建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

課題番号 第33号

研究課題名 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

研究期間 平成20年度~平成21年度

研究代表者名 名古屋工業大学・教授 小畑誠

1.課題番号 第33号

2.研究課題名 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

3.研究期間 平成20年度~平成21年度

4. 代表者及び研究代表者、分担研究者

代表者	(代表者氏名)	(所属機関・職名)
研究代表者	小畑誠	名古屋工業大学・教授
分担研究者	永田 和寿	名古屋工業大学・准教授
分担研究者	篠原 正	物質・材料研究機構・グループリーダー
乙田可容老	· □ 木 舌 / □	福井県雪対策・建設技術研究所
刀担听九伯	百今 単同	総括研究員

5. 補助金交付総額 17,810,000円

6.研究・技術開発の目的

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塗装劣化と腐食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,腐食しやすいボルトナットに樹脂製のキャ ップをかぶせたり,フランジ面の一部に防蝕テープを貼付することなどが一部行われて いる.また,腐食の原因となる塩分等を洗い流す橋梁洗浄も知られている.しかしアメ リカ合衆国のニューヨーク州などで実施されながら日本国内で橋の洗浄が普及されない 理由は,コスト効果が不明なことと洗浄方法の未確立の2点にある.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. まず効果的な洗浄次期,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.これにより、費用のかかる実施観測を使わなくても当該橋梁においてど の時期にどの程度の飛来塩分が橋梁のどの部位につきやすいかを見積もることができる. 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.これにより、橋 梁洗浄の効果を具体的に示すことができる.以上の計画にもとづき,本研究では,飛来 塩分量を含む腐食環境の数値的予測手法の開発,塗装劣化モニタセンサの開発,そして 実用的な橋梁洗浄機の開発を行ったうえで,それらを統合し橋梁洗浄システムを提示す る.

7.研究・技術開発の内容と成果

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. そこで以下では本研究の成果を担当機関ごとにわけて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」(NIMS),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」(名古屋工業大学)そして4.「橋の 洗浄法の開発および洗浄効果の評価」(福井県)としてまとめる. 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

2.1 はじめに

塗膜は時間とともに劣化する.これに海塩が時間とともに付着し,水分とともに塗膜内に浸透 することで腐食が始まり,付着海塩量が増加するにつれ腐食量は加速度的に増える.海塩洗浄は, 腐食量が増える前に海塩量を減らして,腐食量増加を防ぐ有効な手法である.

塗装の劣化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.

筆者らは,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 1)2)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,段差が生じ実機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 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 ACM 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 ACM 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実橋に設置し,モニタリング状況を確認した.

2.2 センサの試作

本研究では,表2-2-1 に示すアノード/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図2-2-1の形状および寸法に切り出した後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2-2-2).これに橋梁 と同様の塗装を施し,促進試験および実環境中暴露試験に供した.

2.3 結果及び考察

2.3.1 促進試験による塗装 ACM センサの評価

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(SST30min 乾燥 5h45min 湿潤 2h15min)を行った.最初の 3 サイクルと 46-48 サイク ルのセンサ出力を図 2-3-1 および図 2-3-2 に示す.図中に示した"ACM"は,無塗装の従来型 ACM センサの出力であり,以下同様である.当初,塗装 ACM にははっきりとした出力が得られなか ったが,46-48 サイクルのセンサでは,SST あるいは SST 終了後にセンサ出力が検出された. 各サイクルの最大出力とサイクル数の関係を図 2-3-3 に示す.最大出力は 30 サイクルごから大 きくなり始めており,腐食の開始もしくは水の浸透を検出できたことになる.

50 サイクル後のセンサを恒湿槽に入れ,センサ出力と湿度の関係を調べたが,有意な出力は

表記	組み合わせ (カソード / アノード)	電極材料(カソード/アノード)
Fe/Zn	鉄/亜鉛	炭素鋼(SPCC)/亜鉛めっき鋼鈑(Z18)
SS/Fe	ステンレス鋼 / 鉄	304鋼 / 炭素鋼(SPCC)
SS/Zn	ステンレス鋼 / 亜鉛	304鋼/亜鉛めっき鋼鈑(Z18)

表 2-2-1 ACM センサの電極







図 2-2-2 塗装した試作 ACM センサの概略図

得られなかった.そこで,塗装ACM 表面に脱イオン水を噴霧させたところ,噴霧直後だけ有意 なセンサ出力が検出された(図2-3-4).したがって,今回検出されたセンサ出力は,水の浸透を とらえている可能性が強い.以下では,センサ出力が最も大きかった Fe/Zn-対を採用し,これに 橋梁と同等の塗装を施したもの実橋におけるモニタリングに用いた.

2.3.2 実橋におけるモニタリング

Fe/Zn 対-ACM センサを橋梁模擬体に埋め込んだ後,本模擬体全体に橋梁と同様の塗装を施し た(図 2-3-5).この模擬体を福井県三国大橋(福井県坂井市三国町)の川下方向に面したウェブ 内面に設置し(図 2-3-6),ACM センサ出力を 10min ごとに測定した.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.

実暴露試験初期(2008年12月19日~31日)から2010年3月の洗浄までのACMセンサ出力(I)の経時変化とI-RHの関係を図2-3-7~2-3-16に示す.センサ出力が負の値となっているのは,塗膜がコンデンサーとして働き,現場での電気的ノイズを積分しているためと考えられる.

初期段階センサ出力の湿度依存性は小さく,湿度上昇とともにIの絶対値はわずかに大きくな るだけである(図 2-3-8).2009年1月になると,Ch.1,2および4においては,湿度上昇とと もにIの絶対値は大きくなり,特定の湿度からは湿度上昇とともにIの絶対値は小さくなる.上 述したように塗膜はコンデンサーとして働き,その誘電率は吸湿や水の侵入によって変化する. 水の侵入によって誘電率はより大きく変化するので,初期および低湿度側の絶対値がわずかに変 化する領域が吸湿域,中湿度域の絶対値が大きく変化する領域が水の侵入域,と考えられる(図 2-3-17).さらに高湿度側ではIの絶対値は小さくなく,すなわちプラス方向へ増加する.このプ ラス方向へ増加は,水が電極表面まで水が達して腐食電流が流れたためと考えられる(図 2-3-17).2009年2月になると,Ch.3でもIの絶対値が大きくなる(図 2-3-9).これは,Ch.3





図 2-3-3 各サイクルにおけるセンサの最大出力とサイクル数の関係



図 2-3-4 塗装 ACM 表面に脱イオン水を噴霧させたときのセンサ出力

の位置(ウェブ真中よりやや上)で結露が起こり難かったためと考えられる .2 月後半には全 Ch で I は同程度となり, RH 依存性がほとんどなくなる(図 2-3-10,下図). これは水が十分に塗膜 内に侵入し, I の絶対値十分に大きくなり, 腐食による分が無視できる程度になったためと考え られる.

洗浄直後の 2010 年 3 月 4 日から 12 日の ACM センサ出力の変化を図 2-3-11 に示す.Ch.2 で は I の絶対値が極めて大きくなる.それ以外の Ch.では,洗浄直後に I の絶対値が大きくなり, それ以降 2,3日かけて元の程度にもどる.このような挙動は,洗浄によって塩分が流されたた め,塗膜中に水分が侵入し難くなったためと考えられる.Ch.2 ではとくに洗浄効果が大きかっ たようである.

Ch.2 の I も 4 月後半には他の Ch.と同程度になる(図 2-3-13). これ以降,全 Ch.の I は同程 度であった.2010年2月になると,Ch.4 の I で,かなり大きなプラス方向への増加が検出され た(図 2-3-15,上図).これは,下フランジ上面(Ch.4 の位置)では,塩分が濃縮しやすく,水 分が塗膜内に侵入しやすいためと考えられる.Ch.4 でかなり大きなプラス方向への増加が検出 されたさいの I-RH の関係を図 2-3-15,下図に示す.I の大きなプラス方向への増加は,急激な RH の上昇が起こる際に検出された.洗浄前後(2010年3月1日から5日)の I の経時変化を図 2-3-16 に示す.洗浄時には大きなプラスのセンサ出力が検出された.これは促進試験の SST 時 (2.3.1 および図 2-3-4)と同様,十分な水分が供給されたためと考えられる.

以上の結果をもとに, I-RHの関係の経時変化を図 2-3-18 に示す.

- (i) 当初は, I の絶対値およびその RH 依存性が小さい().
- (ii) 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.
- (iii) 水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.
- (iv) 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,本 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.



図 2-3-5 橋梁模擬体への ACM センサ埋め込み位置



図 2-3-6 ACM センサを埋め込んだ橋梁模擬体の取り付け



図 2-3-7 実暴露試験初期(2008年12月19日~31日)のACM センサ出力の変化 (上図:経時変化、下図:I-RHの関係)



図 2-3-8 2009年1月のACM センサ出力の変化(上図:経時変化、下図:I-RHの関係)







図 2-3-10 2009年2月のACM センサ出力とRHの関係(I-RHの関係、上図:前半、下図:後半)



図 2-3-11 2009年3月(洗浄直後)のACM センサ出力の経時変化



図 2-3-12 2009年3月(洗浄直後)のACM センサ出力とRH との関係(I-RH の関係)







図 2-3-14 2009 年 4 月の ACM センサ出力と RH との関係(I-RH の関係)



図 2-3-15 2009 年 3 月 (洗浄直後)の ACM センサ出力と RH との関係(I-RH の関係)



図 2-3-16 2010年3月(洗浄前後)のACM センサ出力の経時変化



図 2-3-17 初期段階(2009年1月)での I-RH の関係の説明図



図 2-3-18 実橋での塗装 ACM センサにおける I-RH の関係の模式図

2.4 まとめ

(1) 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 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,Fe/Zn 対,SS/Fe 対,SS/Zn 対 ACM センサに塗装を施し, CCT 試験を行ったところ,当初ははっきりとした出力が得られなかったが,46 サイクル以降に SST あるいは SST 終了後にセンサ出力が検出された,また,塗装 ACM 表面に脱イオン水を噴霧 させたところ,噴霧直後だけ有意なセンサ出力が検出された,したがって,今回検出されたセン サ出力は,水の浸透をとらえている可能性が強い,

以下では,センサ出力が最も大きかった Fe/Zn-対を採用し,これに橋梁と同等の塗装を施した もの実橋におけるモニタリングに用いた,

(2) 実橋に暴露したとそう ACM センサ出力(I)は以下のように変化した:

- (i) 当初は, I の絶対値およびその RH 依存性が小さい(),
- (ii) 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,
- (iii) 水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,
- (iv)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,本 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) 暴露開始後1年3か月たった2010年2月になると,下フランジ上面のIで,かなり大きなプラス方向への増加が検出された,これは,下フランジ上面では,塩分が濃縮しやすく,水分が塗

膜内に侵入しやすいためと考えられる,このIの大きなプラス方向への増加は,急激なRHの 上昇が起こる際に検出された,

参考文献

1) 篠原 正,元田慎一,押川 渡:材料と環境, 54(2005)375.

2) 篠原 正:ふえらむ,11(2006)215.

