

LCC縮減を目的とした点検と同時にできる橋梁等の応急塗装の研究（第2報）

Studies of the temporary coating treatments on bridges performed with its inspection for the purpose of LCC reduction(part.2)

前田 健児

要 旨

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て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塗装系でも、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して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。選定した応急塗装を実橋に塗付して、大気環境との関係を解明するため、飛来塩分調査、付着塩分調査、ACMセンサによる腐食環境をモニタリングした結果を報告する。

キーワード：鋼橋、防食、塗装、ACMセンサ

1. はじめに

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¹⁾。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）¹⁾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。

腐食の主な原因としては、大気環境である飛来塩分量、気温、湿度、結露による濡れ時間がある。福井県における年平均飛来塩分量は最も多い箇所ですら左右高架橋の約24mdd²⁾（mg/dm²/day：1日あたりの100cm²への飛来塩分量）で沖縄県の約3mdd³⁾を桁違いに上回り、福井県は冬期波浪による飛来塩分量が非常に多く、大気環境と腐食に関する研究が重要な県である。

飛来塩分量などの大気環境と鋼橋の腐食速度、塗装膜厚減耗量との関係を解明することで、鋼橋における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）の厚さや仕様を決定することができる。

以上より、本報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、応急塗装の確立について県内の鋼橋にて実施した大気環境調査の結果を報告する。

2. 応急塗装の選定

第1報¹⁾で報告した通り、ACMセンサに10種類の塗装系を塗付して、①腐食速度を測定した結果を表-1に示す。応急塗装は手工具による除錆後塗装するものであり、除錆面には腐食生成物が残存する。そのため、腐食生成物を残存させた鋼板上に塗装を塗付した金属試験片の②目視評価、点検と同時にを行うため簡易に運ぶことができる道具のみでの作業を必要とするため③施工性、点検期間中での応急塗装の実施が必要となるため④作業時間。以上4つを総合的に判断した結果を表-2に示す。実橋への応急塗装はジンクリッチペイント Zn、エポキシ樹脂 Ep、変性エポキシ樹脂 MEp の単層、ジンクリッチペイントとエポキシ樹脂 ZE およびジンクリッチペイントと変性エポキシ樹脂 ZM の2層の計5種類とする。

表－2 応急塗装選定表

塗装系	Zn40	Zn60	Zn80	Ep40	MEp40	An40	ZE80	ZM80	ZA80	ZMII120
年間腐食速度	0.050	0.037	0.032	0.007	0.013	0.008	0.007	0.009	0.010	0.007
	1	3	3	5	5	5	5	5	5	5
目視	200日 発錆	200日 発錆	250日 塗膜割	300日 点錆	250日 変色	100日 発錆	300日 点錆	250日 変色	100日 発錆	250日 変色
	2	2	3	4	3	1	4	3	1	3
施工性	スプレー	スプレー	スプレー	刷毛 1回	刷毛 1回	刷毛 1回	スプレー 刷毛1	スプレー 刷毛1	スプレー 刷毛1	スプレー 刷毛2
	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1
作業時間	1日	1日	1日	1日	1日	1日	1日	1日	1日	2日
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
総合評価	×	△	○	◎	○	△	◎	○	△	△
	8	10	11	13	12	10	13	12	10	10

表－1 全電気量および腐食速度測定

塗装系名	計測期間の 全電流値(μA)	腐食速度 ¹⁾ (mm/y)
無塗装	52,040	0.071
Zn40	15,317	0.050
Zn60	4,497	0.037
Zn80	3,432	0.032
Ep40	48	0.007
MEp40	891	0.013
An40	267	0.008
ZE80	175	0.007
ZM80	297	0.009
ZA80	311	0.010
ZMII120	83	0.007

1) 測定期間は2016年1月～3月

3. 実験場所

第1報¹⁾で報告した通り、離岸距離 L (km)、凍結防止剤の散布有無、地形の3要素から嶺北地域にて6橋を実験場所として選定した。また、嶺南地域は、リアス式海岸で一方向に長い地形であり海岸線方向でほとんど違いがないことから離岸距離 L (km)の1要素から4橋を実験場所として選定した。

