



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 29-7

研究テーマ

耐候性鋼橋梁の診断・補修技術の高度化
についての研究開発

研究代表者：山口大学教授 麻生 稔彦

共同研究者：松江工業高等専門学校教授 大屋 誠
松江工業高等専門学校准教授 武邊 勝道
松江工業高等専門学校准教授 広瀬 望

令和 2 年 7 月

新道路技術会議

目 次

研究概要.....	1
第1章 はじめに.....	3
1. 1 本研究の目的.....	3
1. 2 本研究の内容.....	3
第2章 耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発.....	5
2. 1 腐食予測シミュレーション手法の既設耐候性鋼橋梁への適用.....	5
2. 2 数値シミュレーションの役割・活用および留意点.....	13
2. 3 本章のまとめ.....	14
第3章 ICT 技術を援用した腐食判定法の高度化.....	16
3. 1 セロテープ試験.....	16
3. 2 画像処理による評価の概要.....	16
3. 3 提案法の精度検証.....	19
3. 4 不一致試料についての検討.....	20
3. 5 画像処理によるさび評価における留意点.....	21
3. 6 本章のまとめ.....	22
第4章 腐食耐候性鋼材の補修効果の解明.....	24
4. 1 ワッペン試験による曝露試験環境評価.....	25
4. 2 暴露試験鋼材の計測.....	25
4. 3 塗装試験片評価.....	29
4. 4 I 評点による補修効果の整理.....	30
4. 5 補修実施のための留意点.....	33
4. 6 本章のまとめ.....	34
第5章 耐候性鋼材の診断・補修に関するフロー.....	35
5. 1 腐食予測シミュレーション.....	35
5. 2 腐食判定法.....	35
5. 3 補修フロー.....	37
5. 4 管理者への意見聴取.....	38
5. 5 本章のまとめ.....	39
第6章 まとめ.....	40

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 29 年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.29-7	耐候性鋼橋梁の診断・補修技術の高度化についての研究開発	山口大学 教授 麻生稔彦

本研究開発では、耐候性鋼橋梁の効率的かつ合理的な維持管理を可能とするために、耐候性鋼材の腐食の診断技術および補修技術の体系的高度化を目的として、耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発、ICT 技術を援用した腐食判定法の高度化、腐食耐候性鋼材の補修効果の解明、耐候性鋼橋梁の腐食評価・補修フローの提案を実施する研究開発。

1. 研究の背景・目的

耐候性鋼材は鋼材表面に緻密な保護性さびを形成し、腐食速度を十分低減する鋼材である。そのため耐候性鋼橋梁では塗装を必要とせずライフサイクルコストの観点から有利となるため、多くの耐候性鋼橋梁が建設されている。耐候性鋼橋梁を適切に維持管理し、長寿命化をはかるためには、橋梁がおかれている環境の評価手法、鋼材表面に生成するさびの評価手法、効果的な補修技術の確立が必要不可欠である。本研究では耐候性鋼橋梁の長寿命化手法の確立を目的として、腐食環境シミュレーション技術およびさび評価システムを構築するとともに効果的な補修方法を提示し、これらを統合した維持管理フローを提案することを目標とした。

2. 研究内容

(1) 耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発

耐候性鋼橋梁の腐食には種々の要因が複雑に影響することが知られており、これにより実際に発生する腐食の予測が困難な状況にある。そこで、3D モデリング技術と環境評価シミュレーションを融合し、橋梁各部位における腐食程度がシミュレート可能なシステムの構築を目指す。

(2) ICT 技術を援用した腐食判定法の高度化

耐候性鋼材に発生するさびは外観評点によって評価されている。そのための方法としてセロテープ試験によるさびの採取と評価がなされているが、評価にあたっては評価者の熟練度による個人差が生じることが指摘されている。そこで、セロテープ試験で採取したさび画像に画像解析技術を用いて熟練度に依らず点検者あるいは管理者が簡便にさびの状態を評価するシステムを構築する。

(3) 腐食耐候性鋼材の補修効果の解明

耐候性鋼材の補修方法はいくつか想定される。しかし、これらの補修方法を統一的に評価した事例はなく、環境・さび状態と補修方法との関係が明確でない状況にある。そのため、素地調整方法、塗装方法、塩分除去方法等を組み合わせた試験片を用いた曝露実験を3箇所(沖縄、山口、島根)で実施し補修の効果を検証する。

(4) 耐候性鋼材の腐食評価・補修フローの提案

上記(1)~(3)の成果から、腐食環境評価~腐食状況評価~補修方法決定~将来予測と体系だてた評価・補修フローを提案し実務で適用可能手法を提案する。

3. 研究成果

(1) 耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発

耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション手法として、熱流体シミュレーションソフトウェアを基本として、3次元の地形データと橋梁モデルの連携を図った。このシステムを用い対象橋梁で観測された飛来塩分量の飛来状況をかなりの精度でその傾向を評価可能であることを確

