察により、総合的な塗膜の変状を調査する現場調査法の2つに大別され

る。このうち、鋼橋塗膜のように塗り替えがどうかという、巨視的な評価のために用いられる評価方法としては、もっぱら②の現場調査法が適用される。

この現場調査法は、一般に塗膜劣化度の標準図^{9)~12)}が用意されていて、この図と対比して劣化率%又はレイティングナンバー等で表示する目視観察法である。

本研究では、試験板の塗装仕様が単膜から複合膜まであり、その防食性の評価範囲が広いことから、できるだけ広範囲で、かつ定量的な評価を行う必要があった。

上記に示した目視観察法のうち、これらの必要条件を満たすものとして、財団法人日本塗料検査協会の「塗膜の評価基準」(以下「塗膜の評価基準」という)¹⁰⁾、ASTM D610-68¹¹⁾及びISO/DIN¹²⁾があるが、「塗膜の評価基準」はASTMを参考にして作られており、またJISでも使用されていることから、「塗膜の評価基準」を本研究の評価方法として用いた。なお、この評価基準は0から10までの偶数値で評価されていることから、記載のない中間値(奇数)を補って10段階評価とした。

カット部からの評価は、国内外の文献でも報告例^{13)・14)}のある塗膜のカット部からのさび、ふくれ幅を総合成績換算表¹⁰⁾を用い、一般部と同様に10点満点の10段階評価とした。

(2)促進腐食試験

現在、塗料規格で最も一般的に使用されている促進腐食試験方法は塩水噴霧試験であるが、この試験結果と屋外暴露試験結果が一致しないことは1節で述べたとおりである。

塩水噴霧試験と複合腐食試験との大きな違いは、促進腐食試験条件が、前者は常に塗膜が湿潤状態で行われるのに対して、後者は湿潤と乾燥が繰り返して行われることにある。後者の場合、湿潤によって弱まった塗膜の付着力や塗膜中に吸水された水分が、乾燥時に回復するために、特殊な環境を除いてより自然に近い腐食状態が再現できるものと考えられる。

検討では、促進腐食試験に用いるものと同一塗料で同一塗装系の試験板(以下「促進試験板」という)を作成し、2.(1) a)節で示した5箇所の暴露場で暴露を行い、その経時劣化を記録しておき、後述する各促進腐食試験条件の違いによる試験結果と比較した。なお促進試験板の評価は、暴露試験板と同様に、2.(1) f)節に示す方法で行った。

a)促進腐食試験条件

促進腐食試験条件として、これまでの経験、実績、外国規格及び文献などから表-3に示すように代表的

表-1 試験に使用した塗料の品種、規格及び略称

区分	略称	品 種	膜 厚 (μm)	該 当 規 格 (注)
研 磨	サンダーケレン ブラスト	パワーサンダー処理	-	SIS (St-3)
		サンドブラスト処理	-	SIS (Sa 2-1/2)
ショッ プライマ-	エッチングプライマ- ゾクリッチプライマ-	エッチングプライマ- 2種	15	JIS K 5633 2種
		無機ジंकリッチプライマ-	15	NDK (2) (b)
下塗 塗料	鉛系さび止め 塩化ゴム下塗 無機ジंकリッチ 有機ジंकリッチ エポキシ下塗 変性エポキシ下塗	シアナミド鉛さび止めペイント 1種	35	JIS K 5625 1種
		塩化ゴム系塗料下塗	45	NDK (2) (f)
		厚膜形無機ジंकリッチペイント (エチルシリケート)	75	HBS K 5603
		厚膜形有機ジंकリッチペイント	75	HBS K 5605
		エポキシ樹脂塗料下塗	60	NDK (2) (c)
		変性エポキシ樹脂塗料下塗	60	
中塗 塗料	フェノールM I O 球状ガラスフレーク ビニルエステルガラスフレーク 合調中塗 塩化ゴム中塗 ポリウレタン中塗 ふっ素中塗	フェノールM. I. O塗料	45	NDK (2) (d)
		ガラスフレーク塗料 (エポキシ)	300	
		ガラスフレーク塗料 (ビニルエステル)	300	
		合成樹脂調合ペイント 2種中塗 (フタル酸系)	30	JIS K 5516 2種
		塩化ゴム系塗料中塗	35	NDK (2) (f)
		ポリウレタン樹脂塗料用中塗	30	HBS K 5608
		ふっ素樹脂塗料用中塗	30	
上塗 塗料	合調上塗 塩化ゴム上塗 ポリウレタン上塗 ふっ素上塗	合成樹脂調合ペイント上塗 (フタル酸系)	25	JIS K 5516 2種
		塩化ゴム系塗料上塗	30	NDK (2) (f)
		ポリウレタン樹脂塗料上塗	30	HBS K 5608
		ふっ素樹脂塗料上塗	30	
			30	

(注) SIS (St, Sa) : SVENSK STANDARD(スウェーデン), NDK : 日本道路公団塗料規格, HBS : 本州四国連絡橋公団塗料規格