各実験場所の離岸距離 L (km)、気温 T (°C)、相対湿度 RH (%), 降水量 P (mm), 飛来塩分量 (土

研式タンク法) C (mdd) の値を表-3に示す。嶺南地域の4橋はデータが少ないことから表から除外する。T, RH, Cは2016年10月から2017年3月の平均値, Pは2016年4月から2017年3月の1年間の実験場所から最も近接する地方気象台観測値の合計値とする。

4. 実験方法

(1) 飛来塩分調査

測定方法には、JIS Z 2382 で定められているウェットキャンドル法・ドライガーゼ法、旧建設省土木研究所にて考案された土研式タンク法がある。その中でも福井県内で測定実績が多い、土研式タンク法により各橋梁位置での飛来塩分量を計測した。

土研式タンク法とは、縦72.4cm、横42.4cm、奥行き29.4cmのステンレス製の箱に捕集口(縦10cm、横10cm)が1つ空いたものであり、1方向の飛来塩分のみをとらえる構造である。よって、土研式タンク法にて飛来塩分を採取する場合、その地点の卓越風向と捕集口の向きを吟味する必要がある。今回の土研式タンク法の捕集箱開口向きは過去10年間(2006～2015年)の最多風向を受けられる方向に設置した。計測間隔は1ヶ月、測定期間は2016年10月から2017年3月の6ヶ月である。

表－3 実験箇所の諸元

橋梁名	離岸距離 L(km)	気温 T(°C)	湿度 RH(%)	降水量 P(mm)	飛来塩分量 C(mdd)
A 橋	0.7	6	88	2,037	0.19
B 橋	2.4	8	84	1,861	1.17
C 橋	7.4	7	94	2,283	0.11
D 橋	28.3	6	98	2,132	0.045
E 橋	28.4	7	92	2,334	0.084
F 橋	59.8	4	94	2,422	0.14

(2) 付着塩分調査

腐食速度や飛来塩分量などの外乱と鋼橋の表面に付着する塩分量の関係を調べるため、腐食速度測定箇所と同じ箇所を計測した。付着塩分の測定には表面塩分計 SNA-3000（サンコウ電子研究所）を使用した。測定方式は電気伝導率法（JIS Z 0313 に対応）、測定範囲は 0～1,999mg/m²。毎月の付着塩分量を測定するため、測定後は水道水およびエタノールにて測定面の付着物を除去している。測定期間は 2016 年 10 月から 2017 年 3 月の 6 ヶ月である。

(3) 日平均電気量と腐食速度の算出

鋼橋の橋梁調査を実施して、最も腐食による損傷が進行している箇所の腐食環境を計測するため、鋼橋の部材に ACM センサを設置した。センサは、大きさ 64×64mm 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気温、湿度はデータロガー（1ch UEDA・MS ACM ロガー、UEDA・MS 温湿度ロガー、植田工業株）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）を使用して日平均電気量 Q(C/day) を算出した。測定期間は、平成 28 年 10 月から平成 29 年 3 月の 6 ヶ月間である。

5. 結果および考察

(1-1) 飛来塩分量

飛来物のイオンクロマトグラフ分析を行った結果を図-1、図-2に示す。冬期に NaCl や Mg が増加した。これはいわゆる日本海側気候の特徴である北西からの季節風による冬期波浪が原因と考えられる。福井県嶺北地域の越前海岸では、波の花と呼ばれる現象が発生して、海岸の際に波の花が貯まり、それが強風に巻き上げられ宙を舞う。波の花には塩分が含まれているため、海岸部では冬期間急激に飛来塩分量が増加する原因の一つと考えられる。NaCl と Mg は F 橋を除き、同様な変動を示し、海水に含まれる Mg が飛来していると考えられる。F 橋に関しては(1-3)で示すとおり、凍結防止剤の影響を受けている可能性がある。

(1-2) 飛来塩分量と標高との関係

各橋梁の標高 H と計測期間の平均飛来塩分量 C を表-4に示す。C と L との相関係数は 0.5628、C と H の相関係数は 0.7299 と、L より H の方が飛来塩分量に影響がある結果となった。月別および全体の相関係数を表-5に示す。すべての結果で H が優位な結果となった。

