

大気腐食モニタリングセンサによる 塗装評価に関する一考察

前田 健児

福井県工業技術センター 建設技術研究部 (〒918-8108福井県福井市春日3丁目303)

鋼製橋梁のライフサイクルコスト (LCC, Life cycle cost) 縮減には適切な点検および塗替塗装が重要な役割を果たすが、塗替時期が定量的に示されていないのが現状である。省令・告示の施行等により、5年に1度の橋梁近接目視点検義務化により橋梁に近づく機会が増加する。そこで、塗替塗装に使われるRC-I 塗装系およびRC-III 塗装系における防食効果・浸透抑制効果のある防食下地および下塗塗装のみの簡易な塗装に着目して、点検と同時に簡易な塗装を行い全面塗替え時期を延ばす塗装を確立することを目的とした。本報では大気腐食モニタリングセンサによる10種類の応急塗装の腐食速度評価および腐食速度と膜厚の関係を報告する。

キーワード 鋼橋, 防食, 塗装, ACMセンサ

1. 目的

鋼橋, 鉄道, 鉄塔などをはじめとする多くの鋼構造物が大気環境下に暴露され腐食による劣化, 損傷が進んでいる。特に鋼橋は構造が複雑かつ構成する材料が多いことから、点検および補修が困難な構造物である。

福井県管理鋼橋数は 390 橋あり, 総延長 31,197m と県管理橋梁延長の約 5 割を占める。昭和 30 年から昭和 50 年にかけて建設された鋼橋が 169 橋, 建設後 50 年を経過した鋼橋が約 2 割 (59 橋), 10 年後には約 3 割 (115 橋) と今後, 維持管理を必要とする鋼橋は増えていく。

鋼橋の部位レベルの腐食環境をモニタリングするセンサに ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサ (以下, ACMセンサ) が開発されている。このセンサを用いて, 未補修鋼橋の最も腐食による劣化, 損傷が進行している箇所, または断面欠損が著しい箇所をモニタリングすることで, その鋼橋の最も厳しい腐食環境をモニタリングすることができる。

本研究では, 予防保全により鋼橋の長寿命化を図ることで, 維持管理費のコスト縮減, 平均化を図ることを目的として, 局部的に腐食した箇所のみを 5 年に 1 度の点検と同時に簡易な除錆および塗装をして, 全面塗り替え時期を延ばす塗装 (以下, 応急塗装とする) を確立するため, 屋外環境下 (雨がかりのある条件下) において ACM センサによる大気環境の評価および応急塗装の腐食速度を評価した結果を報告する。

2. 実験方法

暴露箇所の様子を写真-1に, 諸元を表-1に示す。300×300×800mmのH形鋼にACMセンサを厚さ1mmの屋外用両面テープで接着させ, 南向き45°に取り付

写真-1 実験箇所



表-1 実験箇所の諸元

離岸距離 L(km)	気温 T(°C)	湿度 RH(%)	降水量 P(mm)	飛来塩分量 [※] w(mdd)
16.2	17	72	2,044	0.23

※飛来塩分量は2017年2月の計測値

表-2 ACMセンサ上の塗装条件

塗装系名	下地処理 (μm)		下塗り 1回 (μm)		下塗り 2回 (μm)		膜厚 (μm)
Zn40	有機ジンクリッチペイント	40	なし	—	なし	—	40
Zn60	有機ジンクリッチペイント	60	なし	—	なし	—	60
Zn80	有機ジンクリッチペイント	80	なし	—	なし	—	80
Ep40	なし	—	エポキシ樹脂	40	なし	—	40
MEp40	なし	—	変性エポキシ樹脂	40	なし	—	40
An40	なし	—	さび止めペイント	40	なし	—	40
ZE80	有機ジンクリッチペイント	40	エポキシ樹脂	40	なし	—	80
ZM80	有機ジンクリッチペイント	40	変性エポキシ樹脂	40	なし	—	80
ZA80	有機ジンクリッチペイント	40	さび止めペイント	40	なし	—	80
ZMII120	有機ジンクリッチペイント	40	変性エポキシ樹脂	40	変性エポキシ樹脂	40	120

けた。ACM センサには塗装系を塗付して、暴露期間中の電流出力 I (μm), 気温 T(°C), 湿度 RH (%)を計測した。ACM センサとは、2種類の金属 (Fe - Ag) を互いに絶縁して大気中に暴露すると、降雨や結露で表面に水膜が形成され、その水膜が2種類の金属を覆い電流が流れる。その電流を測定して解析することにより腐食速度 CRを推定するものである。