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

3.1 環境調査の方法

3.1.1 調査概要

現地観測は福井県坂井市にある三国大橋を対象に行っている.周辺の腐食環境を定量的に評価す ることを目的とし,腐食電流,風向,風速,温度,湿度,付着塩分量の計測を行う.調査 は2008年11月19日(水)から開始し,現在も継続中であるが,2008年11月19日から12 月3日の期間と,12月23日から1月8日までの期間,ロガー及びPCの不具合により風向・ 風速および腐食電流のデータを計測できていない.また2008年12月3日から12月10日,18 日の数時間において風速風向計の計測機器の動作不良によりデータが欠損している.2009年4 月21日から11月27日にかけ,風速風向計の計測機器の動作不良によりデータが欠損している.

3.1.2 観測地点

観測対象である三国大橋とその位置を図 3-1-1 に示す.三国大橋は福井県の北部,坂井市三国町に位置し,昭和56年に建設された3径間連続鋼庄版箱桁橋である.嶺北地方を流れる九頭竜川に架かる橋であり,河口までは約2kmに位置しているため,日本海に近く飛来塩分量が多





図 3-1-2 観測地点

いと考えられる.橋軸は東西方向に対して時計回りで約34°の角度をなして傾いており,橋桁は2主箱桁からなる,今回は図3-1-2の主桁について観測機器を設置し調査を行った.

3.1.3 調査機器

(1) ACM センサ

図 3-1-3 に ACM センサの概略図を示す.厚さ0.8mmの炭素鋼板(64mm×64mm)を基板と し, その上に絶縁ペースト(厚さ30~35µm)を銀製の導電ペースト(厚さ30~40µm)が, 基板との絶緑が保たれるようにのせてパターン上に積層印刷したものである.

図 3-1-4 に ACM センサの測定原理について示す³⁾. センサ表面には , Ag と Fe に構成される スリットがあり , この部分に結露や降雨により水膜が発生すると , 腐食によって Fe が溶け出 る.この際 , Fe は電子 e を放出し , この電子は導電性ペーストに含まれる Ag 表面で化学反応 が生じる.

$$O^2 + 2H_2O + 4e^- \to 4OH^-$$
 (3-1-1)

この反応により OH - が生じて, 消費された電子の分が腐食電流として測定される.腐食電流 は設置した場所の腐食環境に大きく左右され,環境の厳しさによって炭素鋼板が早く腐食する. そのため数カ月で交換することが推奨されている.





図 3-1-3 ACM センサの概略図



図 3-1-4 ACM センサの測定原理

センサの出力範囲は 1nA~1mA であり, 分解能は 1nA~10µA で 1nA, 10µA~13mA で 1µA である.

(2) 風向風速計

計測に使用したものは,GILL 社の超音波風向風速計 WindSonic である.仕様を表 3-1-1 に示す.
 (3) 温湿度センサ

仕様を表 3-1-2 に示す.

(4) 土研式タンク

日本海から飛来し,付着する塩分は橋梁における塗膜防食膜の劣化要因となる.土研式タンク は調査地点に塩分付着用ステンレス板及び,採取用のポリタンクを設置し,ステンレス板に付着 した塩分を洗い流しその塩分濃度から塩分付着量を算出する方法である.観測された塩分量は mg/dm²/day という単位でまとめる,また表記の際は mdd とし,一日当たり,1dm²=100cm² に付着した塩分量を意味する.なおこの調査は2ヵ月単位で行い,2ヶ月毎にポリタンクを回収, 分析を行っている.

	風速	風向		
測定範囲	0-60m/s	0°-359°		
制度	±2%(12m/s)	±3°(20m/s)		
分解能	0. 01m/s	1°		
動作環境				
動作温度	-35 ~+70			
保存温度	-35 ~	~ +71		
寸法	142×160mm			
重量	k g			

表 3-1-1

表 3-1-2

	温度センサ	湿度センサ		
検出範囲	0 ~ 50	5% ~ 95% ¹		
検出精度	±0.5%	±5%		

^{(*1 95%}以上の湿度も検出可能だが精度が保証されない.)

3.1.4 設置位置および計測内容

図 3-1-5 に ACM センサ,風向風速計,温湿度センサの位置を示す.図のように,ACM センサを川下側(北側)から箱桁部分に順に12 個設置している.計測は10分毎に,計12 チャンネルで,腐食電流を測定する.温湿度センサは床桁を通る通路に2つ設置した.ACM センサと同様に,10分毎に温度,湿度の計測を行っている.また川上側,川下側のそれぞれの高欄部分には風向風速計を設置し0.5秒毎に風向,風速データを観測している.ただし風向風速計に関して,11月27日以降,機器の動作不良により川上側(北側)の一台で1.0秒毎に計測している.土研式タンクは図 3-1-2のように少し離れた位置に2 個設置して,2ヵ月毎に飛来する塩分付着量を調査する.なお,図 3-1-6 から図 3-1-9 に各機器の設置の様子を示す.



図 3-1-5 調査機器設置箇所(断面図)



図 3-1-6 ACM センサ設置の様子



図 3-1-7 土研式タンク設置の様子



図 3-1-8 温湿度センサ設置の様子



図 3-1-9 風向風速計設置の様子

3.2 環境調査の結果

3. 2. 1 飛来塩分測定結果

図 3-2-1, 3-2-2 に 2008 年 12 月 3 日から 2009 年 1 月 25 日までの,土研式タンクによって測定 された塩化物の付着度及び塩化物イオンの付着度についての測定結果を示す.

両月とも、夏季にほとんど計測されないのに比べ冬季の方が大きい値を示している.このことから飛来塩分は冬季に多いと言える.これは冬季に日本海側から塩分を多く含む風が吹くためと考えられる.また計測期間中二度の冬季があったが、どちらも川上側で付着量が多く、2009年11月25日の期間では特に川上側で多い.



図 3-2-2 塩化物イオンの付着度

3.2.2 温度湿度測定結果

2008年12月3日から2009年12月31日までの測定した気温と湿度についての月別平均を図 3-2-3, 3-2-4 に示す. なお計測値の値は温湿度センサ1と2の値の平均である. なお三国気象台 では湿度の計測を行っていない4)ため,三国気象台の次に計測値に近く,湿度の計測を行ってい る福井気象台
⁵⁾を参照した.全体的に計測値は気象台と比べ、気温は高く、湿度は低い値を示し ているが、推移はほぼ同じである.そのため温湿度センサの計測結果は、妥当なものであるとい える.気温は一年を通して大きく変動するが,湿度は一年を通して大きな変化はない.夏季と冬 季は、他に比べ湿度が高い傾向にあるが、これは降雨や降雪の影響で大気中の水蒸気量が増加し ているためと考えられる. 3.1 より冬季に飛来塩分量が多いと言えるため, 冬季についてさらに 詳しく見る. 図 3-2-5, 3-2-6 に福井気象台により計測された 2008 年 12 月, 2009 年 12 月の日 別降水量のデータを示す. なお総降水量は 2008 年 12 月が 225mm, 2009 年 12 月が 331mm で 図 3-2-7. 3-2-8 に 2008 年 12 月, 2009 年 12 月の温湿度センサの推移を示す. 実測値 ある. の平均値は 2008 年 12 月の気温が 8.5℃,湿度が 73.3%,2009 年 12 月の気温が 6.5℃,湿 度が 73.5%となっている. また全体的な傾向として朝方に気温が下がり,湿度が高くなる.90% を超え、100%近くになることも少なくないことから、特に朝方は結露の起きやすい環境である と考えられる.









図 3-2-6 日別降水量[2009 年 12 月]





図 3-2-8 月平均温湿度変化[2009 年 12 月]

2008年12月				2009年12月			
方角	頻度	割合(%)	平均風速	方角	頻度	割合(%)	平均風速
北	26	3.93	4.69	北	61	4.10	4.03
北北東	25	3.78	4.60	北北東	84	5.65	4.08
北東	43	6.50	5.94	北東	112	7.53	3.13
東北東	21	3.17	5.64	東北東	64	4.28	2.42
東	12	1.81	1.42	東	48	3.23	1.67
東南東	25	3.78	1.74	東南東	71	4.81	1.75
南東	99	14.95	2.24	南東	199	13.39	2.57
南南東	143	21.60	3.06	南南東	239	16.12	3.55
南	89	13.44	3.19	南	106	7.16	3.75
南南西	29	4.38	3.48	南南西	32	2.12	3.57
南西	30	4.53	2.36	南西	47	3.14	5.79
西南西	15	2.27	4.17	西南西	54	3.64	6.52
西	15	2.27	4.34	西	101	6.82	8.04
西北西	27	4.08	3.94	西北西	113	7.59	8.21
北西	38	5.74	2.63	北西	96	6.43	5.15
北北西	25	3.78	3.34	北北西	59	4.00	3.94
<u></u> 計	662	100	(m/s)	計	1485	100	(m/s)

3.2.3 風向·風速測定結果

表 3-2-1 に 2008 年 12 月,2009 年 12 月の風向風速計の測定結果を示す.風向を全 16 方位に 分け,方角ごとの風速とその頻度を 30 分ごとに平均をとったものである.ロガーの不具合によ り 2008 年 12 月 3 日から 11 日まで,また 2008 年 12 月 23 日から 1 月 8 日まで欠測となってい る.

両月とも南南東方向を中心とした風が多い.これは橋軸方向に沿う風であるため,橋軸垂直か ら吹く風に比べると飛来塩分が付着しにくいと考えられる.また平均風速を見てみると,北を中 心とした風と比較して穏やかである.北からの風は,頻度は少ないものの,平均風速が南風より 2倍以上高い.また 2009 年 12 月は西方向の風がかなり強い.

3.2.4 腐食電流量測定結果

図 3-2-9 から図 3-2-14 に 2008 年 12 月から 2009 年 12 月までの腐食電流量の測定結果を示す. これらは 2 章で述べた 12 個の ACM センサを 2 個ずつ部位によって川下側桁外面,川下側フラ ンジ部,川下側桁内面,川上側桁内面,川上側フランジ部,川上側桁外面と分けて,月別の平 均を示したものである. 経験則から腐食電流量量が 0.01µA 以下の時は乾燥状態, 0.01~0.1µA のとき結露状態,1~100µAのとき降雨状態である⁶⁾ことが知られている.全体の傾向としては, 春先にかけて低くなった後、夏に高くなり、冬に向かうにつれてそのまま推移するか、下がる. 川下側外面フランジ部, 川上側外面フランジ部などは夏から冬の変動が大きい. 図 3-2-15 から 図 3-2-26 に 2008 年 12 月, 2009 年 12 月の腐食電流の測定結果を示す. これらは 2 章で述べた ①~⑫までのセンサを2個ずつ部位によって川下側桁外面,川下側フランジ部,川下側桁内面, 川上側桁内面, 川上側フランジ部, 川上側桁外面と分けて, プロットしたものである. また表 3-2-2 にそれぞれの月で計測された値のうち、結露状態以上の値、すなわち 0.01 µ A を超える 値を出した頻度を示し、10%以上の頻度を記録したものを図 3-2-27、3-2-28 に示す. 2008 年 12 月は桁外で計測される値が桁内部の値より大きく、また川上側と川下側を比較すると川上側に設 置したセンサのほうが大きい値を算出していることがわかる。桁外で見ると上部、下部、フラン ジ部分で電流量が大きく異なり、 川下側では下部で 0.01~1µA とその他の部位で算出される 値に比べて 10 倍から 100 倍近く大きい結果が出ている. 川上側では上部の値が最も高く、下部, フランジ部に比べて電流量が平均で 10 倍以上も高く, 100 μ Α を超える電流量も算出されている ため、この時間帯で降雨があったことが把握できる.桁内の腐食電流量については、降雨時以外 0.01 µAを越えることがほとんどなく,設置箇所に依らず,ほとんどの期間で乾燥状態だと判断 できる,また時折 0.01μΑ以上の値を検出するのは,その前後を通して降雨があったことなどか ら、結露状態であったと判断できる.降雨時以外には桁内の腐食環境は比較的良好であるといえ る.