表-2 試験板の塗装仕様

TP No	ショッ プライマ- の種類	研 磨 注1)	塗 装 系 注2)	合 計 膜 厚 (μm)	備 考
1	-	-	ジंकリッチプライマ-	15	単膜仕様
2			無機ジंकリッチ	75	"
3			有機ジंकリッチ	75	"
4			エポキシ下塗	60	"
5			エポキシ下塗×2	120	"
6			変性エポキシ下塗	60	"
7			変性エポキシ下塗×2	120	"
8			エポキシガラスフレーク	300	"
9			ビニルエステルガラスフレーク	300	"
10			鉛系さび止め×2	70	"
11	エッチング	サンダー	鉛系さび止め×2+合調(中・上塗)	125	複合膜仕様
12	プライマ-	ケレン	鉛系さび止め×2+フェノールMIO+塩化ゴム(中・上塗)	180	"
13	ゾクリッチ	ブラスト	ゾクリッチプライマ-+塩化ゴム下塗+塩化ゴム(中・上塗)	170	"
14	プライマ-		無機ゾクリッチ+球状下塗×2+矽酸塩(中・上塗)	255	"
15	-	-	変性球状下塗×3+矽酸塩(中・上塗)	240	"

注 1) 研磨を行う試験板 (No.11~14) は、ショップライマ-を塗装した鋼板を1か月間暴露した後に研磨を行った。

注 2) 表中「×2」は2層塗りを、その他は1層塗りを意味する。

注 3) No.11は日本道路公団規格のA塗装系, No.12は同B塗装系, No.13は同C塗装系, No.14は本州四国連絡橋公団No.5塗装系, No.15は鋼道路橋塗装便覧(財)日本道路協会, 平成2年6月)のc-1補修塗装系である。

表-3 促進腐食試験条件

No.	試験名	暴露条件	試験（サイクル）条件			注2)	備考
①	SS（塩水噴霧試験） 注1)	サソソイツ ウェザーメータ 96hr	S. S. 5% NaCl 35°C	(連続) →			JIS Z 2371 基準 タールエポキシ樹脂等のJIS
②	S 6	同上	S. S. 5% NaCl 30°C 0.5hr	Wet 95% R. H. 30°C 1.5hr	Dry 20% R. H. 50°C 2hr	Dry 20% R. H. 30°C 2hr	昭和60年度通産省 委託試験で設定 軽防食対象
③	DS	同上	S. S. 5% NaCl 35°C 2hr	Dry 50% R. H. 50°C 2hr	Wet 90% R. H. 50°C 15hr	Dry 50% R. H. 50°C 5hr	昭和55年頃に建設省 土木研究所で検討
④	NS	同上	S. S. 5% NaCl 35°C 4hr	Dry 50% R. H. 60°C 2hr	Wet 95% R. H. 50°C 2hr		日産自動車社内規格
⑤	JASO	同上	S. S. 5% NaCl 35°C 2hr	Dry 50% R. H. 60°C 4hr	Wet 95% R. H. 50°C 2hr		日本自動車技術会 JASO規格
⑥	海水NS	同上	No④のNSで5%NaClの代わりに人工海水を用いて試験を行う				
⑦	ASTM	同上	S. S. 5% NaCl 35°C 4hr	Wet 100% R. H. 100F(37.8°C) 18hr	Freeze -10 ±3F (-23.3 ±2°C) 2hr		ASTM D 2933-74

注1) SS（塩水噴霧試験）は連続試験で、サイクル試験ではないが、JIS K 5664-1995 タールエポキシ樹脂塗料やJIS K 5400の9.1に記されている従来の代表的な促進腐食試験なので比較のために加えた。

注2) 試験（サイクル）条件欄の記号は次のとおりである。

S. S. : 塩水噴霧 (Salt-Spray), Wet : 湿潤, Dry : 乾燥, Freeze : 凍結, NaCl : 塩化ナトリウム, R. H. : 相対湿度。

な6条件と、④に示すNSの噴霧液（NaCl）を人工海水に置き換えた1条件の計7条件を選び、それぞれの条件で2か月間の連続試験を行った。各試験条件の特徴並びに詳細は次のとおりである。

①塩水噴霧試験

この試験はJIS Z 2371をはじめ、ASTM、ISOなどにも規定された条件で、従来の促進腐食試験条件の代表であるが、実際の暴露環境と異なり腐食途中に乾燥（酸化・脱水）や結露（湿潤）などの条件がなく、連続塩水噴霧のために流れさび（ Fe^{++} の水溶性さび）が多くなり、天然の海浜などで生ずるような層状さびやこぶさび（ Fe^{+++} を主体とする水不溶性 α 、 β 、 γ 、 $FeOOH$ やアモルファスハイドロオキシド）を生じにくい。

また、噴霧液がNaCl単体であるために、最近の重防食塗料系で多く使用されているジंकリッチペイントの寿命が著しく短くなるといわれている。

このため最近では、屋外暴露結果との相関性の低いことが問題とされつつあるが、試験の再現性が良く、方法としても簡単なことから、塗料の製造ロットのバラツキなどを調べるには適当で、JISでも採

用されている。

②S 6

昭和60年度に通産省の委託研究（委託先：財団法人日本塗料検査協会）で得られた条件で、従来の油性さび止め塗料、フタル酸樹脂塗料及び塩化ゴム系の塗装仕様を中心に検討を行ったものであり、屋外暴露と高い相関性（0.9以上）を示した。（塩水噴霧試験では0.59）。

