

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

Preliminary Accelerated Exposure Tests of Corrosion Durability Estimation for Steels

伊藤義人*, 金 仁泰**, 太田 洋***, 貝沼重信****
Yoshito ITOH, In-Tae KIM, Hiroshi OHTA, Shigenobu KAINUMA

*工博 名古屋大学教授 附属図書館長 理工科学総合研究センター(〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

**博士(工学) 名古屋大学研究員 理工科学総合研究センター(同上)

***工修 東海旅客鉄道株式会社 前名古屋大学大学院生(〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1)

****博士(工学) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

Corrosion damages seriously affect durability of structural steel members, and corrosion deterioration is one of the most important issues in maintenance and rehabilitation of steel bridges. Field exposure tests are often used for evaluating environmental durability for steel members, but they need a long time of testing. In this study, using accelerated exposure tests, three sets of preliminary tests are carried out. From the test results, the arrangement of test specimens in two types of accelerated exposure testing instruments and the relationship between the two instruments are confirmed. Corrosion deterioration characteristics of uncoated and/or various coated steel plates are also experimentally investigated.

Key Words: accelerated exposure test, steel, corrosion, combined cyclic test

キーワード: 環境促進実験, 鋼材, 腐食, 複合サイクル実験

1. まえがき

鋼橋の架替え理由の内訳およびその上部構造の損傷の原因は、図-1に示すように17%が上部構造の損傷であり、その内約半分が鋼材の腐食である^{1),2)}。一般に改良工事や機能上の問題は寿命に関係なく行われると言われている。したがって、橋梁架替え理由の中からそれらを除いた41%の内の17%が上部構造の損傷であり、さらにその半分、すなわち性能劣化による架替え理由の約4分の1が鋼材の腐食劣化に相当する。このように腐食は図-1(b)に示すように上部構造の損傷による架替え理由の大部分を占めており、橋梁の維持管理において腐食の重要性は広く認識されている。

腐食環境下における構造部材の腐食耐久性や寿命を実験的に求める方法として大気暴露実験が一般的に用いられている³⁾。大気暴露実験は、実際の劣化を追うことはできるが、結果を得るま

でに多くの時間を必要とするという欠点がある。そのため、大気暴露実験を補完あるいは代替する実験方法として、環境促進実験が材料の分野を中心として開発されてきた。土木分野においては建設省土木研究所、通産省によるDS、S6などの促進腐食実験条件が既存の実験条件として用いられてきた。また、これらの実験条件に対して、塗装鋼板を用いて大気暴露実験との相関性が確認されている⁴⁾。

著者らは、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橋梁の維持管理を考えたライフサイクル評価を行うことを長期的な目的として、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。文献5)で、裸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な研究成果を明らかにしている。

本研究では、各種の防食された鋼材の防食性能を環境促進実験で本格的に評価するための前段階として実験手法を確立し実験精度を明確にするためのパイロット実験を行った。普通鋼および耐候性鋼について、種々の防食処理した鋼材の基本的な劣化特性を得るための10種類以上の供試体を用いた短期的な環境促進実験を行った。

本論文では、a) 実験の正確性・信頼度を求めるための環境促進実験装置の違いおよび供試体の配置の違いにより生じる誤差の確認促進実験、b) 裸鋼板、防食処理(さび安定化処理、塗装、溶射)鋼板の短期間劣化特性を把握するための塩水噴霧および酸性雨噴霧複合サイクル促進実験、c) 普通鋼および耐候性鋼の経時的な重量および腐食面積の変化を追跡するための促進実験、の計3種類の実験とその結果を報告する。本研究において、通常行われ

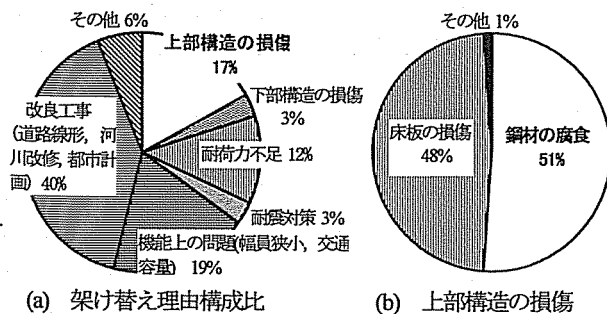


図-1 道路橋(鋼橋)の架け替え理由の調査結果¹⁾

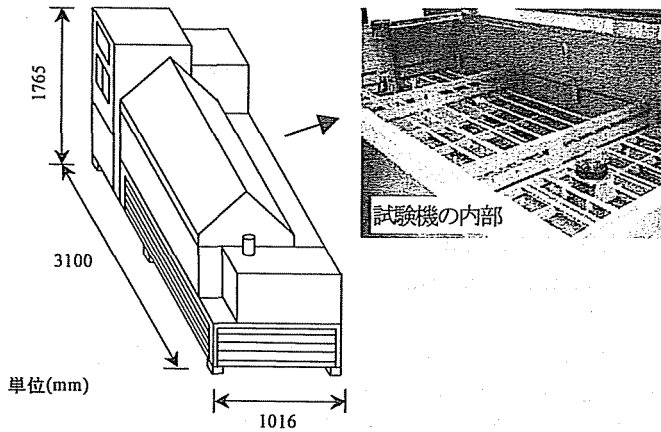


図-2 複合サイクル試験機

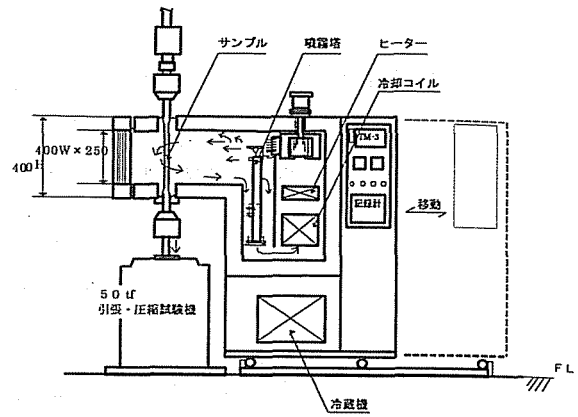


図-3 実応力作用環境試験槽

表-1 環境促進実験装置の性能⁹⁾

実験条件		複合サイクル試験機	実応力作用環境試験槽
塩水噴霧条件	噴霧方式	噴霧塔方式(ミストマイザ内蔵)	
	塩濃度	5%中性塩水	5%中性塩水, 人工酸性雨
	噴霧量	試料位置に於いて 1~2 ml/80cm ² /h (at 35 °C)	
	噴霧圧力	0.098 MPa ± 0.0025 MPa	
	実験温度	35°C~50°C ± 1°C	
乾燥条件	乾燥方式	吸気弁を開けて外気を導入し, 温度を温度調整装置で調節する	
	温度調節範囲	(RT+10°C)~ 50°C ± 1°C	(RT+10°C) ~ 70°C ± 1°C
温湿度条件	温度調節範囲	50°C ~ 70°C ± 1°C	
	湿度範囲	60%RH ~ 95%RH ± 5%RH	
低温条件	温度調節範囲	—	-10°C ~ 20°C ± 1°C
静的・動的裁荷	最大荷重	—	±50tf
	ストローク	—	±160mm
実験槽内寸法	幅×奥行×高さ(mm)	2000×1000×500	450×835×300

