

ACM センサを用いた鋼桁塗装劣化予測手法の検討

Investigation of the degradation prediction technique of the steel girder paint using the ACM sensor

竹田俊明*, 大島俊之**, 三上修一***, 山崎智之****, 岩渕直*****

Toshiaki TAKEDA, Toshiyuki OSHIMA, Shuichi MIKAMI, Tomoyuki YAMAZAKI and Sunao IWABUCHI

*工修 財北海道道路管理技術センター (〒060-0807 札幌市北区北 7 条西 2 丁目 20 番地)

**工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

*** 博(工) 北見工業大学助教授, 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

**** 博(工) 北見工業大学助手, 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

***** 株式会社構研エンジニアリング (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1 番 1 号)

While maintenance management of bridges became important in recent years, it has a great interest specially in the degradation prediction. Degradation prediction is indispensable technology when carrying out maintenance management of the structure effectively. However, there is few technology of the still established degradation prediction. Then, writers aimed to propose the formula of more accurate degradation prediction which can be used for Bridge Management System (BMS) paying attention to degradation of paint of steel girder. In this paper, a degradation prediction formula is proposed first. Next, the coefficient used by the formula was verified and the formula which performs more exact degradation prediction was examined.

Key Words: Degradation prediction, Paint film, Rate of degradation area, Coefficient of durability, ACM sensor

キーワード: 劣化予測, 塗装, 劣化面積率, 耐久性係数, ACM センサ

1. はじめに

鋼橋を管理する上で塗装劣化は重要な問題であり, その予測は Life Cycle Cost (LCC) という観点からも注目されている^{1,2)}. 有馬らは経過年数, 劣化因子および点検評価値からニューラルネットワークを用いて塗装の劣化予測を行っている³⁾. また, 松本らは点検評価値から鋼橋の腐食劣化を推定している⁴⁾. このように塗装の劣化予測は様々な角度から検討されているが, その劣化予測の多くは数多くの劣化要因項目を用いて行われる. しかし, LCC を管理する上で重要な Bridge Management System (BMS) では入力されている劣化要因項目には限りがあるために, それを用いることは困難であった.

そこで筆者らは橋梁台帳や塗装台帳などの入手が容易なデータから塗装劣化予測を行う式を提案した⁵⁾. この式は既往の研究における各劣化要因の相対比較例を用いて橋梁の構造形式, 架設環境, 使用塗装系などの 6 要因項目についてのデータを数値化 (以下, 耐久性係数と称す) し, 将来の劣化面積率を予測するものである^{5,6)}. この手法は用いる劣化要因が少ない上にデータの入手が比較的容易であり, BMS に用いることができる可能性がある. また, 台帳などの既存のデータベースよりデータが入手できる

ため, 現地調査などの労力を大幅に削減できる手法である. その予測精度は, 北海道内の橋梁 32 データについて劣化予測を行った結果, 実際の劣化状況との適合率は 80% 以上であり, 概ね良好な結果が得られた⁵⁾. しかし, さらに適合率を向上させ寒冷地での信頼性のある指標とするには寒冷地特有の環境条件を考慮する必要がある.

本論文ではこの問題を解決するために, 腐食環境を定量的に計測する ACM 型腐食センサ (以下, ACM センサ) を用いて, 新たに寒冷地で耐久性係数を算出することを試みた. ACM センサとはガルバニック対を用いた大気腐食環境を計測するセンサである^{7,8,9)}. なお, ACM センサの詳細については 3 章にて説明する. 以下に本論文の構成を示す.

2 章では, 筆者ら⁵⁾ が提案した塗膜劣化予測式について説明する. ここでは, 塗膜劣化予測式, 各劣化要因の数値化 (耐久性係数), 現状での予測精度について述べる.

3 章では, 耐久性係数の問題点を解決するために行った ACM センサを用いた実験について説明し, その結果を示す. また, 得られたデータを基に耐久性係数を算出する.

4 章では, 3 章で得られた結果と現在の耐久性係数の比較を行い最適値を検討し, 耐久性係数による塗装劣化予測手法の適合性を検討する.

2. 塗膜劣化予測式

2.1 塗膜劣化予測式について

藤原ら¹⁰⁾は6万を超える塗装劣化のデータから、腐食に厳しくないマイルド環境では以下の式で塗膜劣化を回帰できるとしている。

$$Y = 0.008X^2 \quad (1)$$

Y: 劣化面積率(%) X: 経過年数(年)

ここで、劣化面積率とは単位面積中のさび、われ、ひびわれの合計面積の占める割合である。なお、藤原らは他の腐食環境においても二次式で回帰している。本研究では、様々な環境にある塗膜劣化がすべて二次式で表すことが可能であるという仮定から、係数の変化によって様々な腐食環境の塗膜劣化を再現できると考えた。そこで、式(1)に各腐食環境を係数に置き換えた数値を掛け合わせる方法を提案する。

本研究では塗膜の耐久性に大きな影響を及ぼすと同時に、BMSに用いることが可能となるような比較的把握が容易である劣化要因を用いた。以下に本研究で用いる各劣化要因およびその分類を示す。

1. 構造形式 …箱桁、鉸桁、トラス
2. 部位 …桁腹板外面、桁腹板内面、下フランジ下面、添接部、桁端部
3. 架設環境 …海岸環境、河川環境、一般環境
4. 使用塗装系 …一般塗装系(A, B 塗装系)
重防食塗装系(C 塗装系)
5. 塗装施工方法 …一般塗装系現場上塗り塗装, 重防食塗装系現場上塗り塗装, 重防食塗装系工場一括塗装
6. 塗装履歴 …新設塗装, 塗替え塗装

これらのデータは橋梁台帳および防錆台帳などで入手することができるので、現時点でも本手法をBMSに用いることが可能であることを示している。なお、本研究では架設環境の分類は、文献¹¹⁾にて厳しい腐食環境とされる海岸から100m(北海道西岸などでは200m)の地域を海岸環境、常時水量が確保されている河川と交差する場合を河川環境、それ以外を一般環境とした。

以上より、本研究で用いる塗膜劣化予測手法に用いる式を以下に示す。

$$Y = N_S \cdot N_P \cdot N_E \cdot N_R \cdot N_W \cdot N_H \cdot 0.008X^2 \quad (2)$$

Y: 劣化面積率(%) X: 経過年数(年)

