

ACM センサを用いた橋梁における各種腐食環境の定量的評価

Quantitative evaluation of various corrosion environment in the bridge using the ACM-sensor

北見工業大学大学院

北見工業大学

(財)北海道道路管理技術センター

北見工業大学

北見工業大学

(株)ドーコン

○学生員 岩渕 直 (Sunao Iwabuchi)

フェロー 大島俊之 (Toshiyuki Oshima)

正会員 竹田俊明 (Toshiaki Takeda)

正会員 三上修一 (Shuichi Mikami)

正会員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)

フェロー 安江 哲 (Satoshi Yasue)

1. はじめに

元来、さびによる腐食リスクを伴う材料である鋼は、その維持管理には最新の注意を払う必要がある。そのために現在では様々な防食材料が開発されている。しかしながら、既存の橋梁においては財政の悪化などもあり、完全なメンテナンスが行われているとはいえず、鋼材が腐食しているケースは少なくない¹⁾。このような状況は今後、平均橋齢があがると予想される中でメンテナンスが必要な橋梁が増加し、ますます進行していくことが考えられる。

そのため、効率的に橋梁の維持管理を行うことを目的とした Bridge Management System (BMS) が近年盛んに研究されている²⁾。BMS を用いて行われる効率の良い維持管理には、どの橋梁の、どの部材がどれだけの速さで劣化していくかを予測することが必要となる。そのためには、各種環境の腐食特性や腐食速度についての定量的データが必要になる。そこで、本研究ではその定量的データとして、腐食環境を定量的に計測することができる ACM 型大気腐食センサ (ACM センサ) を用いて、各種腐食環境に置かれている鋼橋5橋について腐食環境の計測および比較を行った。

ACM センサは利点として、腐食電流量を用いてさび環境の定量的な評価が可能なこと^{3,4)}と同時に、既存橋梁の塗装劣化状態や腐食状態から腐食環境を評価する手法とは異なり、用いられている塗装の種類に依存しない腐食環境評価手法であることが挙げられる。また、ACM センサから得られるデータは全て腐食電流という同一スケールのものであり、各橋梁間のデータ比較が容易である。設置後はデータロガーにて記録を行うので、人的・時間的負担も比較的大きくない。なお、詳細は2章にて記述する。

本研究で得られる結果は、各種腐食環境に置かれる橋梁の腐食特性を定量的に表したものである。したがって、BMS に用いることが可能である。

2. ACM センサ実橋測定実験

2.1 実験概要

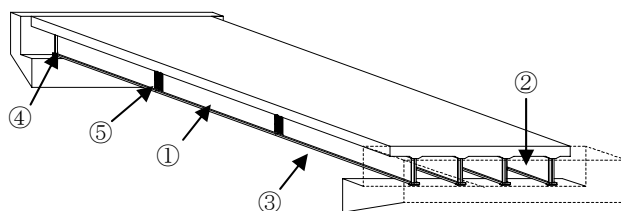
本実験では、個々の腐食環境における橋梁の特性を把握するために、表-1に示すような腐食環境にある橋梁について、ACM センサを設置し腐食環境の測定を行った。No.1, 2, 3に示す橋梁 A, B, C では構造形式が同一であるため、個々における架設環境の差異による腐食特性の違いについて比較検討することができる。また No.2, 4, 5に示す橋梁 B, D, E では同一の架設環境において、構造形式の差異によ

表-1 実験実施橋梁の架設環境および構造形式

No.	架設環境	構造形式	橋梁名
1	海岸	鈑桁	A
2	河川	鈑桁	B
3	一般	鈑桁	C
4	河川	トラス桁	D
5	河川	箱桁	E

る腐食特性の違いを検討する。

本実験では、これらの橋梁の各部材に ACM センサを設置し、各部材の腐食環境を計測した。ACM センサを設置した部材を図-1に示す。なお、トラス橋については添接部を格点部として設置した。また、各種環境別および構造形式別の比較に加えて、各部材毎のデータを比較することにより、部材別の腐食環境の比較を得ることとした。