一方,2009年12月は,桁内でも値が大きく,桁外では川下側の方が川上側に比べて大きい値 を算出している.12月18日付近で川上側の値が大きくなっているが,図3-2-6よりこの前後で 降水量の多い日が続いていることに関係していると考えられる.両側とも桁外部のフランジ部で は0.01µAを超えることがほとんどなく,ほぼ乾燥状態である.桁内では2008年とは異なり, 0.01 μAを超えることが多く、特に川上側内部に関しては、超えていることがほとんどであるため、 湿潤な環境であったといえる.

両年を比較すると、外面フランジ部を除き全体的に腐食電流量は大きくなり、特に桁内部の変化 が大きく、傾向が変わっている.前年に比べ降水量が多く気温も低かったことや、風向風速など諸々 の気象条件により、腐食環境に変化があったと考えられる.



図 3-2-11 月別平均腐食電流量[ACM#5,6]



図 3-2-12 月別平均腐食電流量[ACM#7,8]



図 3-2-14 月別平均腐食電流量[ACM#11,12]


























				1		
	ACM#1	ACM#2	ACM#3	ACM#4	ACM#5	ACM#6
2008年12月(%)	1.81	62.2	6.07	3.16	3.85	0.73
2009年12月(%)	95.9	100	2.31	42.1	82.5	70.4
	ACM#7	ACM#8	ACM#9	ACM#10	ACM#11	ACM#12
2008年12月(%)	0.86	3.4	0.24	83.2	65.5	0.61
2009年12月(%)	98.8	99.8	23.7	2.89	79.9	32.5

表 3-2-2 腐食電流 0.01 µ A 以上を記録した割合



図 3-2-27 0.01 µ A 以上の腐食電流を記録した割合[2008 年 12 月]



3. 2. 5 付着塩分量の推定

腐食電流量と相対湿度の関係を元田らの較正曲線とともに示す. 較正曲線とは、あらかじめ 所定の塩分を ACM センサに付着させたときの相対湿度と腐食電流量の関係であるため、較正曲 線と比較することにより塩分付着量を推定することができる. また 10nA より大きい電流量をも って有意な値としている.

図 3-2-29 のグラフは 2009 年 12 月川下側外面上部 (ACM#1)の腐食電流量と相対湿度の関係 をプロットしたものである. 2008 年 12 月, 2009 年 12 月の各センサの計測結果から同様にプロ ットし, 推定された付着塩分量を表 3-2-3 に示す.

全体としては 0.001~0. 1g/m²の塩分量が推定される. 2009 年 12 月は 2008 年 12 月に比べ, フランジ部を除き,全体的に同じか,10 倍程度増加している.両月とも桁外面下部で付着量が 大きいため,桁外面下部分は塩分が付着しやすい傾向がある.また内面においてフランジ部に比 べ桁内部で大きい値になる傾向もあるため,風が吹き込むことで内部に塩分が付着するものと考 えられる.

3,2.6 考察

飛来塩分の測定結果から, 飛来塩分は冬季に多いといえる. 温湿度センサの測定結果から, 夏季と冬季に比較的湿度は高くなり, 特に冬季は朝方にかけて結露の起きやすい状態であるといえる.

腐食電流量の計測結果と付着塩分量の推定から、冬季における腐食環境は年により傾向の違い があるが、桁内面に比べ外面、桁の上部に比べ下部に塩分が付着しやすいといえる. 2009 年 12 月は 2008 年 12 月に比べ、厳しい腐食環境にあったと考えられるが、腐食電流量の傾向と付着塩 分量の推定から、結露しやすい環境にあることと塩分の付着には関係性があると考えられる.



図 3-2-29 腐食電流量と相対湿度の関係(北側外面上部)[2008 年 12 月]

X 3 2 3					
部位		付着塩分量[g/m²]			
		2008年12月	2009 年 12 月		
川下側	川下側外面上部①	0.001~0.01	0.01~0.1		
桁外	川下側外面下部②	0.01~0.1	0. 01~0.1		
	川下側外面フランジ③	0.001~0.01	0.0001~0.001		
川下側	川下側内面フランジ④	0.0001~0.001	0.001~0.01		
桁内	川下側内面下部⑤	0.001~0.01	0.01~0.1		
	川下側内面上部⑥	0.0001~0.001	0.01~0.1		
川上側	川上側内面上部⑦	0.001~0.01	0.01~0.1		
桁内	川上側内面下部⑧	0.001~0.01	0.01~0.1		
	川上側内面フランジ⑨	0.001~0.01	0.001~0.01		
川上側	川上側外面フランジ10	0.01~0.1	0.0001~0.001		
桁外	川上側外面下部⑪	0.01~0.1	0.01~0.1		
	川上側外面上部⑫	0.001~0.01	$0.\ 001 \sim 0.\ 01$		

表 3-2-3 腐食電流量から推定した付着塩分量のオーダー

3.3 結露解析

3.3.1 解析手法

3.2 より冬季に飛来塩分量が多く,同時に結露が生じやすいため,両者に関係があると考えられる.そこで汎用熱流体解析ソフト STAR-CDVer.4.08¹⁾を用いて,桁表面における結露の生成シミュレーションを行う.

3.3.1.1 結露解析

STAR-CD における,結露の成長シミュレーションについて説明する. STAR-CD にはデフォルト機能として壁面における結露の生成・蒸発を目的とするものはない. しかし,蒸発や凝縮を可能とする球状の微粒子を扱う機能が存在する. そこで,あらかじめ壁面に微粒子を付着させ,その水滴の質量,直径といったものの増減から,結露状況を把握する.

3.3.1.2 方法

水滴を壁面に付着させるために、初期条件として壁付近に配置した水滴を壁面に向けて初速度 を持たせておく.壁面に衝突してからの水滴の状態をユーザーサブルーチン DROWBC により、 REBOUND=FALSE とすることで壁面に留まらせる.

3.3.1.3 飽和水蒸気圧

飽和水蒸気圧は,温度により大きく変化する.ここでユーザーサブルーチン DROPRO を用い, 以下の式を与え,温度 T における飽和水蒸気圧 Pv を与える.

$$P_{\nu} = \exp(-6096.9385T^{-1} + 21.2409642 - 2.711193T)$$

$$+1.673952 \times 10^{-5} T^{2} + 2.433502 \ln(T)) \qquad (3.3.1)$$

 P_v : 飽和水蒸気圧(Pa)

T:温度(K)

3.3.1.4 湿度

STAR-CD において,湿気を含む空気を与える場合,湿度を与えるのではなく,水蒸気の質量 分率(Concentration) m_i を与える.

$$R_{p} = \frac{P_{i}}{P_{v}} \times 100$$

$$= \frac{q}{\varepsilon + q} \frac{P_{a}}{P_{v}} \times 100$$

$$(3.3.2)$$

$$\Xi \equiv \mathfrak{C},$$

$$q = \frac{m_{i}}{1 - m_{i}}$$

 $\varepsilon = \frac{M_i}{M}$ R_p :相対湿度(%) P_i :水蒸気分圧(Pa) P_v :飽和水蒸気圧(Pa) P_a :大気圧(Pa) M_i :水蒸気の分子量(≒18) M:空気の分子量(≒29)

3.3.1.5 水滴の状態の表示

STAR-CD の機能により,水滴は球状で表示される.またディスプレー上に表示される球は同 じ振舞いをする水滴をひとまとめに表し,1つの球が1つの水滴を表すわけではない.ここで同 じ振舞いをする水滴の数は初期条件として与えることができる.また,ディスプレー上の水滴の サイズは任意に設定でき,色で表現可能な値は水滴直径,1つの球に含まれる水滴の総質量,温 度等である.

3.3.2 簡易モデルによる解析例

冬季の結露が発生しやすい条件,すなわち気温が低く,湿度が高いときに固体温度,風速を変 化させ,固体周りの水滴の変化を見る.

3.3.2.1 解析モデル

(1) 形状と寸法

図 3-3-1 に解析モデルの形状と寸法を示す.中心にあるのが固体である.

(2) メッシュ分割

図 3-3-2 に示すように、モデル領域を分割する.特に固体境界付近においてメッシュを細かく施



図 3-3-1 モデル形状と寸法

した. 図に示すモデルにおいて、緑は固体セル(鋼)、赤は流体セル(空気)である.

3.3.2.2 諸元

表 3-3-1 から表 3-3-3 に空気,水滴(水),鋼の諸元を示す.

3.3.2.3 境界の設定

図 3-3-3 のように各境界を設定する.固体周りは伝導壁(wall),解析領域の上下は断熱壁(wall)であり,風を与える場合は、モデルの左端の入口(inlet)から吹かせ、右端に出口(outlet)を与える.

3.3.2.4 水滴核の表示と配置

水滴の表示方法として、ディスプレーに球状で示される. 図 3-3-4 に示すように水滴核を配置する.



図 3-3-2 メッシュ分割

表 3-3-1 空気の諸元

分子量	28.96
分子粘性(kg/ms)	1.81E-05
比熱(J/kgK)	1006
熱伝導率(W/mK)	0.02637

表 3-3-3 鋼の緒元

密度(kg/m³)	7800
比熱(J/kgK)	473
熱伝導率(W/mK)	43

表 3-3-2 水の諸元

分子量	18.015
分子粘性(kg/ms)	8.89E-04
比熱(J/kgK)	4179
熱伝導率(W/mK)	0.6207
潜熱(J/kg)	2.43E+06
密度(kg/m³)	997.56
表面張力(N/m)	0.072



図 3-3-3 境界の設定

図 3-3-4 水滴核の配置

太 3-3-4 空気の初期余件	表 3-3-4	空気の初期条件
-----------------	---------	---------

温度(K)	279
湿度(%)	97
水蒸気の質量分率	0.005544

温度(K)	279
直径(m)	0.001
初速度(m/s)	1

表 3·3·6 固体の初期条件 温度(K) 279

3.3.2.5 解析例1

無風状態,気温と固体の温度が同じときの水滴核の変化を見る.

(1) 初期条件

表 3-3-4 から表 3-3-6 に,空気,固体,水滴核の初期条件を示す.

(2) 解析結果

1 ステップ(0.1 秒)で1200 ステップ行った解析結果を以下に示す.図 3-3-5,図 3-3-6 に水滴の直径 を示し,流体領域に関しては,図 3-3-7,3-3-8 に温度分布,図 3-3-9,3-3-10 に水蒸気分布を示す.

全体として水滴の直径は減少している.左右に比べ上下の蒸発が遅いのは,固体により蒸発が妨げ られているため,わずかに固体周りで温度が下がっているのは,蒸発による気化熱によるものと考 えられる.



3.3.2.6 解析例 2

無風状態,固体の温度が気温より3℃低いときの水滴核の変化を見る.

(1) 初期条件

固体および水滴核の初期温度を276Kとし、他は解析例1と同じとした.