ない酸性雨噴霧複合サイクル実験を行った理由は、我国における降水中の硫酸イオンが中国等で大量に使用されている石炭燃焼によりもたされている可能性が大きいと指摘されており^{7), 8)}、今後、酸性雨による鋼材、溶射防錆などの劣化特性を明確にしておく必要があると考えたからである。

2. 実験概要

2.1 実験装置

本研究で行った3種類の実験では、図-2, 3に示す複合サイクル試験機および実応力作用環境試験槽(スガ試験機社製)を用いた。これらの装置の性能を表-1に示す。複合サイクル試験機は、塩水噴霧条件、温湿度条件、乾燥条件を任意の順序・組み合わせによって自動サイクル運転することができる装置である。実験槽内の寸法は、幅2,000×奥行1,000×高さ500mmであり、最大設置枚数はウェザロサイズ供試体(150×70×6mm)で188枚である。

実応力作用環境試験槽は、環境試験槽とMTS材料試験機を組み合わせたものであり、環境試験槽は複合サイクル試験機とはほぼ同様の性能を有している。実験供試体に引張および圧縮などの応

力を加えながら、塩水および酸性雨噴霧などの環境促進実験を行うことができる。ただし、今回は環境試験槽とMTS材料試験機を離して環境試験槽のみを利用した。実験槽内はチタンでコーティングされているため、酸性溶液等を用いた噴霧実験を行うことができる。環境試験槽内の寸法は、幅450×奥行835×高さ300mmであり、最大設置枚数はウェザロサイズ供試体で16枚である。

2.2 環境促進実験の複合サイクル条件^{4), 5), 9)-12)}

従来、塗装の長期防食性能を推定する実験方法として、1928年にDr.Cappによって紹介され、その後ASTM, ISO, JISの各規格によって採用された塩水噴霧実験が用いられてきた。しかし、塩水噴霧実験は単に品質管理にのみ用いられた実験方法であり、暴露実験結果との相関性は低いと言われてきた。そこで、自動車協会では塩水噴霧、湿潤、乾燥などの条件をサイクリックに行う複合腐食実験が開発され、既に自動車工業統一規格(JASO)として用いられてきた。一方、土木分野においては、1980年頃に建設省土木研究所によって新たな促進腐食実験条件(DS)が開発された。この他にも、通産省による油性さび止め塗料用の実験条件(S6)や海浜暴露実験との相関性が高いと言われていた実験条件(ASTM)が既存の実験条件として用いられてきた。

表-3 鋼材の化学成分 (%)

鋼種		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V
		×100	×100	×1000	×1000	×100	×100	×100	×100	×100
普通鋼材 (SM490A)	高炉材	16	32	131	10	2	—	—	—	—
	電炉材	12	25	131	19	5	10	6	6	—
耐候性鋼材 (SMA490AW)	高炉材	13	45	86	14	8	32	11	48	6
	電炉材	15	49	113	18	15	34	25	53	—

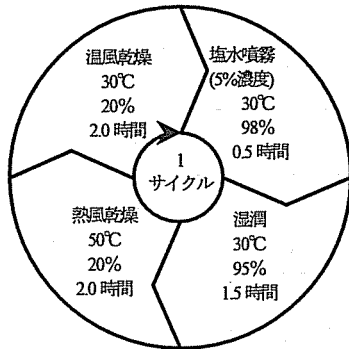


図-4 S6 サイクル条件

表-2 人工酸性雨溶液(pH3.5)の組成

試薬	使用量
5%中性塩化ナトリウム(NaCl, pH7)	10(l)
10%硝酸(HNO ₃)	73.2 (ml)
98%硫酸(H ₂ SO ₄)	16.94 (ml)
10%水酸化ナトリウム(NaOH)	適量

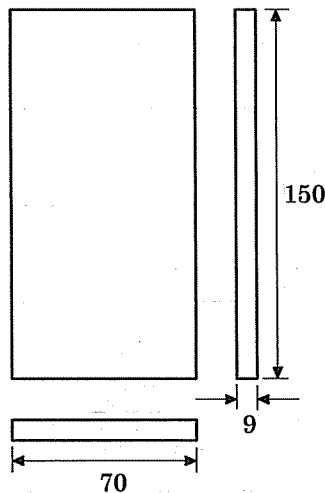


図-5 実験供試体の寸法(mm)

これらの実験条件に対して、藤原ら⁴⁾は大気暴露実験との相関性を確認するために、塗装鋼板を用いた実験を行った。また、大気暴露3年間と促進腐食実験2ヶ月間の相関性を検討した。この結果、藤原らはS6サイクルを実用的な促進腐食実験条件として提案した。そこで、本研究においても促進腐食実験条件としてS6サイクルを用いることとした。

2.3 実験方法

(1) 二つの複合サイクル実験条件

塩水噴霧複合サイクル促進実験(以下、塩水サイクル実験と呼ぶ)には、前述の2種類の実験装置を用いた。また、酸性雨噴霧複合サイクル促進実験(以下、酸性雨サイクル実験と呼ぶ)には、環境試験槽を用いた。図-4に本実験で用いた塩水サイクル実験条件(S6)を示す。

酸性雨サイクル実験の実験条件は噴霧溶液に人工酸性雨を使う以外はS6サイクル実験条件と同様である。酸性雨サイクルに使用する人工酸性雨溶液の組成を表-2に示す。この人工酸性雨

溶液は、酸性雨には必ず硫酸イオン(SO₄²⁻)と硝酸イオン(NO₃⁻)が含まれており、その組成を参考に須賀¹³⁾によって開発された人工酸性雨溶液である。pHが3.5となっているのは3.0, 3.5, 4.0の3種を比較した場合、促進実験の繰り返し再現性をよくする点でpH3.5のものが最も適切であったことによる¹³⁾。本研究で用いた人工酸性雨溶液は5%塩化ナトリウム溶液に硫酸・硝酸の規定量を少しずつ混ぜ、その後pHを10%水酸化ナトリウム溶液により調整することで作成した。