認した。また、地形を考慮することにより、橋脚周辺の桁内への流入状況やその影響範囲と異常腐食を生じている範囲が良く一致することを確認した。

(2) ICT 技術を援用した腐食判定法の高度化

さび画像から個々のさび粒子を同じ面積を持つ円に置き換え、その円の直径である円相当径により粒径加積曲線を求め、この粒径加積曲線の累加百分率 40%および 100%の円相当径と、さび評点を関連付ける閾値を示した。この手法による技術者評価との一致率は、評価基準設定時に用いたセロテープ試験試料における 74.0%となり、評点 4 以上および評点 2 以下はほぼ技術者評価と一致する。また、評価基準設定時とは別の試料における技術者評価と本研究で設定した評価基準による画像解析評価の一致率は 92.1%となり良い精度を示した。

(3) 腐食耐候性鋼材の補修効果の解明

Rc-I 塗装系を含め種々の補修塗装を施した試験片について腐食環境の異なる沖繩、島根、山口において曝露試験を継続実施した。飛来塩分の影響を受ける地域では、Rc-II 塗装系、Rc-I 塗装系（水洗レス工法含む）、また、応急延命的措置として有機ジンクリッチペイントと変性エポキシ樹脂塗料が適用可能であると判断した。飛来塩分の影響を受けない地域では、Rc-II 塗装系、Rc-I 塗装系（水洗レス工法含む）、簡易塗装、さらに腐食要因が完全に排除された場合には無塗装による補修も有効であると考えられる。

(4) 耐候性鋼材の腐食評価・補修フローの提案

本研究の成果を診断補修マニュアルとして一般に普及する観点から、(1)腐食予測シミュレーション技術、(2)腐食判定法、(3)補修手順についてフローを提案した。

4. 主な発表論文

- 1) T. Aso, Y. Tokieda, K. Tajima, Y. Nakamura, K. Sakamoto, Rust Rating System using Image Analysis for Weathering Steel Bridges, Proceeding of Bridge Engineering Institute Conference, pp.88 - 92, 2019.
- 2) 杉山 裕夏, 麻生 稔彦, 田島 啓司, 腐食した耐候性鋼材の補修塗装に関する検討, 第 71 回土木学会中国支部研究発表会, 2019.
- 3) 広瀬 望, 大屋 誠, 武邊 勝道, 麻生 稔彦, 田中 健太郎, 地形を考慮した耐候性鋼橋梁の腐食環境評価, 土木学会第 75 回年次学術講演会, 2020.

5. 今後の展望

数値解析を用いた橋梁の腐食評価には、解析領域の大きさ、モデルの詳細度、要素サイズ、適切な境界条件の設定や風、海塩粒子の影響だけでなく温度、湿度、風による乾燥効果などの環境条件の設定など検討課題はあるが、鋼構造物の長寿命化を考慮した設計の高度化に向けさらなる研究を進める。AIを援用したさび判定においては、概ね技術者と同一評価が可能となるシステムが構築できた。一方、教師データの信頼性（技術者間の相違）は常に問題となる。本研究では技術者によらない定量的評価手法との比較も行い良好な結果を得ているものの、中間評価での指摘にもあるように現行の評価レベル自体に関する検討を実施したい。曝露試験により補修方法と腐食環境の定性的な関係を明らかにできた。今後はこの成果をもとに実橋梁に対する試験補修を実施、曝露試験との比較検討により補修方法のさらなる信頼性の向上に努めたい。

6. 道路政策の質の向上への寄与

耐候性鋼橋梁は無塗装で使用できることからLCCの観点から有利となるため、近年多くの橋梁が架設された。本研究の成果はこれらの橋梁の維持管理に適用でき、耐候性鋼橋梁の長寿命化に貢献できる成果である。すなわち、耐候性鋼橋梁に予期せぬ腐食が発生した場合に、腐食原因を推定するためのシミュレーション、腐食状態の評価、長寿命化のための補修を一連の流れとして捉えた研究である。また、本研究の成果は広い範囲の橋梁管理者、点検業者、施工業者により実施可能であり、道路政策の質の向上に大いに資する成果と考える。

7. ホームページ等

特になし

第1章 はじめに

1.1 本研究の目的

耐候性鋼材は鋼材表面に緻密な保護性さびを形成し、腐食速度を十分低減する鋼材である。そのため、耐候性鋼橋梁では塗装を必要とせずライフサイクルコストの観点から有利なため、平成24年度には新規建設橋梁の20%以上を占め、今後も建設され続けると予想される。しかし、一部の耐候性鋼橋梁では異常腐食が報告されていることから、耐候性鋼橋梁を適切に維持管理し、長寿命化をはかるためには、橋梁がおかれている環境の評価手法、鋼材表面に生成するさびの評価手法、効果的な診断・補修技術の確立が強く望まれている。

