

塩分の飛来・付着特性と塗装の劣化を 考慮した鋼桁洗浄システムの開発

小畑誠

名古屋工業大学大学院工学研究科 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

日本海沿岸部等、強い季節風によって海からの飛来塩分にさらされる橋梁の防錆対策のひとつとして橋梁洗浄が効率的であることが期待されているが、その効果等は必ずしもあきらかにはなっていない。本研究では塩分粒子の飛来・付着特性、塗膜劣化のモニターも含め橋梁洗浄の効果的実施方法およびその費用対効果をあきらかにすることを目的とする。

キーワード 鋼橋の防錆, 橋梁洗浄, 飛来塩分量, 塗膜劣化センサ

1 はじめに

日本海側では冬の強い季節風により海面上で発生した塩分が内陸地域まで進入する。この塩分の鋼橋面への付着によりぬれ時間が増加し水分の浸透により結果として腐食と塗膜劣化が促進されることが知られている。塗装の劣化に対しては定期的に再塗装するのが一般的な維持管理の手法であるが、再塗装は大きな費用がかかることから、ライフサイクルコスト削減のために塗装劣化防止策が検討されている。たとえば、腐食の原因となる塩分等を洗い流す橋梁洗浄があり、既に米国では腐食対策として効果が得られている¹⁾。このようなことから洗浄の防錆効果は明らかであるが、様々な洗浄方法に対しての費用対効果について実際に検証しようとするに年数を要するためコスト効果が不明であり洗浄方法の未確立という問題がある。そこで本研究ではこれらの点に留意しながら効果的な洗浄システムを開発することを目的とする。まず効果的な洗浄時期、頻度および箇所を予測するために、当該橋梁地点において外的要因である腐食環境（温度、湿度、飛来塩分量、付着塩分量）を数値的に予測推定することを考える。また、腐食環境下での塗装劣化に対する影響についてはこれまで適当なセンサがなく定

性的な評価にとどまっていた。そこで表面に塗装を施しても動作する新型の塗装劣化センサを開発し、付着塩分の塗装劣化に対する影響を具体的に観測する。さらに合理的な橋梁洗浄装置を開発したうえで橋梁洗浄を実施しその効果を確認する。

本研究は実用化研究という性質上、福井県雪対策・建設技術研究所、独立行政法人物質・材料研究機構（NIMS）、および名古屋工業大学の3機関が共同して実施した。具体的にはNIMSは新しい塗膜劣化センサの開発と橋梁現場での暴露試験を、名古屋工業大学は当該地点での飛来塩分量、橋梁面への付着塩分量の実測および数値シミュレーションを、そして福井県が橋梁洗浄の対象現場の提供および自動洗浄機の開発を担当した。

2 橋梁の塗装劣化および腐食状況モニタリングシステムの開発

(1) 概要

塗装の劣化の評価については種々の手法が使われているが、その測定結果と腐食状況、腐食挙動との関連に関して情報がほとんどないのが現状である。本研究の目的は、効果的な桁洗浄を行うために、橋梁の塗装劣化とそれに伴う腐食状況をモニタリング

できるセンサを開発するとともに、測定・評価システムとして確立することである。著者らは、大気環境の腐食性モニタリング・センサとして ACM(Atmospheric Corrosion Monitor)センサ²⁾³⁾を開発し、田園環境から海洋環境に至る幅広い大気環境における腐食性のモニタリング、評価を実施して来た。しかしながら、実用化されている ACM センサでは、鋼板（アノード：金属溶解部）の上に絶縁層およびカソード（還元反応電極）を印刷するため、段差が生じ実橋と同等の塗装を施すことが困難であった。そこで、本研究開発では、二つの電極（アノード／カソード）が同一平面上に配置されるような新型 ACM センサを試作し、橋梁と同等の塗装が行えるようにした。この塗装した新型センサに対して促進試験を長期にわたって実施し、環境側促進条件とセンサ出力との関係を調査・検討した。また、本システムを福井県内の三国大橋（図-1）に設置し、モニタリング状況を確認した。

(2) 新しいセンサ

本研究では、Fe, SS, Zn でアノード／カソードの組み合わせについて調べた。電極材料をレーザーカットによりくし歯状に切り出した後に対向させて組み合わせ、電極のギャップをエポキシ系 BN ペーストで埋めて絶縁したものをセンサとした（図 2）。Fe/Zn 対, SS/Fe 対, SS/Zn 対 ACM センサに塗装を施し、従来の ACM センサと併せて CCT 試験を行った結果を検討した結果 Fe/Zn-対を採用した。新型センサを埋め込んだ模擬鋼板を作成し、橋梁と同様の塗装を施し三国大橋で試験適用した。