センサ番号	部材	設置角
①	ウェブ外面	90°
②	ウェブ内側	90°
③	下フランジ下面	180°(下向き)
④	桁端部	90°
⑤	添接部	90°

図-1 ACM センサ取り付け箇所（鈑桁橋）

2.2 ACM 型大気腐食センサ⁴⁾

ACM センサとは、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。ガルバニック腐食とは異種金属間接触による腐食のことである。本センサの構成を図1に示す。厚さ 0.8mm の炭素鋼板 (64×64mm) の基盤上に 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) が基盤との絶縁型も保たれるように積層印刷されている。

(図-2 および図-3). Ag 導電ペーストがカソードとなり、炭素鋼基盤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 $0.1\text{nA} \sim 13\text{mA}$ であり、その分解能は $0.1\text{nA} \sim 10\mu\text{A}$ では 0.1nA , $10\mu\text{A} \sim 13\text{mA}$ では $1\mu\text{A}$ である。本実験では 0.1nA 以上を腐食に有意な電流として解析に用いた。

また、ACM センサから得られたデータはデータロガーに蓄積し、Compact Flash を記録媒体として解析を行った。

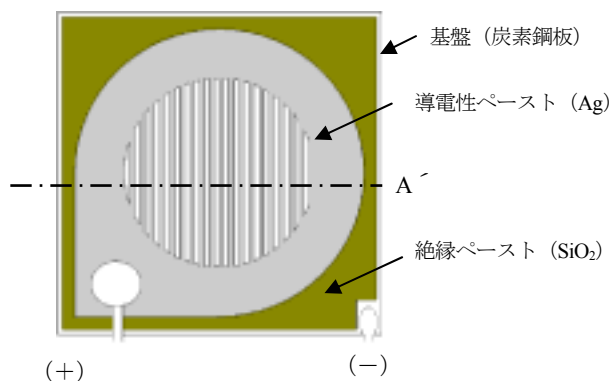


図-2 ACM センサ平面図

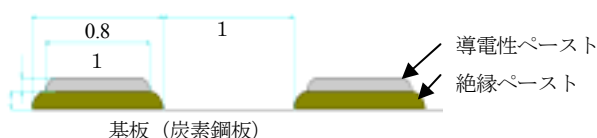


図-3 ACM センサ断面図 (単位: mm)

2.3 実験結果

以下、図-4 から図-8 に、A 橋で測定した ACM センサによる腐食電流量を示す。

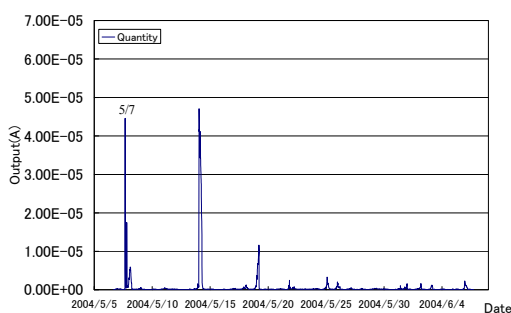


図-4 ①ウェブ外面の ACM センサ出力 (A 橋)

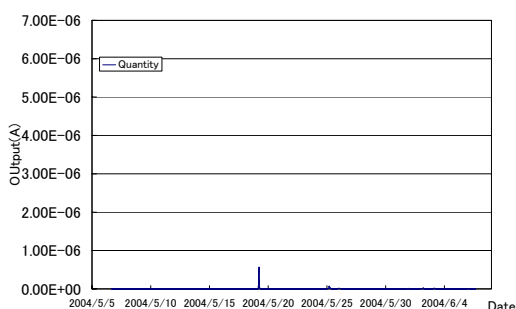


図-5 ②ウェブ内側の ACM センサ出力 (A 橋)

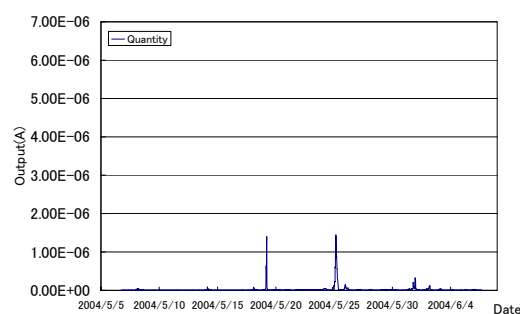


図-6 ③下フランジ下面の ACM センサ出力 (A 橋)