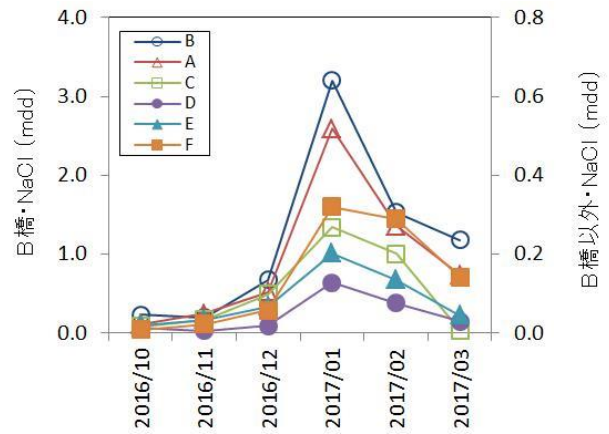


図-1 飛来塩分量

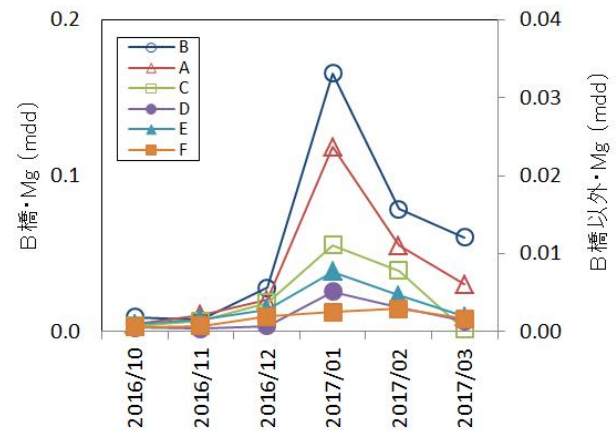


図-2 マグネシウムイオン量

表-4 実橋の標高と飛来塩分量

橋梁名	標高 H(m)	飛来塩分量 C(mdd)
A橋	314	0.19
B橋	5	1.17
C橋	184	0.11
D橋	183	0.45
E橋	73	0.84
F橋	560	0.14

表-5 飛来塩分量との相関係数

測定月	離岸距離 L	標高 H
10月	0.5628	0.9439
11月	0.6165	0.6844
12月	0.5957	0.7567
1月	0.5992	0.7440
2月	0.4948	0.6782
3月	0.5207	0.6544
測定期間	0.5628	0.7299
全月	0.4100	0.5395

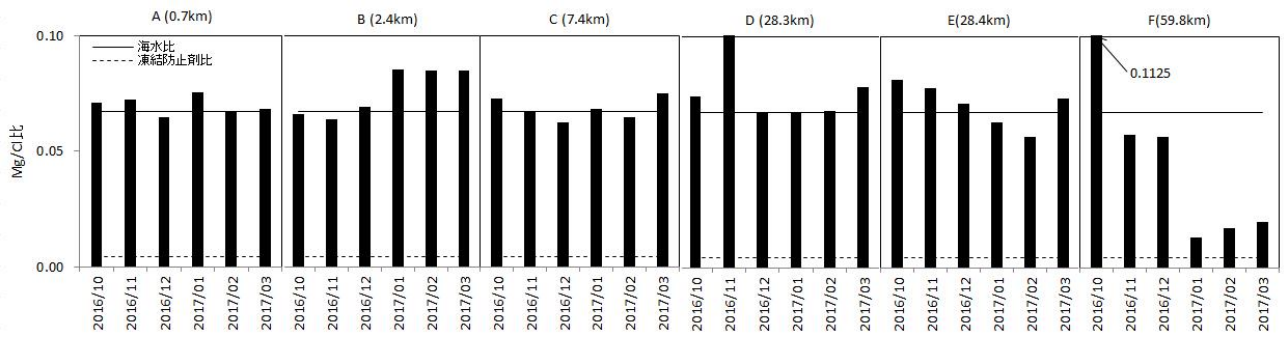


図-3 飛来塩分の Mg/Cl 比

今回の測定箇所はすべて橋梁であり、河川上に測点を設けている。通常、河川は H が高ければそれだけ河口からの距離が長くなり、C が減少すると想定できる。L は海岸からの最短直線距離であり、最短直線上に山などの障害物などがあつた場合、必ずしも C が増加するとは限らないと考える。事実、C 橋のように L は 7.4km であるが、その直線状には標高約 600m の山があり飛来を防いでいるのではないかと考えられる。