(3) 結果および考察

橋梁模擬体の設置は 2008 年 11 月 19 日（水）に実施し、測定は 2008 年 12 月 19 日（金）から開始し、現在も継続中である。その結果次のような傾向が得られている。当初は、腐食電流量 I の絶対値およびその RH(相対湿度) 依存性が小さい。しかし 吸湿および水の侵入によって I の絶対値が大きくなり、低湿度側の RH 依存性も大きくなる。さらに水



図-1 三国大橋

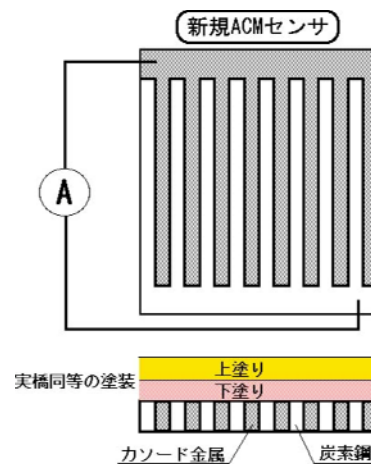


図-2 新型センサ

の侵入が十分になると I の RH 依存性はほとんどなくなる。このことから塗膜の劣化に伴い、RH の急激な上昇時に大きな腐食電流が得られる。これは水の侵入に着目した塗膜の劣化挙動と考えられ、新型の ACM センサによって塗膜劣化程度を評価できる見通しが得られた。

3 橋梁の塗装劣化環境調査ならびに飛来塩分の付着と結露予測システムの開発

(1) 概要

特定の地点における飛来塩分量についてはこれまででは時間および費用のかかる現地観測によってき

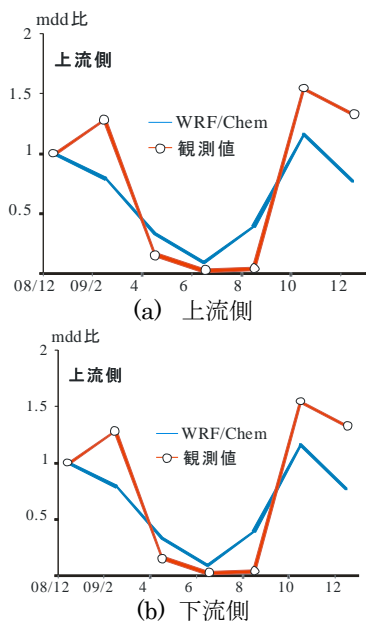


図-3 飛来塩分量の推定値と実測値

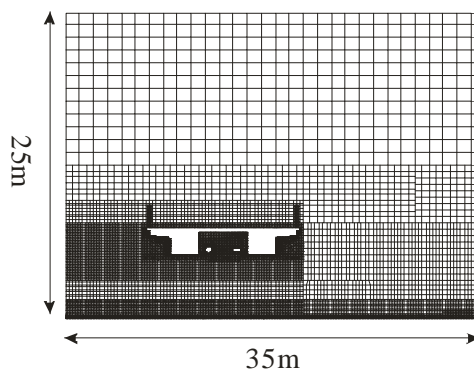


図-4 解析領域

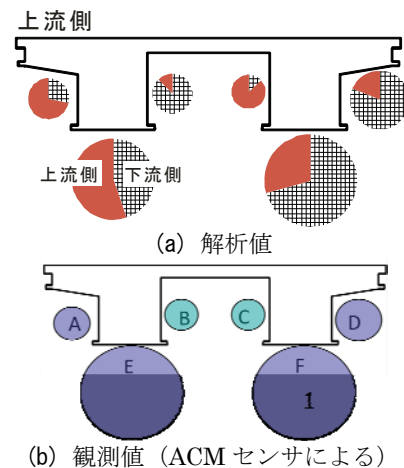
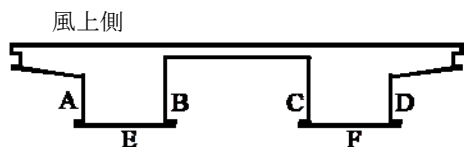


図-5 付着塩分量

表-1 付着粒子の分布

例	流入部 平均風速(m/s)	部位ごとの付着数					
		A	B	C	D	E	F
(a)	2.00	12	1	7	1	<u>14</u>	10
(b)	3.00	11	0	8	5	<u>16</u>	5
(c)	5.00	10	2	6	1	<u>25</u>	8
(d)	7.00	13	3	5	4	<u>31</u>	5
(e)	9.00	11	0	4	0	<u>25</u>	21



た. 本研究では飛来塩分量および橋梁けた面への付着塩分について数値シミュレーションによる予測法を検討する. ここでは大域的な解析では気象解析の一部を利用し, 局所的な付着解析には流体解析を適用する二段階のアプローチをとる.