塗装系は表-2の10種類とした。塗装は下地処理後4日間養生。養生後下塗り1回目を塗付。下塗り1回目完了後、24時間再養生。再養生後下塗り2回目を塗付。塗装系を安定させるため、下塗り2回目後4日間最終養生を行った。ACM センサは、大きさ64mm×64mmのFe - Ag型、腐食防食学会認定品を用い、ACMセンサの電流出力と温度、湿度はデータロガー(4ch ACMデータロガー SACM-304B, (株)シュリンクス)にて10分間隔で連続計測した。解析には、解析ソフト(Ver.1.2, 腐食防食学会頒布)を使用した。試験期間は、2016年3月から2017月の13ヶ月間である。

3. 結果と考察

(1) 福井県の大気腐食環境

福井県における無塗装炭素鋼の腐食速度を図-1に示す。月別の温湿度を図-2、降水量を図-3に示す。腐食速度は、夏期(6~8月)に減少し、冬期(1~3月)に増加することがわかった。季節によってはっきり差が出るということは、季節的な特徴である降雨時間、温度、湿度が影響すると考えられる。測定結果より、湿度が上昇すると腐食速度も上昇する傾向がみられ、降雨量と腐食速度には特徴はみられない。冬期に腐食速度が上昇する理由として塩分の供給があり、県内6箇所で行った飛来塩分調査を実施した結果、全ての箇所でも1月が最大となった。また、冬期には路面凍結防止のため、凍結防止剤の散布による人工的な塩分供給も腐食速度が上昇した原因と考えられる。

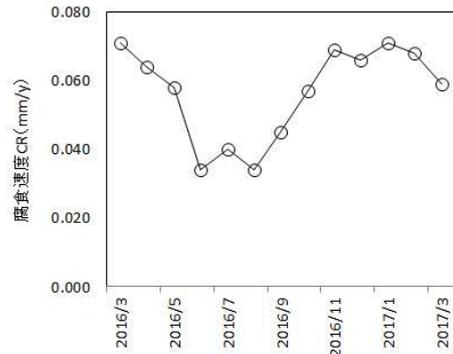


図-1 月別の腐食速度

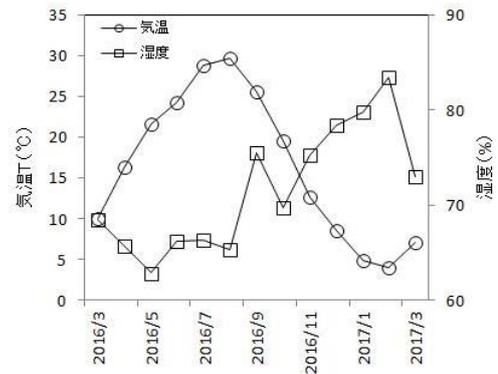


図-2 月別の温湿度

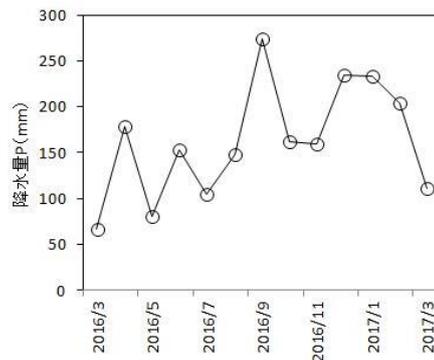


図-3 月別の降雨量

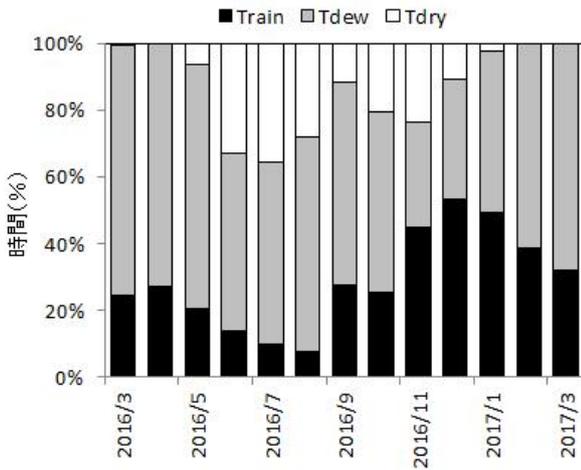


図-4 月別の降雨, 結露, 乾燥時間

2016年度の屋外環境下(雨かがりのある条件下)における無塗装炭素鋼の腐食速度CRは0.055mm/yであり、沖縄西原町の0.017mm/y(7年経過で約0.12mm) ¹⁾と比較すると、福井県福井市では3倍以上の速度で腐食することになる。