供試体の配置角度については、JIS¹⁴⁾で規格化されている「鉛直線に対し20±5°(JIS Z 2371)」に従って、鉛直方向から保持角15度で配置した。

(2) 実験の測定方法

本実験は、a)供試体の写真撮影および重量や板厚などの実験前測定、b)環境促進実験、c)表面性状の観察および写真撮影、d)化学薬品溶液中の煮沸によるさび取り、e)供試体の写真撮影および実験後測定の手順を行った。供試体表面に生成されたさびを物理的に除去することは、一般に非常に難しい。本実験ではチオ尿素(CH₄N₂S)とクエン酸二アンモニウム(C₆H₄N₂O₇)を用いて煮沸した。その後、容器から供試体を取り出し、毛先の柔らかいブラシで供試体を擦りさびを除去した。また、さびを取った後、デシケータ内で乾燥させ供試体表面の水分を除去した。

アルミ溶射、亜鉛溶射、亜鉛アルミ溶射はいわゆる「白さび」を生じる場合がある。現在、白さびのみを化学薬品によって除去する方法はなく、ディスクサンダーやブラストで除去するのが一般的である。しかし、この方法では、溶射表面を傷つけるため、本実験では水洗いおよび重曹で磨き取ることにした。

2.4 供試体の製作および実験内容

これまでに行われてきた環境促進実験では、一般に縦150×横70×幅1.6~3.2mmの供試体がい用いられており、本実験においても縦と横のサイズについてはこの値を採用することとした。なお、板厚に関しては図-5に示すように道路橋示方書において規定されている鋼材の最小板厚8mmを考慮した上で、板厚9mmの供試体を用いることとした。

本実験では、JIS規格の普通鋼(SM490A)の高炉材(43体)および電炉材(13体)を実験供試体として製作した。また、耐候性鋼(SMA490AW)の高炉材(38体)および電炉材(34体)の供試体も製作した。鋼材の化学成分を表-3に示す。すべての供試体はグリットブラストあるいはショットブラストによって表面処理を行った。このうち、3.で詳述する実験装置の精度確認実験では、表-4に示すようにブラスト処理したままの普通鋼材6体および耐候性鋼材28体を用いた。4.で詳述する鋼材の防食特性を把握するための塩水および酸性雨サイクルによる防食特性に関する促進実験

表-4 実験装置の精度確認実験(塩水サイクル実験-240 サイクル)

供試体の鋼種		表面処理	供試体数	
			複合サイクル試験機	環境試験槽
普通鋼	高炉材	素地調整(グリットブラストのみ)	-	3
	電炉材	〃	-	3
耐候性鋼	高炉材	〃	11	3
	電炉材	〃	11	3
合計			22	12

表-5 防食特性に関する促進実験(塩水あるいは酸性雨サイクル実験-120 サイクル)

供試体の鋼種		表面処理	供試体数	
			複合サイクル試験機	環境試験槽
普通鋼	高炉材	素地調整(ショットブラストのみ)	8	2
	電炉材	〃	8	2
耐候性鋼	高炉材	〃	8	2
	電炉材	〃	8	2
さび安定化処理 耐候性鋼	高炉材	カプテンコート(さび安定化処理)	8	2
	電炉材	〃	8	2
アルミ溶射	普通鋼	常温溶射, 平均厚膜: 180 μm	3	2
		常温溶射 → 塗装, 平均厚膜: 180 μm, 封孔処理	3	2
亜鉛アルミ溶射	普通鋼	常温擬合金溶射, 平均厚膜: 150 μm, 亜鉛: アルミ=53:210	3	2
		常温擬合金溶射, 亜鉛: アルミ=53:210 → 塗装, 平均厚膜: 150 μm, 封孔処理	3	-
亜鉛溶射	普通鋼	常温溶射 平均厚膜: 160 μm	3	2
		常温溶射 → 塗装, 平均厚膜: 160 μm, 封孔処理	3	-
合計			66	20

表-6 腐食特性の経時的な変化に関する促進実験(塩水サイクル実験-120 サイクル)

供試体の鋼種		表面処理	供試体数
			複合サイクル試験機
普通鋼	高炉材	素地調整(グリットブラストのみ)	4
耐候性鋼	高炉材	〃	4
合計			8

で用いた供試体の詳細を表-5 に示す。ブラスト処理したままの普通鋼材 20 体および耐候性鋼材 20 体、さび安定化処理した耐候性鋼材 20 体を用いた。また、普通鋼材にアルミ溶射、亜鉛アルミ溶射、亜鉛溶射の防食処理した供試体 15 体、普通鋼に溶射処理した後塗装した供試体 16 体も用い、合計 86 体の供試体を用いた。5. で詳述する経時的な腐食重量および腐食面積の変化を追跡するための促進実験では、表-6 に示すようにブラスト処理したままの普通鋼材 4 体および耐候性鋼材 4 体の供試体を用いた。

3. 環境促進実験装置の精度確認実験

3.1 実験方法

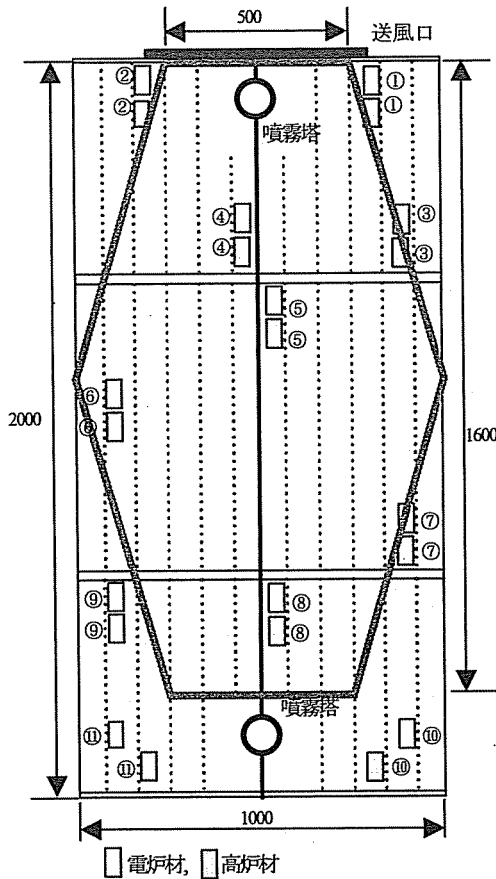
一般に、環境促進実験では実験装置内の供試体の配置場所により、腐食減少量が 40~50%程度ばらつくと言われている。また、4. に後述する環境促進実験からもこのような現象が確認された