(1-3) 飛来塩分の由来

各橋梁の飛来物 Mg/Cl 比を図-3に示す。ほとんどの結果は海水 Mg/Cl 比に近似しており、飛来物は海水由来の塩分である可能性が高い。離岸距離 28.4km の E 橋および 59.8km の F 橋では Mg/Cl 比が減少して凍結防止剤 Mg/Cl 比に近づく傾向がみられた。これは凍結防止剤には Mg がほとんど含まれておらず、NaCl のみが供給されることで Mg/Cl 比が減少したと考えられる。Mg/Cl 比が減少する原因は凍結防止剤の影響である可能性がある。

(2) 付着塩分量

付着塩分量の計測結果について図-4に示す。全 17 箇所の内、継続して測定している 15 箇所につい

て、1月に最も高い数値を観測したのが 6 箇所、2月が 4 箇所、12月が 3 箇所、3月が 2 箇所となった。すべての橋梁での飛来塩分量は 1月がもっとも多く、付着塩分量は飛来塩分量と同じ傾向を示すことが分かった。

F 橋起点面で 2月に増加した理由は凍結防止剤を含んだ路面水が桁下に流れ込んだのが原因である。事実、付着水の成分分析を行った結果、Mg/Cl 比が 0.0147 と凍結防止剤 Mg/Cl 比 0.0042 に近い値を示した。

(3-1) 飛来塩分量と腐食速度の関係

飛来塩分量と桁端部耳桁外面の雨水が直接当たる面の腐食速度を比較した結果を図-5に示す。相関係数は 0.8606。C 橋の耳桁外面は雨水が直接当たっていない可能性があり、他の橋梁と条件が異なる可能性があるため、C 橋を除いた場合の相関係数を求めた。相関係数は 0.9575 と非常によい相関を示した。飛来塩分量より腐食速度を予測することができる可能性を示唆している。今後は橋梁数を増やして再度検証する。耳桁内面についても比較したが、相関関係は得られなかった。原因としては、内側は漏水などによる水分の供給、湿度による結露水など、飛来塩分以外の影響が大きいためと考えられる。

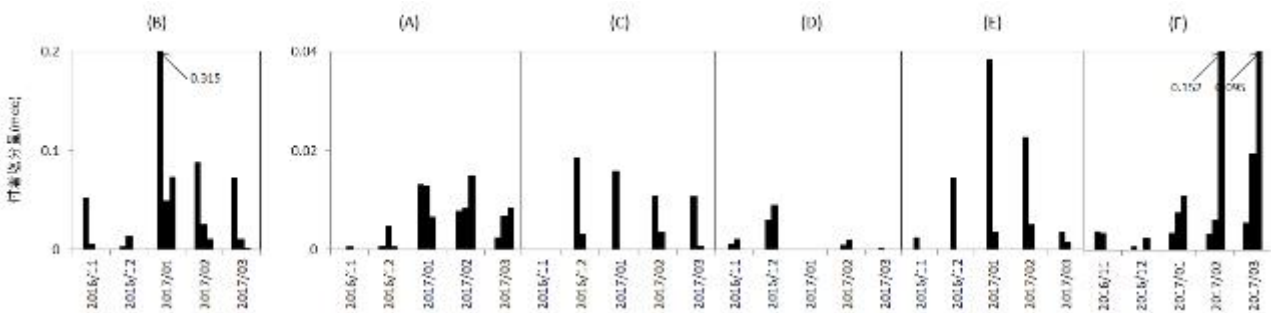
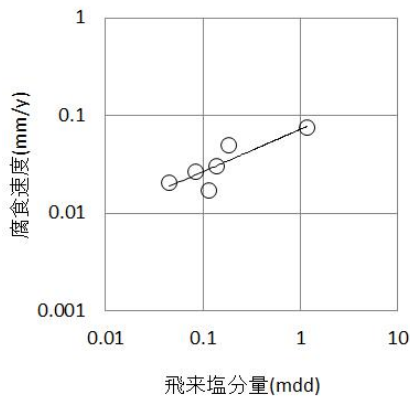


図-4 各測定箇所の付着塩分量(mdd)