(2) 降雨・結露・乾燥の判別

図-4に測定期間の降雨時間(T_{rain} , $I \geq 1\mu A$), 結露時間(T_{dew} , $1\mu A > I > 10nA$), 乾燥時間(T_{dry} , $I \leq 10nA$)に分け月別に示す。冬期に降雨時間の割合が増え、夏期に乾燥時間の割合が増えることがわかる。また、測定期間中の平均値は T_{rain} が 28.9%, T_{dew} が 57.9%, T_{dry} が 13.2%と冬期に曇りや雨が多い日本海岸気候が顕著に現れた。沖縄県西原町 (T_{rain} : 9%, T_{dew} : 48%, T_{dry} : 43%)と比較すると福井県福井市は金属が腐食と言われているぬれ時間 (Time of wetness: $TOW = T_{dew} + T_{rain}$)が多い県であることが分かる。特に飛来塩分の多い冬期(1月~3月)の T_{dew} は59.3%, TOWは99.2%と多く、飛来塩分と水分が同時に供給される冬期の腐食環境の把握が重要な県であると言える。

(3) 腐食速度と降雨, 結露, 乾燥, ぬれ時間の相関関係

図-5に腐食速度と降雨時間, 結露時間, 乾燥時間,

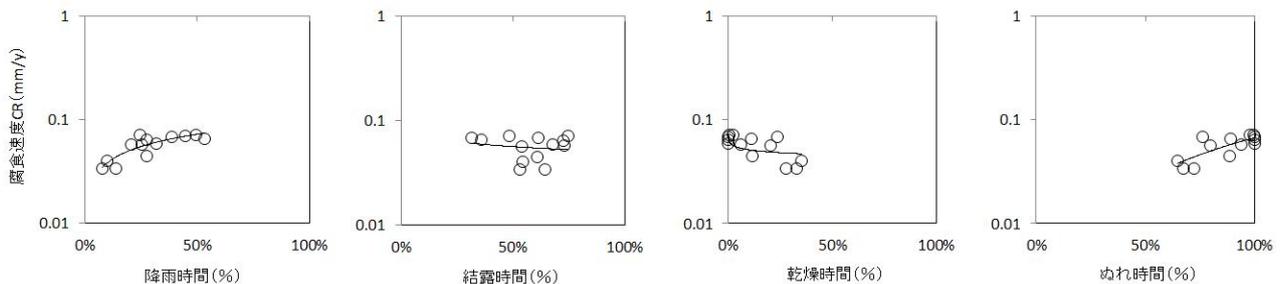


図-5 腐食速度と降雨時間, 結露時間, 乾燥時間, ぬれ時間の相関関係

表-3 腐食速度と各時間との相関係数

降雨時間 T_{rain}	0.857
結露時間 T_{dew}	0.161
乾燥時間 T_{dry}	0.580
ぬれ時間 TOW	0.770

表-4 計測期間中の全電気量, 腐食速度および低減効果

塗装系名	計測期間の全電気量 $\Sigma I(\mu A)^*$	腐食速度** CR(mm/y)	低減効果
無塗装	94,253	0.057	1.0
Zn40	16,886	0.036	1.6
Zn60	12,796	0.032	1.8
Zn80	10,051	0.029	2.0
Ep40	594	0.008	7.1
MEp40	1,187	0.009	6.3
An40	702	0.007	8.1
ZE80	82	0.004	14.3
ZM80	428	0.005	11.4
ZA80	985	0.007	8.1
ZMII120	30	0.003	19.0

*2016年3月から2017年3月の13ヶ月の合計および平均値

ぬれ時間の相関関係を示す。また相関係数を表-3に示す。腐食速度 CR と降雨時間 T_{rain} には強い相関関係が、結露時間 T_{dew} にはほとんど相関関係がなく、乾燥時間 T_{dry} には相関関係があり、ぬれ時間 TOW には強い相関関係がある。屋外環境下(雨かがりのある条件下)では、降雨時間およびぬれ時間が腐食速度に影響がある可能性がある。

(4) 塗装の評価

大気腐食環境をモニタリングするセンサ上に塗装を施工し、各塗装の効果を評価した結果を表-4に示す。膜厚が厚くなるにつれて腐食速度が減少することを確認した。有機ジンクリッチペイント Zn膜厚 T と腐食速度 CRの相関係数は0.999とほぼ完全な相関関係にあることが確認できたため、関係式を以下に示す。