この条件は、油性さび止め塗料の促進腐食試験条件として、従来の塩水噴霧試験に代わってJISで用いられるようになった。

③DS

この方法は今回と同じく、屋外暴露結果と相関の高い促進腐食試験条件の開発を目的として、1980年頃に建設省土木技術研究所で検討されたものである。また、重防食塗料を用いた促進腐食試験条件として公式に検討された唯一のものであり、湿潤時の試験条件が高温（50°C）で長時間続くのが特徴である。

④NS

日産自動車の社内規格試験として、自動車部品の検査に使用されている条件で、自動車用塗膜を対象

表-4 人工海水の成分 (g/20ℓ)

成分	量 (g)	成分	量 (g)
MgCl ₂ (6H ₂ O)	222.2	KBr	2.01
CaCl ₂ (2H ₂ O)	30.7	H ₃ BO ₃	0.54
SrCl ₂ (6H ₂ O)	0.85	NaF	0.06
KCl	13.89	NaCl	490.68
NaHCO ₃	4.02	Na ₂ SO ₄	81.88

としているためか、前記②に比べて塩水噴霧時間及び温度条件が厳しくなっている。

⑤ JASO

日本自動車技術会 (JASO) が中心となって、各自動車メーカ、鉄鋼メーカ及び塗料メーカが共同で検討して定めた条件で、前記④のNSに比べて塩水噴霧時間が半分になり、その分乾燥時間が長くなっている。

⑥ 海水 NS

前記④のNSの試験条件において、5%塩化ナトリウム水溶液の代わりに人工海水 (表-4参照) を用いて塩水噴霧試験を行うものである。これは前記②で行った昭和60年度通産省委託試験のなかで判明したことであるが、重防食塗装系の中心となるジンクリッチペイント (亜鉛めっき、亜鉛溶射も同様) の場合、NaCl水溶液と天然海水とでは腐食速度に大差が生じることが確認⁶⁾ されている。この原因としては、噴霧液に海水を用いた場合には、海水中のMgがZn金属表面にMg・Zn Complex皮膜を生成して、Znの腐食・消耗を阻止するためと考えられる。

⑦ ASTM

これはASTM D2933-74に規定されている条件で、米国フロリダの海浜暴露と相関性の高い促進腐食条件である。フロリダは緯度的にはほぼ沖縄と同じであり、沖縄の天然暴露試験結果との相関性を検討するために用いた。

b) 試験装置

促進腐食試験で使用した装置は以下のとおりである。

① 塩水噴霧試験機

JIS Z 2371「塩水噴霧試験方法」で規定され、JISを始めとして国内外の規格試験に使用されている。この試験機は表-3のNa①に示すSS (塩水噴霧試験) に用いた。

② 複合腐食試験機

複合腐食試験機はISOで規定された塩水噴霧・乾燥・湿潤が繰り返し行うことができる装置で、温度・湿度・時間などの設定はコンピューターによって制御され、各試験温度への移行時間を少なくするためにスポットクーラーを設備してある。この装置は表-3に示す5種類の促進腐食試験 (Na②～⑥) に用いた。

③ 耐湿試験機

JIS K 5400「塗料一般試験方法」で規定されている装置で、JISを始めとして国内外の規格試験で使用されている。この装置は表-3のNa⑦に示すASTM促進腐食試験に用いた。

④ 低温槽

低温槽については-23℃まで冷却可能なものを用いた。この装置は前記③の装置と同様にNa⑦のASTM促進腐食試験に用いた。

c) 促進腐食試験方法

促進試験板は、暴露試験板と同時に作成された単膜10仕様と、複合膜5仕様の合計15仕様を選び、暴露試験板と同様にクロスカットを入れた。

作成した促進試験板は、表-3に示す条件で、ASTMは35サイクル、その他の試験条件では2ヶ月間の試験を行い、促進腐食試験条件 (3. (1)参照) の検討を行った。

3. 促進腐食試験方法の検討

(1) 促進腐食試験条件の検討

表-3に示した7種類の促進腐食試験結果と、各暴露地での屋外暴露試験結果の相関係数を求めた。なお、相関係数の計算に用いた各塗装系の評価点は、屋外暴露試験では3年間、促進腐食試験では2ヶ月間の平均評価点を使用した。また、同時に各試験内における塗装系間の成績順位によるSpearmanの順位相関係数も求めた。

$$rs = 1 - 6 \sum_{i=1}^n di^2 / (n^3 - n) \quad (1)$$

$$di = xi - yi \quad (2)$$

ここで、

rs : Spearmanの順位相関係数

xi : 屋外暴露試験におけるNa_i試験板の順位

yi : 促進腐食試験におけるNa_i試験板の順位

各試験間の相関係数を表-5に、順位相関係数を表-6に示す。また、相関係数と順位相関係数の平均値を求めたものを表-7に、各促進腐食試験の促進倍率を表-8に示す。

なお、促進倍率は次のようにして求めた。

$$m = \bar{x} / \bar{r} \times (36/2) \quad (3)$$

ここで、

m : 促進倍率

\bar{r} : 屋外暴露試験によって求められた平均劣化点
で、(10-平均評価点)によって算出する。
なお、平均評価点は、劣化のない状態を10点満点としたときの各試験板 (Na1~15) の評価点を平均したもの