(2) 大域的な解析

日本において飛来塩分は海面上から供給されるものがほとんどであり, それは数 100km におよぶ大気の流れに連動している. したがってその解析は気象解析の一部として行うのが合理的である. そこで本研究では入手と運用が容易なメソスケール気象解析コードである WRF の Chemistry パッケージ⁴⁾を用い

た. 三国大橋における土研式タンクによる観測結果との比較を図に示す. WRF/Chem は空気中に含まれる浮遊塩分量を出力し, 土研式タンクは浮遊する粒子を一定の割合で補足するにすぎないので, 直接の比較はできない. そこで捕捉率を一定と考えてこれらのグラフでは絶対量ではなくとも 2008 年 12 月の値で正規化しその変化量を比較している. 川上および川下の両方の風向に対して解析結果は観測結果と良好な一致を見ていることがわかる.

(3) 付着塩分の局所性の推定

ここでは三国大橋を想定し, 浮遊粒子のけた面への付着の流体解析⁵⁾を行った. 解析の基本的な考え方は著者らのこれまでの手法によった⁶⁾. 解析領域は図-4 に示すとおりである. 左側の流入境界から風速にあわせて一定時間間隔で粒子を 60 秒間射出し付着性状を見た. なお, 風速は実測値に鑑み一定ではなく正弦波による変動を与えている. 結果は表-1 に示す. 付着には強い局所性がありその局所性は風速により大きく変わらないこともわかる. これは短期間の結果に過ぎないので数ヶ月にわたる付着性状については表の結果を基本解として次式のような積分をしていけばよい.

$$S = \int m(v(t))f(t)dt \quad (1)$$

このとき浮遊塩分量 $f(t)$ や風速 $v(t)$ 等の時系列的

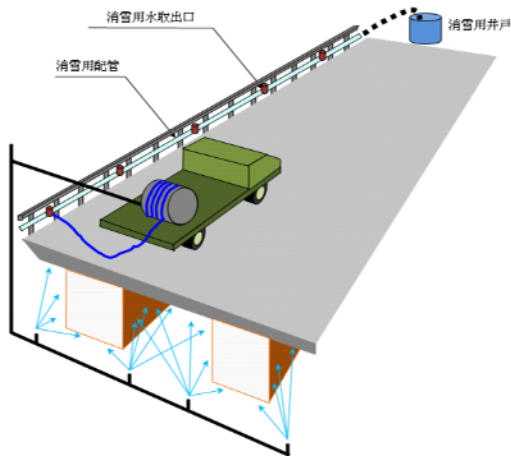


図-6 橋梁洗浄の様子



図-7 橋梁洗浄の状況

変化は前述の大域的な解析により得ることができる。2010年3月から5月の3ヶ月の結果を図に示す。箱桁下面への付着量が多いという特徴をとらえており実測値とも対応していることがわかる。なお、これらの図ではともに付着塩分量の部位による相対量を示している。したがってこのような手法による付着塩分量の数値シミュレーションは有望であると結論できる。

4 橋の洗浄法の開発および洗浄効果の評価

(1) 三国大橋の腐食の状況と洗浄方法

洗浄の対象とした三国大橋で腐食の著しい箇所は、桁内側の主桁と横桁の下フランジ上下面、箱桁底天井、ボルトナットである。次に桁内側のウェブが著しい。桁外側の下フランジ上下面、ボルトナット、桁外側のウェブでは付着塩分は降雨で洗浄され腐食は抑制されている。福井の橋梁のほとんどには

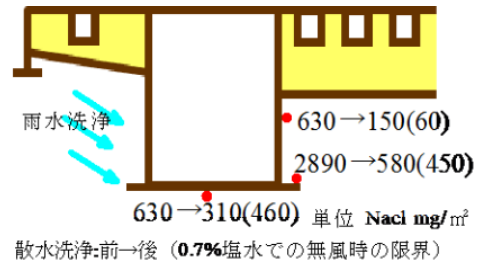


図-8 付着塩分の減少

表-2 再塗装までの期間と費用比較

3種ケレン, a系塗装	8年	毎年洗浄費+16年
	1	0.59
3種ケレン, c系塗装	12年	毎年洗浄費+24年
	0.85	0.51
1種ケレン, c系塗装	30年	毎年洗浄費+60年
	0.65	0.42