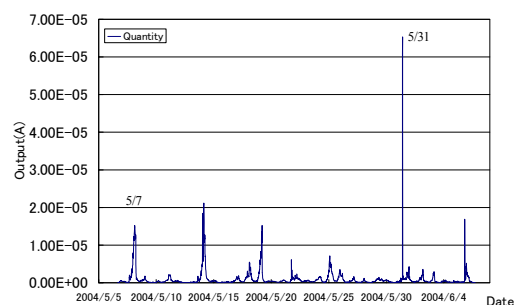


図-7 ④桁端部の ACM センサ出力 (A 橋)

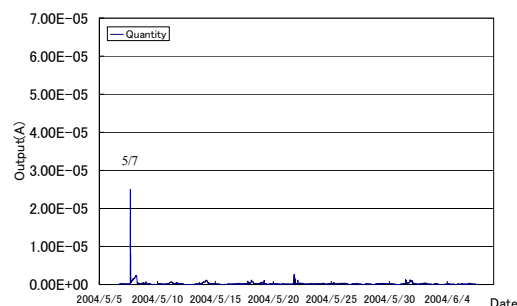


図-8 ⑤添接部の ACM センサ出力 (A 橋)

A 橋の各部材に貼り付けた ACM センサでは以上の結果が得られた。なお横軸は日付、縦軸は腐食電流量を示し、グラフが突出した箇所は大きな腐食電流が流れたことを示す。これらと気象観測データ⁵⁾を比較すると、それぞれ降雨時に腐食電流の増加があることが分かる。5月7日には 5mm/day の降雨があったが、それに対応しウェブ外面、桁端部および添接部の各 ACM センサに腐食電流量の増加が認められる。しかし、それに対して降雨による雨滴が直接 ACM センサにあたらないウェブ内側および下フランジ下面ではそれほど大きな電流は計測されていない。また、5月31日には桁端部のみで大きな腐食電流が計測されている。これは降雨による水滴が風向きにより他の ACM センサには当たらずに、ジョイント部からの漏水があった桁端部の ACM センサのみが反応したと思われる。このように本結果は実際の降雨と相関があることから、当該橋梁の腐食環境を確実に捉えているといえる。

次に、これら各部材の日平均電気量 Q を表-2 に示す。鋼材は 2.2 で述べたように腐食するとき、腐食電流を発生する。よってこれらの強度、つまり日平均電気量から腐食環境が推定できる。また、表-2 と同時に B 橋、C 橋、D 橋、E 橋の各部材の日平均電気量を表-3 から表-6 に示す。

表-2 A 橋の日平均電気量

部位	日平均電気量 Q (C/day)
ウェブ外面	4.95E-02
ウェブ内側	1.61E-04
下フランジ下面	1.28E-03
桁端部	7.96E-02
添接部	1.80E-02

表-3 B 橋の日平均電気量

部位	日平均電気量 Q (C/day)
ウェブ外面	6.83E-03
ウェブ内側	0.00E-00
下フランジ下面	9.62E-06
桁端部	3.62E-06
添接部	1.03E-04

表-4 C 橋の日平均電気量

部位	日平均電気量 Q (C/day)
ウェブ外面	1.62E-05
ウェブ内側	1.59E-08
下フランジ下面	6.96E-06
桁端部	2.30E-05
添接部	2.24E-04

表-5 D 橋の日平均電気量

部位	日平均電気量 Q (C/day)
ウェブ外面	9.38E-03
ウェブ内側	1.80E-05
下フランジ下面	0.00E-00
桁端部	1.34E-02
添接部	1.35E-03

表-6 E 橋の日平均電気量

部位	日平均電気量 Q (C/day)
ウェブ外面	6.64E-06
ウェブ内側	0.00E-00
下フランジ下面	0.00E-00
桁端部	6.46E-05
添接部	1.03E-04

