

## 鋼橋防食に用いられる金属皮膜の腐食劣化評価に関する実験的研究

Corrosion degradation of metallic coating systems for steel bridges

伊藤義人\*, 金 仁泰\*\*, 肥田達久\*\*\*, 坪内佐織\*\*\*\*, 忽那幸浩\*\*\*\*\*

Yoshito ITOH, In-Tae KIM, Tatsuhiisa HIDA, Saori TSUBOUCHI, Yukihiro KUTSUNA

\*工博, 名古屋大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*博(工), 名古屋大学大学院助手, 工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

\*\*\*工修, (株)関西空港(〒598-0000 大阪府泉佐野市泉州空港北 1) (当時名古屋大学大学院学生)

\*\*\*\*名古屋大学大学院学生 環境学研究科都市環境学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*\*日本道路公団中部支社(〒465-0045 名古屋市名東区姫若町 57)

This study examined to evaluate corrosion durability of metallic coatings system for steel bridges. Accelerated corrosion cyclic tests conforming to JIS K5621 were carried out on four types of metallic coating systems, Zinc hot-dip plating and three thermal sprayings of Zinc and/or Aluminum. After metallic coating, cross-scribed lines reaching the steel substrate were mechanically made in the coated surface, and uncoated region of 20×70mm were also introduced in the specimens. The coated test specimens were exposed into the S6-cycle corrosion environments for 300 days (S6-1200 cycles). The surface geometry and thickness of the metal coating layers were measured at the exposure times of 0, 100, 200, and 300 days. After the measurements, corrosion productions on the test specimens were removed mechanically and chemically, and then surface geometry and thickness loss were also measured. From the test results, the corrosion degradation of the four types of metallic coating systems was evaluated.

*Key Words: corrosion, accelerated corrosion test, metallic coating, corrosion degradation, steel bridge*

キーワード: 腐食, 腐食促進実験, 金属皮膜, 腐食耐久性, 鋼橋

## 1. はじめに

鋼橋に用いられる防食法としては, 塗装が最も一般的であるが, めっきや溶射といった金属皮膜を用いるものも長期間の防食法として最近注目されている。塗装による防食法は, 鋼橋の設置場所の腐食環境条件によって異なる塗装仕様が用いられる。鋼道路橋塗装便覧<sup>1)</sup>によると, 一般の環境では A 塗装系, 飛来塩分や自動車排気ガスあるいは工場排煙の影響を受けるやや厳しい腐食環境では B 塗装系, 海上などの厳しい腐食環境では C 塗装系が外面塗装系として用いられる。それぞれの環境下における塗装系の劣化特性は, 実橋調査, 暴露実験および環境促進実験に基づいて検討されている。また, 無塗装耐候性鋼についても旧建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部および(社)日本橋梁建設協会による共同研究の暴露実験結果に基づいて無塗装耐候性橋梁の設計・施工要項(改訂案)がまとめられている<sup>2)</sup>。しかしながら, 金属溶射のように比較的最近普及してきたものは, その腐食劣化に関する実験データが少なく, 長期腐食耐久性の検討が不十分である。

著者ら<sup>3-5)</sup>は, 鋼橋に用いられる防食法について設置場所(地域性)や部材位置の違いを考慮したネットワークレベ

ルの鋼橋の腐食劣化特性および劣化寿命予測法を検討するために, 2000 年から鋼構造部材を対象とした環境促進実験を行ってきた。その結果として, 裸鋼材の腐食耐久性評価のための腐食促進実験とその促進倍率を明らかにしている<sup>3)</sup>。また, 素地調整程度が異なる塗装鋼板の腐食劣化特性を明らかにし, 新設塗装と塗替え塗装の劣化寿命の違いを明らかにした<sup>4)</sup>。さらに, 腐食促進実験より塗装系および金属皮膜系の防食法の短期間の劣化特性を明らかにした<sup>5)</sup>。

本研究では, 長期間(300 日間)の複合サイクル腐食促進実験を行い, 溶融亜鉛めっきおよび 3 種類の金属溶射(亜鉛アルミ合金溶射, 亜鉛アルミ擬合金溶射, アルミ溶射)の合計 4 種類の金属皮膜の長期防食性能を明らかにすることを目的としている。

## 2. 実験手法

## 2.1 実験の概要

本実験では, 溶融亜鉛めっき, 亜鉛アルミ合金溶射, 亜鉛アルミ擬合金溶射, アルミ溶射の 4 種類の金属皮膜コーティングを実施した各 10 体の鋼板を用いて腐食促進実験

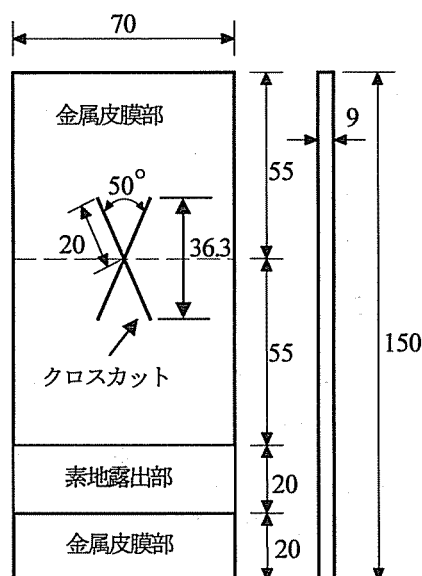


図-1 供試体の形状および寸法(単位: mm)  
(名古屋大学型ウェザロ供試体)