ため、実験装置内において供試体の配置による誤差や本研究で用いられた 2 種類の促進実験装置の違いによる腐食度の誤差の確認実験を行った。本実験では表-4 に示すようにグリットブラストで素地調整を行った普通鋼 6 体(高炉材 3 体、電炉材 3 体)および耐候性鋼 28 体(高炉材 14 体、電炉材 14 体)の合計 34 体の供試体を用いた。これらの供試体は図-6(a), (b)に示すように複合サイクル試験機および環境試験槽内の全体的に配置した。実験条件としては、塩水噴霧サイクル(S6)であり、その期間は一律 240 サイクル(60 日間)とした。

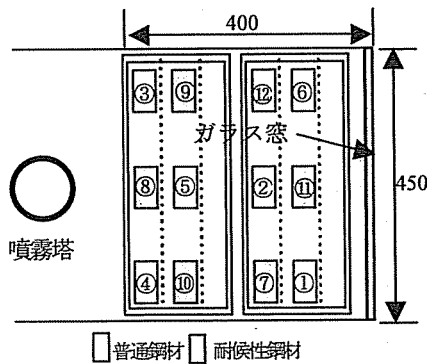
3.2 供試体の配置による誤差

(1) 複合サイクル試験機

本実験では耐候性鋼材の単位面積あたりの重量減少量(kg/m²)によって、複合サイクル試験機内の配置による誤差を比較検討した。供試体の各配置場所に対する重量減少量、平均値、標準偏差、



(a) 複合サイクル試験機



(b) 環境試験槽

図-6 供試体の配置図(単位: mm)

および変動係数を表-7に示す。また、供試体の位置と重量減少量の関係図を図-7に示す。ここで、表-7および図-7中の①~⑪は、図-6(a)に記されている供試体の配置位置を示す①~⑪に対応している。

表-7より、重量減少量の変動係数が高炉材で26.9%、電炉材で19.0%と双方とも大きく、実験機内での重量減少量のばらつきは大きいと言える。供試体の配置の違いによる重量減少量の最大値/最小値は約2程度と大きい場合もある。表-7および図-7から、高炉材および電炉材ともに⑨、⑩、⑪における重量減少量が大きいことが分かる。送風口から距離が離れている供試体ほど腐食減少量が大きいという傾向がみられる。これは、送風口からの距離が遠いほど、供試体表面が乾燥するまでの時間が長く、その結果として、供試体表面の湿潤時間が長くなっていることに起因

表-7 供試体位置による重量減少量(kg/m²)

配置場所	耐候性鋼の高炉材		耐候性鋼の電炉材		
	重量減少量	備考	重量減少量	備考	
①	0.96	平均値	1.13	平均値	
②	1.00		0.96	1.28	
③	1.00		[1.00]	[1.17]	
④	0.83	標準偏差	1.31	標準偏差	
⑤	0.95		0.95		0.24
⑥	1.14		[0.10]		[0.15]
⑦	1.16	変動係数	1.36	変動係数	
⑧	0.95		1.19		19.0%
⑨	1.45		1.43		12.8%
⑩	1.58	[10.0%]	1.85	[12.8%]	
⑪	1.90		1.48		

[]内の数値は①~⑧の結果のみを用いた値である。

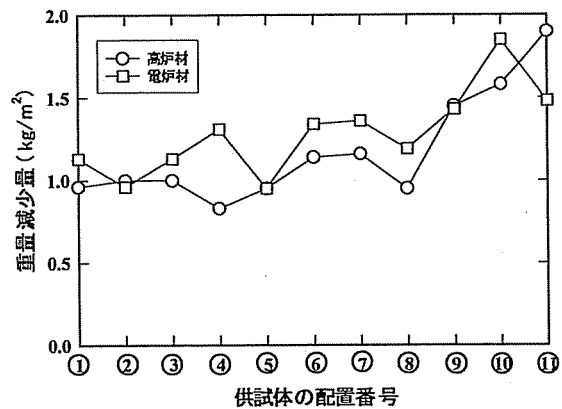


図-7 配置位置と腐食重量減少量

すると考えられる。

次に、重量減少量のばらつきが大きい⑨、⑩、⑪の結果を除き、①~⑧の結果のみを用いて平均値、標準偏差、および変動係数を算出した。その結果を、表-7の[]内に示す。変動係数は高炉材で10.0%、電炉材で12.8%と全体での結果と比して40~70%程度小さくなっている。

以上の結果より、図-6(a)に示す太い実線の領域内では、変動係数10%程度の精度の高い実験を行うことができるものと考えられる。

(2) 環境試験槽

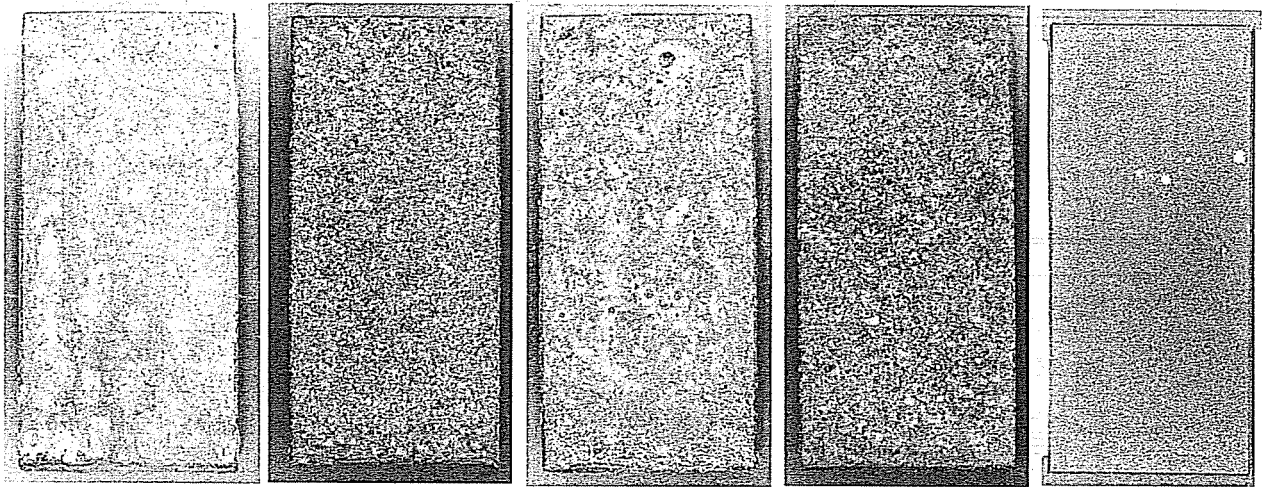
環境試験槽における、普通鋼材および耐候性鋼材の重量減少量、平均値、標準偏差、および変動係数を表-8に示す。ここで、表中の配置場所の欄に記述されている①~⑪は、図-6(b)に記されている供試体配置図の①~⑪に対応している。