N_S : 構造形式による耐久性係数

N_P : 部位による耐久性係数

N_E : 架設環境による耐久性係数

N_R : 使用塗装系による耐久性係数

N_W : 塗装施工方法による耐久性係数

N_H : 塗装履歴による耐久性係数

次に、耐久性係数の値を表-1に示す。ここで示す耐久性は参考文献⁶⁾より定めた。なお、耐久性から耐久性係数を算出する方法としては以下の式を用いた。

$$N_X = A / A_0 \quad (3)$$

N_X : 各耐久性係数 A: 基準耐久性(=10)

A_0 : 各分類の耐久性

基準耐久性 A とは各種劣化要因ごとに、最も一般的であるものの耐久性(=10)である。基準耐久性は、式(1)を求めた時にそれぞれの劣化要因の中で最も多く用いられた分類とする。これは、式(1)は最も多く用いられた分類に対してもっとも正確に対応すると思われるからである。例えば、式(1)は架設環境としては一般環境に於ける劣化データを最も多く用いて作成されていることから、一般環境におかれるデータに対して最もよい相関があると考えられる。そこで、一般環境の耐久性を10とする。よって、その時の耐久性係数は1となり式(1)の値に影響を与えない。なお、最も多く用いられた分類が明らかにされていない分類については、一般的に最も多く用いられている分類の耐久性を10とした。式(3)により、各耐久性の値が10より小さければ耐久性係数は大きくなることになり、これを予測式に用いると早期に劣化することになる。

表-1 耐久性係数

各種劣化要因	分類	耐久性	耐久性係数
構造形式 (N_S)	箱桁	11	0.91
	鉸桁	10	1
	トラス桁	9	1.11
部位 (N_P)	桁腹板外面	10	1
	桁腹板内面	3	3.333
	下フランジ下面	3	3.333
	添接部	3	3.333
	桁端部	3	3.333
架設環境 (N_E)	一般	10	1
	河川	7	1.428
	海岸	4	2.5
塗装系 (N_R)	一般塗装系(A, B 塗装系)	10	1
	重防食塗装系(C 塗装系)	20	0.5
塗装施工 (N_W)	一般塗装系現地上塗り	10	1
	重防食塗装系現地上塗り	15	0.667
	重防食塗装系工場一括塗装	20	0.5
塗装履歴 (N_H)	新設塗装	10	1
	塗替1回	8	1.25
	塗替2回	6	1.667
	塗替3回	5	2

2.2 予測精度

先述の耐久性係数を用いたときの式(2)の予測精度の確認のため、実際の劣化状況と予測結果との比較を行った。表-2に予測精度の確認のための劣化予測に用いたデータの一覧を示す。本論文では寒冷地における橋梁の塗膜劣化予測を対象にしているため、対象橋梁は北海道留萌地方における25橋、劣化状況のサンプル数(点検箇所)は32である。比較方法としては、図-1に示すように劣化予測した2次曲線と点検結果の一致を確認する。両者が重なる場

表-2 予測に用いたサンプル一覧

各種要因	分類	サンプル数
構造形式 (N _s)	箱桁	0
	钣桁	30
	トラス桁	2
部位 (N _p)	桁腹板外面	32
	桁腹板内側	0
	下フランジ下面	0
	添接部	0
	桁端部	0
架設環境 (N _e)	一般	10
	河川	0
	海岸	22
塗装系 (N _b)	一般塗装系(A,B 塗装系)	25
	重防食塗装系(C 塗装系)	7
塗装施工 (N _w)	一般塗装系現地上塗	25
	重防食塗装系現地上塗	5
	重防食塗装系工場一括塗装	2
塗装履歴 (N _h)	新設塗装	8
	塗替	24
点検時 経過年数	0~5	15
	5~10	16
	10~15	1
点検評点	1	7
	2	7
	3	14
	4	3

合は「合」とし、重ならない場合を「否」としてその適合率により本手法の有効性を確認する。なお、点検は標準図との比較による官能検査であるために、表-3のように劣化面積率には幅がある。表-4に点検結果と予測結果との比較を示す。

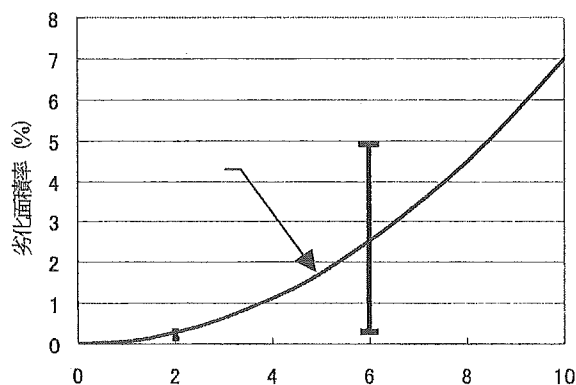


図-1 劣化予測曲線と実点検結果の比較方法

表-3 点検結果の劣化面積率範囲

点検評点	劣化面積率(%)	点検評点	劣化面積率(%)
1	0~0.03	3	0.3~5.0
2	0.03~0.3	4	5.0~

表-4 実橋梁への予測式適用結果

サンプル 数	判定		
	合	否	適合率 (%)
32	26	6	81.25

ここでは点検結果との適合率が 80%を越え、概ね良好な値となったことから、本手法は有効な劣化予測手法であると考えられる。また、表-5に予測式と非適合であったサンプルと予測式との差を示す。正の値は予測式が過大な面積率を予測したことを示す。その値は数パーセント以内に収まっている。ただし、表-2で示したように、点検結果のサンプル内にデータの偏りが見られるため、より多くのサンプルを用いて比較することが必要である。

表-5 非適合サンプルの差

サンプル No.	点検評点との差 (%)
1	-2.44
2	-0.033
3	0.043
4	0.155
5	-3.04
6	-1.08
平均二乗誤差	1.6514

3. ACM センサによる耐久性係数の算定

3.1 概要

これまで述べたように、本予測手法は有効な劣化予測手法であると考えられる。しかし、劣化予測に用いる耐久性は、今回劣化予測を行った寒冷地の腐食特性を考慮していない。そこで、寒冷地における耐久性係数を定量的に求めることを目的としてACM型大気腐食センサを用いて腐食環境を測定した。測定試験は構造形式、部位、架設環境による耐久性係数の違いを求めるための実橋測定試験と、塗装系による耐久性係数の違いを求めるためのACMセンサを塗装下に埋設した促進腐食試験を行った。ACMセンサでは鋼材の置かれている腐食環境を定量的に測定することが可能であることから、鋼材の劣化速度すなわち耐久性係数を推測できる。