(2) 解析結果

1 ステップ(0.1 秒)で1200 ステップ行った解析結果を以下に示す.図 3-3-11,図 3-3-12 に水滴の直径を示し,流体領域に関しては,図 3-3-13,3-3-14 に温度分布,図 3-3-15,3-3-16 に水蒸気分布を示す. 全体として,水滴の直径は増大している.特に下側で成長が早い.固体と空気との温度差により冷や された空気が下へ向かうことにより,上側に比べ,より結露しやすい状態であったためと考えられ る.また上側においても冷やされた空気が固体によりその場に留まるため,結露しやすい状態であっ たと考えられる.水滴が成長しているところほど,空気中の水蒸気を吸収しているため,水蒸気量が 下がっている.





3.3.2.7 解析例 3

気温と固体の温度が同じで、風が吹いているときの水滴核の変化を見る.

(1) 初期条件

解析例1と同じである. 図 3-3-3 に示すように解析領域の左側から 2m/s の風を与える. 風の諸元 は空気と同じとする.

(2) 解析結果

1 ステップ(0.1 秒)で1200 ステップ行った解析結果を以下に示す. 図 3-3-17, 図 3-3-18 に水滴の 直径を示し,流体領域に関しては,図 3-3-19, 3-3-20 に温度分布,図 3-3-21, 3-3-22 に水蒸気分布, 図 3-3-23, 3-3-24 に速度分布を示す.

全体として水滴の直径は減少している.特に風の当たるところで顕著である.逆に左側壁面の中心 付近,右側壁面は蒸発速度が遅い.このことから解析例1と異なり,風が吹き空気の流れが生じる ことで場所によって蒸発速度に明らかな違いが出ると言える.



図 3-3-23 速度分布(1 秒後)

図 3-3-24 速度分布 (120 秒後)

3.3.2.8 解析例4

固体の温度が気温より3℃低く、風が吹いているときの水滴核の変化を見る.

(1) 初期条件

解析例2と同じである.

図 3-3-3 に示すように解析領域の左側から 2m/s の風を与える. また風の諸元は空気と同じとする. (2) 解析結果

1 ステップ(0.1 秒)で1200 ステップ行った解析結果を以下に示す. 図 3-3-25,図 3-3-26 に水滴の 直径を示し,流体領域に関しては,図 3-3-27,3-3-28 に温度分布,図 3-3-29,3-3-30 に水蒸気分布, 図 3-3-31,3-3-32 に速度分布を示す.

風の当たる側が減少している一方で、当たらない側は増大している.また減少している側も解析例 3に比べ減少速度は遅い.これらは固体と空気に温度差があり、水滴の温度に影響を与えているた めと考えられる.また左側壁面で水滴が成長しているにも関わらず、周りの水蒸気分布が初期より 高いのは、他の部分から蒸発した水蒸気が風により、流れ込んだためと考えられる.







3.3.2.9 考察

結露するか蒸発するかは水滴近傍の水蒸気圧と水滴温度における飽和水蒸気圧によって決ま る. すなわち水滴近傍の水蒸気圧の方が水滴温度における飽和水蒸気圧より大きければ結露し, 小さければ蒸発する. 解析例1においては空気と固体の温度が同じであるため蒸発し,解析例2 においては固体の温度が空気より低いため,水滴温度が下がり結露したと考えられる.

風が吹く場合,結露の傾向が無風の時とは変わり,風の当たる場所では蒸発が促進,あるいは 結露が阻害される.解析例3では解析例1と比べ全体的に蒸発が早く,特に風の当たる側で蒸発 速度が速い.また解析例4では風の当たる側では蒸発し,反対側では結露している.風が吹くこ とで,水滴はより空気にさらされ,同時に蒸発した水蒸気が留まることなく直ちに流されるため であると考えられる.

簡易モデルによる解析により,温度,湿度の差による結露現象および空気の流れによる結露傾 向の違いをシミュレーションできた.この結果から結露現象は,気温,湿度,空気の流れに依存 するものといえる.

3.3.3.2 モデル形状

(1) 形状と寸法

図 3-3-33 に解析モデルの形状と寸法を示す.これは観測対象である三国大橋を基に作成した. 以下,川上側の主桁を主桁①,川下側の主桁を主桁②とする.

(2) メッシュ分割

図 3-3-34, 図 3-3-35 に示すように、モデル領域を分割する.特に固体境界付近においてメッシュを細かく施した. 図に示すモデルにおいて、緑は固体セル(鋼)、赤は流体セル(空気)である. なお図 3-3-35 は主桁①だけだが、主桁②にも同様にメッシュ分割を施す.

	ACM#1	ACM#2	ACM#3	ACM#4	ACM#5	ACM#6
$\log I(\mu A)$	-0.82894	-0.52235	-3.24654	-1.74977	-0.87723	-0.95961
	ACM#7	ACM#8	ACM#9	ACM#10	ACM#11	ACM#12
$\log I(\mu A)$	-0.81458	-0.49768	-2.16024	-2.49937	-0.51807	-3.17682

図 3-3-7 対象区間における腐食電流量



25.0m

図 3-3-33 モデル形状と寸法





図 3-3-35 メッシュ分割(桁部分)

3.3.3.3 諸元

空気,水,鋼の各諸元は3.3.2の表3-3-1~3-3-3と同じである.

3.3.3.4 境界の設定

図 3-3-36 のように各境界を設定する.固体周りは伝導壁,解析領域の上下は断熱壁であり,風を 与える場合は,モデルの左端から吹かせ,右端に出口を与える.







3.3.3.5 水滴核の表示と配置

初期の水滴核を図 3-3-37 に示すように壁面に配置する. なお図は主桁①だけだが, 主桁②にも同様に配置する.

3.3.3.6 解析例 1

(1) 初期条件

3.3.2の解析例2と同じとした.

(2) 解析結果

図 3-3-38, 3-3-39, に水滴の直径, 図 3-3-40, 3-3-41 に水滴の温度を示し, 流体領域に関しては, 図 3-3-41, 3-3-42 に温度分布, 図 3-3-44, 3-3-45 に水蒸気分布を示す.

全体的に結露しており,桁外部に比べ,内部の方が増大している.桁外部に比べ周りの空気の 影響を受けにくく温度変化が小さいことにより,結露しやすい状態にあると考えられる.

表 3-3-16 と比較すると、桁内部(#4~8)で高い値を出していることに一致している.









3.3.3.7 解析例 2

風があるときの水滴核の変化を見る.

(1) 初期条件

3.3.2の解析例2と同じとした.

(2) 解析結果

図 3-3-46, 3-3-47, に水滴の直径, 図 3-3-48, 3-3-49 に水滴の温度を示し, 流体領域に関しては, 図 3-3-50, 3-3-51 に温度分布, 図 3-3-52, 3-3-53 に水蒸気分布, 図 3-3-54, 3-3-55 に速度分布を示す.

全体の傾向としては、風上側では蒸発し、風下側では結露している.特に主桁①の下部分で減少 が大きい.速度分布より、この部分に風が吹きつけていることによるものと考えられる.温度分布 で見てもこの部分は他の部分に比べ、温度が高く風により蒸発が促進されたものと考えられる. 結露している部分では.主桁①の内部.特に下部分で結露している.空気が滞留し.水滴の温度変 化が小さいためと考えられる.また結露している部分でも、無風状態と比べて変化が小さい.空気 の流れによって水滴の温度が上げられたためと考えられる.

表 3-3-16 と比較すると、主桁②の風下側(#1,2)、主桁①の風下側(#7,8) で電流量の値が 高いこと、主桁①の下フランジ部分(#10) で値が低いことに一致する. また図 3-3-28 の傾向と もおおよそ一致する.風の吹く方向が変われば、結露の傾向が変わることも予想される.









解析例 1,2 より気温が低く,湿度が高い時に生じる結露について,風が無い時とある時の違い について検討した.

無風状態では全体的に結露し,内部でより結露するという結果が得られた.

風があるときは風上側,とくに風が吹き付ける位置で蒸発し,風下側では結露する.また無風状態の時に比べて,結露する速度が遅い.この解析は,温度,湿度が一定で,無風状態,あるいは常に一定の風が吹いている状態で行ったが,実際には気温,湿度,風向,風速といった気象条件は常に変動している.それらがさまざまに組み合わさり,現象が起こっていると考えなければならない.また実際の結露現象では,水滴がある大きさになると垂れ流れることも考えられる.2009年12月に見られたような腐食電流量の傾向の一部については,今回の結露解析によりシミュレーションすることができた.

参考文献

1) Computational Dynamics Limited, STAR-CD Version 4.08, 2008

3.4 飛来塩分量予測シミュレーション

3.4.1 はじめに

これまでの大規模な飛来塩分量の観測事例には 1980 年頃に旧建設省土木研究所が行った建設 省(現 国土交通省)土木研究所が 1984~1987 年に実施した飛来塩分量全国調査¹⁾, NEDO(新 エネルギー・産業技術総合開発機構)の金属委員会が実施した調査²⁾などがある.いずれも多く の時間と労力をかけたものであり,我が国における飛来塩分の地域,季節依存性等について貴重 なデータを提供している.しかし,特定の地点の飛来塩分量の推定のためには依然として十分な ものとは言えない.したがって,飛来塩分について何らかの数値シミュレーションの手段を確立 しておくことが望ましい.

日本においては飛来塩分の発生は主として海洋面であること, 飛来塩分が大気の動きによって海 岸部から内陸部への輸送・拡散されていることを考えると, 飛来塩分量のシミュレーションは気 象解析の一部としてなされるのが相当である.そこで本研究では代表的なメソスケール気象解析 プログラムではる WRF とその大気汚染解析用パッケージである Chem を用いてその適用性を検 討する.

3.4.2 WRF および Chem パッケージについて $^{3)}$

気象モデルは,日々の天気予報をはじめとする気象予測や,激しい集中豪雨をもたらす積雲対 流シミュレーションなどの気象研究に幅広く用いられている.近年,暴風雨災害,風力発電,都 市のヒートアイランド現象などが社会的な関心を集めている.これらの予測と観測に対して,領 域気象モデル(メソモデル)が用いられてきた.1970-80年代に広く使われていた静力モデル(静水 圧近似モデル)は,計算時間が早いなどの長所があるが,積雲のような深い対流を扱う場合水平格 子間隔をおおよそ10km以上に設定しなくてはならないなどの制限があった.この問題を解決す るために,1990年代から非静力モデルの開発が進められてきた.現在米国では,NCARにおいて メソスケール気象解析モデル「WRF」の開発が進行中である.

WRF モデルは,水蒸気,雲水,雨水,雪,霰などの予報方程式からなる雲物理モデル,日射量 や大気放射量を計算する放射モデル,地表面温度,土壌温度,土壌水分量,積雲量,地表面フラ ックスが導入されている点,地球の曲率などを考慮している点,マザードメイン上での計算結果 を小領域へ境界値として内挿することにより複数の領域を同時に計算できるネスティング機能 や,客観解析値を一定時間毎に取り込み解析値に近づけることで過去の現実的な気象場の再現が 可能になる Four-Dimensional Data Assimilation(FDDA,4次元データ同化システム)を有している点 などが特徴である.