井戸水利用の消雪装置が設置されているので、橋脚ごとのバルブからその地下水を得て洗浄した。図-6に全体の概念を、図-7に今回開発の洗浄装置の稼働状況を示す。この地下水は塩水化が進行し、0.7%塩化ナトリウム水であった。

(2) 洗浄の結果

2009年3月4日～6日、2010年3月4日～5日に洗浄した。この2009と2010年の洗浄前後の付着塩分量を表面塩分計で計測した平均値を図-8に示す。付着塩分はそれぞれ腐食の著しい雨の当たらない箇所の下フランジ上面では約20%、箱桁外底面では約50%、桁内側ウェブでは約25%に低減された。ただし洗浄水に0.7%の塩分が混入していることから既往の研究に比較すれば効率は劣っている⁷⁾。

(3) 洗浄の効果

洗浄の効果については、ACMセンサ、気象と付着塩分量、現場の錆の観測という3つの観点により推定した。前二者が無塗装鋼材、現場の錆にもとづくものが塗装された鋼材に対する推定となるが、いずれの推定でも洗浄により腐食速度はおおよそ半分程度に減少することがわかった。これをもとに三国大橋の塗装に関するコスト低減の様子を表したのが表-2である。この表では8年毎に3種ケレンa系塗装で再塗装した場合の管理費用を1としてその他の場

合と比較している。洗浄により防錆のための維持管理費が少なくとも 40%程度は低減していることがわかる。

5 まとめ

以上の結果は次のようにまとめることができる。

- 1) 橋梁の塗装劣化および腐食状況モニタリングシステムの開発について
従来の ACM センサを改良した鋼橋の塗膜劣化センサを試作し実験室および現場での基本的な動作確認をすることができた。促進試験においても、現場試験においても新型センサは塗膜を浸透する水を捉えることができているものと推定できる。したがって、長期間にわたる塗膜劣化のモニタリングに使用できる可能性が高い。
- 2) 飛来塩分の付着と結露予測システムの開発について
大域的な飛来塩分の予測をメソスケール気象解析プログラムで行い、一定の要件のもとで実測値を再現できることをあきらかにした。日本の各地においてどの程度の適用性があるかについて今後の研究をまたねばならないが、基本的には日本の沿岸部での飛来塩分量の数値的な予測ができるものと思われる。また得られた飛来塩分量をもとに局所的な飛来塩分の橋梁桁面への付着について検討し、定性的な傾向については再現できる

ことを示した。結露についてはぬれ時間との関連までを示すにはいたらなかった。

- 3) 橋桁の洗浄法の開発について。

独自の橋梁洗浄機を開発し、プロジェクト期間中 2 回にわたって現場での洗浄を行った。高圧水による洗浄によって短時間で桁に付着した塩分の 50~80%程度を洗い落とせることを確認した。さらに、下フランジ上面、箱桁下面、ウェブでのボルトナットの錆率と塩分付着量の関係を経過年ごとに調査し、塩分量と錆率の関係を明らかにした。その調査結果から洗浄による塩分量削減が塗装の塗り替えを約 2 倍に延ばせるとの予想をもたらした。これにより塗膜劣化を防止する効果を期待することができる。

参考文献

- 1) 磯光男,三田村浩,勝俣盛ほか:橋梁洗浄に関する北海道での取り組みと米国における実態調査,橋梁と基礎,pp.29-33,2004.6
- 2) 篠原 正, 元田慎一, 押川 渡 : 材料と環境, 54(2005)375.
- 3) 篠原 正 : ふえらむ, 11(2006) 215.
- 4) <http://www.wrf-model.org>
- 5) Computational Dynamics Limited, STAR-CD Version 4.08, 2008
- 6) M. Obata, T. Hasegawa, K. Nagata, Y. Goto, Numerical analysis of sea-salt particulate matter adhesion on bridge surfaces, Proc. ICASS09, pp-369-376, 2009
- 7) 三田村浩, 佐々木聡, 勝股盛ほか : 橋梁に付着した塩分の除去実験, 土木学会第 56 回年次学術講演会 CS6-043, 2001,9