\bar{x} : 促進腐食試験によって求められた平均劣化点
で、(10-平均評価点)によって求める。

36 : 屋外暴露試験期間 (3年)

2 : 促進腐食試験 (2か月)

表-5によると、各暴露地と一番高い相関を示す促進腐食試験条件は、東京がS6 (相関係数 0.688)、沖縄内陸がASTM (同 0.891) であり、沖縄海岸 (同 0.907)、北陸 (同 0.837) 及び藤沢 (同 0.862) が海水NSであった。

海塩粒子の影響が大きい沖縄海岸、北陸及び藤沢の暴露場とは、NaClの代わりに人工海水を用いた海水NSが高い相関を示した。また、沖縄の内陸及び海岸では、ASTMと高い相関を示すことが見いだされた。

これは、ASTMが、もともとフロリダ半島に暴露した試験板に対応した促進腐食試験条件であり、フロリダ半島 (マイアミビーチ) は沖縄と同じ北緯26度にあつて、半海洋性気候で日照や温湿度条件も良く似ており、沖縄との相関性の高い理由もこれによるものと推定される。

東京については、特に高い相関性を示す促進腐食試験が見られなかった。これは、東京での劣化形態が他の暴露地と異なり、主に温度差や乾燥に起因して発生した塗膜の内部応力によって、カット部に劣化が生じたことが原因と考えられる。なお、表-5の相関係数及び表-6の順位相関係数では、ほぼ同様の傾向がみられるものの一部で逆転も見られた。

理想的な促進腐食試験は、劣化の順位及び劣化度が相対的に等しいことである。従つて、相対的劣化変位のばらつきを表す相関係数と順位の大小のみから計算する順位相関係数2つを平均して、新たな相関性を表す尺度として表-7に示した。表-7によると、①各暴露地と平均的に高い相関を示す試験条件は海水NS (0.767) である。この理由としては、人工海水を用いることで、飛来塩分の影響を強く受ける沖縄海岸、北陸及び藤沢の相関係数が高いため、それによって平均値が高くなったことによる。

表-5 屋外暴露3年間と促進腐食試験2ヶ月間の相関関係

	促進腐食試験	屋外暴露試験				
		東京	沖縄内陸	沖縄海岸	北陸	藤沢
①	SS	0.122	0.578	0.505	0.275	0.444
②	S6	0.688	0.714	0.787	0.819	0.846
③	DS	0.629	0.602	0.504	0.648	0.552
④	NS	0.613	0.676	0.671	0.793	0.831
⑤	JASO	0.414	0.780	0.664	0.701	0.793
⑥	海水NS	0.650	0.737	0.907	0.837	0.862
⑦	ASTM	0.559	0.891	0.823	0.771	0.804

表-6 屋外暴露3年間と促進腐食試験2ヶ月間の順位相関係数

	促進腐食試験	屋外暴露試験				
		東京	沖縄内陸	沖縄海岸	北陸	藤沢
①	SS	0.209	0.716	0.455	0.382	0.440
②	S6	0.604	0.708	0.543	0.734	0.813
③	DS	0.543	0.563	0.556	0.804	0.844
④	NS	0.657	0.611	0.538	0.804	0.800
⑤	JASO	0.567	0.771	0.690	0.829	0.815
⑥	海水NS	0.510	0.789	0.655	0.851	0.873
⑦	ASTM	0.600	0.853	0.679	0.743	0.791

②次いでASTM (0.751) が高い相関性を示したが、これも前記①と同じ理由による。

③ASTMと相関性の高い沖縄と、海水を直接散布する藤沢を除く、東京と北陸の平均ではS6 (0.712)、NS (0.717) 及び海水NS (0.712) の差はほとんどなかった。

本研究の目的は、暴露試験結果と高い相関性を示す促進腐食試験条件を見いだすことにあるが、各暴露地毎に促進腐食条件が異なる (すなわち鋼橋の架設環境を細かく分けて促進腐食条件を設定する) ことは実用的ではない。そこで、ASTMと特に相関性の高い沖縄と、それ以外の地区との2つの促進腐食試験条件を設定することにした。

沖縄以外における促進腐食試験条件を設定する場合、S6、NS及び海水NSとの比較になるが、前記③に述べたように3条件の差はほとんどなく、人工海水を用いた場合の海水NSでは試験コストが高くなること、S6は一部のJISで既に採用されていて

表-7 相関係数と順位相関係数の平均値

促進腐食試験	屋外暴露試験					全暴露場の平均値	東京と北陸の平均値
	東京	沖縄内陸	沖縄海岸	北陸	藤沢		
① SS	0.166	0.647	0.480	0.329	0.442	0.413	0.248
② S6	0.646	0.711	0.665	0.777	0.830	0.726	0.712
③ DS	0.586	0.582	0.530	0.726	0.698	0.625	0.656
④ NS	0.635	0.643	0.605	0.799	0.816	0.700	0.717
⑤ JASO	0.491	0.776	0.677	0.765	0.804	0.702	0.628
⑥ 海水NS	0.580	0.763	0.781	0.844	0.867	0.767	0.712
⑦ ASTM	0.580	0.872	0.751	0.757	0.798	0.751	0.669