WRF は,世界で最も多くのユーザーを持つ非静力モデル「MM5」の次世代モデルと位置づけ られている.WRF は MM5 同様,非静力の完全圧縮モデルであるが,3次精度のルンゲ・クッタ スキームと5次精度の風上差分スキームといったより高精度な数値計算スキーム,最新の物理モ デル,より進んだ変分データ同化システムを採用していることから,局地豪雨,局地風,ヒート アイランド現象などの局地気象の予報と再現のための有力なツールになると期待されている. WRFは,WRF-ARWとWRF-NMMの2つのバージョンが存在する.前者はNCAR(National Center for Atmospheric Research)2)が管理している研究バージョンであり,後者はNCEP(National Centers for Environmental Prediction)が管理する現業バージョンである.本研究では前者のNCAR が管理し ているWRF-ARWを用いている.そのバージョンは定期的に更新されており,現在はWRF V3 が公開されている.

次の図 3-4-1 に WRF の実行フローを示す.

WRF はその前処理プログラムである WRF Preprocessing System(WPS)(以下 WPS)からなる.次







図 3-4-2 WPS, WRF 実行フロー

の図 3-4-2 において四角で囲まれている部分が WPS の実行フローである .WPS は WRF で使用さ れる入力データを作成するために用いられる .図 3-4-2 のように WPS は 3 つの独立したプログラ ムからなる geogrid ungrid metgrid である .またこれ以外にも WPS にはいくつかの utility program も公開されているが,ここではそのプログラムについては割愛する.次に WPS の 3 つのメイン プログラム,それ以外の WRF 実行プログラムについての説明を以下に示す.なお図 3-4-2 上に表 示してある番号と以下の番号は一致している.

geogrid

geogrid はシミュレーションの領域を定義し,様々な地球上のデータ(地形,土地,植生データ など)をモデル格子へ内挿するプログラムである.また格子間隔の設定,ネスティングの領域の設 定などもここで行うことができる.

ungrib

ungrib は WRF の実行の初期値および境界値である客観解析データ等を入力, GRIB 気象データを解凍し, intermediate file format に入れ込むためのプログラムである.

不規則に分布した観測データから規則的な格子点上の大気の状態を求めることを客観解析と いう.数値予報をするためには、3次元すべての格子点で、ある時刻の気温、風、水蒸気量など の大気の状態(初期値)を与える必要がある.しかし実際の気象観測所は規則正しく配列されてい るわけではない.各格子点付近にある観測所で実際に観測した値を用いて、各格子点で各気象要 素の一番確からしい値を決める.本来は空間座標の連続関数であった大気の情報を、いくつかの 水平面上の多数の格子点での値で表現する.これが客観解析データである.

世界中の気象官署や船舶では, 広域の気象現象を知るために同時観測を行っている.世界協定 時(UTC)の0時から3時間または6時間ごとに地上観測を,0時と12時(日本時間9時と21時) の1日2回レーウィンゾンデ(rawin sonde)で高層観測を行う.高層の気圧,気温,湿度を自動で 測るセンサーと小型無線発信機を一組にしたものに気球をつけて飛揚させる.こうして気圧,気 温,湿度,風速の高度分布がわかり構想の気象データを得ることができる.太平洋などの観測点 の少ない地域ではこれだけの資料では十分な解析ができないので,航空機からの報告や気象衛星 の観測資料なども用いられる.

この客観解析データには NCEP(米国)の Final Analysis(1.0 度格子), NCEP/NCAR Reanalysis(2.5 度格子), ECMWF(欧州)の ERA-40(125km 格子), ERA-15(125km)そして日本の気象庁の GPV デー タ(GSM, RSM, MSM)等がある.

metgrid

metgrid は水平方向に ungrib で抽出した気象データを, geogrid で定義されたシミュレーション 領域へ内挿するプログラムである.この metgrid のアウトプットは WRF の real プログラムで使用 される. real.exe

real プログラムでは鉛直座標の系の変換, WRF にインプットする初期値および境界値を生成する.ここまでの鉛直座標系は圧力座標系であるのに対し, WRF の座標系はη座標系である.η座 標系とは式(3-4-1),及び図 3-4-3 で示すように,圧力面で表した鉛直座標系値をモデルトップの 圧力面までの距離で無次元化したものである.

$$= \frac{p_{h} - p_{ht}}{p_{hs} - p_{ht}}$$

$$p_{h}: 静水圧$$

$$p_{hs}: 地表面圧力$$

$$p_{ht}: モデルトップ圧力$$
(3-4-1)

WRF には主として大気汚染予測および解析のためにさまざまなアドオンが開発されている.これには CMAQ や MADRID などがあり, Chem もそのひとつである.大気の移動にともなう汚染物質の移流・拡散, さらに化学反応等を予測する. Chem の大半の機能は Chem のための実測値にもとづく外部データを利用するものであるが,海洋面上での塩分の発生等など一部については外部データなしで計算を行うことができる.



海洋面における飛来塩分の発生のメカニズムは図 3-4-4 にあるようなもののである.すなわち 海面で砕波あるいは白波等で波が崩れるとき多くの気泡が発生する.その気泡が破裂するときに 細かい水滴(微水滴)が空気中に放出され,それが蒸発すると塩分が空気中に残ることになる. WRF/Chem では海洋面からの飛来塩分の発生モデルに指示式で表される Monahan や Gong4)らに よる経験式を用いている.

$$\frac{dF}{dr} = 1.373U_{10}^{3.41}r^{-3}(1+0.057r^{1.05}) \times 10^{1.19e^{-B^2}}$$

$$B = \frac{0.380 - \log r}{0.650}$$
(3-4-2)

ここに r は湿度 80%における塩分粒径であり F₀ は発生率である.この式からわかるように海洋面 での飛来塩分の発生は海洋面上 10m における風速の 3.41 乗の関数として与えられる.これは風 速が 1m/s を超えるまでは塩分発生はきわめて少なく,1m/s を超えると急激に増加することを示 している.日本付近での観測では洋上の風速が 2m/s を超えない場合には塩分の発生がほとんど ないことが報告されており,定性的な傾向には一致が見られる.ただし,WRF/Chem の Ver.3 で は飛来塩分の発生源としては無視できない汀線における砕波による影響は考慮されていない.ま た土地利用データに淡水面の項目がないので内陸の淡水湖からも塩分が発生してしまうという 問題がある.ただし琵琶湖程度の淡水湖ではその影響は小さく三国大橋の観測点においてはその 影響はほとんどの場合無視できる.

このように WRF/Chem はいまだ開発途上のプログラムであるといえるが本研究では他のすべ ての成分を無視し飛来塩分のみについて考慮する方法で使用した.雨雪による飛来塩分の洗い流 しも考慮していないが,少なくとも基本的な特性は把握できるものと考えた.

3.4.3 WRF/Chemによる飛来塩分量予測の基本的性質

三国大橋における飛来塩分量のシミュレーションの前に ,上記の WRF/Chem による飛来塩分量



図 3-4-4 海面からの飛来塩分の発生のメカニズム

予測の適用性についてこれまでの観測値と比較することにより簡単に検討する.

比較対象は建設省(現 国土交通省)土木研究所が 1984 ~ 1987 年に実施した飛来塩分量全国調査 (以下 全国調査)とする.これは 1984 年から 1987 年にかけて全国の 266 地点(のべ数,図 3-4-5) で土研式タンクを用いて月ごとの飛来塩分量やコンクリート構造中への塩分蓄積量を観測した ものである.全国規模で行われた飛来塩分量の調査のなかでは観測点,期間の点で大きいもので ある.なお,同様の調査には 2005 年に NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の金属 委員会が実施した調査などがあるが,全国調査に比べて地点が限られている.土木研究所の報告 書では,各観測地点における,離岸距離,海面からの高さ(m),海岸線方向,海岸状況等が記載 されている. 観測点における飛来塩分量のデータの例を図 3-4-6 に示す.図にあるように地点に より観測期間が異なる場合がある.

WRF/Chem による飛来塩分量の解析結果の一例を図 3-4-7 に示す.図は 2008 年 1 月のある時刻に おける解析領域の飛来塩分量分布を示したものである.大陸からの強い季節風によって日本海上 で塩分が発生しそれらが日本海沿岸に吹き寄せている様子を見て取れる.WRF/Chem では飛来塩

分量は単位質量の乾燥空気あたりに含まれる塩分質量(µg/kg)として与えられる.土研式タン ク等の飛来塩分観測法で得られる値は特定断面での単位時間あたり塩分通過量である.そこで以



図 3-4-5 全国調査の観測点(ピンのマーク)



(a)	真栄橋



図 3-4-6 各地の飛来塩分観測データ例

下のような考えにより WRF/Chem の値を特定断面における塩分通過量に変換した.まず,理想気体の状態方程式により乾燥空気に対する質量比から単位体積あたりの塩分質量に変換し,風速ベクトルを乗じたうえで一定期間内に特定方向の断面を通過する塩分量を計算した.こうして計算される飛来塩分量は形式に mdd の単位を用いて表すことができる.しかし WRF/Chem による値はその地点での飛来塩分通過の総量であり,土研式タンクの観測量はその地点の特定方向を通過



図 3-4-7 2008 年 1 月の日本付近の飛来塩分の分布

した飛来塩分でタンクに捕捉された量である.また,土研式タンクの飛来塩分捕捉率はあきらか ではないので,同じmddの単位で表すことはできるが直接比較できる量ではない.実際,図 3-4-8 にあるよう観測地とWRF/Chemによる解析値には大きな差が見られる.なお,建設省土木研究所 による観測はおおよそ23年前に行われたものであり,WRF/Chemの解析もその期間に合致させ るのが望ましい.しかし解析に必要な客観データが存在しないために,解析値は2008年のデー タを用いて得られたものである.ある地点の長期の飛来塩分量の変化について観測例は少ない が,30年間の定点観測によっても極端な変化がなかったという報告もある.ここで問題にしてい る飛来塩分量は人的要因のものではなく,自然現象によるものであるから,平均気温や風速等の 気象量に極端な変動がないかぎり飛来塩分量の変動もまたないと考えてよいと思われる.そして これらの気象量は20年程度で急激な変化を生ずるものではないから,結局飛来塩分量も20年程 度のレンジでは顕著な変化はないものとしても問題はない.

以下では数値シミュレーションによって飛来塩分の季節変動および地域変動をどのように表 すことができるかについて検討した.図 3-4-9 は図 3-4-8 の例についてともに飛来塩分の多い1月 の値で正規化したものを比較したものでる.これからわかるように,現段階で WRF/Chem は同一 地点の季節変動については十分な制度で再現できていることがわかる.これは同一地点であれば タンクの捕捉率は年間を通じてほぼ変わらないことを意味している.もっとも捕捉率には一定の 地域依存性があり,ある地点の捕捉率をもって他の地点の飛来塩分の絶対量を予測することはで きるというわけではない.またいくつかの地点において,観測量が解析値を上回った.これには 観測値自体の信頼性の問題もあるが,主として WRF/Chem の飛来塩分発生モデルの問題と思われ る.既にのべたように飛来塩分の派生は沖合の海洋面上で風による発生のみを含めたものであ



図 3-4-8 飛来塩分量の予測(直接比較)



図 3-4-9 正規化した飛来塩分量の解析値と実測値の比較



り,沿岸の汀線部からの発生は考慮されていない.海岸にごく近い領域ではこれが問題になりうる.次に図 3-4-10 は各地域の年平均についてある地点の値で正規化し,地域変動を観測地と比較して表したものである.おおよその範囲ではあるが解析値は地域変動も再現している.ただし,特に瀬戸内海地方では観測値は解析値の10分の1程度しかないが,これはWRF/Chemで採用している飛来塩分発生モデルが沖合で発生する波から生じるものをモデル化したものにあることに起因すると考えられる.内海である瀬戸内海では発生する波が外洋のものとはことなることからその差が顕著なものになった可能性がある.