を行った。腐食促進実験環境としては、S6 サイクルの複合サイクル腐食促進実験条件(JIS K5621)を用いた。実験期間は300日間とし、実験中約25日毎に実験供試体を取り出し、外観変化および重量測定を行った。また、100日(1日4サイクルで合計400サイクル)、200日(800サイクル)および300日(1200サイクル)後には、それぞれ各3体、3体、4体の供試体の腐食生成物を除去し、残存金属皮膜

厚を測定した。

## 2.2 実験供試体の製作

製作完了後の供試体(名古屋大学型ウェザロ供試体)の形状および寸法を図-1に示す。実験供試体の製作工程の各段階における具体的な内容を以下に示す。

- ① JIS G3106 溶接構造用圧延鋼材 (SM490A)から縦150×横70×板厚9mmの鋼板を各10体の合計40体を製作した。比較供試体として③、④の防食処理および機械加工処理をしない裸鋼板供試体10体も製作した。
- ② 鋼板をブラスト処理することで素地調整を行った。素地調整後の表面粗度(Rz)は53.5~107.8μmであった。
- ③ 4種類の金属皮膜コーティング処理を実施した(各10体)。その工程を表-1に示す。3種類の溶射供試体の場合は、溶射処理前にマスキングテープを貼って溶射処理後テープを取り除くことによって供試体の下部には幅20mmの素地露出部を設けた。
- ④ 素地素材に達するようにクロスカット(線幅1mm、線長40mm)をエンドミル機械加工より設けた。また、溶融亜鉛めっき供試体は、ディスクグラインダーを用いてめっき皮膜を除去することで、溶射供試体と同様に供試体の下部には幅20mmの素地露出部を設けた。クロスカット部は、金属皮膜に傷が入った場合や角部などの皮膜が薄いと予想される部位に対する腐食劣化進行状態を把握するためであり、通常の塗装鋼板などの腐食実験で用いられている。また、本研究では、図-1に示すように供試体の下部には幅20mmの素地鋼板を露出させた<sup>4)</sup>

表-1 実験供試体の製作工程

防食法	処理工程	規格	処理内容	目標膜厚(μm)	供試体数
溶融亜鉛めっき	前処理	JIS H8641			10
	めっき処理	JIS H8641	めっき槽温度: 445±5°C(7~8分), 冷却槽温度: 50~60°C(約10秒)	100(550g/m <sup>2</sup> )	
亜鉛アルミ合金溶射(JIS工法)	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	10
	プライマー	-	無機ジンクリッチプライマー	(15)	
	2次素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	
	粗面化処理	-			
	溶射	-	亜鉛アルミ合金被覆(Zn70Al30)	100	
	封孔処理	-	エポキシ樹脂溶射被覆封孔塗料	-	
亜鉛アルミ擬合金溶射(MS工法)	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	10
	プライマー	-	無機ジンクリッチプライマー	(15)	
	2次素地調整	-	スリープブラスト(SIS-Sa1)	-	
	粗面化処理	-	低温溶射用塗布型粗面形成剤	-	
	常温溶射	-	亜鉛アルミ擬合金被覆(Zn70Al30)	100	
	封孔処理	-	ブチラール樹脂系溶射被覆封孔塗料	-	
アルミ溶射	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	10
	プライマー	-	無機ジンクリッチプライマー	(15)	
	2次素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	
	粗面化処理	-			
	溶射	-	アルミ被覆	100	
	封孔処理	-	エポキシ樹脂溶射被覆封孔塗料	-	
裸鋼材	素地調整		ブラスト SIS-Sa2.5		10
				合計	50

表-2 実験鋼材の化学成分(%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S
JIS G3106 SM490A	0.16	0.37	1.44	0.01	0.001

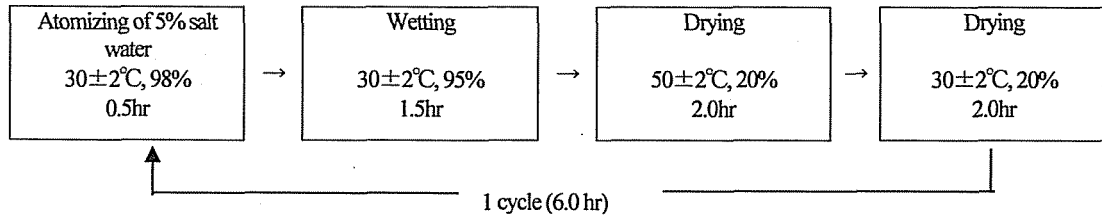


図-2 腐食促進実験の条件(S6 サイクル)

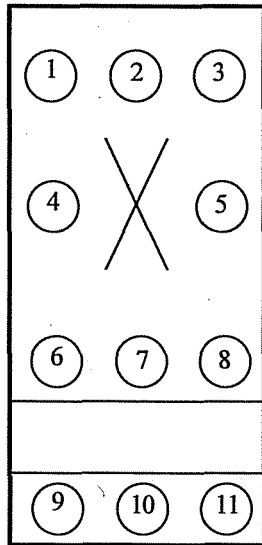


図-3 金属皮膜厚の測定位置

9.7. これは、金属皮膜の不連続部からの腐食劣化特性を検討するためである。このような金属皮膜の不連続部とは、鋼構造部材とコンクリートとの接触部、ボルトなどの接合部において、金属皮膜による再防食処理前の素地調整が困難である部位を想定している。素地鋼板の化学成分を表-2に示す。

### 2.3 腐食促進実験条件

本実験では、複合サイクル試験機(スガ試験機社製)を用いた。腐食促進実験条件としては、図-2に示すS6サイクル(JIS K5621)を用いた。このサイクルは5%濃度の塩化ナトリウム水溶液の噴霧、95%の湿潤および温度が異なる2種類の乾燥サイクルで構成されている。