表-8より、それぞれの鋼種に対する変動係数が22.9~42.6%と大きく、供試体の配置位置によるばらつきが非常に大きいと言える。中でも、噴霧塔からの距離が遠い①、⑥、⑪の重量減少量が同じシリーズの他の2枚と比して1.5~2.5倍ほど大きい。一方、実験装置の中心線付近に配置された⑤、⑧については同じシリーズの他の2枚と比して重量減少量は小さい。以上の結果より、環境試験槽についても複合サイクル試験機と同様に乾燥風による影響が大きいと考えられる。さらに、複合サイクル試験機のように、場所による傾向を検討することが困難であるため、実験を

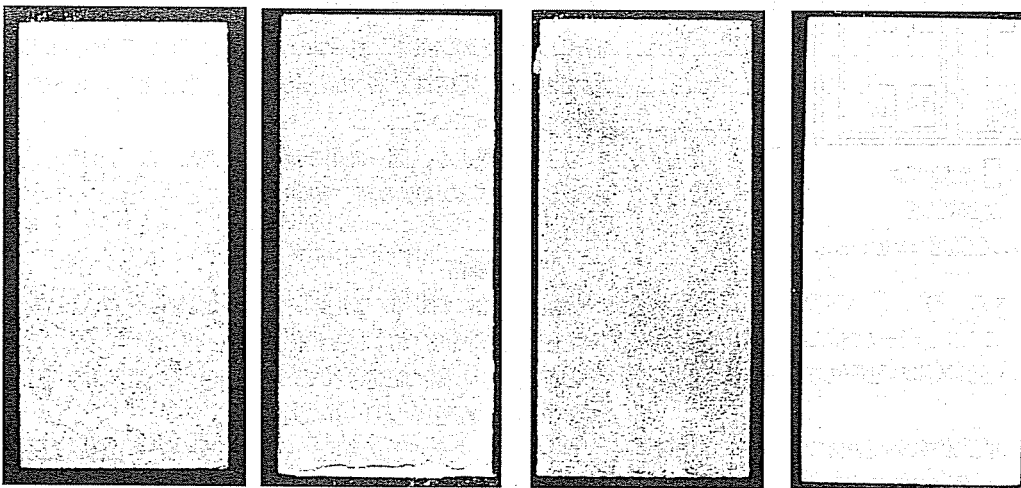
表-8 供試体位置による重量減少量(酸性雨サイクル実験)

配置場所	供試体の鋼種	重量減少量 (kg/m ²)	平均値 (kg/m ²)	標準偏差 (kg/m ²)	変動係数 (%)
①	普通鋼 高炉材	1.40	1.04	0.25	23.9
②		0.84			
③		0.89			
④	普通鋼 電炉材	0.77	1.00	0.43	42.6
⑤		0.64			
⑥		1.60			
⑦	耐候性鋼 高炉材	0.85	0.63 [1.00]	0.16 [0.10]	26.0 [9.97]
⑧		0.46			
⑨		0.58			
⑩	耐候性鋼 電炉材	0.65	0.91 [1.17]	0.21 [0.15]	22.9 [12.8]
⑪		1.16			
⑫		0.92			

[]内の数値は同種鋼材の複合サイクル実験での結果を示す。



(a) 普通鋼の高炉材 (b) 普通鋼の電炉材 (c) 耐候性鋼の高炉材 (d) 耐候性鋼の電炉材 (e) さび安定化処理耐候性鋼材



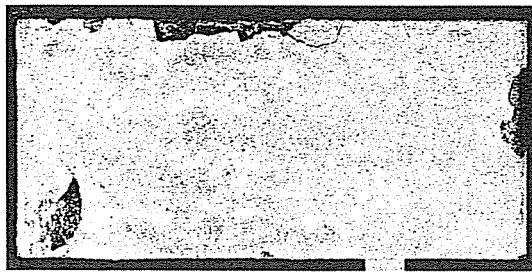
(f) 亜鉛溶射 (g) アルミ溶射 (h) 亜鉛アルミ溶射 (i) 溶射後塗装

図-8 実験後の供試体外観(塩水サイクル実験)

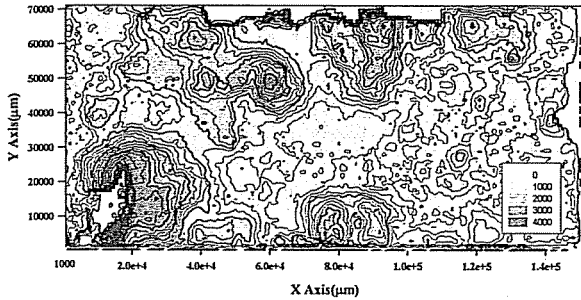
行う際には、定期的に供試体の配置場所をローテーションさせて行う必要があるといえる。

3.3 実験装置の違いによる誤差

複合サイクル試験機と環境試験槽の対応性および実験装置の違いによる誤差について検討する。表-8の[]内に複合サイクル試験機を用いて得られた耐候性鋼材の重量減少量を示す。環境



(a) 表面状況



(b) レーザ深度計の測定結果

図-9 亜鉛アルミ溶射供試体

試験槽での重量減少量は、複合サイクル試験機(表中の [] 内の値)より、平均値としては 58.7%(高炉材)あるいは 28.6%(電炉材)程度小さい。個々の供試体の重量減少量を比較すると、複合サイクル試験機の結果に比べて環境試験槽から得られた重量減少量は同程度あるいは小さいことが分かる。しかし、上述したように、環境試験槽では個々の値のばらつきが大きいため、複合サイクル試験機と環境試験槽との対応を定量的に取ることは現時点では困難である。

以上の結果から、実験条件が同じであっても(例えば、S6 サイクル)、実験装置や供試体の配置により異なる結果が得られる可能性が高く、実験装置や供試体の配置位置による誤差の確認実験を

事前に行う必要があると考えられる。なお、今後、環境試験槽については供試体の配置場所をローテーションさせながら実験を行い、そこで得られた結果を用いることによって、複合サイクル試験機との対応関係について検討する必要がある。