図一五 腐食速度と飛来塩分の関係

(3-2) 凍結防止剤を含んだ雨水が付着する箇所の腐食速度

雨水が直接当たらない鋼橋の内面にて、ひと月の全電流値 ΣI が約20万 μA を記録した箇所がある。この箇所は鋼橋の部材が非常に腐食している箇所である。センサはひと月で著しく腐食して、センサ表面は肉眼で確認できるほど腐食生成物による凹凸が発生した。原因は凍結防止剤を含んだ路面水がジョイント部から漏水して桁端部に付着したと考えられる。確認のため、凍結防止剤を含んだ雨水が付着する箇所にセンサを設置して、1ヶ月間計測した結果、同じようにひと月の ΣI は約20万 μA となった。しかし、腐食速度を算出すると前者が0.078mm/y、後者が0.318mm/yとひと月の全電流値 ΣI と比較するとそれほど腐食速度は速くない。これは、腐食速度を計算する過程で降雨期間における電流値（出力値が1 μA 以上の場合）を含めないためと考えられる。解析ソフト（Ver.1.2、腐食防食学会頒布）を調べたところ、降雨期間における総電気量 Q_{rain} は日平均電気量 Q を求める過程で使用されず、結露期間における総電気量 Q_{dew} および時間 T_{dew} により日平均電気量 Q を求める方法が読み取れた。すなわち、降雨期間は腐食が進行しないという考えで腐食速度が解析されていることを示している。この考えは降雨の役割から来していると考えられる。降雨は腐食過程において2つの役割があり、一つ目は金属表面上への水分の供給であり、金属の腐食を促進させる。二つ目は表面に付着した飛来塩分や窒素酸化物、硫黄酸化物、砂、ほこりなどの付着物や腐食生成物を洗い流す作用であり金属の腐食を減速させる。しかし、当該箇所の腐食は進行し、非常に速いスピードで減肉していく。よって、桁端部などの凍結防止剤を含んだ路面水の付着が予想される箇所では、センサ以外での評価もしくは新たな腐食速度の計算方法を検討する必要がある。

6. まとめ

以下に、本研究で得られた成果を列挙する。

- (1) 日本海側気候の特徴である季節風による冬期波浪が原因で、冬期に飛来塩分量が増加する。
- (2) 飛来塩分量は標高との相関が高い。
- (3) 飛来物Mg/Cl比は海水Mg/Cl比に近似している。
- (4) 飛来物Mg/Cl比が低下した場合、凍結防止剤の影響である可能性が高い。
- (5) 付着塩分量は飛来塩分量と同じ傾向を示す。
- (6) 付着塩分量が急激に上昇する場合は、凍結防止剤の影響が考えられる。
- (7) 飛来塩分量と桁端部耳桁外面の腐食速度は相関が高く、飛来塩分量から腐食速度を推定することができる可能性がある。
- (8) 凍結防止剤を含んだ雨水が付着する箇所の腐食速度はセンサ以外での評価、もしくは新たな腐食速度の計算方法を考える必要がある。

7. 今後の方針

大気環境である飛来塩分量（土研式タンク法およびドライガーゼ法）、気温、湿度、濡れ時間などの外乱と、腐食電流、腐食速度、付着塩分量とその成分比、塗装膜厚および鋼材厚、腐食生成物層の厚さなどの応答の関係を解明して、各鋼橋における応急塗装の規格を決定する。飛来塩分量については、これまでに県内の各土木事務所にて数多くの調査が行われている。その調査結果を収集して、研究の一部に取り入れ、より精度の高い研究結果を目指すため、各土木事務所の方々にはご迷惑をおかけしますが、ご協力をお願いいたします。

謝辞:センサによるモニタリング方法に関すること、付着塩分量の評価方法に関すること、金属試験片の開発に関することについて、九州大学 貝沼重信准教授、琉球大学 押川渡教授、日鉄住金防蝕(株) 今井篤実様にご教示いただきましたことに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 前田健児, LCC縮減を目的とした点検と同時に行える橋梁等の応急塗装の研究(第1報), 福井県建設技術研究センター成果報告 平成27年度, (2016)
- 2) 財団法人 福井県建設技術公社, 道路橋計画・設計マニュアル, (2003)
- 3) 沖縄地区鋼橋塗装マニュアル検討委員会, 沖縄地区鋼橋塗装マニュアル, (2008)