以上のように現状では WRF/Chem は飛来塩分の発生モデルに検討の余地を残しているといえ るが,飛来塩分の定性的な性状についての予測には十分な道具であると言える.

3.4.4 WRF/Chem による三国大橋付近の飛来塩分量の予測

本研究で観測対象とした三国大橋での解析結果および観測結果を図 3-4-11(a)に示す.上に示し たように解析値との比較は 2008 年 12 月での値で正規化して行っている.これにみるように WRF による解析結果はこの地点での季節変動をよく捉えていることがわかる.図 3-4-11(b)に観測値お よび解析値を上流と下流にわけて表す.三国大橋では川下である北東よりも特に冬季では川上側 である南西方向の飛来塩分が多い.これは,三国大橋の地点では発生頻度の最も多いのは南西か らの風であり,その方向の風にも塩分が含まれているために結局捕捉される飛来塩分量は南西側 の方が多くなるのである.このように結果として上流側の面に多くの塩分量が含まれることにな ることは数値解析によっても示されている(図 3-4-11(b)).なお,観測された飛来塩分の絶対量 は近くの塩谷大橋(北緯 36 度 17 分,東経 136 度 15 分,三国橋より北東に約 15km で海岸からは 約 600m に位置する)で土木研究所によって昭和 60 年に観測されたデータに比べると約 5 分の 1 程度である.

すでにのべたように,WRF/Chem で求めることのできる飛来塩分量は一定期間のあいだにある 特定の断面を通過する塩分量であり,それは土研式タンクによって捕捉されるものそのものでは ない.実際に飛来している塩分が一定の割合でタンクに捕捉されるものと思われるが,この捕捉



率については十分な解明がなされていない.実際のところ,土研式タンクは付着塩分量を測定しているのであり,腐食環境を評価するうえでは利用価値が高く付着率を議論する必然性は高くない.しかし,WRF/Chemのような浮遊塩分量との関係では重要となるので,今後はこの点についての解明が必要となる.なお,今回の計測ではWRF/Chemによる予測値と土研式タンクによる観測値の比はほぼ1/5程度であった.

3.5 橋桁への付着塩分量の推定

3.5.1 解析の目的

上述したように,鋼橋の塗膜劣化,腐食において問題となるのは飛来塩分の橋梁の構造体に対 する付着である.土研式タンク等で特定の地点での飛来塩分量が把握できたとしても,観測値に みえるように橋梁面への付着態様はあきらかに一様ではない(図 xx).付着塩分の多い部位を重 点的に洗浄するなど,橋梁洗浄を効果的に行うためには,付着性状の非一様性を確認しておく必要がある.そこで,以下では解析領域を橋梁の桁まわりの比較的に限られた部分に限定し,数値 流体解析によって付着性状を検討する.

3.5.2 解析の概要

以下の数値解析においては汎用の流体解析 STAR-CDVer.3.26 および 4.08^{6,7)}を使用した.解析 領域を図 3-5-1 に示す.数値解析は計算機の能力の問題から 2 次元的な解析としている.橋脚の 近傍でないかぎり橋梁のような細長い構造では 2 次元的なモデルによる解析はそれなりの合理性 を持つものと考える.

空気は領域の左側から流れ込み右側境界からでていく.流出部での境界条件は連続条件と速度 勾配が0を満たすものとして与えられる.乱流モデルはk-e高レイノルズ数標準モデルとした. 下辺ABは地面に対応し摩擦境界とし,上辺は摩擦のない境界とした.領域の大きさとくに橋梁 断面上部および流出部境界についてはその境界の存在が橋桁まわりの空気の流れに影響のない 程度とした.橋桁断面は三国橋での測定部位に近いところをほぼ再現している.流入部の平均風 速が3m/sのときの橋桁まわりの空気の流れの一例を図3-5-2に示す.橋桁付近でのセル分割を小 さくごく一部をのぞいてセル重心での無次元化壁面距離が300を超えない程度になっていること を確認した.

次に空気中に浮遊する塩分粒子の橋桁面への付着挙動については基本的には塩分粒子を固相 として扱い,粒子の運動方程式を解いていく Lagrange 法を採用した.Lagrange 法を用いた塩分粒 子の橋梁面への付着挙動についてはすでに筆者らが基本的な挙動について検討している⁸⁾.そこ



図 3-5-1 解析領域とセル分割


図 3-5-2 橋桁まわりの空気の流れ(速度分布)

では具体的には粒子の壁面への付着条件,粒子の大きさ,風速およびその変動の全体としての付 着性状の影響等を詳細に検討した.これらの検討にもとづき以下に,塩分粒子の大きさは 10µm として橋梁面への付着は粒子が衝突すればかならず捕捉されるものとした.そして表 3-5-1 と 3-5-2 にまとめるような設定において風速を変化させて塩分粒子の付着性状についてのシミュレ ーションを行った.流入境界での平均風速は 3~9m/s と一定風速とした場合,および±1m/s の変 動量を周期 5 秒の正弦波で与えた場合,さらに平均風速が 3~9m/s の範囲内にある実測値にもと づいた場合について考えた.なお,空気の温度および湿度はシミュレーションに関するかぎりほ とんど影響がないことが分かっている.また,付着条件については桁面に衝突すれば完全に付着 するものとしている.微細粒子の壁面への付着はまだ解明されていない点が多く,ここでは上限 値に対応するものをとった.なお,Lagrange 法を採用したため本解析は付着塩分の絶対量を直接 的に求めるものではない.これは実際の現象に対応した数だけの塩分粒子の追跡を長期間にわた り行うことは現実的でないからである.あくまで,付着粒子の部位のよる相対的な多寡を知るた めのものである.

3.5.3 解析結果

浮遊する塩分粒子の様子を図 3-5-3 に示す.図 3-5-3(a)は流入境界において一定風速としたもの であり,図 3-5-3(b)は 2009 年1月10日午前7時30分ごろの三国大橋での観測値をもとに風速の 変動(図 3-5-3(c))を再現したものである.風速の変動のある場合の付着性状は一定風速の場合 と異なることがわかる.具体的には付着数そのものが多いことおよび一定風速の場合にはほとん



乱流モデル	k-e 高レイノルズ数乱流モデル
乱流混合長(m)	2.3, 2,4, 2.5
表面祖度	0.09
乱流強度	0.1

表 3-5-1 乱流の諸元

粒径 (µm)	10
塩の密度 (kg/m ³)	2200
空気の密度 (kg/m ³)	1.2
粒子の流入個数(1/m/sec)	5
温度(K)	300K
湿度(%)	0
壁への付着	接触により100%表面に付着
流入風速(m/s)	3~9
風速変動量	$\sin\frac{2\pi T}{T_0}, \ T_0 = 5 \sec$

表 3-5-2 物性定数

ど見られない下部の主桁間の空間にも粒子が付着する点である.もっとも,自然の風速変動をどのように代表させるかについては検討を要するが,実測値を再現したものと表 3-5-2 で与えた正弦波によるもので大きな相違はなかったので,以下では正弦波で風速の変動を与えた場合を中心に付着挙動を検討した.

解析結果を橋梁下面の部位ごとの付着位置と個数に注目し表 3-5-3 にまとめる. どの風速であ っても風速変動の影響は大きく,一定風速の場合にくらべて 20%以上付着する.とくに桁間部へ の付着は風速変動のない場合には非常に少ない.全体的に風速の変動のある場合には桁下面がも っとも多く続いて,風上側のウェブ面が多かった.風の変動による付着部位の大きな変化は確認 できなかった.なお,この表では風速は付着量にほとんど影響を及ぼしていないことになるが, この解釈には若干の注意を要する.本解析では風速によらず1秒に1回,流入境界より粒子を射 出しているがこの設定ではある断面における単位時間当たりの塩分通過量が風速によらず一定 となる.しかし実際には空気中に含まれる塩分量の変化は風速に比べればはるかに緩やかであり 短期的には一定とみてよい.とすればある断面の塩分通過量は風速に比例することになる.した がって実際の付着量は風速にほぼ比例して増加するとみなすことができる.

これを,図 3-5-4 の 2009 年 10 月(設置期間 6 ヶ月)の ACM センサによる観測値と比較する と桁下面(位置 3,4,9,10,図 3-5-4)が他の部位に比べてあきらかに大きくなっておりほぼ解析値 と対応していることがわかる.外面のウェブ上ではそれほど大きくないが,これは雨による洗い 流しのためと思われる.この解析によるかぎり桁間部への付着は大きいものとは思われないが,



図 3-5-4 (a) ACM センサによる付着塩分推定量(川下側, 2009/10)

桁間部では雨による洗い流しの可能性がないこと,結露による塩分の局所的な集中が考えられる ことから,長い期間での影響については今回の解析の範囲を超えるものであり断定はできない. また桁間部には点検用通路やあ通信用のパイプ等があり,今回の解析では十分な再現が難しかっ たことも考慮しておく必要がある.ただ,橋梁洗浄という比較的短期のものであればこのような 解析で付着が集中するような部位をあきらかにしておくことが有用である.そして,桁間部につ いていえば洗浄間隔は長くてもよいものと思われる.

以上の結果を現地観測との関係で考えると,付着による塩分付着がもっとも著しいのは主桁の 下面である.風向きも考慮した塩分粒子の相対量の関係はその地点での方向ごとの土研式タンク による観測値と関係つけなければならない.つまり塩分量の多い強い風がある方向から吹いてく



図 3-5-4(b) ACM センサによる付着塩分推定量(川上側, 2009/10)

る場合であっても,塩分量のやや少なくても持続時間の長い方向の風の方が結果的には付着に対 する影響が大きい.しかも WRF による解析や三国大橋現地の解析によれば,単純にその地点での 海岸方向のみに注目すれば十分というわけではない.この点については現地で飛来塩分の調査を する段階でも注意が必要であろう.

平均風速	部位(個数)					風速	
(m/s)	Α	В	С	D	Е	F	変動
2.00	4	0	2	0	<u>11</u>	2	無
3.00	10	0	4	1	<u>20</u>	5	無
5.00	6	0	5	0	<u>23</u>	6	無
7.00	9	0	7	3	<u>24</u>	14	無
9.00	15	0	3	3	<u>28</u>	17	無
2.00	12	1	7	1	<u>14</u>	10	有
3.00	11	0	8	5	<u>16</u>	5	有
5.00	10	2	6	1	<u>25</u>	8	有
7.00	13	3	5	4	<u>31</u>	5	有
9.00	11	0	4	0	<u>25</u>	21	有
3.33	11	0	6	4	<u>13</u>	9	有 1)

表 3-5-3 桁への付着個数

1) 2009/3/13 12:30 に観測された風速変動による.

太字は部位別の最大の箇所を示す.