実験供試体は、JISで規格化されている「鉛直線に対し $20\pm 5^\circ$ (JIS Z 2371)」に従って、鉛直方向から保持角15度で複合サイクル試験機の中に配置した。また、複合サイクル試験内の供試体配置位置は所定のサイクルごとにローテーションし、供試体の配置位置による環境条件の違いの最小化を考えた。

腐食促進実験は、100日間(各3体)、200日間(各3体)および300日間(各4体)行った。

表-3 初期金属皮膜厚の測定結果

金属皮膜の種類	皮膜厚( $\mu\text{m}$ )	
	平均	標準偏差
溶融亜鉛めっき	108.3	19.8
亜鉛アルミ合金溶射	154.5	23.5
亜鉛アルミ擬合金溶射	170.2	11.7
アルミ合金溶射	172.4	36.7

### 2.4 測定項目および測定の流れ

本実験の測定内容を以下に示す。測定はクロスカット部と素地露出部を有する面を対象とした。

#### (1) 実験前の測定

実験前の供試体に対しては、重量および金属皮膜厚の測定や外観写真撮影を行った。金属皮膜厚測定には、LZ-300C((株)ケツト製、分解度： $100\mu\text{m}$  未満 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 以上 $\pm 1.0\mu\text{m}$ )を用いて図-3に示す供試体表面の11箇所を測定した。実験前の金属皮膜厚の測定結果を表-3に示す。

#### (2) 実験途中の測定

腐食促進実験中には、25日(100サイクル)毎に供試体を取り出し、外観写真撮影および重量測定を行った。

#### (3) 塩分除去後あるいは白さび除去後の測定

実験開始後100日目には、各3体の供試体を取り出して表面の付着塩分を除去した後の写真撮影および重量測定を行った。また、200日目にも各3体、300日目にも各4体に対して同様の測定を行った。さらに、白さびなどの腐食生成物を除去した後、実験前と同様に写真撮影、重量および金属膜厚を測定した。白さびの除去はJIS Z 2371(塩水噴霧試験方法)の「試験後の試験片の取扱い」に従って行った。まず、供試体の表面に付着した塩化ナトリウムを除去するために供試体を常温 $15\sim 40^\circ\text{C}$ の水で洗浄し、直ちに乾燥させた。物理的に白さびだけを取り除くことは難しいので、化学的方法を用いることにした。化学的方法は、酢酸アンモニウム100gに蒸留水を加えて1000mlの溶液を作成し、溶液の温度を $70^\circ\text{C}$ に保ちながら供試体を5分間浸し、軟らかいブラシで擦って白さびを除去する方法である。しかしながら、300日目の供試体に対しては、白さびを完全に除去することは困難であった。

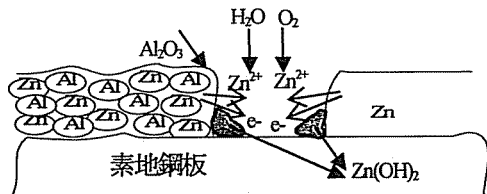
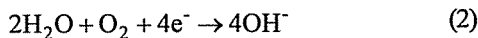
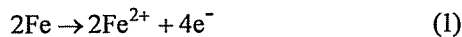


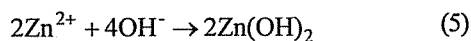
図-4 素地露出部を有する亜鉛皮膜の腐食

### 3. 金属皮膜の防食作用<sup>8)</sup>

鉄が水と酸素に接触すると、鉄がイオン化して溶出され(式(1)), 鉄が放出した電子が介在して、水と酸素が反応し水酸化イオンを生成する(式(2)). また、鉄イオンと水酸化イオンが反応して水酸化鉄(赤さび)が生成される(式(3)).



金属皮膜は、塗膜のように素地鋼材を被覆し、腐食環境を遮断する保護皮膜としての役割がある。また、金属皮膜は、鉄より電位が低くイオン化しやすいため、鉄がイオン化する前にイオン化し、電気化学的に鉄がイオン化するのを防ぐ犠牲陽極作用がある。つまり、図-4に示すように亜鉛めっき皮膜に傷がある場合、①亜鉛が放出した電子が介在して(式(4)), 水と酸素が反応し水酸化イオンが生成される(式(2)). ②亜鉛イオンと水酸化イオンが反応し、水酸化亜鉛(白さび)が生成される(式(5)). このように亜鉛を消費しながら素地鋼材をさびから守るため、亜鉛めっきの同一環境下における耐用年数は亜鉛付着量に比例するといわれている。亜鉛アルミ溶射皮膜の場合にも、②と同様に白さびが生成される。また、アルミは容易に酸化皮膜( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )を生成して亜鉛のカバー材として作用することで、亜鉛が過度にイオン化し溶出することを防ぐと同時に、水と酸素の透過を防ぎ、亜鉛の防錆効果を長期にわたり適正に保つといわれている。



## 4. 実験結果および考察

### 4.1 外観観察

本実験では、25日(100サイクル)ごとに供試体を取り出して外観写真撮影を行った。ここでは、その写真を用いてS6サイクル腐食促進実験条件下における4種類の金属皮膜の経時変化を比較・検討する。5種類の供試体の実験前、50日目、100日目、200日目、300日目およびさび除去後の外観を図-5に示す。図-5には、比較供試体として用いた裸鋼板供試体の外観変化も示す。

### 4.2 腐食生成物除去前の供試体の表面性状

#### (1) 裸鋼板供試体

図-5(a)に示すように、比較のために用いた裸鋼板供試体の場合は、実験開始後5日目にはほぼ全面が赤さびに覆われた。その後、10日目には全面に赤さび層が形成され、実験期間が経過するとさび層にはクレータのようなさび層のふくれが生成して拡大していった。また、新たなクレータも生成され、250日目になると赤さび層が一部剥がれ始めた。