またACMセンサ⁷⁾⁹⁾とはガルバニック腐食原理を用いた大気腐食センサの一種である。なお、ガルバニック腐食とは異種金属間接触による腐食である。ACMセンサの構成を図-2に示す。厚さ0.8mmの炭素鋼板(64×64mm)の基板上にIC用精密スクリーン印刷機を用いてエポキシ系(フィラー:SiO₂)の絶縁ペースト(厚さ20μm)が塗付されている。その上に同印刷機を用いて、Ag導電ペースト(厚さ15μm)が基盤との絶縁が保たれるように積層印刷されている(図-2)。センサ表面に腐食性物質が付着するとAg導電ペーストがカソードとなり、炭素鋼基板のパターン露出部がアノードとなる。センサ出力の測定範囲は1nAから13mAであり、その分解能は1nAから10μAでは1nA、10μAから13mAでは1μAである。また、ACMセンサから得られたデータはACMデータロガーに蓄積し、後日解析を行った。

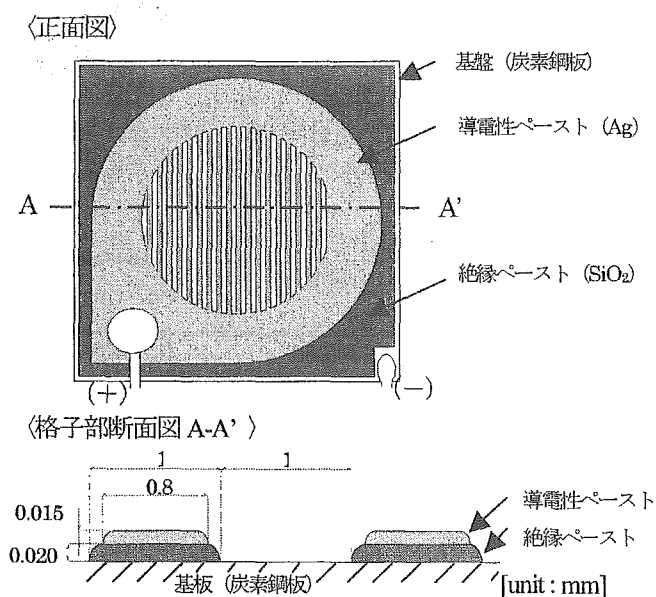


図-2 ACM センサ平面図および断面図

3.2 実橋測定実験

(1) 実験概要

本実験は以下の状況にある橋梁について行った。

1. 河川環境, 鈑桁橋 (橋梁名: A 橋)
2. 海岸環境, 鈑桁橋 (橋梁名: B 橋)
3. 一般環境, 鈑桁橋 (橋梁名: C 橋)
4. 河川環境, トラス橋 (橋梁名: D 橋)
5. 河川環境, 箱桁橋 (橋梁名: E 橋)

これらの架設環境および構造形式を選定した理由は以下の通りである。

- ・ A 橋, B 橋, C 橋において, 架設環境の違いによる腐食しやすさを比較するため
- ・ A 橋, D 橋, E 橋において, 構造形式の違いによる腐食しやすさを比較するため
- ・ 各構造形式において, 各部位の腐食しやすさを検討するため

次に, 実験方法について説明する。実験は橋梁上部構造の各部材に ACM センサを設置して 1 ヶ月間大気中に暴露し, その腐食電流を測定する。図-3 に ACM センサの設置箇所の概要, 表-6 に ACM センサの設置状況の概要を示す。表-6 で下フランジ下面に取り付けた ACM センサ

の設置角が 180° とあるのは計測面を下向きに設置したことを意味する。図-4 には桁端部に取り付けた ACM センサの設置状況を示す。また, 本研究では全橋について 1 ヶ月間の測定を行ったが, 今後の課題として年間を通じて測定を行い, 腐食環境を明らかにする必要があると考える。

表-6 ACM センサ設置概要

設置箇所	図-3 での センサ番号	設置角 ($^\circ$)	桁下面から の高さ(cm)
桁腹板外面	#1	90	90
桁腹板内面	#2	90	70
下フランジ下面	#3	180	0
桁端部	#4	90	90
添接部	#5	90	90

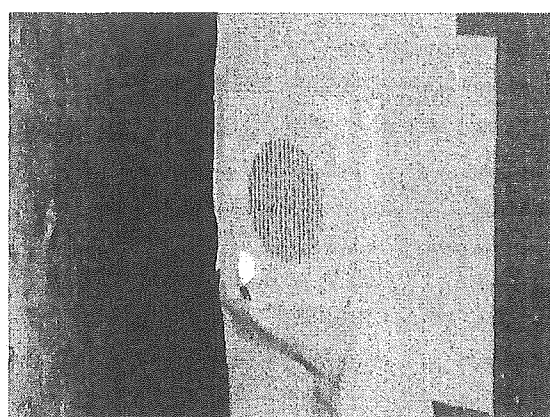


図-4 桁端部 ACM センサ取り付け状況

(2) 実験結果

図-5 から図-9 に, B 橋で測定した ACM センサの腐食電流の出力状況を示す。

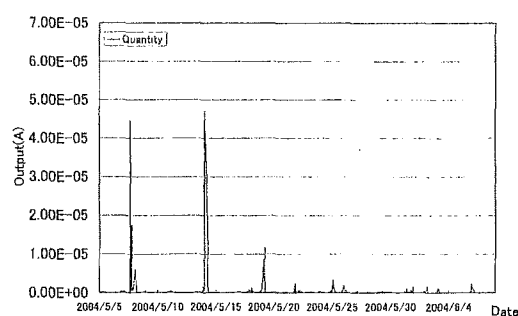


図-5 桁腹板外面の ACM センサ出力 (B 橋)

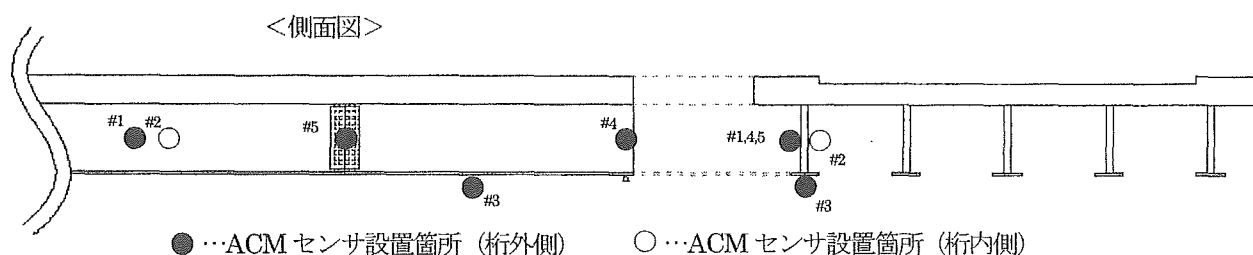


図-3 ACM センサおよび温湿度計設置箇所 (鈑桁)