実績があることなどから、ここではS6を実用的な試験条件とすることにした。

なお、表-8に示す促進倍率により、促進腐食試験から各暴露地での屋外暴露結果を推定すると、S6で6か月間（720サイクル）の促進腐食試験を行うと、北陸暴露場のような多量の海塩粒子が飛来する腐食環境において5～6年、東京暴露場のようなマイルドな腐食環境において11年、そして藤沢暴露場のように海水飛沫が直接塗装面に付着するような腐食環境で4年程度の屋外暴露結果が、それぞれ推定できることになる。

また、ASTMで6か月間の促進腐食試験を行うと、沖縄内陸のように、高温多湿で海塩粒子の飛来の影響を受ける腐食環境における14～15年程度の屋外暴露結果が推定できることになる。

表-8 各暴露地と促進腐食試験間の促進倍率

暴露地及び条件	基準の暴露地				
	東京	沖縄内陸	沖縄海岸	北陸	藤沢
東京	1.00	1.13	0.44	0.35	0.27
沖縄内陸	0.88	1.00	0.39	0.31	0.24
沖縄海岸	2.29	2.59	1.00	0.80	0.62
北陸	2.85	3.23	1.25	1.00	0.77
藤沢	3.72	4.21	1.63	1.30	1.00
SS	45.40	51.45	16.55	15.94	12.22
S6	39.38	44.62	14.36	13.83	10.60
DS	27.33	30.97	9.97	9.60	7.36
NS	70.41	79.80	25.67	24.72	18.95
JASO	67.17	76.12	24.49	23.58	18.08
海水NS	42.15	47.77	15.37	14.80	11.34
ASTM	37.52	42.52	13.68	13.17	10.10

(2)試験時における温度条件の検討

前記3.(1)節で屋外暴露試験結果と高い相関性を示す促進腐食試験条件が求められたが、次に、促進腐食試験時における温度条件の検討を行った。

促進腐食試験条件を決定する重要な要因として試験時の環境温度がある。ただ単に、塗膜を早く劣化させるだけの目的であれば試験時の環境温度を高く設定すれば良いが、本研究の目的は、屋外暴露試験結果と相関性の高い促進腐食試験条件を見いだすことにある。

この場合問題となるのが塗膜のガラス転移点（以下「T.g」という）である。特に、湿潤試験時において、塗膜のT.gを越えた温度条件を設定すると、塗膜内での分子運動が著しく活発になり、腐食因子の塗膜内への侵入が容易になる。その結果、塗膜の劣化や塗膜下金属の腐食が大きく進むことになる。

したがって、促進倍率を高めるためにはある程度高い環境温度が必要となるが、この環境温度が塗膜

表-9 塗膜の電気容量測定のため塗装仕様

試験板 No.	塗 装 系	塗膜厚 (μm)
1	変性エポキシ下塗	60
2	変性エポキシ下塗×2	120
3	エポキシ下塗	60
4	エポキシ下塗×2	120
5	エポキシガラスフレーク	300
6	塩化ゴム（中・上）	65
7	ポリウレタン（中・上）	60

のT.gを大きく上回ると、塗膜の劣化状態が自然条件と異なり、屋外暴露試験結果との相関性が損なわれる可能性が高くなると考えられる。

そこで、湿潤試験時における塗膜のT.gを求め、促進腐食試験条件における湿潤時温度の上限を検討するために、塗装試験板を用いた試験を行った。

試験は、プラスト鋼板(150×70×3.2mm)に、表-9に示す塗装仕様で塗装した試験板各2枚を、塩化ナトリウム水溶液(5% W/V)中に浸し、温度を2時間毎に10℃間隔で10~70℃の範囲で変化させ、そのときの塗膜の電気容量値を測定した。

なお、測定結果は、それぞれの試験板の10℃時における電気容量値を基準とした比率で算出(試験板2枚の平均)し、図-2に示す。

図-2によると、各試験板ともに40~50℃にかけて塗膜の電気容量値が大きくなっており、塗膜の物性が大きく変化する試験板塗膜のT.gも、この付近(40~50℃)にあるものと思われる。

したがって、促進腐食試験条件における湿潤試験時の温度は40℃以下にし、塗膜の物性を変化させないようにすることが望ましいと考えられる。

次に、促進腐食試験条件のうち、乾燥時温度の上限を検討するために、沖縄海岸暴露場に近接している鋼道路橋の橋体温度を測定したが、夏期の晴天時(正午)には最高47℃まで上昇することがわかった。また、この時沖縄海岸暴露場に設置したある暴露試験板(黒色)の表面温度は60℃を記録した。

これらのことから、促進腐食試験条件における乾燥時の温度は60℃以下とすることが妥当と思われる。

以上、温度条件の検討結果から見ると、表-3に示した促進腐食試験において、湿潤時(Wet)40℃以下、乾燥時(Dry)60℃以下に該当する試験条件はS6とASTMだけであり、3.(1)節で決定した両試験条件が、温度条件の面からも妥当であることが確認された。