#### (2) 溶融亜鉛めっき供試体

溶融亜鉛めっき供試体表面の経時変化を図-5(b)に示す。実験開始後25日目には、素地露出部以外の全表面は薄い白さび層で覆われ、表面の光沢がなくなった。その後、実験期間の経過とともに白さび層が徐々に厚くなった。150日目になると点状の赤さびが生成され、実験期間の経過とともに点状さびの生成が多くなった。クロスカット部は、白さびに覆われて50日目に部分的に赤さびが見られるようになったが、300日を経過してもここからのさびの広がりは見られなかった。

供試体下部の幅20mmの素地露出部では、その中央部に赤さび層が生成されたが、亜鉛皮膜の近辺では赤さびが生成しなかった。これは、3.で記したように鉄より亜鉛の方がイオン化されやすく、亜鉛皮膜近辺の鉄のイオン化が防止される犠牲陽極作用によるものと推測される。実験開始後150日目になると素地露出部の全面が赤さびで覆われた。図-5(b)に示すように、素地露出部と接する亜鉛めっき皮膜部においては、実験終了(300日)まで素地露出部の赤さびのめっき皮膜への侵食は見られなかった。

#### (3) 亜鉛アルミ合金溶射供試体

図-5(c)に示す亜鉛アルミ合金溶射供試体の場合は、実験開始から25日後に供試体の端部や素地露出部の境界部において部分的に白さびが生成し、100日目には溶射皮膜の全面が白さびに覆われた。その後、白さび層はふくれ始めて、200日目では供試体の端部の白さび層が剥がれ、素地鋼板の露出および赤さびの生成が部分的に見られた。また、300日目には、実験初期に白さびに覆われたクロスカット部以外のほぼ全表面から白さび層の剥がれおよび赤さびの生成が見られた。

素地露出部においては、その中央部から赤さびが生成し、溶射皮膜の方に広がった。実験期間が経過すると素地露出部は部分的に白さびに覆われた。素地露出部の上・下部の溶射皮膜部は、素地露出部のさび層により塩水が溜まりやすく、白さび層の生成が目立った。実験期間の経過とともに、素地露出上部の溶射皮膜上の白さび層はふくれ、剥がれ始めた。これとともに、100日目には赤さびが生成され、徐々に上部に広がった。300日目になると、この広がりにはクロスカット部あるいは供試体の下端まで達する場合もあった。

#### (4) 亜鉛アルミ擬合金溶射供試体

亜鉛アルミ擬合金溶射供試体の場合には、図-5(d)に示すように実験開始後50日目に素地露出部を含む全面が白さびで覆われた。実験開始後150日目に、赤さびが生成し、