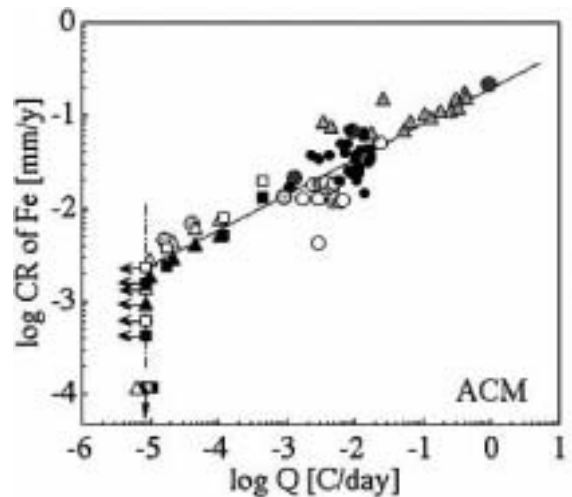
2.4 年平均腐食量

2.3 では各橋の各部材における日平均電気量を示した。しかし、橋梁の維持管理を行う上では、実際の腐食速度が目安として重要となる。ACM センサで測定された日平均電気量と鋼材の腐食速度は篠原らが図-7 で示す相関性を明らかにしている⁴⁾。以下に、図-7 の傾きのある直線の式を示す。

$$\log \text{CR of Fe} = 0.379 \log Q - 0.723 \quad (1)$$

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

$\log Q$: 日平均電気量 [C/day]



CR of Fe: 鉄の腐食速度 Q: 日平均電気量

図-7 日平均電気量と鋼材腐食速度の関係⁴⁾

2.3 では各環境・各部材における ACM センサの日平均電気量を明らかにしている。これらの測定結果と式(1)を用いて各種腐食環境の鋼材腐食速度を明らかにする。

(1) 架設環境別鋼材腐食速度

架設環境が異なる A 橋, B 橋, C 橋の日平均電気量を用いて各架設環境別の鋼材の腐食速度を算定する。腐食速度の算定には式(1)を用いる。表-7 に各架設環境の日平均電気量, その対数, および年間腐食量を示す。なお, 各架設環境における日平均電気量には当該環境にある A 橋, B 橋, C 橋の各部材に設置した ACM センサ出力の平均を用いた。

表-7 架設環境別の鋼材年間腐食量

架設環境	日平均電気量 Q(C/day)	Log Q	年間腐食量 (mm/year)
河川	1.3896E-03	-2.857	0.01564
海岸	2.9717E-02	-1.527	0.04992
一般	5.3932E-05	-4.268	0.00456

(2) 構造形式別鋼材腐食速度

(1)と同様に構造形式が異なる B 橋, D 橋, E 橋の日平均電気量を用いて各構造形式の鋼材の腐食速度を算定する。

表-8 構造形式別の鋼材年間腐食量

構造形式	日平均電気量 Q(C/day)	Log Q	年間腐食量 (mm/year)
鈑桁	1.3896E-03	-2.857	0.01564
トラス桁	4.8309E-03	-2.316	0.02508
箱桁	1.7806E-05	-4.749	0.00300

(3) 各部材の鋼材腐食速度

ここでは、実験を行った 5 橋についての各部材の日平均腐食量をそれぞれ平均して各部材の日平均電気量とした。表-9 に各部材における日平均電気量, その対数, および年間腐食量を示す。

表-9 各部材の鋼材年間腐食量

部材	日平均電気 量 Q(C/day)	Log Q	年間腐食量 (mm/year)
ウェブ外面	1.3149E-02	-1.881	0.03665
ウェブ内側	3.5770E-05	-4.446	0.00391
下フランジ 下面	2.5902E-04	-3.587	0.00827
桁端部	1.8619E-02	-1.730	0.04181
添接部	4.9280E-03	-2.307	0.02527