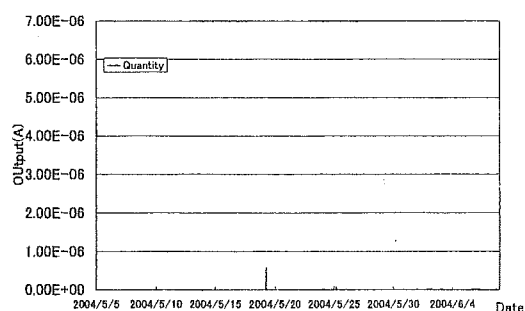


図-6 桁腹板内面の ACM センサ出力 (B 橋)

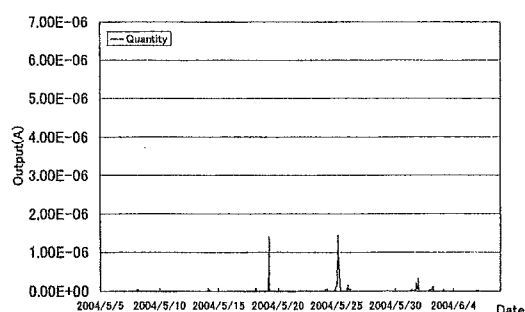


図-7 下フランジ下面の ACM センサ出力 (B 橋)

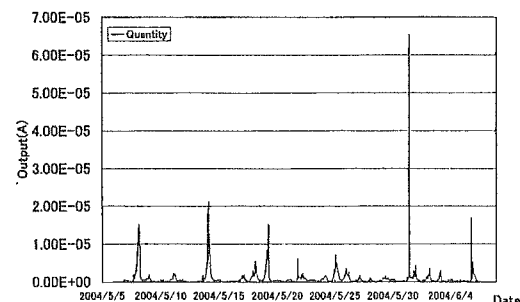


図-8 桁端部の ACM センサ出力 (B 橋)

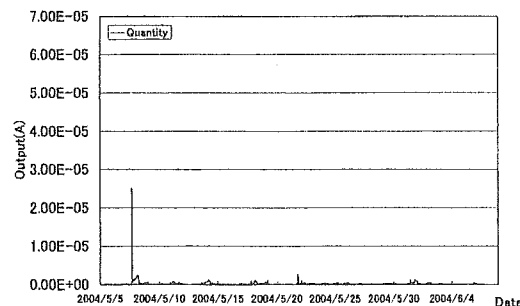


図-9 添接部の ACM センサ出力 (B 橋)

B 橋に貼り付けた ACM センサでは以上のような結果が得られた。グラフが突出している箇所は大きな腐食電流が流れていることを示す。実験期間中の気象観測データ¹²⁾と比較すると、それぞれ降雨時に大きな腐食電流が流れたことが分かる。5 月 7 日には 5mm/day の降雨があったが、それに対応して桁腹板外面・桁端部・添接部の各 ACM センサに大きな腐食電流が流れている。また、5 月 13 日から 14 日にかけても降雨と同時に腐食電流が流れている。それに対して、降雨が直接当たらない桁腹板内面・下フランジ下面ではそれほど大きな電流は流れていない。また、桁端部で 5 月 31 日に大きな電流が流れているが、これは降雨が風向きにより他の ACM センサには当たらず、遊間

からの漏水があった桁端部の ACM センサだけが反応したものである。このように実際の降雨との相関があることから、本実験では妥当な結果が得られたと考えられる。

次に、各橋の日平均電氣量を表-8 から表-11 に示す。日平均電氣量の値が大きければその腐食環境が厳しいことを示す。

表-8 A 橋の日平均電氣量

部位	日平均電氣量 Q (C/day)	Log Q
桁腹板外面	6.08E-03	-2.216204
桁腹板内面	-8.28E-09	-----
下フランジ下面	8.62E-06	-5.06426
桁端部	3.28E-06	-5.48458
添接部	8.38E-05	-4.07672

表-9 B 橋の日平均電氣量

部位	日平均電氣量 Q (C/day)	Log Q
桁腹板外面	4.95E-02	-1.30532
桁腹板内面	1.62E-04	-3.79021
下フランジ下面	1.28E-03	-2.89323
桁端部	7.96E-02	-1.0991
添接部	1.80E-02	-1.74384

表-10 C 橋の日平均電氣量

部位	日平均電氣量 Q (C/day)	Log Q
桁腹板外面	2.42E-10	-4.67968
桁腹板内面	4.67E-13	-7.39436
下フランジ下面	9.07E-11	-5.10583
桁端部	2.86E-10	-4.60717
添接部	2.61E-09	-3.64737

表-11 D 橋の日平均電氣量

部位	日平均電氣量 Q (C/day)	Log Q
桁腹板外面	9.38E-03	-2.02771
桁腹板内面	1.84E-05	-4.73480
下フランジ下面	2.23E-08	-7.65116
桁端部	1.34E-02	-1.87282
添接部	1.35E-03	-2.87002

表-12 E 橋の日平均電氣量

部位	日平均電氣量 Q (C/day)	Log Q
桁腹板外面	4.65E-06	-5.33255
桁腹板内面	-5.85E-06	-----
下フランジ下面	2.36E-07	-6.62681
桁端部	6.39E-05	-4.19480
添接部	8.38E-05	-4.07672

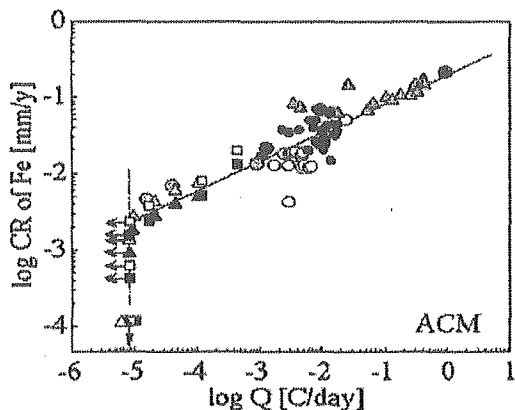
(3) 耐久性係数の算定

ACM センサで計測された日平均電気量と鋼材の腐食速度には図-10 で示す相関性がある¹³⁾。以下に図-10 の傾きのある直線部分の式を示す⁹⁾。

$$\log CR_{\text{of Fe}} = 0.379 \log Q - 0.723 \quad (4)$$

$\log CR_{\text{of Fe}}$: 鉄の腐食速度 [mm/year]