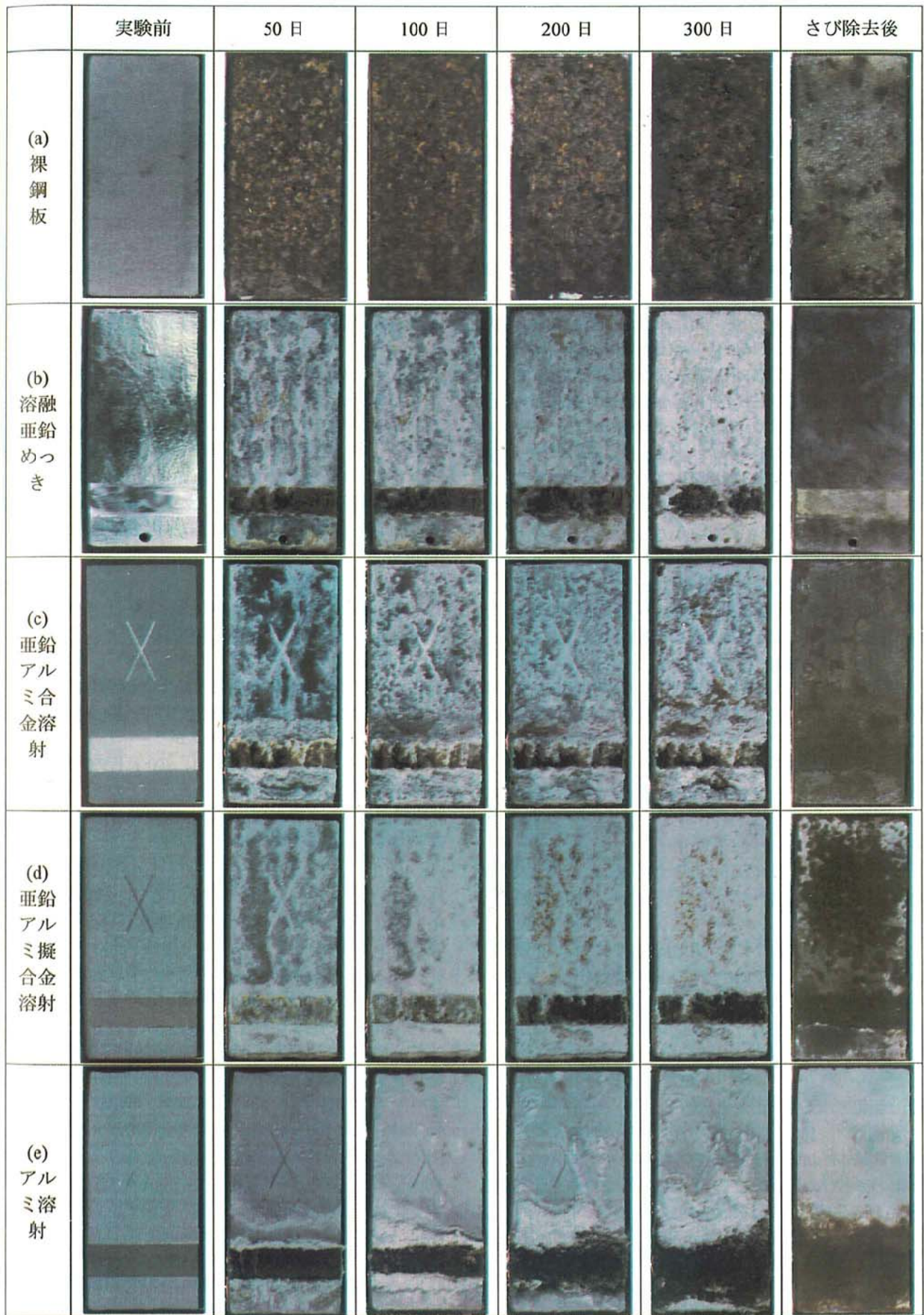


図-5 外観の経時変化

色見本



実験期間の経過とともにその面積は大きくなった。300日目では、クロスカット部および供試体の端部以外のほぼ全面にわたって赤さびが見られた。

素地露出部は、50日目までには白さびで覆われ、赤さびの生成は見られなかった。その後、部分的に赤さびが生成し、徐々に素地露出部の全面には赤さび層が生成された。300日目までには、素地露出部の上・下部の溶射皮膜における赤さびの生成はなく、素地露出部からの赤さびによる侵食も見られなかった。

#### (5) アルミ溶射供試体

アルミ溶射供試体の場合、図-5(e)に示すように、実験終了(300日)までにクロスカット部や皮膜一般部からの赤さびは見られなかった。素地露出部は、溶融亜鉛めっき供試体と同様に25日目には素地露出部の中央部のみ赤さびが形成され、100日目に素地露出部の全面が赤さびで覆われた。素地露出部の上・下部の溶射皮膜は、亜鉛アルミ合金溶射供試体と同様に、塩分が溜まりやすくなり、腐食が集中的に生じる傾向があった。150日目には、赤さびが見られ、その後、赤さびは素地露出部の上・下部の溶射皮膜にも広がった。

### 4.3 腐食生成物除去後の供試体表面性状

4種類の試験供試体は、100日目(各3体)、200日目(各3体)、300日目(各4体)で、それぞれの実験終了後白さびを除去した。以下にその外観観察の詳細を示す。

#### (1) 溶融亜鉛めっき供試体

実験開始後100日目および200日目の溶融亜鉛めっき供試体の場合、全面が白さびで覆われていたが、白さびを除去すると亜鉛めっき層が残っており、素地鋼材の露出は観察されなかった。また、クロスカット部からの赤さびの生成も見られなかった。素地露出部の上・下部の金属皮膜には、素地露出部からの侵食は見られず、実験前と同様の素地露出部に接するめっき皮膜が残っていた。

実験開始後300日経過後の供試体の場合には、化学的方法により白さびを完全に除去がすることが困難であったため、ディスクグラインダーで残りの白さび層を除去した。クロスカット部においては、素地露出線に沿って部分的に赤さび層が生成されていた。その以外の金属皮膜一般部からは、多数の点状の素地露出部(赤さびの生成)が確認された。素地露出部とめっき皮膜との境界部は、100日目および200日目と同様に素地露出部からの侵食は見られなかった。

#### (2) 亜鉛アルミ合金溶射供試体

実験開始後100日目および200日目後の亜鉛アルミ合金溶射供試体においては、白さびを除去しても、クロスカット部の赤さびの生成はなく、また一般部における素地露出(赤さびの生成)も見られなかった。300日目の供試体では、クロスカット部とその近辺から赤さびの生成が確認された。また、素地露出部と溶射皮膜の境界部は、素地露出上部の金属皮膜がなくなり、赤さびが上部に広がっていた。

#### (3) 亜鉛アルミ擬合金溶射供試体

亜鉛アルミ擬合金溶射供試体の場合、100日目の供試体

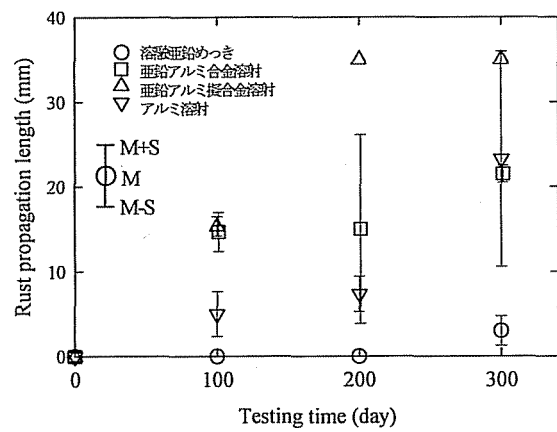


図-6 素地露出部からの赤さびの広がり(最大侵食距離)

からは、白さび除去後クロスカット部の周辺と素地露出上部の素地鋼板の露出(赤さびの生成)が確認された。また、200日目の供試体からはクロスカット部周辺の金属皮膜がほぼなくなり、粗面形成剤が露出していた。300日目の供試体では、ほぼ全面にわたって金属皮膜がなくなって素地鋼板の露出が見られた。しかしながら、素地露出部に接する溶射皮膜においては、素地露出部からの侵食は確認されなかった。

#### (4) アルミ溶射供試体

アルミ溶射供試体の場合、100日、200日、300日目の供試体と初期供試体との外観の違いはほとんどなく、全面に金属皮膜が残存していた。しかしながら、素地露出部の上・下部の溶射皮膜は、亜鉛アルミ合金溶射と同様に素地露出部と接する溶射皮膜が部分的になくなっていった。