4. 塩水および酸性雨サイクルによる鋼材の防食特性に関する促進実験

4.1 実験方法

本実験では、鋼材の防食特性を把握するための塩水および酸性雨サイクル実験を行った。表-5 に示したようにプラストしたままの普通鋼材の供試体 20 体、耐候性鋼材の 20 体、カブテンコートのみ安定化処理した耐候性鋼材の 20 体を用いた。また、プラストしたままの普通鋼材にアルミ溶射(5 体)、亜鉛溶射(5 体)、亜鉛アルミ溶射(5 体)した供試体も用いた。さらに、溶射供試体の表面を塗装した塗装供試体 11 体を用いた。各供試体の種類、表面処理、数などの詳細は表-5 に示した。

塩水噴霧および酸性雨噴霧複合サイクル促進実験は、それぞれ複合サイクル試験機あるいは環境試験槽を用い、120 サイクル(30 日間)行った。

4.2 塩水サイクル実験結果および考察

(1) 外観観察

塩水サイクル実験後の代表的な各供試体の外観を図-8 に示す。120 サイクル経過後、最も変化がみられるのは、プラストしたままの普通鋼材と耐候性鋼材である。このうち耐候性鋼電炉材の表面は図-8 に示すように全面が一様にさびており、ふくれているところも所々観察される。これに対して、さび安定化処理耐候性鋼の供試体は、実験前後外見の変化はほとんどみられない。しかし、供試体 8 体中の 2 体にはさび(3×3mm 程度)が 1~2 ヶ所発生していた。表面観察後、腐食した供試体のさびとりを行っ

表-9 塩水サイクル実験結果

供試体の鋼種		供試体数	平均重量減少量 (kg/m ²)	標準偏差 (kg/m ²)	変動係数 (%)
普通鋼	高炉材	8(2)	0.92 [0.87]	0.06 [0.03]	6.52 [3.45]
	電炉材	8(8)	0.82	0.05	6.10
耐候性	高炉材	8(2)	1.03 [0.78]	0.2 [0.06]	19.4 [7.69]
	電炉材	8(8)	0.67	0.05	7.46
さび安定化処理耐候性	高炉材	8(8)	1.69 × 10 ⁻³	0.62 × 10 ⁻³	36.5
	電炉材	8(8)	2.02 × 10 ⁻³	0.28 × 10 ⁻³	13.9
アルミ溶射	無塗装	3(3)	-8.59 × 10 ⁻³	1.43 × 10 ⁻³	17.3
	塗装	3(3)	8.43 × 10 ⁻³	0.73 × 10 ⁻³	8.62
亜鉛アルミ溶射	無塗装	3(3)	-13.2 × 10 ⁻³	1.03 × 10 ⁻³	7.81
	塗装	3(3)	8.66 × 10 ⁻³	0.13 × 10 ⁻³	1.51
亜鉛溶射	無塗装	3(3)	-64.5 × 10 ⁻³	48.2 × 10 ⁻³	74.8
	塗装	3(3)	8.12 × 10 ⁻³	0.47 × 10 ⁻³	5.88

()内の数値は 3. で検討した重量減少量の誤差が 10%程度以内の範囲内に配置された供試体数である。これらのデータから得られた結果は []内に示す。

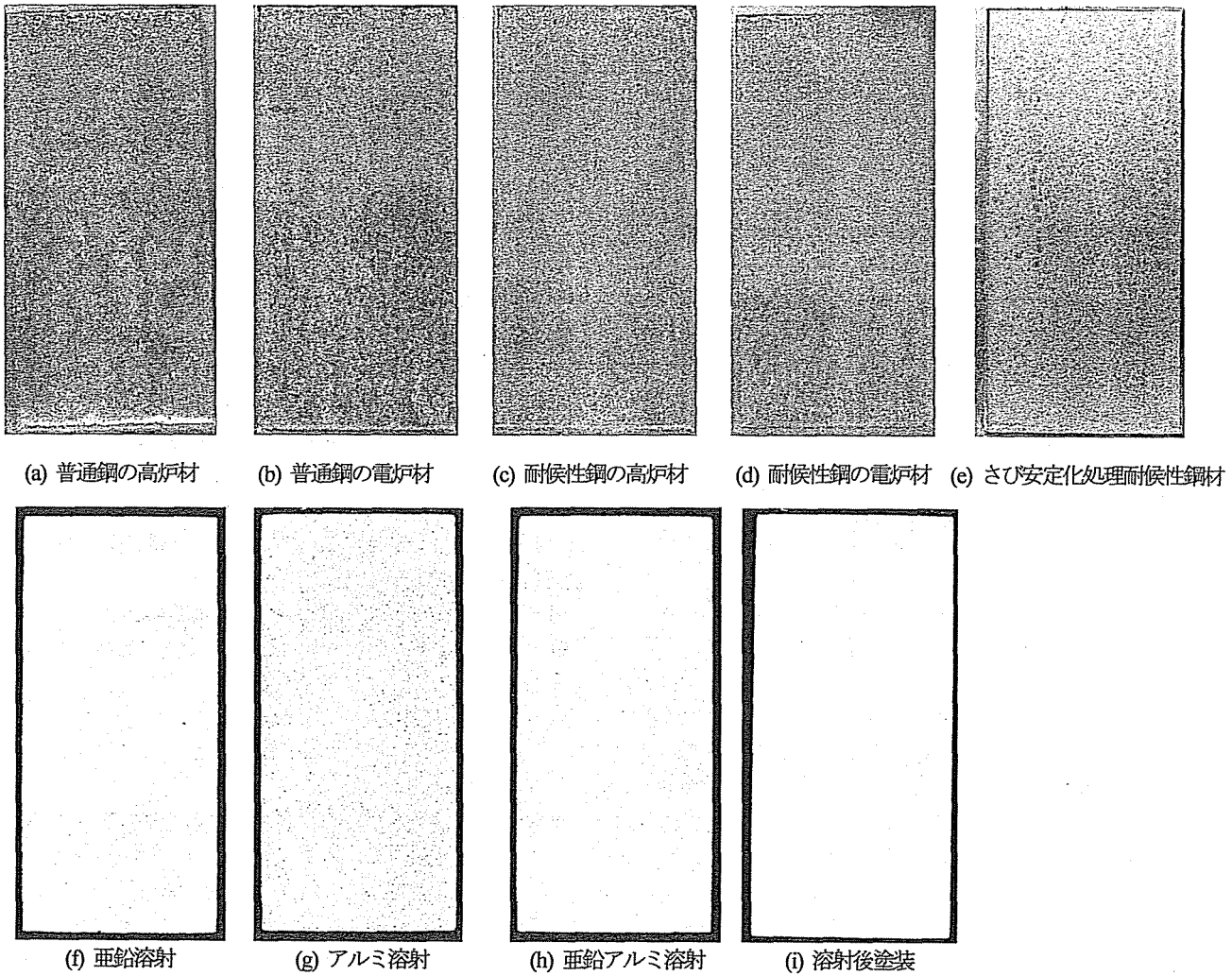


図-10 実験後の供試体外観(酸性雨サイクル実験)