$\log Q$: 日平均電気量 [C/day]



$CR_{\text{of Fe}}$: 鉄の腐食速度 Q : 日平均電気量

図-10 平均電気量と鋼材の腐食速度の関係¹³⁾

本論文では日平均電気量から式(4)を用いて鉄の腐食速度を算出し、それを比較することによって耐久性係数の算定を行う。3.2(2)の実験結果から式(2)で用いる耐久性係数を算出する。

架設環境による耐久性係数の算定

架設環境に関する耐久性係数を算出する。用いるデータは架設環境に違いのある A 橋 (河川環境), B 橋 (海岸環境) および C 橋 (一般環境) とする。それぞれのデータは各 5 データあるので、その代表値として平均値を求める (表-13)。

表-13 各橋梁の日平均電気量の平均

橋梁	架設環境	日平均電気量の平均 Q (C/day)	$\log Q$
A	河川環境	1.2351E-03	-2.908
B	海岸環境	2.9717E-02	-1.527
C	一般環境	5.5745E-05	-4.254

日平均電気量の平均が算出されると、式(4)より各架設環境での鋼材の腐食速度は式(4)より表-14 のようになる。ここで式(1)は、作成時に様々な架設環境のデータを用いて作成されているが、その中でもっとも用いられている比率が大きい¹⁴⁾ 一般環境の耐久性を 10 とし、それぞれの架設環境の腐食速度の比をとることによって耐久性係数を算出した。塗膜劣化面積率に用いる耐久性係数と鋼材の腐食速度の累乗は比例関係にあり、耐久性係数の算定には鋼材の腐食速度の累乗を用いるべきであるが、そのとき、耐久性係数には最大で 1 万倍程度の差が生じる。これを耐久性

係数として用いるとそのときの劣化面積率は実際の塗膜劣化に即していないものになる。この原因として、塗膜劣化は鋼材腐食と異なり、環境の違いによる劣化速度の変化が小さいことが推察される。そこで、本研究では便宜的に各腐食環境の厳しさを対数で表す $\log CR_{\text{of Fe}}$ を用いて耐久性係数を求めた。その後、式(3)を用いて耐久性係数を算定した。

表-14 各架設環境の鋼材腐食速度と耐久性係数

架設環境	$\log CR_{\text{of Fe}}$ (mm/y)	耐久性	耐久性係数
河川環境	-1.83	7.82	1.279
海岸環境	-1.30	5.56	1.799
一般環境	-2.34	10	1

表-14 より、海岸環境が鋼材の腐食環境として最も厳しく、一般環境が 3 者で最も厳しくない環境であることが分かる。これは、従来考えられている腐食環境と一致し、本実験で得られた結果が妥当であると考えられる。

構造形式による耐久性係数の算定

次に構造形式による耐久性係数を求める。用いるデータは構造形式の違いにより A 橋 (鈑桁), D 橋 (トラス桁) および E 橋 (箱桁) とする。上述と同様に各橋梁の日平均電気量の平均値および $\log Q$ を求める (表-15)。

表-15 構造形式別の日平均電気量平均

橋梁	構造形式	日平均電気量の平均 Q (C/day)	$\log Q$
A	鈑桁	1.23E-03	-2.908
D	トラス桁	4.83E-03	-2.316
E	箱桁	1.57E-05	-4.804

ここで、鈑桁の耐久性を 10 とするとそれぞれの耐久性および耐久性係数は表-16 のようになる。

表-16 各構造形式の鋼材腐食速度と耐久性係数

構造形式	$\log CR_{\text{of Fe}}$ (mm/y)	耐久性	耐久性係数
鈑桁	-1.83	10	1
トラス桁	-1.60	8.74	1.144
箱桁	-2.54	13.88	0.720

表-16 より、構造形式別の腐食しやすさは箱桁、鈑桁、トラス桁の順に厳しくなることが分かる。箱桁は桁の幅が大きいので、下フランジ下面や桁腹板内側では風雨にさらされることが少なく、結果的に耐久性が大きくなったと考えられる。また、トラス桁では桁高が大きく部材の間隔が大きく開いているために、各部材が風雨にさらされやすい。したがって、桁腹板内側や下フランジ下面では他の形式に比べて水分の供給が多くなり、腐食しやすい環境となる。本実験で得られたデータは従来考えられている順序と一

致しており⁹⁾本実験結果の妥当性が高いことを示している。

○ 部位による耐久性係数の算定

各構造部位に関する耐久性係数については、全橋のそれぞれの部位について合計して平均値を求め、耐久性係数を算定する。表-17に各部位の日平均電気量の平均を示す。

表-17 各部位の日平均電気量の平均

部位	日平均電気量の 平均 Q(C/day)	Log Q
桁腹板外面	1.30E-02	-1.8861
桁腹板内面	3.49E-05	-4.4566
下フランジ下面	2.59E-04	-3.5866
桁端部	1.86E-02	-1.7301
添接部	4.92E-03	-2.3077

ここで、桁腹板外面の耐久性を 10 とすると、それぞれの耐久性および耐久性係数は表-18 のようになる。

表-18 各部位の鋼材腐食速度と耐久性係数

部位	Log CR of Fe (mm/y)	耐久性	耐久性 係数
桁腹板外面	-1.44	10	1
桁腹板内面	-2.41	16.74	0.597
下フランジ下面	-2.08	14.44	0.693
桁端部	-1.38	9.58	1.044
添接部	-1.60	11.11	0.900

表-18 では、5 部材では桁端部が最も腐食しやすい環境にあり、桁腹板内側が最も腐食に厳しくない環境であることが示された。しかし、従来考えられている順序^{9),15)}ではなく、この点について検討の余地があると考えられる。

3.3 塗膜下 ACM 供試体促進腐食実験

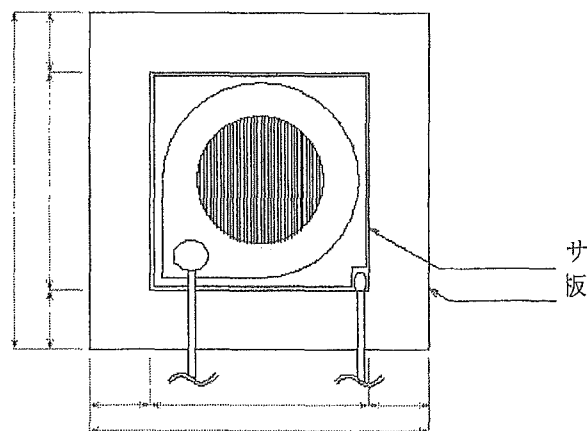
(1) 実験概要

3.2 節では、構造形式、部位、架設環境による耐久性係数を算定した。ここでは塗膜自体の耐久性に起因する耐久性係数である使用塗装系、塗装施工による耐久性係数の算定を行う。実験は図-11 に示すように、鋼板上に ACM センサを接着し、鋼板および ACM センサ全体に塗装を行った供試体に対して促進腐食試験を行った。これにより、塗装自体が破壊されれば ACM センサに腐食電流が流れ、塗膜の耐久性を算定できる。