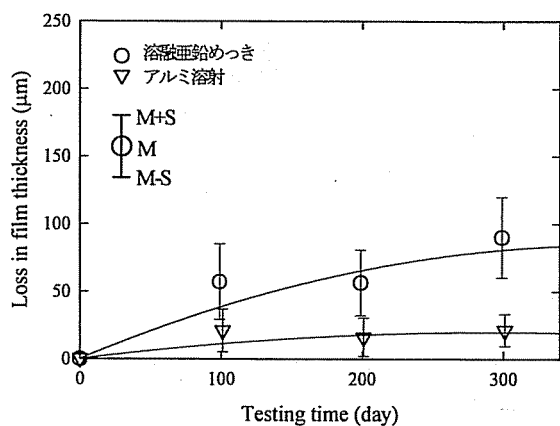
#### (5) 素地露出部からの赤さびの広がり

実験開始後100日目、200日目、300日目の試験供試体の白さび除去後、素地露出部と金属皮膜との境界線から金属皮膜がなくなり赤さびが広がった境界線までの最大距離を求め、その統計値を図-6に示す。ここで、最大距離は、100日目、200日目および300日目の試験供試体のそれぞれ3体、3体および4体の平均値(M)と標準偏差(S)である。300日目の亜鉛アルミ擬合金溶射供試体の場合には、境界部からの侵食とクロスカット部の下部に生じた赤さびがつながり、素地露出部からの侵食度を評価することが困難であったため、最大値は素地露出部の上端からクロスカット部までの距離である35mmとした。

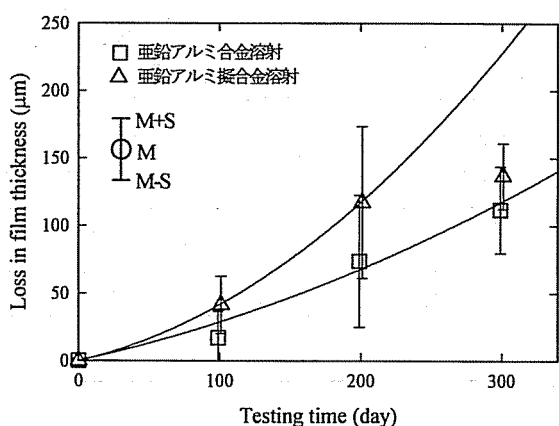
素地露出部からの侵食度は、溶融亜鉛めっき供試体が、最も小さく、実験開始後300日目では約2mm程度と非常に小さい。これに対して、アルミ溶射、亜鉛アルミ合金溶射、亜鉛アルミ擬合金溶射の順に侵食程度が大きくなった。例えば、300日目の最大値は、溶融亜鉛めっき供試体で3.0mmに対して、アルミ溶射は21.5mm(約7.2倍)、亜鉛アルミ合金溶射は23.3mm(約7.8倍)、亜鉛アルミ擬合金溶射は35mm(約11.7倍)と大きい。

### 4.4 金属皮膜厚の経時変化

白さびの除去後、電磁誘導/高周波渦電流式デュアルタイプ膜厚計を用いて金属皮膜厚さを計測し



(a) 溶融亜鉛めっきおよびアルミ溶射供試体



(b) 亜鉛アルミ合金溶射および擬合金溶射供試体

図-7 金属皮膜厚の経時変化(一般部)

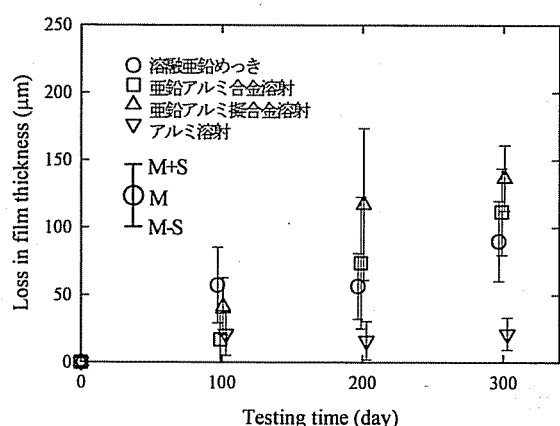


図-8 平均皮膜厚減少量の比較(一般部)

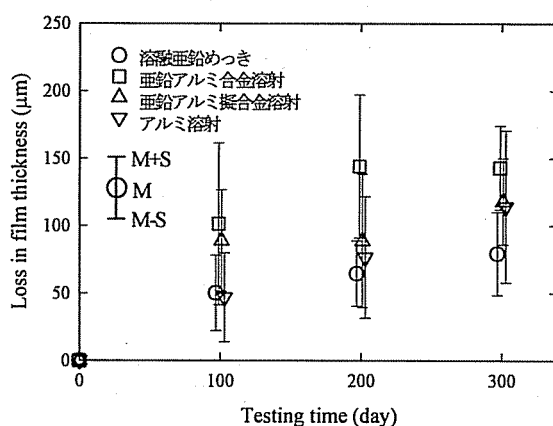


図-9 金属皮膜厚減少量の比較(境界部)

た。計測は図-3に示す11点において行った。ここで、クロスカット部や素地露出部の影響のないと思われる計測点①~⑤を金属皮膜の一般部とし、計測点⑥~⑩を素地露出部との境界部として整理する。

#### (1) 一般部の皮膜厚減少量

100日、200日、300日目の供試体、それぞれ3体、3体、4体における一般部の平均膜厚減少量(M)およびその標準偏差(S)を図-7に示す。また、それぞれの近似曲線を2次関数で求めて実線で示す。