(3)試験板養生条件の検討

促進腐食試験において、試験条件と同じくらいに重要な要因に試験板の作成条件が挙げられる。特に、乾燥硬化して初めて塗膜という製品になる塗料の養生条件は、試験結果に大きな影響を与えるものと思われる。

屋外暴露試験結果あるいは実橋塗膜との相関性を高めるには、これらの養生条件と同じ自然乾燥条件にすることが望ましいが、結果を早く求めるための促進腐食試験の養生条件としては、あまり長期間の養生時間の設定は実用的ではない。

塗膜の一般的な物性を試験するために規定されて

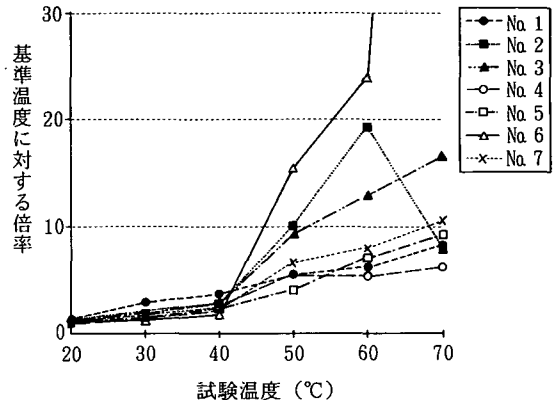


図-2 温度変化による湿潤時電気容量の変化
(基準温度10℃)

いるJIS規格でも、自然乾燥期間は通常7日間程度であり、しかも屋外暴露試験結果との相関性を対象としたものではない。

そこで、実用的な試験期間内における、屋外暴露試験結果と相関性の高い試験板の養生条件、すなわち乾燥条件の検討を行った。

a)強制乾燥条件の検討

参考文献(6)で示したS6の試験板養生では、ウェザーメータ照射による96時間の強制乾燥が行われている。S6で試験された塗装系は油性系が中心であり、単膜で膜厚35μm、複合膜で膜厚125μmである。一方、本研究では重防食塗装系が主体で、単膜で膜厚60~120μm、複合膜で膜厚125~255μmであり、2倍もしくはそれ以上の膜厚差がある。

Fickの拡散法則によると、塗膜が形成された段階以降では、塗膜中の溶剤蒸発は塗膜内部での拡散が律則段階となり、塗膜内からの溶剤の蒸発速度(溶剤/樹脂重量比)は、横軸に、時間/(乾燥塗膜)²、縦軸に膜厚の関係で表すと、膜厚によらず一定の値を示すことが紹介されている¹⁵⁾。したがって、塗膜の乾燥度合いを残留溶剤量で考えると、膜厚が2倍になるとウェザーメータの照射時間は4倍になることになる。

そこで、S6で行われた強制乾燥時間の96時間の4倍である384時間を基準に、照射時間と照射時期の違いが相関性に与える影響を調べるための試験を行った。

なお、乾燥条件の検討は、屋外暴露試験2年目の結果が判明した時点で行ったため、この時点で最も腐食環境の厳しい藤沢との相関性が高く、かつ促進倍率の高かったJASOを促進腐食試験の代表として

表-10 屋外暴露試験とJASOとの相関係数（乾燥条件の検討）

		屋 外 暴 露 試 験					
		東 京	沖 縄 内 陸	沖 縄 海 岸	北 陸	藤 沢	平 均
東 京		1.000					
沖 縄 内 陸		0.300	1.000				
沖 縄 海 岸		0.557	0.647	0.000			
北 陸		0.777	0.594	0.635	1.000		
藤 沢		0.740	0.625	0.652	0.948	1.000	
J A S O	①	0.742	0.616	0.686	0.779	0.757	0.716
	②	0.746	0.677	0.707	0.792	0.772	0.739
	③	0.760	0.605	0.698	0.787	0.782	0.726

選び、試験を行った。

試験に用いた試験板は、3.(1)節で用いた試験板とは別に、新たに3.(1)節で示した促進腐食試験条件で検討した15塗装仕様と同一な試験板を作成し、次の示す条件で強制乾燥を行った。

乾燥条件①：全塗装工程終了後にウェザーメータで192時間照射（基準照射384時間の1/2）

乾燥条件②：下塗り工程終了後にウェザーメータで96時間照射，さらに残りの中・上塗り工程終了後に96時間照射（基準照射384時間の1/2）

乾燥条件③：単膜は乾燥条件①，複合膜は乾燥条件②，のそれぞれ照射時間を2倍にした照射（基準照射384時間）

試験結果から求めた屋外暴露試験結果との相関係数を表-10に示す。

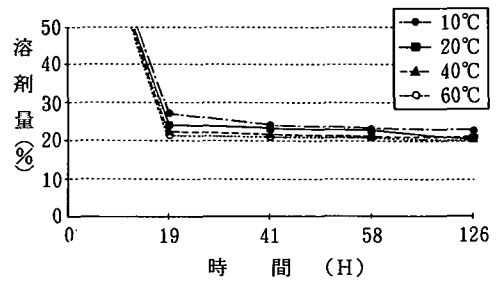
表-10によると、全暴露地の平均値でみると、乾燥条件②が僅かながら高い相関性を示すものの、差はほとんど見られなかった。このことから、今回試験した乾燥条件では、乾燥時間の違いによる相関性の向上は認められないことになる。したがって、ウェザーメータによる強制乾燥時間を長くすることの効果は期待できないため、強制乾燥時間は参考文献6)で用いた96時間で行うことにする。