参考文献

- 平成 17 年度成果報告書,開発成果標準化フォローアップ等標準化調査研究事業,新発電関 連要素機器の長期耐久性及び寿命予測の標準化に関する調査研究,新発電関連要素機器の長 期耐久性及び寿命予測の標準化に関する調査研究委員会,2006,NEDO
- 2) 飛来塩分量全国調查(I)~(IV), 土木研究所資料, 1985
- 3) http://www.wrf-model.org
- 4) 耐候性橋梁の適用性評価と防食予防安全,鋼橋の性能・信頼性向上に関する研究委員会:耐 候性橋梁部会,2009
- Gong, S. L., Barrie, L. A., and Blanchet, J. P., Modeling sea-salt aerosols in the atomosphere, 1, Model-development, J. Geophys. Res., Vol. 102, 3805-3818, 1997.
- 6) Computational Dynamics Limited, STAR-CD Version 3.26, 2006
- 7) Computational Dynamics Limited, STAR-CD Version 4.08, 2008
- 8) 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

4.橋の洗浄法の開発および洗浄効果の評価

4.1 はじめに

日本海側では,冬の季節風によって飛来する海塩粒子が鋼橋に付着し,腐食が促進されている. 金沢市みなと橋と九頭竜川河口の鋼橋では,桁の下フランジとウエブの接面が腐食で切断される 事態に至った.福井県九頭竜川河口の塗り替え後12年の新保橋では,桁のフランジ下面で層状 剥離の錆の発生を筆者らは発見し(写真4-1),管理者に通報した.この橋では,雨がかかるトラ ス部は写真4-2のように錆が見られないことから,気づかなかったようである.このように雨に よる洗浄が防錆に非常に効果を発揮している事例からも,橋梁の洗浄が極めて効果的なことが類 推される.既に,米国では腐食対策として洗浄がなされ,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 検証しようとすると年数を要するなどで,なされていない.

筆者らは洗浄装置を制作し,福井県管理のほとんどの橋に設置されている消雪装置からの井戸 水を用いて,2008年と2009年の春に河口から4.5kmに位置する三国大橋(鋼橋,橋長542m) の洗浄を行った.そこでの洗浄と費用対効果を中心に述べる.

4.2 対象橋の腐食の状況

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(写真 4-3).次に桁内側のウエブが著しい.桁外側の下フラ ンジ上下面,ボルトナット,ウエブに飛来の塩分は降雨で洗浄され腐食は抑制されている.

この三国大橋では塗装の塗り替えを一度に行ってこなかったので,桁内側の下フランジ上面, ウエブの付着塩分量を表面塩分計 SNA2000 で計測し,それを塗装後の年数経過を横軸に整理し た(図-1).図-1でウエブが1年で約800mg/m²で一定となるのは,冬期の塩分付着で臨界湿度が 低下し頻繁に結露し,落水することで,飛来塩分量とにバランスが生じることによる.そのウエ



写真 4-2-1 河口部の橋桁の腐食



写真 4-2-2 同じ橋の雨かかりの部分





写真 4-3 ボルト,雨かかりのない下フランジが 錆びる(三国大橋))

写真 4-4 下フランジ端部の結露水



図 4-1 ウエブと下フランジ上面の付着塩分量の変化

ブから流れた塩分は下フランジの上に至り,元々上向きで多く蓄積した塩分量を更に増やす.塩 分高濃度の下フランジ上面では頻繁に結露し錆を促進するが,結露水は写真4-4のように端部に 水滴となって落水する.ウエブに比べ蓄積量が大きいので,この落水による塩分の減少とのバラ ンスには年数を要し,平衡する付着塩分量も高い図4-1のカーブとなっている.Uリブ下面でも 写真4-5のように結露が観測され,この水滴が乾燥するので,付着塩分濃度はウエブに比べると やや高い.しかし,蓄積しやすく貯留しやすい下フランジ上面に比べるとUリブは落水しやすい ことから著しい腐食にはなっていない.

4.3 洗浄の方法

福井の橋梁のほとんどには井戸水利用の消雪装置が設置されているので,橋脚毎のバルブから その地下水を得て洗浄した.図4-2に全体の概念を,写真4-6,4-7に今回開発の洗浄装置の稼働 状況,写真4-8,4-9に、消雪装置との取り付け状況を示す.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.



図 4-2 橋梁洗浄の概念図



写真 4-7 橋梁洗浄の状況



写真 4-6 橋梁洗浄の状況



写真 4-8 橋梁洗浄の状況



写真 4-9 洗浄機の融雪装置への取り付け

写真 4-10 洗浄後の落下水

河川上の洗浄を考慮した洗浄機を製作した.この洗浄機をユニック車にて搬入し,橋面の1車 線上で組み立てて,橋面車道を1橋脚(延長 60m)走行し,その後1橋脚を後進し,再度前進し て橋脚に至る.次に,洗浄機は軸回転して橋脚を避けて次のスパンに至る.ここで,1度後退さ せて,再度洗浄するという合計3回の洗浄を行ったのは,(1)一度洗浄で塗らして時間を経過して



からの方が,最初の洗浄後にできる塩分濃度の高い滴を流すこと,(2)塗膜下の塩分が塗装表面に 浮き上がり,それが再度の洗浄で流されることへの期待,(3)ノズルからの散水が水道管や電話線 などの管路に当たりUリプに達しないことがあり,3回の洗浄によって,走行線のずれで斑のな い洗浄に寄与する(4)ユニック車の走行を低速度で運転することは難しい,の4点の理由による. この橋面洗浄は,通気時間帯を避け朝9時から夕方4時半まで片側交互通行規制で行った.9時 からの橋面路面上での洗浄機の組み立てに4時間を要し,実際の洗浄は4時30分まで実施し, その後組み立てた洗浄機の下側を外して陸上に下ろす.洗浄機の解体は,下側を切り離して,片 側交互通行規制時間を少なくした.翌日は,下側の組み立てが不要なので洗浄作業は約2時間後 には開始できた.なお,今回の洗浄機は,三国大橋以外の類似の橋梁に適用できるように,ノズ ルと洗浄機自体の高欄との距離はシフトできる構造とした.但し,走行上側の路側に容易に撤去 できない照明ポールなどは走行の妨げとなる.

既往の橋梁洗浄の研究では,水量を増やしても塩分の除去量は増えなくて6~8 以/mでよいこと,高圧より低圧でゆっくり噴霧角度も広角度にした方が良いことが示されている1).このことを参考にして,橋長当たり塗装面積 32 m²/m に 7/3 以/回の散水を3 回行うことで,3 回合計で塗装面積当たり7 以/mの散水とした.ここで桁と桁の中間は写真 4-4 から分かるように,電線管などと管理用通路が洗浄の遮蔽となり非効率なことと水量の確保が容易なことからより多く散水したいが,片側通行規制となり経費的にも洗浄時間は長くはできない.散水の状況は,写真 4-6 が示すように,散水時は凄い勢いでの多量の散水で,桁内の管理用通路に立ち入ることができないほどである.散水の全流量は約 800 以/min(2009 年),717 以/min(2010 年)で,約 9.6~10.7 m/minの走行速度となり,橋長 542m の3 往復は 2.5~2.8 時間で終了する.橋脚での停止や反転,軸回転での時間ロスを考慮しても4 時間で済む.実際には組み立て解体と搬入で1 日間を要して,2日間の作業となる.組立解体が素早くできるよう機械が改良されれば,作業はより短時間になる.

また,腐食の著しい横桁下フランジ上面へはノズルを進行方向に傾けて対処した.この傾斜し たノズルは,橋脚の際で長く停止して散水することで,橋座の洗浄にも効果的であった.なお, 2008年の洗浄では,消雪の分岐バルブからのコルゲートホースの径50mmが小さくて水圧が不足 し床版下のUリブに散水が届かないことが生じたので,加圧ポンプと発電機をユニック車に掲載



図 4-5 洗浄前後の ACM センサの変化

しホース径も 65mm と大きくした.

洗浄後の水が河川に流れることについては,県の環境政策課からは法的には問題にならないとの確認を得て実施した.実際にも,橋梁の再塗装でも洗浄は実施されている.実施したが,そのことが問題になることはなかった.ちなみに,水量 800 以/min(0.013m3/sec)は九頭竜川の低水流量(1年を通じて 275 日はこれを下らない流量)23.8m3/sec の 1/1,785 である.また,落下水を下面に設置したビーカーで集水したものが写真 4-10 で,初年度は長年の汚れが除去され濁っているが,2年目はその汚れは少なくなった.

洗浄の時期は,九頭竜側河口 16km 明治橋での図-3 が示すように冬の季節風による海塩粒子の 飛来が他の季節の 10 倍以上になることから,4 月上旬がよいと考えられる.しかし予算上の制約 などで 2008 年は5月15日~17日と2009年は3月4日~日,2010年は3月4日~5日に洗浄を 行った.

4.4 洗浄の結果

2008 年 5 月にやや能力不足ながら洗浄したこの橋を 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 SNA2000 で計測した平均値を図-4 に示す.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 2,890mg/m²が 580mg/m²に,箱桁外底面では 630 が 310mg/m²に削減され,ウエブでは 630mg/m²が 150mg/m²に低減された.

また,塗装後約5年経過の現場の鋼橋で塩分を除去後に現場の地下水と同じ0.7%濃度の食塩水を散水し,その乾燥後の付着塩分量を図4-4の()に記した.ここで,ウエブでは150mg/m²,箱 桁外底面では460mg/m²,下フランジ上面460mg/m²と異なるのは,ウエブでは洗浄水は縦に流れ 薄い水膜が残り乾燥に至るが,箱桁外底面では水滴になり乾燥するため大きな値となる.但し,



箱桁外底面では,Uリブと異なり,風速の強いに日であれば水滴は吹き飛ばされて付着塩分量は低下する.

既往の洗浄研究例では,2000mg/m'以上であったものが平均25.8mg/m'に,平均1,221mg/m'が平



図 4-9 部位ごとのボルトの錆発生率の経年変化

均 1.2mg/m²に削減された2)ことからすると、今回の洗浄後の値は大きく、費用面では安価であるが、洗浄の効果は相当に劣っている.これは、既往研究とは異なり、0.7%もの塩水を使用していることによると思われる.

4.5 洗浄による防錆効果の推測 洗浄の抑制効果を次の3方法で推測した.

1) ACM センサからの防錆効果の推定

模擬鋼板の塗装表面に表面高さを一致させて裸鋼の腐食を計測できる ACM センサを取り付け,そのL型模型鋼板を2008年12月3日に腐食箱桁内側に取り付けた.腐食の著しい下フランジ上面の ACM センサが示す洗浄前後各約25日間(平均湿度を70%に調整のため洗浄後の日数は25日より短い,平均気温は洗浄前6.9 洗浄後8.8)の平均腐食速度は各々19.9mm/y,6.3mm/yで(図-5),洗浄で3倍に延命される.ウエブはなぜか平均腐食速度が20%ほど上昇した.