た。さびとり後の耐候性鋼電炉材の表面からは1mm程度の孔食の存在が無数確認された。これは普通鋼材と耐候性鋼材のどちらも高炉材と電炉材に関わらず観察された。

普通鋼の素地鋼材に溶射処理した溶射供試体の場合には、実験前はほぼ見分けがつかなかったが、図-8では明らかに違いが分かる。表面には塩分が付着したように見える白さびが着いている。この中で外観から白さび発生面積の広さを判断すると、亜鉛溶射>亜鉛アルミ溶射>アルミ溶射の順になる。亜鉛アルミ溶射供試体3体中の1体は、溶射膜と素地鋼材との間に離れ膨れが生じた。図-9に供試体の外観とレーザー深度計による表面形状の測定結果を示す。膨れはほぼ全表面で生じて最大膨れの高さは4.0mm以上である。溶射処理後塗装した塗装供試体の場合には、実験前後の外観の変化はほとんど見られない。

(2) 重量減少量

各供試体の実験前後の重量変化を表-9に示す。ブラスト処理したままの普通鋼材の重量減少のばらつきは小さい。耐候性鋼材からも同様な傾向が見られる。ただし、耐候性鋼の高炉材では多少ばらつきがみられる。これは、3.で記述したように供試体の配置位置による違いに起因すると考えられる。

表-9の[]内に示す値は、3.で検討した重量減少量の変動係数10%範囲以内に配置した供試体の結果であり、これを見ると、

その変動係数は8%以下であることがわかる。これらの結果から、普通鋼の腐食減少量が耐候性鋼より若干大きいことがわかる。また、いずれも、高炉材の方が電炉材に比べ、腐食減少量が大きいことがわかる。一方、さび安定化処理した耐候性鋼材の腐食減少量はほとんど見られない。

アルミ、亜鉛、亜鉛アルミ溶射供試体の場合には、どの供試体においても重量が増加している。これは白さびが発生しているが、前述したようにこれらを完全に除去することはできなかったためであると考えられる。

溶射後塗装した塗装供試体は、どのタイプの溶射をとってもほぼ同じ重量減少が見られる。これは、各溶射鋼材に塗られている塗装の種類が同じであるためと考えられる。

4.3 酸性雨複合サイクル実験結果および考察

酸性雨サイクル実験後の各供試体の外観を図-10に示す。全体的に塩水サイクル実験の場合と比べ腐食の進行が遅い。溶射鋼材では白さびの発生面積が塩水サイクル実験での発生面積と比べ約半分程度である。また、さび安定化処理耐候性鋼材と塗装した供試体では、塩水サイクルと同様に表面の変化はほとんど見られない。

重量変化の計測結果を表-10に示す。普通鋼の重量減少は、塩

表-10 酸性雨サイクル実験結果

供試体の鋼種		供試体数	平均重量減少量 (kg/m ²)	標準偏差 (kg/m ²)	変動係数 (%)
普通鋼	高炉材	2	0.71	0.002	0.34
	電炉材	2	0.59	0.115	19.6
耐候性鋼	高炉材	2	0.38	0.029	7.54
	電炉材	2	0.45	0.024	5.40
さび安定化処理耐候性鋼	高炉材	2	3.46 × 10 ⁻³	0.94 × 10 ⁻³	27.2
	電炉材	2	3.98 × 10 ⁻³	0.19 × 10 ⁻³	4.79
アルミ溶射	無塗装	2	-3.13 × 10 ⁻³	0.27 × 10 ⁻³	8.87
	塗装	2	12.7 × 10 ⁻³	4.23 × 10 ⁻³	33.3
亜鉛アルミ溶射	無塗装	2	13.9 × 10 ⁻³	15.9 × 10 ⁻³	114.0
亜鉛溶射	無塗装	2	-3.07 × 10 ⁻³	1.88 × 10 ⁻³	61.4

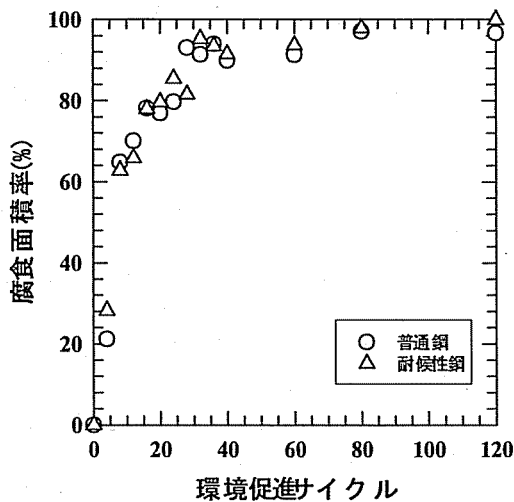


図-11 環境実験サイクル数と腐食面積率

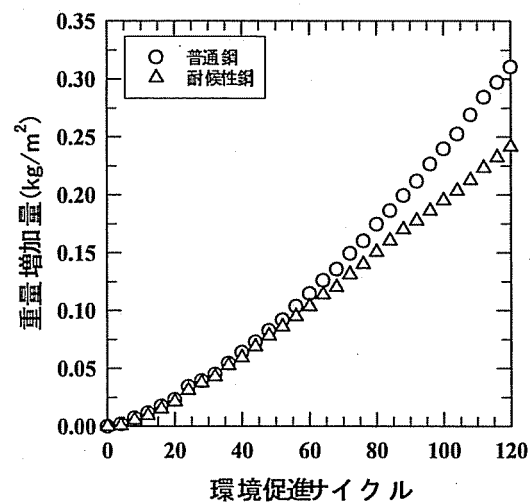


図-12 環境実験サイクル数と重量増加量

水サイクル実験と同様に耐候性鋼に比べ大きいものの、塩水サイクル実験のような高炉材と電炉材の違いは見られない。その他の供試体においては、塩水サイクル実験と同様に腐食度合いが少なく、重量変化はほとんど見られない。塩水サイクル実験結果と比較すると、プラスト処理したままの普通鋼材と耐候性鋼材は重量の減少度合いが少ないことがわかる。