なお、複合膜の一部に、残留溶剤の影響と見られる不規則なふくれが認められた。また、塗膜のカット部の劣化でも、膜厚が厚くなればふくれが大きくなる傾向が見られ、これも同様に残留溶剤による応力緩和の影響と考えられる。

このことは、強制乾燥前の養生（以下「自然乾燥」という）が重要であることを示唆しているものと考えられる。

b)自然乾燥条件の検討

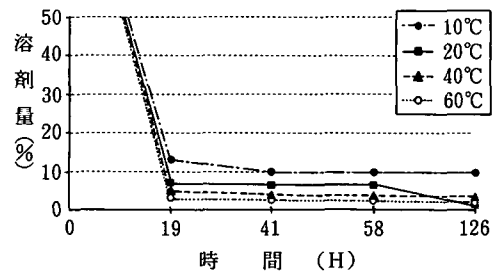
強制乾燥前に行う自然乾燥条件を検討するために、自然乾燥時における養生温度及び養生時間と、その



(単位：%)

時間 E(S)	0	19	41	58	126
10°C	100.0	27.0	24.0	23.0	22.7
20°C	100.0	24.0	23.0	22.8	20.7
40°C	100.0	22.5	21.5	21.3	20.8
60°C	100.0	21.5	21.0	20.8	20.6

図-3 塗膜中の残留溶剤の経時変化 (E(S))



(単位：%)

時間 MD-E	0	19	41	58	126
10°C	100.0	13.0	9.8	9.7	9.6
20°C	100.0	7.0	6.5	6.5	1.5
40°C	100.0	5.0	4.0	3.8	3.5
60°C	100.0	3.0	2.5	2.2	1.8

図-4 塗膜中の残留溶剤の経時変化 (MD-E)

時の残留溶剤の関係を調べる試験を行った。

試験に用いた試験板は、エポキシ樹脂塗料下塗（以下「E(s)」という）と、変性エポキシ樹脂塗料下塗（以下「MD-E」という）をガラス板（150×70×2mm）2枚ずつに、それぞれ乾燥膜厚が60μmとなるような理論塗布量で刷毛塗りしたものを用いた。

刷毛塗り後、直ちに試験板の重量を測定し、各温度に保った恒温器中に水平に置き、一定時間おきに試験板の重量を測定した。このときの重量減少量を溶剤の蒸発量とし、予めJIS K 5407「5.加熱減量」により求めた値を塗料中の溶剤量として、それぞれの温度条件における養生時間と塗膜中の残留溶剤との関係を調べた。その結果を図-3及び図-4に示す。

図-3及び図-4によると、各養生温度ともに19～41時間後には残留溶剤量が大きく減少し、E(S)では約20%、MD-Eでは10%以下になっている。

その後、養生温度が常温（20℃）及び高温（40℃、60℃）ではE(S)は僅かに減少し、ほぼ一定の値を示すとともに、126時間経過後には高温時（40℃、60℃）と同程度の残留溶剤量となった。また、MD-Eも同様な傾向を示していた。

しかし、養生温度が低温（10℃）の場合には、126時間経過後でもE(s)、MD-Eともに他の養生温度で自然乾燥を行った場合よりも残留溶剤量が多くなっていた。このことは、強制乾燥前に行うための自然乾燥は、単膜の場合には常温（20℃）で5日程度を必要としていることを示唆している。

また、複合膜（塗装系）による試験は、硬化前の塗料の塗り重ねが困難なため行わなかったが、上記で得られた単膜での条件（20℃、5日間隔）で塗り重ねるとすると、一般的な塗装仕様（下塗り2層、中・上塗り各1層）の4層では20日間の自然乾燥が必要となる。しかし、実際に行われている間隔（1～10日）で各層を塗装し、塗装系を完成したと考えると、1か月程度の自然乾燥が必要であると考えられる。

4. 結論

本研究は、鋼橋塗装の長期防食性の把握を目的として、10年程度の屋外暴露試験に相当する塗膜劣化を、短期の促進腐食試験で置き換えられるような試験条件を見いだそうと試みたものである。

この試みに当たって、既存の促進腐食試験6条件に、新たに1条件を加えた計7条件について行った

表-11 推奨する促進腐食試験条件

乾燥条件	単膜塗膜	24時間間隔で塗装後5日間自然乾燥し、 燥し、ウェザーメーターで96時間照射
	複合塗膜 （塗装系）	3～4日間隔で上塗まで塗装後、1か月自然乾燥してウェザーメーターで96時間照射
促進腐食条件	S6	一般の腐食環境用 （JIS油性さび止め塗料でも採用）
	ASTM	沖縄に代表される海洋性の高温多湿の腐食環境用