2) 気象と付着塩分量からの防錆効果の推測

次に,下フランジ上面について,洗浄なし,3月末に0.8g/m²に,毎年3月末に0.2g/m²に洗浄と いう3ケースで腐食量を見積もった.塩分付着量の推移はと塩分飛来が冬期に集中していること を考慮し図-6と仮定した.付着塩分量と相対湿度の腐食速度への影響(図-7)3)を近似曲線に 置き換えて用いた.また腐食の進行は環境温度に依存することから環境腐食性指数を求める式(4) より,図-7での腐食進行速度は20 の値であるとして,時刻ごとの気温を用いて補正を行った. この式では環境温度が10 ,30 となると約1/2倍,約2倍になる.従って,夏の付着塩分量を 削減が効果的で,春の付着塩分の除去が有効だと推測される.相対湿度,気温は福井県三国の標 準気象データを用いて10年間シミュレーションした.その結果を示す図-8 では,3月末に800mg/

	三国	国大橋17500㎡	新保橋(陸上部3600㎡) 水道水タンク車利用		
3種ケレン,	8年毎塗り替え	毎年洗浄費 + 16年毎塗り替え			
a未空表	¥ 660/㎡年	¥ 390/㎡年	¥ 399/㎡年		
		従来との差4,725千円/年	従来との差¥938千円/年		
3種ケレン,	12年毎塗り替え	毎年洗浄費 + 24年毎塗り替え			
c糸塗装	¥ 558/㎡年	¥ 339/m ² 年	¥ 348/㎡年		
		従来との差3,833千円/年	従来との差¥754千円/年		
1種ケレ	30年毎塗り替え	毎年洗浄費 + 60年毎塗り替え			
ン, c糸塗 装	¥ 429/㎡年	¥ 275/m ² 年	¥ 229/m ² 年		
2		従来との差2,704千円/年	従来との差¥721千円/年		

表 4-2 洗浄のコスト縮減効果

三国大橋での洗浄費内訳:90万円/回(2日作業 1日の作業編成;消雪設備運転 電工1人,発電機100kVA1台,世話役1人,洗浄機作業特殊3人,発電機30kV A1台,高所作業車1台,高所作業車運転手1人,交通誘導員3人,ユニック車1 台)+損料15万円/回(洗浄機500万円を3橋利用で1/3,橋蛇口工事60万円の合 計の15年償還)

新保橋での洗浄費内訳:5人日,高圧洗浄車2kl積1日¥80,000 給水車1日17,000 雑材¥18,000 経費込みで ¥250,000

mlにまで洗浄するという今回の方法で,洗浄無しに比べて約2倍延命となった.また,0.7%の塩 分を含む地下水を水道水等に替えて 200mg/mlにまで洗浄できたとしても約 25%の縮減効果に止 まった.

3) 現場の錆からの防錆効果の推測

この橋の塗装の塗り替えは,全区間一斉にはされてこなかったことから,塗装塗り替え後3年, 5年,16年経過の設置位置毎の錆色発生率(表面錆着色の全体での比率)を腐食の著しいボルト について調べた.その設置部位と経過年数毎の平均結果を塗装塗り替えからの経過年数を横軸 に,錆色発生率を縦軸にして,ボルトの位置(16年経過での付着塩分量も記載)毎に図-9に示し た.既往研究で「海岸地域にような厳しい腐食環境においては,塗膜表面に発生している顕在劣 化面積率で塗装下腐食を推定した方が現実的である」とされ,また塗膜劣化曲線を二次放物線で 与えていることから5),図-9では同じ部位での経過年数-錆色発生率の点を元に錆色進行カーブ を二次放物線で作成した.

図-9から内側フランジ上面(付着塩分量 2700mg/m²)では急激に錆色発生率は高まり,16年で 80%に至っている.但し,ボルトの付着塩分量は部位が狭くて精度良く測りにくいことで,ボル ト周囲の鋼板面と同じであると考えて,その計測値を用いている.箱桁底の外面(付着塩分量 700mg/m²)では,内側フランジ上面の約70%の錆色発生率となっている.また,3年と5年経過し



写真 4-11 3 年経過 1 種ケレン C 系塗装状況

た内側フランジ上面の点は,16年経過から推定した二次放物線に比べて,早い錆色発生となって いる.これは16年経過に比べて塗装塗り替え回数が1回多い点で,塗り替え回数が増えると早 く腐食することが示唆される.内側ウエブでは付着塩分量が670mg/m²と箱桁底の外面付着塩分量 700mg/m²とほぼ同じであるにも拘わらず,錆色発生率が半分以下と少ない.この原因は,結露で 塩分を多く含む滴が底面のボルトにはウエブのボルトより多く集まり,その滴が落下せずに乾燥 し,周囲の鋼板面の700mg/m²とは異なり実際にはより高濃度の塩分付着となっていることが考え られる.なお,雨かかりの外ウエブ(付着塩分量90mg/m²)では,錆色の発生はほとんど生じて いない.

次に図-9から洗浄の効果を推定する.付着塩分濃度が高くて錆色発生率の高い箱桁下フランジ 上面の錆色進行カーブは,洗浄で図-4から580mg/m²にダウンすると見込まれるので,ほぼ同じ 付着量670mg/m²の内側ウエブの錆色進行カーブにシフトすると推測される.そのシフトであれ ば,同じ錆色率発生までの年数は約2.5倍になる.次に,箱桁外底面については,700mg/m²(図-4 では630mg/m²)は310mg/m²になる.内側ウエブは外側ウエブとの中間まで錆色進行カーブがシフ トすると考えられ,同じ錆色までの年数も大幅に延びると推測される.

4) 推測のまとめ

以上の3つの推測の最初の2つの推測は,裸の鋼を対象にしたもので,最後の推測は現場の塗装に即したものである.いずれからも,概ねの効果としては,同じ錆に達するまでの年数が約2 倍に延びる.

4.6 洗浄によるコスト縮減効果

三国大橋 (塗装面積 17,500 m²)を Ra-, Rc-, Rc-の塗装で行い, 各々の耐久年を 8 年, 10 年, 30 年として, その塗り替え年数が洗浄で 2 倍に延びるとした場合の面積当たりの年間費 用を試算した.その結果が表-2 で, 維持費は洗浄によって約 36~41%が縮減されるとなった. なお,洗浄費用の内訳は表-2 下欄に記した.

4.7 下路トラス橋での洗浄

福井県では河口から 1.8km の新保橋で,20年以上の耐久性を期待し1種ケレンC系塗装での塗 り替えを実施したが,下フランジ下面では塗装塗り替え後3年で錆が生じた(写真 4-11).一旦 腐食した鋼板での現場ケレンと塗装には大きな課題が残っている.

新保橋で消雪用井戸水 0.7%塩水洗浄を行っても,ここで最も問題となる下フランジ下面が天井 面なので,前述のように十分な効果が得られない.更にこの橋のトラス部分の存在で前述の洗浄 機は使用できない.そこでこの新保橋では陸上部分橋長 125m のみに限っての洗浄をタンク車搬 送の水道水での洗浄を試算した.地上部に人が立って高圧散水する条件で,使用水量 10 ½/㎡と して,タンク車やノズル洗浄機を有する地元企業からの見積もりでは1日間で施工でき 25 万円 となった.その洗浄で塗装の塗り替えの延長は三国大橋と同様に2倍になるとすると表-の右欄が 示すように,38%~47%のコスト縮減となった.

4.8 まとめ

以上の研究開発をまとめると

- 1. 消雪用井戸水で洗浄しながら,下路橋を洗浄させる技術を開発した.
- 洗浄前後の ACM センサの値,湿度・気温・付着塩分量と鋼板腐食進行速度を明らかにした既 往研究からの当該橋現場の気象データを用いた数値シミュレーション,現場の付着塩分量と腐 食からの推定という3つの推定手法から塩分濃度0.7%の地下水を用いた洗浄であっても,塗装 の塗り替えを約2倍に延ばせると推定できた.
- 3.その結果と洗浄費用の積算から、この橋梁では維持費用を約4割削減できると見込まれた.
- 4.洗浄機の使用できないトラス橋と腐食進行の遅い内陸部の橋梁についても,その洗浄の検討を 行った.

参考文献

- 1) 礒光男,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) 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
- 3) 篠原正,元田慎一,押川渡:ACM センサによる環境腐食性評価,材料と環境, 54,pp.375-382,2005
- 4) 紀平寛:陽耐候性鋼の腐食減耗予想技術とさび安定化評価法,第145回腐食防食シンポジウム

資料,pp.47,2004.6

5)藤原博:鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究,東京大学学位論文, pp.114-143,2000.6 5 まとめ

以上の結果から本研究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,研究期間中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半分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,ウエ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.

4) これらの結果から塩分飛来地域で効率的に鋼桁を洗浄するシステムを構築する目標をほぼ達成することができた.ただし,鋼橋の塗膜の劣化は本来10年程度の長期間の挙動なので,短期間 で完全が検証を行うことには限界があることは考慮しておく必要がある. 8.研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名(雑誌のときは 雑誌名、巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
1. Numerical analysis of sea-salt particulate matter adhesion on bridge surfaces, Proc. ICASS09, pp-369-376	2009/12	Elsevier	M. Obata, T. Hasegawa, K. Nagata, Y. Goto
2. 消雪設備を利用した鋼橋洗浄防 錆,北陸雪氷シンポジウム論文集	2010/3		宮本重信,北嶋浩, 小畑誠,永田和寿, 篠原正,奥村茂
3. 海塩粒子が飛来する鋼橋の洗浄に よる防錆,日本道路会議ポスター 発表	2009		宮本重信,北嶋浩, 牧野芳行,奥村茂, 小畑誠,永田和寿, 篠原正
4. 海塩粒子が飛来する橋での洗浄の 費用対効果,福井県雪対策・建設 技術研究所年報地域技術第22号, pp. 59-60	2008/8		北嶋浩,宮本重信
5. 重腐食部の重防食による鋼橋ライ フサイクルコストの縮減,福井県 雪対策・建設技術研究所年報地域 技術第22号,pp. 61-62	2008/8		宮本重信・北嶋浩
 海塩粒子が飛来する鋼橋の洗浄による防錆,福井県雪対策・建設技術研究所年報地域技術第22号,pp. 43-44. 	2009/8		北嶋浩・宮本重信・ 奥村茂
7. 鋼橋重腐食部への亜鉛テープ被覆 等によるコスト縮減の予測,福井 県雪対策・建設技術研究所年報地 域技術第22号,pp.46-47	2009/8		宮本重信・北嶋浩・ 篠原正
 8. 鋼橋重腐食部への亜鉛テープ被覆 等によるコスト縮減の予測,平成 21年度土木学会全国大会講演会概要,I-088 	2009/9		宮本重信・北嶋浩・ 篠原正
 9.海洋面発生の飛来塩分の移流・拡散 シミュレーションの検討,平成21 年度土木学会全国大会講演会概 要,I-072 	2009/9		星野明,小畑誠,永 田和寿
10.効果的な桁洗浄のための飛来塩分 の付着特性に関する調査,平成21 年度土木学会全国大会講演会概要	2009/9		永田和寿,渡辺泰成, 小畑誠,宮本重信,

9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の 種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
特許 橋梁の自動洗浄装置	特願 2008-261415	平成20年10月8日		福井鉄鋼(株)奥村茂, 宮本重信(福井県), 北嶋 浩(福井県)

10. 成果の実用化の見通し

すでに2回の橋梁洗浄を行っており,橋梁洗浄機とその具体的な運用方法については実 用化の域に達している.そして付着塩分の洗い流しについて効果があることも確認ずみ である.これをうけて橋梁洗浄は三国大橋と同じく福井県内の新保橋で今後毎年実施さ れることになっている.

11. その他

8.に示した刊行物の写し

本研究に関する報道

- a) 橋梁洗浄実施に関する新聞報道,県民福井,2008年5月16日
- b) 橋梁洗浄実施に関する新聞報道,福井新聞,2008年5月23日