図-7(a)に示すように溶融亜鉛めっき供試体およびアルミ溶射供試体の場合には、100日目まではそれぞれ0.57および0.21  $\mu\text{m}/\text{day}$ で皮膜厚が減少したが、その後減少量は小さくなった。溶融亜鉛めっき供試体の場合は、前述したように100日を経過すると供試体表面は白さびで覆われ、亜鉛めっき層へ水と酸素の供給が部分的に抑制されることで、徐々に金属皮膜の減少量が小さくなったと思われる。

図-7(b)に示すように、亜鉛アルミ合金および擬合金溶射供試体の場合、実験期間の経過とともに皮膜厚減少量は徐々に大きくなった。これは、溶融亜鉛めっきと同様に供試体表面は白さびに覆われるが、その後実験期間が経過すると白さび層は剥がれ、

水と酸素の供給は抑制されず、塩水が溜まりやすくなり湿潤の期間が長くなったことに起因するとと思われる。亜鉛アルミ擬合金溶射の場合は、実験開始後300日目には皮膜厚が部分的になくなって素地鋼板が露出した。したがって、表-3に示す初期皮膜厚170  $\mu\text{m}$ 以上の膜厚減少は測定できないので、300日目の膜厚減少の平均値は参考値として示し、近似曲線の計算にも含めなかった。

4種類の供試体の一般部における皮膜厚の平均減少量(M)および標準偏差(S)を図-8に示す。データのプロットは比較しやすいように、実験期間を少しだけずらして示した。200日目および300日目の皮膜厚は亜鉛アルミ擬合金溶射、亜鉛アルミ合金溶射、溶融亜鉛めっき、アルミ溶射の順に小さくなった。200日目のアルミ溶射供試体の皮膜厚減少量に比べて、亜鉛めっき供試体は約3.5倍、亜鉛アルミ合金溶射供試体は約4.6倍、亜鉛アルミ擬合金溶射供試体は約7.3倍と大きくなった。

#### (2) 境界部の皮膜厚減少量

図-3に示す測定位置⑥~⑩の皮膜厚の平均減少量(M)およびその標準偏差(S)を図-9に示す。ただし、亜鉛アルミ合金溶射およびアルミ溶射供試体では、300日目に測定点において皮膜がなくなった



表 - 4 皮膜残存率

金属皮膜の種類	皮膜残存率 10%までの推定 実験期間(日)	赤さびの生成確認	
		実験期間(日)	皮膜残存率(%)
熔融亜鉛めっき	360	150(41)*	62(67)**
亜鉛アルミ合金溶射	340	200(59)*	56(86)**
亜鉛アルミ擬合金溶射	230	150(65)*	56(95)**
アルミ溶射	2640	-	-

(\*)\*内の数値は推定実験期間に対する割合(%)。  
 (\*\*)\*内の数値は皮膜残存率に相当する皮膜厚(μm)。

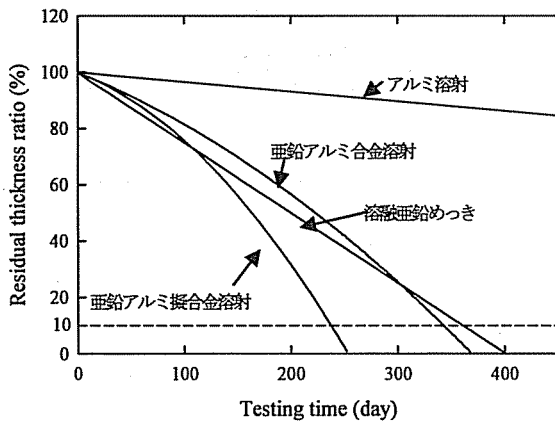


図-10 皮膜残存率

部分があり、これらは参考値として示す。

亜鉛めっき供試体では、一般部の皮膜厚と同様に100日目までは急速に減少するが、その後、減少量は小さくなった。このような傾向は亜鉛アルミ擬合金溶射供試体においても見られた。亜鉛アルミ合金溶射およびアルミ溶射供試体の皮膜厚減少量は、200日目までほぼ線形的に大きくなった。防食法の違いにより200日目の皮膜厚減少量を比較すると熔融亜鉛めっき供試体が最も小さく、これに比べて、アルミ溶射で約2.2倍、亜鉛アルミ擬合金溶射で約1.4倍、亜鉛アルミ合金溶射で約1.2倍と大きくなった。

(3) 皮膜残存率

初期皮膜厚を100としたときの、ある実験期間後の残存皮膜の割合(皮膜残存率)を図-10に示す。初期皮膜厚さは実験前の測定結果の平均値(表-3)を、供試体の皮膜厚の減少量は各供試体から求めた近似曲線を用いた。ただし、熔融亜鉛めっき供試体およびアルミ溶射供試体は、線形的に減少すると仮定し、線形の近似直線を用いた。

文献9)に示されているように、一般に金属皮膜の寿命は、皮膜が劣化し、初期膜厚の90%がなくなるまでの期間としている。すなわち、皮膜残存率10%までの期間となる。4種類の金属皮膜について、金属皮膜一般部の皮膜残存率10%までの実験期間の推定結果を表-4に示す。また、一般部において赤さびの生成が確認された時の実験期間およびその時の皮膜残存率も示す。皮膜残存率10%までの

推定実験期間は、亜鉛アルミ擬合金供試体で約230日、亜鉛アルミ合金溶射供試体で約340日、亜鉛めっき供試体で約360日、アルミ溶射供試体で2640日の順に長くなった。

赤さびの生成は、熔融亜鉛めっきで約41%、亜鉛アルミ合金溶射で約59%、亜鉛アルミ擬合金溶射で約65%と皮膜残存率10%までの推定実験期間の約半分前後で確認された。そのときの皮膜残存率はそれぞれ約62%、56%および56%であった。つまり、赤さびは、推定寿命の約半分の前後で生成され始めると推定される。また、亜鉛めっきでは約67μm、亜鉛アルミ合金溶射で約86μm、亜鉛アルミ擬合金溶射で約95μmの平均皮膜が残存する時期から赤さびが生成されることになった。