次に実験方法について説明する。本実験は塩水噴霧・乾燥・湿潤を繰り返し行うことができる促進腐食実験機内に塗装した ACM 供試体を設置し、S6 試験と呼ばれる促進腐食条件にて行う促進腐食実験である。S6 試験とは旧通商産業省委託試験で設定された条件で、藤原らによってその実環境との相関性は検証されている¹⁴⁾。表-19 に S6 試験の促進腐食実験条件を示す。なお、本促進腐食実験条件

は実環境との相関性が良いものを用いたので、必ずしも寒冷地の促進条件ではないことを付記する。図-12 に ACM 供試体の試験装置における設置状況を示す。

〈正面図〉



〈側面図〉

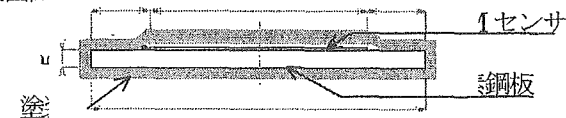


図-11 塗膜下 ACM 供試体の概要

表-19 S6 促進腐食試験条件

暴露条件	試験 (サイクル条件)			
サンシャインウェザーメータ	塩水噴霧 (5%水溶液) 30℃ 96hour	湿潤 95%R.H. 30℃ 1.5hour	乾燥 20%R.H. 50℃ 2hour	乾燥 20%R.H. 30℃ 2hour

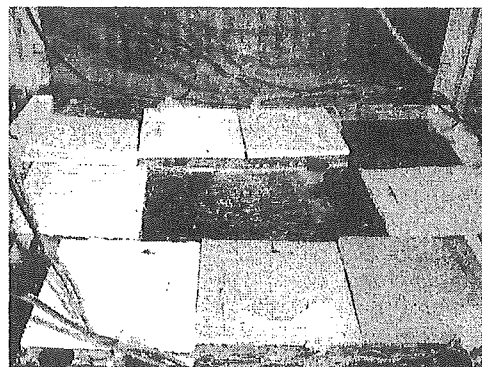


図-12 ACM 供試体設置状況

なお、本実験では日本道路協会で定められた A-1, A-2, A-3, A-4, B-1, C-1, C-2, C-3, C-4 の各新設塗装系についての供試体を作成した。しかし、C-1, C-2 および C-4 塗装系については供試体作製後に熱によってわれが生じたために信頼性のあるデータが得られなかった。よって、これらの塗装系についての実験結果は除外する。