2か月間の試験結果と、腐食環境の異なる3地区（4箇所）において行っている屋外暴露試験3年目の結果とを比較検討した。その結果、次のような結論が得られた。

- ①東京、北陸、沖縄海岸、沖縄内陸の4暴露場及び天然海水散布の藤沢暴露場と平均的に最も高い相関を示す促進試験条件は海水NSであった。この理由としては、人工海水を用いることで、飛来塩分の影響を強く受ける沖縄海岸、北陸及び藤沢の相関係数が高くなり、それによって平均値が高くなったことによる。
- ②次いでASTMが高い相関性を示したが、これは、気象条件がASTMの基準となっているフロリダと似通っている沖縄（特に内陸）と高い相関を示したため、平均的にも高くなったことによる。
- ③ASTMと相関性の高い沖縄内陸及び沖縄海岸と、海水を直接散布する藤沢を除く、東京と北陸の平均ではS6、NS及び海水NSの差はほとんどなかった。
- ④実用的な促進腐食試験条件として、沖縄のように高温多湿で海塩粒子量の多い腐食環境用としてASTMを、それ以外の腐食環境用としてS6を提案した。
- ⑤表-8によって求めた促進腐食試験の促進倍率により、S6で6か月間の促進腐食試験を行うと、多量の高塩粒子が飛来する腐食環境において5～6年、マイルドな腐食環境において11年、そして海水飛沫が直接塗装面に付着するような腐食環境で4年程度の屋外暴露結果が、それぞれ推定できることを示した。また、ASTMで6か月間の促進腐食試験を行うと、高温多湿で海塩粒子の飛来の影響を受ける腐食環境において14～15年程度の屋外暴露結果が推定できることを示した。
- ⑥塗膜の電気容量値の測定結果から、塗膜の物性に

大きな影響を与えずに促進腐食試験を行うためには、湿潤時 (Wet) の温度については40℃以下、乾燥時 (Dry) の温度については60℃以下とすることの妥当性を明らかにした。

⑦促進腐食試験板の養生条件として、単膜では5日間塗装系では1か月間の自然乾燥後、ウェザーメータによって96時間強制乾燥することが、残存溶剤の影響を少なくするために必要であることを示した。

⑧以上をまとめたものを表-11に示し、鋼橋塗装に用いられる重防食塗料または塗装系の、実用的な促進腐食試験条件として推奨する。

なお、塗装試験板の屋外暴露試験は、平成10年までの10年間を継続して調査する予定にしており、データの蓄積により更に相関性が高く、かつ促進倍率の高い促進腐食試験条件の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 「Survey of Accelerated Test Methods for Anti-corrosive Coating Performance」 jct August 1990. 三吉靖彦：表面技術，Vol. 32, No. 6, pp. 319~323, 1985.
- 2) JASO 規格 M610-92 (自動車部品外観腐食試験方法)
- 3) 田中柳之助，蔭田実，森芳徳：防食材料の促進劣化に関する調査研究，鋼橋塗装，Vol. 10, No. 4, pp. 19

~26, 1982.

- 4) 安井正宏，武吉理夫：暴露塗装鋼板への複合腐食条件の影響，防錆防食技術発表大会講演予稿集，Vol. 10, pp. 5~10, 1990.
- 5) 神谷誠，藤原博，三宅将：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，日本道路公団試験研究所報告，Vol. 31, pp. 65-97, 1994.
- 6) 財団法人日本塗料検査協会：石油製品需要適正化調査 (昭和60年度)，1970.
- 7) 日産自動車社内規格
- 8) ASTM D 2933-74
- 9) 社団法人日本鋼橋協会：鋼橋塗膜調査，JSS IV 03-1982, 1982.
- 10) 財団法人日本塗料検査協会：塗膜の評価基準，1970.
- 11) ASTM D 610-68 (Reapproved 1974)
- 12) ISO 4628/1-1978/DIN 53210 (1978)
- 13) Fultz, B. S. : Performance of Topcoated Inorganic Zinc coatings Exposed to Weather, *Journal of Protective Coating & Linings*, December 1988.
- 14) 久野忠一，今津司，縦山巖，栗山寛：海洋環境における鋼材の各種防食塗装システムの性能，川崎製鉄技報別刷，Vol. 13, No. 2, pp. 43-63, 1981.
- 15) Beevers, R. B. and White, E. F. T. : *Trans Faraday Soc.*, 56, 774 (1960). 中道敏彦：塗料の流動と塗膜形成，技報堂出版，pp. 112~113, 1995.

(1996. 5. 31 受付)

RESEARCH ON THE CORRELATIVITY OF OUTDOOR EXPOSURE TEST OF PAINTING TEST PIECE WITH CORROSION TEST FOR STEEL BRIDGE PAINTING

Hiroshi FUJIWARA and Yoshio TAHARA

7 kinds of accelerated corrosion tests have been investigated in order to find out the test method of steel bridge painting which can reproduce the result of actual exposure test for 10 years accurately by short term. In addition, actual exposure test of painted specimens has been carried out at 3 different corrosive regions since 1988. Each method was distinguished by its unique cyclic patterns, the temperature and period of salt water cycle, humid cycle and dry cycle. As a result, combined cycle condition deeply correlative with actual exposure test was found out. In this cycle, the result of exposure test for 4 to 15 years can be presumed by 6- months accelerated corrosion test.