3. 腐食傾向の実際との比較

2 章では ACM センサを用いて架設環境、構造形式、および部材別の鋼材の腐食速度を算定した。ここでは、この結果と実際の腐食状況との比較を行う。

表-10 に社団法人日本鋼構造協会の示す塗膜の耐久性の相対比較例⁹⁾と、それに対応する本実験による年間腐食量を示す。

表-10 各要因における塗膜耐久性の相対比較例(抜粋)⁹⁾と本実験結果

各種要因	分類	耐久性*	本実験による 年間腐食量 (mm/year)
橋梁構造	箱桁	10	0.00300
	鈑桁	9	0.01564
	トラス桁	8	0.02508
橋梁部位	桁腹板外面	10	0.03665
	下フランジ下面	5	0.00827
	添接部	5	0.02527
	桁端部	5	0.04181
架設環境	一般	10	0.00456
	海岸	4	0.04992

*数値が大きいほど耐久性が高いことを示す

同協会では架設環境による耐久性の相違は、飛来した海塩粒子が塗装表面に付着し、その潮解性により大気中の水分を吸着することでぬれ時間が多くなることや付着塩分が電解質として働き、さびの発生が促進されるためとしている⁹⁾。鋼材の腐食も同様の原因で発生することから、相対比較例と本実験による年間腐食量が同じく箱桁、鈑桁、トラス桁の順でさび易くなると示していることは、実験として妥当な数値を得られたと考えられる。

橋梁部位については水分の供給の差が原因と述べられている⁹⁾が、本実験では相対比較例とは異なる腐食しやすいの順序となった。この原因として、下フランジ下面では腐食性水溶液が濃縮してさびが発生しやすくなるといわれるが⁷⁾、ACM センサの設置期間が1ヶ月余りと短く、腐食性物質の濃縮段階まで進んでいないことが考えられる。またウェブ外面や桁端部、添接部の腐食速度が大きいのは、直接雨水に曝され易いためであると考えられる。

しかし、橋梁構造および架設環境に関する相対比較例と本実験による年間腐食量の腐食傾向は一致していることから、これらについては妥当な腐食速度を算出しているといえる。

4. 結論

本研究は、各種環境におかれる鋼橋について、その腐食環境を定量的に明らかにすることを目的として行われた。以下に、本研究で得られた結果を要約する。

- (1) 鋼橋の架設環境別、構造形式別、および各部材の鋼材の腐食環境を、ACM センサを用いることにより当該橋梁、部材の鋼材年間腐食量として定量的に明らかにすることができた。
- (2) 架設環境別にみると、一般環境、河川環境、海岸環境の順に腐食環境が厳しくなることが確認できた。
- (3) 構造形式別にみると、箱桁、鈑桁、トラス桁の順に腐食が進行しやすくなることを確認できた。
- (4) 部材別にみると、ウェブ内側、下フランジ下面、添接部、ウェブ外面、桁端部の順で鋼材の腐食環境が厳しくなるという実験結果を得た。

また、今後の課題として以下の点が挙げられる。

- ・各環境について1橋のみを抽出して実験を行っており、得られるデータに各橋梁の特性が現れている可能性がある。よって、今後は同環境にある多数の橋梁について同様の実験を行い、実験結果の精度の向上および信頼性の向上の必要がある。
- ・長期間の測定により、季節および測定期間による腐食電流の相違を明らかにする必要がある。

謝辞

本研究をおこなうにあたり、株式会社フジエンジニアリング(本学客員教授)松本正信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。本研究は日本学術振興会科学研究費(課題番号:15560401 代表者 大島俊之)の補助を受け行われました。

参考文献

- 1)黒木慶一：点検・欠陥・判定・補修などー塗装ー，橋梁と基礎 10 月号，pp.66-69，1974
- 2) 椎橋亜由美，佐藤誠，池田憲二，大島俊之，丹波郁恵，三上修一：橋梁マネジメントシステムの開発，土木学会年次学術講演会講演概要集第1部 57 巻，pp.483-484，2002
- 3)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
- 4)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腐食環境特性，材料と環境 47，pp.651-660，1998
- 5)気象庁：電子閲覧室，<http://www.data.kishou.go.jp/>
- 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，pp.13-16，1998
- 7) 社団法人日本橋梁建設協会：橋梁技術者のための塗装ガイドブック，pp.106，1996
- 8) 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
- 9)岩淵直，大島俊之，三上修一，山崎智之，安江哲，竹田俊明：ACM 型腐食センサによる I 桁橋主桁の腐食環境に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集第 60 号，pp.254-257，2004