(2) 実験結果

図-13 から図-18 に各 ACM 供試体の促進腐食実験結果を示す。

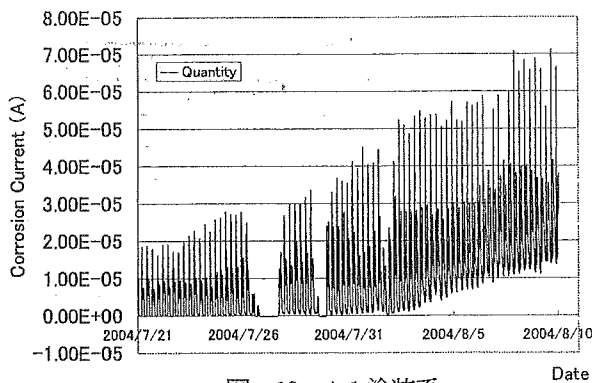


図-13 A-1 塗装系

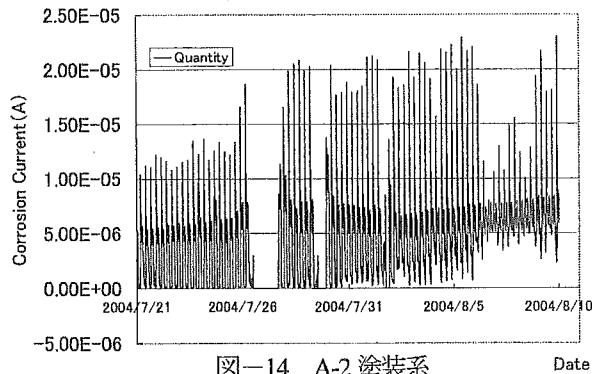


図-14 A-2 塗装系

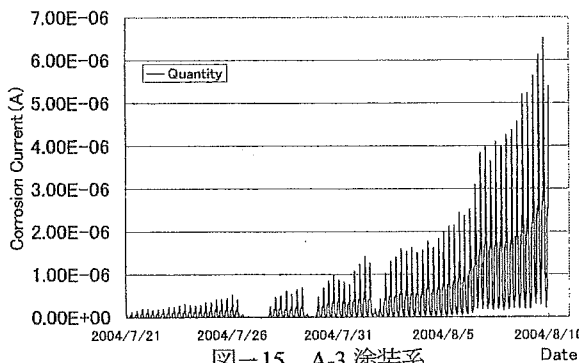


図-15 A-3 塗装系

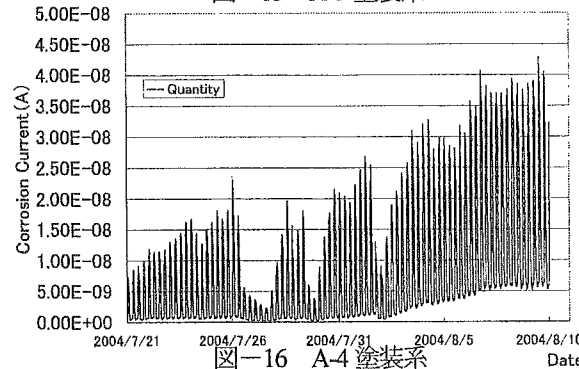


図-16 A-4 塗装系

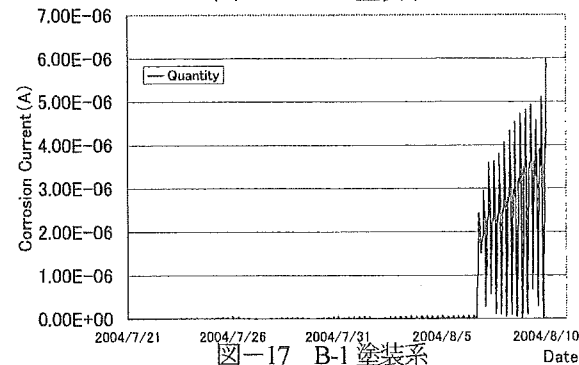


図-17 B-1 塗装系

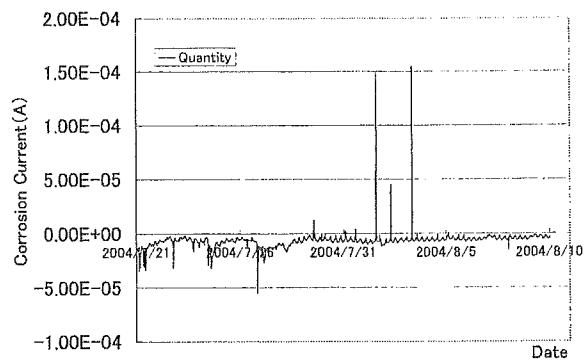


図-18 C-3 塗装系

A-1 塗装系では実験が進行する過程で、徐々に腐食電流量の極大値が大きくなっていることが分かる。このことから、徐々に塗膜の破壊が進んでいると見られる。また、8月3日を越えた時点で腐食電流の極小値が0に戻らなくなっている。これは塗装下のACMセンサ上のさびが進行しているためと考えられ、塗膜下腐食が常時進行している可能性が考えられる。これらの傾向はA塗装系の全ての供試体に見られ、A塗装系は同様の劣化傾向を示すことが考えられる。

また、B-1 塗装系では、8月6日まではACMセンサに電流は流れていなかったが、翌日より急激に腐食電流が流れている。これは、塗膜が破壊されて塗膜下に水分が侵入したものと思われる。このことから、B-1 塗装系の塗膜劣化は一度破壊されると劣化が急速に進行することが分かる。

C-3 塗装系では数回、大きな腐食電流が計測されたが、全体的には他に比べ電流量は少なかった。また常時、電流が他の供試体と逆方向に流れていることが計測された。これらは、C-3 塗装系が重防食塗装系であるため塗膜が厚く丈夫な上に、下塗りに使用されている亜鉛末を含んだ無機ジンクリッチペイントが電気化学的防食作用(犠牲陽極作用)により鋼材の腐食を防いでいる可能性がある。

なお、7月26日前後、7月28日および8月1日に腐食電流量が極端に落ち込んでいるのは、試験機に充填した塩水が不足し十分に噴霧されなかったからである。

(3) 耐久性係数の算定

次に、各塗装系の耐久性を比較するために各供試体の電気量データを二次曲線 ($y = ax^2$) で回帰した。表-20に各塗装系の回帰式の係数 a を示す。ただし、促進腐食試験であるので腐食電流量に波があり、相関係数は低い。

表-20 各供試体の回帰式

塗装系	回帰式の係数 a	相関係数 r^2
A-1	7.17E-03	0.3472
A-2	1.79E-03	0.0051
A-3	2.87E-04	0.4486
A-4	4.48E-06	0.1166
B-1	1.61E-04	0.3204
A,B 塗装系合計	8.78E-04	0.0991
C-3	7.17E-07	0.0005

y : 日電気量 (C/Day) x : 時間 (Day)

上記の回帰式は時間と電気量の関係を示す。式(4)に示したように日平均電気量と鉄の腐食速度には相関があることから、表-20 の各供試体の回帰式を日平均電気量として式(4)に用い、鉄の腐食速度の時間的変化を示す式を作成した(表-21)。

表-21 時間と鋼材腐食量の関係

塗装系	関係式
A-1	$\text{Log CR} = -1.54 + 0.758 \log x$
A-2	$\text{Log CR} = -1.76 + 0.758 \log x$
A-3	$\text{Log CR} = -2.07 + 0.758 \log x$
A-4	$\text{Log CR} = -2.75 + 0.758 \log x$
B-1	$\text{Log CR} = -2.16 + 0.758 \log x$
A,B 塗装系合計	$\text{Log CR} = -1.88 + 0.758 \log x$
C-3	$\text{Log CR} = -3.05 + 0.758 \log x$

CR: 鋼材腐食量 (mm/Year) x: 時間 (Day)

ここで、各供試体の腐食環境を示す関係式の定数項を用いて、耐久性および耐久性係数を算定する。式(1)の作成時にもっとも多くデータとして用いられた¹⁴⁾A,B 塗装系の耐久性を10とすると表-22 のようになる。なお、3.2 (3)項と同様に、実数での比較は値の範囲が大きく困難であるため、対数での比較を行う。

表-22 各塗装系の鋼材腐食速度と耐久性係数

塗装系	表-21 の定数項	耐久性	耐久性係数
A-1	-1.54	8.19	1.221
A-2	-1.76	9.36	1.068
A-3	-2.07	11.01	0.908
A-4	-2.75	14.63	0.684
B-1	-2.16	11.49	0.870
A,B 塗装系合計	-1.88	10	1
C-3	-3.05	16.22	0.617

4. 算定された耐久性係数と既存の耐久性係数との比較

以上の実験より算定された耐久性係数の妥当性を確認するために、2.1 節で用いた耐久性係数での予測結果と実験で算出された耐久性係数での予測結果の比較を行う。表-23 に実験で算出された耐久性係数をまとめる。なお、従来の耐久性係数は表-1 に示した。

塗装履歴に関する耐久性係数については、主にケレン程度や塗装施工ミスなどの影響により発生する係数であるためにACM センサでの計測が困難と判断し、今回は検証を行わなかった。また、塗装施工による耐久性係数は供試体にひび割れが生じ、信頼性のある値が得られなかった。よって塗装履歴、および塗装施工に関する耐久性係数については既存のものと同様とする。

次に、2.2 節で予測を行った同様のデータについて、実験で算定した耐久性係数を用いた予測結果を表-24 に示す。予測結果は第2章と同じく、適合率は81.25%であった。以前と同様の結果が得られた原因としては、最適化を