今回の実験では、塩水複合サイクルに比べ酸性雨サイクルの方がプラスト処理したままの普通鋼および耐候性鋼の重量減少量は小さいという結果が得られた。最も影響のある環境因子である塩分濃度はどちらのサイクル(塩水サイクル、酸性雨サイクル)においても同一であるため、酸性雨の影響かもしくは前述した実験装置および供試体の配置位置の違いによる影響であると思われる。今後、同一実験装置を用いた再実験が必要である。

5. 経時的な腐食量および腐食面積の変化

5.1 実験方法

本実験では、表-6 に示したようにプラスト処理したままの普通鋼4体および耐候性鋼4体の供試体を用いた。塩水サイクル実験期間は120サイクル(30日間)とし、供試体を4サイクル(24時間)間隔で取り出し、重量測定および写真撮影を行った。これらの

結果を用いて120サイクルまで4サイクルごとの普通鋼および耐候性鋼の重量、腐食面積の変化を検討する。

5.2 腐食進行に伴う腐食面積率の変化

塩水サイクル実験のサイクル数と腐食面積率(腐食面積/供試体の片面の面積)を図-11に示す。腐食面積は、4サイクルごとにとった写真の画像処理より求めた。供試体のビットマップ画像の各ピクセルに割り当てられていた赤、緑、青のカラー値は、さびの有無により大きく異なる。そのため、このカラー値を用いてさびが生じているかどうかを見分けることができる。本研究では、供試体の片面における全ピクセルの数とさびが生成された部分のピクセルの数の割合から腐食面積率を求めた。

図-11に示すように腐食面積率は、20サイクルまで急激に増加し、約80%以上になる。その後、腐食面積率は徐々に増加し、40サイクルで約90%以上となり、80サイクルでほぼ100%(全面腐食)となる。

5.3 腐食進行に伴う鋼材の重量変化

4.2(2)で、塩水サイクル実験の重量減少量を示した。これは、120サイクル後に、さび取りを行い重量減少量を求めたものである。ここでは、環境促進サイクル中の供試体の重量変化を図-12に示す。当然であるが、さび取りを行っていないため、環境促進サイクル

とともに重量は増加している。はじめの20サイクルまでは、重量の増加量は腐食面積率の変化ほど見られない。その後、サイクル数とともに増加する。120サイクルまでの結果では、サイクル数と腐食重量との間には、比例関係が見られる結果となる。普通鋼と耐候性鋼の重量増加量を比較すると、約40サイクルまではその差は見られないが、その後段々差が広がり、普通鋼の方が大きい。

ここで求めた環境促進実験中のさび取りをしていない供試体の重量変化は、腐食性能の評価には直接役立つものではないが、さびの程度を簡便に判定する量として、今後、実験手法の改良に役立つものと考えられる。

6. 結論

本研究では、塩水および酸性雨噴霧複合サイクル環境促進実験を行い、裸鋼材および防食処理鋼材の腐食劣化特性を検討した。また、促進実験の正確性・信頼度についても検討した。本実験は、各種の防食性能を環境促進実験で本格的に評価するための前段階として行ったパイロット実験である。その結果を以下にまとめる。

- 1) 環境促進実験の場合、同一実験条件下においても実験装置の違いおよび実験装置内での供試体の位置の違いにより異なる結果が得られる可能性がある。したがって、実験の精度を高めるためには予備実験による確認および定期的な供試体のローテーションが必要である。
- 2) 塩水および酸性雨噴霧複合サイクル促進実験(S6-120 サイクル(30日間))を行い、実験前後の裸鋼材および防食処理鋼材の重量および外観の変化を検討した。最も重量変化が見られたのはショットブラスト表面処理した裸鋼材(普通鋼材および耐候性鋼材)であり、普通鋼の重量減少量は耐候性鋼より多少大きかった。これに対して、さび安定化処理した耐候性鋼材、防食処理(アルミ、亜鉛、亜鉛アルミ溶射、塗装)した供試体の場合には、実験前後の重量変化はほとんど見られなかった。
- 3) 塩水噴霧複合サイクル促進実験(S6-120 サイクル(30日間))によるブラスト表面処理した裸鋼材(普通鋼および耐候性鋼)の腐食面積率は、はじめの20サイクルまでは急激に増加し、その後ゆるやかに増加して80サイクルでほぼ100%(全面腐食)となった。これに対して、120サイクルまでの重量増加量は促進実験サイクル数とほぼ比例関係を保ち、耐候性鋼よりも普通鋼の方が多少大きかった。

今後、溶射防食などに対して長期的な腐食劣化を検討する必要がある。本実験で用いた供試体および新たな供試体を製作し、長期間の環境促進実験を進めている。

謝辞：本研究の一部は平成11～13年度の文部省・科学研究費補助金・基盤研究(B)(研究代表者：伊藤義人)として研究補助を受けて実施したものである。また、供試体の製作において、株式会社トピー工業豊橋製造所よりご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木研究所橋梁研究室：既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究，土木研究所資料第2420号，1986。
- 2) 土木学会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，鋼構造シリーズ7，1996。
- 3) 建設省土木研究所，(社)鋼材倶楽部，(社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する研究報告書(I～XX)，1983～1993。
- 4) 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。
- 5) 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研究，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1021-1029，2002。
- 6) スガ試験機株式会社：複合サイクル試験機，環境試験槽—取扱説明書，1996。
- 7) 北村守次ほか：中国における酸性雨とその対策について，環境技術，Vol.23，No.11，pp.24-27，1994。
- 8) 溝口次夫ほか：中国における環境の現状と保全対策，環境技術，Vol.23，No.11，pp.45-52，1994。
- 9) 田中柳之助，蒔田実，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，pp.19-26，1982。
- 10) 自動車技術会：自動車用材料腐食試験方法—複合サイクル試験の促進性および暴露との相関性，自動車技術界テクニカルペーパー，pp.57，1991。
- 11) 自動車技術会：自動車用材料腐食試験法，自動車規格，JASO M 609-91，1991。
- 12) ASTM：ASTM D 610，Annual Book of ASTM Standards，Section 6，pp.84-86，1987。
- 13) 須賀蒨：実用環境に対応した酸性雨腐食試験，塗装工学，Vol.28，No.8，pp.39-48，1993。
- 14) 日本規格協会：JISハンドブックI，II，1999。
- 15) Cleveland Society for Coatings Technology Technical Committee：Correlation of accelerated exposure testing and exterior exposure site，*Journal of Coatings Technology*，Vol.66，No.837，pp.49-67，1993。
- 16) Brian S. Skerry，Charles H. Simpson：Combined corrosion/weathering accelerated testing of coatings for corrosion control，*The NACE Annual Conference and Corrosion Show*，pp.412/I-412/17，1991。

(2002年9月13日受付)