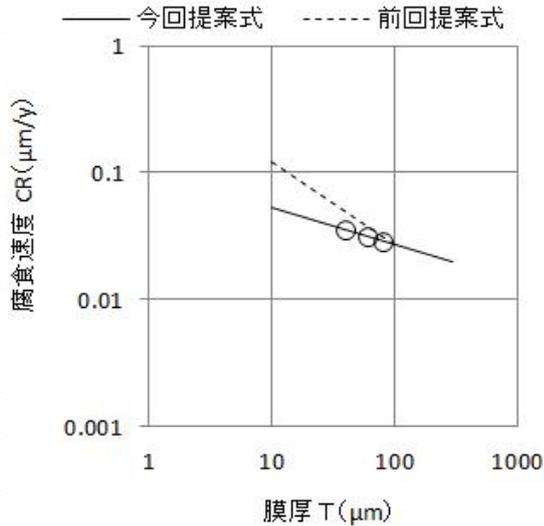


図-6 有機ジンクリッチペイントの腐食速度と膜厚の関係

$$\log CR (\text{mm/y}) = -0.296 \log T (\mu\text{m}) - 0.974 \quad (1)$$

図-6に今回得られたZnの腐食速度と膜厚の関係を実線で示す。前回提案式³⁾を点線で示す。前回提案時の測定期間は2016年12月から2017年3月の4ヶ月間であり、大気腐食環境が最も厳しい冬期である。前回提案式は今回提案式に比べ、勾配が急である。勾配が急になるということは、薄膜厚が腐食速度に与える影響が増加することを意味している。すなわち薄膜厚の場合、大気腐食環境が厳しくなると腐食速度低減効果が減少し、一定の膜厚を確保することで腐食環境の違いによる腐食速度低減効果が変化しなくなる可能性があり、こまめな管理により膜厚を一定以上保ち続けることが重要となる。

Znの単層使用による腐食速度は、膜厚40μmで0.036mm/yと無塗装に比べ1.6倍、80μmでは2.0倍の腐食速度低減効果がある。一方、Ep40やMEp40、An40は6.3～8.1倍の腐食速度低減効果があり、Znは他の塗装に比べ腐食速度低減効果が低いことが確認された。膜厚80μmのZn80とZE80(Zn40μmにEp40μmを上塗り)で比較すると、ZE80はZn80に比べ、腐食速度低減効果が7倍以上の差が確認された。この原因は、Znは平均10μm以下の金属Zn粒子が全体に分布しており、多孔質な状態である⁴⁾。この構造により、水や酸素がZnに進入しやすいことで腐食速度が上昇したと考えられる。よって、Znは塗膜の構造および腐食速度低減効果より単層での使用は他の塗装に比べて有効性は低いといえる。実橋でもZnペイントは最下層で使用されており、上塗りなどの塗装が何らかの原因で劣化、剥離してZnペイントが露出した場合のことを考えると、こまめな点検および補修が必要である。

4. 結論

本報では、ACMセンサによる大気環境の評価および大気暴露環境下における塗装系の腐食速度を計測・評価した。以下に本研究で得られた成果を列挙する。

- 1) 福井県福井市における無塗装炭素鋼の腐食速度は0.055mm/y.
- 2) 福井県はぬれている時間が長く、その内訳は降雨時間 T_{rain} が 28.9%、結露時間 T_{dew} が 57.9%、乾燥時間 T_{dry} が 13.2%.
- 3) 屋外環境下(雨かがりのある条件下)では、降雨時間 T_{rain} およびぬれ時間 TOW が腐食速度に影響がある可能性がある.
- 4) Znの腐食速度 CR (mm/y) と膜厚 T (μm) には、ほぼ完全な相関関係があり、その関係は次式で示される.

$$\log CR (\text{mm/y}) = -0.296 \log T (\mu\text{m}) - 0.974 \quad (1)$$

- 5) Znの単層使用は腐食低減効果が低く、上塗りなどの塗装が劣化、剥離しないようこまめな点検・補修が必要である.

謝辞：ACMセンサへの塗装材の塗付について、(株)野村塗装店 野村達生様、小林鉄也様、並びに北山幸弘様にご協力いただきましたことを深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 押川渡：沖縄における金属の腐食と環境評価，ウェザリング技術研究成果発表会講演テキスト，73-83(2003).
- 2) 元田ら：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，44，4，218-225(1995).
- 3) 前田ら：ACMセンサーによる応急塗装の腐食速度評価，土木学会年次学術講演会概要集，71，I-066(2016).
- 4) 長澤ら：高塩害環境下における無機Znプライマ塗布鋼板のZn腐食生成物の解析，材料と環境，199-202(2015).