表-23 実験より得た耐久性係数

各種劣化要因	分類	耐久性	耐久性係数
構造形式 (N _s)	箱桁	13.88	0.720
	钣桁	10	1
	トラス桁	8.74	1.144
部位 (N _p)	桁腹板外面	10	1
	桁腹板内面	16.74	0.597
	下フランジ下面	14.44	0.693
	添接部	11.11	0.900
	桁端部	9.58	1.044
架設環境 (N _e)	一般	10	1
	河川	7.82	1.279
	海岸	5.56	1.799
塗装系 (N _r)	一般塗装系(A,B 塗装系)	10	1
	重防食塗装系(C 塗装系)	16.22	0.617
塗装施工* (N _w)	一般塗装系現地上塗	10	1
	重防食塗装系現地上塗	15	0.667
	重防食塗装系工場一括塗装	20	0.5
塗装履歴* (N _h)	新設塗装	10	1
	塗替1回	8	1.25
	塗替2回	6	1.667
	塗替3回	5	2

*従来と同様の値

行った耐久性係数が6係数のうち4係数と限られていたこと、表-2 に示したように予測を行うための点検データに分類のばらつきがあることが挙げられる。しかし、表-25 に示すように実点検結果との差の大きさを示す各データの平均二乗誤差は、表-5 と比較して小さくなっている。これは、耐久性係数が最適値に近づいていることを示している。

以上のことから、検討の範囲内の条件については、表-23 の値を耐久性係数として塗膜劣化予測式に用いることにより精度の高い劣化予測ができる。

表-24 実験で算定した耐久性係数を用いた予測結果

データ数	判定		
	合	否	適合率 (%)
32	26	6	81.25

表-25 非適合データの差

データ No.	実点検結果との差 (%)
1	0.212
2	-1.790
3	0.008
4	0.102
5	0.525
6	-2.542
平均二乗誤差	1.2907

5. 結論

本研究は寒冷地にある鋼橋について、塗装というアプ

ローチから維持管理費を縮減すべくその劣化予測を確立する目的で行われた。その結果を以下に要約する。

- (1) 実橋測定試験および塗膜下 ACM 供試体促進腐食実験から、6 耐久性係数のうち 4 耐久性係数を実測により示すことができた。
- (2) 耐久性係数の検討を行った結果、塗膜劣化予測式の予測精度が高くなり、用いる劣化環境要因が少ないため、BMS に用いることが可能である。
- (3) 実橋の腐食環境を ACM センサにて計測した結果、架設環境、構造形式、各部位の腐食特性を明らかにした。
- (4) 塗装を施した ACM センサによって塗膜下の腐食環境をモニタリングが可能であることを示した。
- (5) 北海道において腐食環境を計測したが、部位に関する耐久性以外には既存の耐久性との大きな変化はなかった。部位に関する耐久性については従来の考えと異なり^{6),15)}、主に降雨の影響を直接受ける桁外側が厳しいものとなった。この点は今後の検討課題である。

また、今後の課題としては以下の三点が挙げられる。

- ・表-2 に示した点検結果の内訳に偏りがあり、検討ができない項目があった。今後、多くの点検結果を入手し、さらに検討する必要がある。また、今回算定に至らなかった残りの耐久性係数についても検討を行い、定量的に算定する必要がある。
- ・塗装自体の寒冷地での劣化特性を検討するために、より寒冷地の塗装劣化に相關のある促進腐食条件の検討や、他の実験方法を検討する必要がある。
- ・寒冷地における腐食環境をより明らかにするために、厳寒期を含めた年間を通じて実橋測定試験を行う必要がある。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、株式会社フジエンジニアリング 秋本正信氏、株式会社ドーコン 安江哲氏に大変有益なご助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。また、本研究は平成 16 年度文部科学省科学研究費(代表者大島俊之)の補助を受け行われました。

参考文献

- 1) 社団法人日本鋼構造協会：鋼橋ライフサイクル調査研究最終報告、JSSC テクニカルレポート、No.30, 1994.
- 2) 社団法人日本鋼構造協会：鋼橋の長寿命化のための方策、JSSC テクニカルレポート、No.57, 1994.
- 3) 有馬博人、松井繁之、田中成典：鋼橋の塗装劣化曲線の同定方法、構造工学論文集、vol.44A, pp.529-536,

1998.

- 4) 松本勝、岡田信一郎、渡邊義明、丸山大亮：鋼橋における腐食劣化推定システムに関する研究、鋼構造年次論文報告集、第 4 巻、pp.235-240, 1996.
- 5) 岩渕直、大島俊之、安江哲、三上修一、村上新一、山崎智之：鋼橋主桁部材の劣化予測に関する研究、土木学会第 58 回年次学術講演会、I-476, 2003.
- 6) 社団法人日本鋼構造協会：鋼橋塗膜の評価技術(その 2. 塗膜劣化の経時変化モデルと寿命予測の検討)、JSSC テクニカルレポート、No.45, pp.13-15, 2002.
- 7) 元田慎一、鈴木揚之助、篠原正、兒島洋一、辻川茂男、押川渡、糸川昌祐、福島敏郎、出雲茂人：海洋性大気環境の腐食性評価のための ACM 型腐食センサ、材料と環境、43, pp.550-556, 1994.
- 8) 元田慎一、鈴木揚之助、篠原正、辻川茂男、押川渡、糸川昌祐、福島敏郎、出雲茂人：ACM 型腐食センサで測定した海洋性大気腐食環境条件の年変化、材料と環境、44, pp.218-225, 1995.
- 9) 元田慎一、鈴木揚之助、篠原正、辻川茂男：工業化住宅内各部位の環境腐食性、材料と環境、47, pp.651-660, 1998.
- 10) 藤原博、三宅将：鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究、土木学会論文集、No.696/I-58, pp.111-123, 2002.
- 11) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針、1995
- 12) 気象庁：電子閲覧室、<http://www.data.kishou.go.jp/>
- 13) 独立行政法人物質材料研究機構：耐食材料研究グループ、<http://www.nims.go.jp/>
- 14) 藤原博：鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究、博士論文(東京大学)、2000.
- 15) 黒木慶一：点検・欠陥・判定・補修などー塗装ー、橋梁と基礎、pp.66-69, 1974
- 16) 有馬博人、松井繁之、田中成典：鋼橋の劣化原因を考慮した塗装劣化予測システムに関する基礎的研究、構造工学論文集 vol.43A, pp.609-620.1997.
- 17) 山崎智之、大島俊之、三上修一、安江哲：鋼製材料の腐食に関する大気環境評価、土木学会北海道支部論文報告集第 58 号、pp.26-27, 2002.
- 18) 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.
- 19) 社団法人日本鋼構造協会：鋼橋塗装の LCC 低減のために、JSSC テクニカルレポート、No.55, 2002.
- 20) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧、1990.

(2004 年 9 月 17 日受付)