5. 結論

本研究では、長期間(300日間)の腐食促進実験を行い、鋼橋防食法として用いられる熔融亜鉛めっき、亜鉛アルミ合金溶射、亜鉛アルミ擬合金溶射およびアルミ溶射の合計4種類の金属皮膜の腐食劣化特性を明らかにした。本実験では、腐食促進実験条件としてS6サイクルを用いて、実験開始後100日目に各3体、200日目に各3体、300日目に各4体の供試体を取り出し、外観の経時変化を検討した。また、白さび除去後の外観の変化および金属皮膜厚の減少量も検討した。

以下に本実験から得られた主な結果を示す。

- 1) 熔融亜鉛めっき、亜鉛アルミ合金溶射、亜鉛アルミ擬合金溶射およびアルミ溶射の4種類の金属皮膜におけるクロスカット部、金属皮膜部、素地露出部の白さび層の生成、剥がれや赤さびの生成などの腐食劣化特性の経時変化を明らかにした。
- 2) 実験開始後300日経過したクロスカット部においては、金属皮膜の犠牲陽極作用により、素地鋼板の腐食による赤さびの生成および侵食は見られなかった。
- 3) 実験供試体の下部に設けた幅20mmの素地露出部から金属皮膜への最大侵食距離は、熔融亜鉛めっきの場合には、ほとんどなく、アルミ溶射、亜鉛アルミ合金溶射、亜鉛アルミ擬合金溶射の順に大きくなった。
- 4) 金属皮膜の一般部における金属皮膜厚の平均減少量は、アルミ溶射が最も小さく、熔融亜鉛めっき、亜鉛アルミ合金溶射、亜鉛アルミ擬合金溶射の順に大きく



なった。また、初期皮膜の90%がなくなるまでの推定実験期間もアルミ溶射で2640日、溶融亜鉛めっきで360日、亜鉛アルミ合金溶射で340日、亜鉛アルミ合金溶射で230日と同じ順に短くなった。また、赤さびは、溶融亜鉛めっきでは67 $\mu$ m、亜鉛アルミ合金溶射では86 $\mu$ m、亜鉛アルミ合金溶射では95 $\mu$ mだけ残存している時期から確認された。

- 5) 金属一般部における外観の経時変化および皮膜厚の減少量の比較からは、本研究で用いた4種類の金属皮膜の中でアルミ溶射が最もよい防食性能を示した。ただし、金属皮膜不連続部(素地露出部)において、その防食性能が劣る場合があった。

本研究では、腐食促進実験条件下における4種の金属皮膜の腐食劣化特性について検討した。今後、腐食促進実験条件と実環境との相関性をさらに検討し、実環境下のライフサイクル評価への適用をはかりたい。

#### 謝辞

供試体の製作などにおいて、横河ブリッジの寺尾圭史氏および小山明久氏よりご協力を頂いた。なお、本研究の一部は、平成14、15、16年度文部科学省科学研究費補助金・基礎研究(B)(2)(研究代表者：伊藤義人、課題番号：1560237)として研究補助を受けて行ったものである。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，1990.
- 2) 建設省土木研究所：耐候性鋼の橋梁への適用に関する共同研究報告(XV)，1992.
- 3) 伊藤義人，岩田厚司，貝沼重信：鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1021-1029，2002.
- 4) 伊藤義人，金仁泰，貝沼重信，門田佳久：素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.766/I-68，pp.291-307，2004.
- 5) 伊藤義人，金仁泰，太田洋，貝沼重信：鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.49A，pp.707-715，2003.
- 6) 藤原博，田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，土木学会論文集，No.570/I-40，pp.129-140，1997.
- 7) 高橋定明，守屋進：塗膜の複合環境促進試験条件の検討，防錆管理，pp.343-349，2003.
- 8) 防錆・防食技術総覧編集委員会：防錆・防食技術総覧，pp.637-654，(株)新協，2000.
- 9) 深沢誠，大田孝二：錆びない鋼(その2)耐腐食性金属材料，橋梁と基礎，95-11，pp.35-42，1995.
- 10) Almedia, E. and Morcillo, W.: Lap-joint corrosion of automotive coated materials in chloride media. Part I - Electroplated steel, Surface and Coating Technology, Vol. 124, pp.169-179, 2000.
- 11) 植野修一：海岸地帯において設置後25年経過したアルミニウム溶射鋼橋の観察報告，防錆管理，pp. 163 - 168，2004.
- 12) 平崎敏史，濱田秀則，阿部正美，月岡泰夫，西山正敏：溶融Alめっきの海洋環境下における暴露試験結果，防錆管理，pp. 244-249，2004.
- 13) (社)日本溶融亜鉛鍍金協会：亜鉛めっき鋼材の耐食性，鉛と亜鉛，第213号，pp.27-35，2000.
- 14) 和泉聡，大杉隆弘，藤原繁郎，高野嘉彦，原田廣美，多田恭弘：北陸自動車道および近畿自動車道における溶融亜鉛めっき橋梁の追跡調査，橋梁と基礎，No.5，pp.13-19，2000.
- 15) 藤原博：溶融亜鉛めっき面への補修塗装系の検討，日本道路公団技術情報，No.126，pp.92-97，1995.
- 16) 前田博，中川泰宏，古川浩史，稲田和典：新厚東川(仮称)における溶射仕様の検討について，防錆管理，pp.10-16，2004.

(2004年9月17日受付)