本研究は、耐候性鋼橋梁の効率的かつ合理的な維持管理を可能とするために、耐候性鋼材の腐食の診断技術および補修技術の体系的高度化を目的とし、腐食予測シミュレーション、並びにさび画像を活用した腐食判定方法を開発し、耐候性鋼橋梁の合理的な維持管理手法を提案するものである。

これまでの耐候性鋼橋梁における保護性さび（あるいは腐食）に関する研究は、主として個々の実橋梁での調査あるいは実験室レベルで行われており、既存の耐候性鋼橋梁の長寿命化を目指した俯瞰的な研究は例がない。また、さびの評価方法も種々提案されているものの、広く実業務に適用されているとは言い難い。また、現在までに地方整備局あるいは個別の道路管理者において既設耐候性鋼橋梁の維持管理に関する手引き等が示されている場合もある。しかし、これらの手引きでは具体的な補修方法の提示、特に状況に応じた補修方法の使い分けには言及されていない。

本研究は、耐候性鋼材の長寿命化を実現するための研究であり、この種の研究は国内外を問わずこれまでほとんど行われておらず、特色ある研究である。本研究で開発を目指すICT技術を援用した腐食判定法の高度化は熟練度によらずさびを評価する手法を提供することを目指しており、本研究の独創的な点

の一つである。さらに、補修方法の統一的評価と補修フローの作成は耐候性鋼橋梁の維持管理に極めて有用であり、現時点で早急に解決すべき課題である。本研究を通して得られる知見は、単に耐候性鋼橋梁のみでなく、鋼構造全体にわたり適用できる可能性を持ち、将来的な発展が大いに期待できる。

1.2 本研究の内容

本研究では耐候性鋼橋梁の長寿命化手法の確立を目的として、以下の事項について研究を進めた。

(1) 耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発

耐候性鋼橋梁の腐食には種々の要因が複雑に影響することが知られており、これにより実際に発生する腐食の予測が困難な状況にある。そこで、3Dモデリング技術と環境評価シミュレーションを融合し、橋梁各部位における腐食程度がシミュレート可能なシステムの構築を目指す。

(2) ICT技術を援用した腐食判定法の高度化

耐候性鋼材に発生するさびは外観評点によって評価されている。そのための方法としてセロテープ試験によるさびの採取と評価がなされているが、評価にあたっては評価者の熟練度による個人差が生じることが指摘されている。そこで、セロテープ試験で採取したさび画像に画像解析技術を用いて熟練度に依らず点検者あるいは管理者が簡便にさびの状態を評価するシステムを構築する。

(3) 腐食耐候性鋼材の補修効果の解明

耐候性鋼材の補修方法はいくつか想定される。しかし、これらの補修方法を統一的に評価した事例はなく、環境・さび状態と補修方法との関係が明確でない状況にある。そのため、素地調整方法、塗装方法、塩分除去方法等を組み合わせた試験片を用いた曝露実験を3箇所（沖縄、山口、島根）で実施し補修の効果を検証する。

(4) 耐候性鋼材の腐食評価・補修フローの提案
上記(1)～(3)の成果から，腐食環境評価～腐食状況評価～補修方法決定～将来予測と体系だてた評

価・補修フローを提案し実務で適用可能手法を提案する。

第2章 耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発

2.1 腐食予測シミュレーション手法の既設耐候性鋼橋梁への適用

本研究では、耐候性鋼橋梁の橋梁各部位の腐食予測を i-Construction において格納が要求される CIM モデルと環境シミュレーションを用いて飛来塩分量 (mdd: NaCl mg/dm²/day) や大気中塩分濃度 (mg/m³) から耐候性鋼橋梁の腐食の程度を予測する技術を開発することを目的としている。

耐候性鋼橋梁は、鋼材表面に生成する緻密な保護性さびにより、鋼材内部へのさびの腐食進行を抑制し、維持管理上問題とならない範囲に抑制する。耐候性鋼材は多くの橋梁において目的とする性能を發揮しているが、伸縮装置からの漏水や排水設備の問

題などによる異常腐食の事例、道路橋示方書¹⁾の離岸距離規定や耐候性鋼材の適用可否を検討する際に観測された飛来塩分量データからでは適切な腐食環境が評価できていないことによる異常腐食の事例がいくつか報告されている。耐候性鋼橋梁の適切な維持管理を行うためには、耐候性鋼橋梁の桁内部の各部位の腐食環境を適切に評価し、適切な防食法の選定が必要である。

本研究において開発を行う耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーションシステムの概要を図-2.1 に示す。本システムは、CIM モデルを活用して、飛来塩分量や空气中塩分濃度などの腐食環境条件より、橋梁各部位の腐食予測を数値シミュレーション技術と連携して行うことを目的とする。

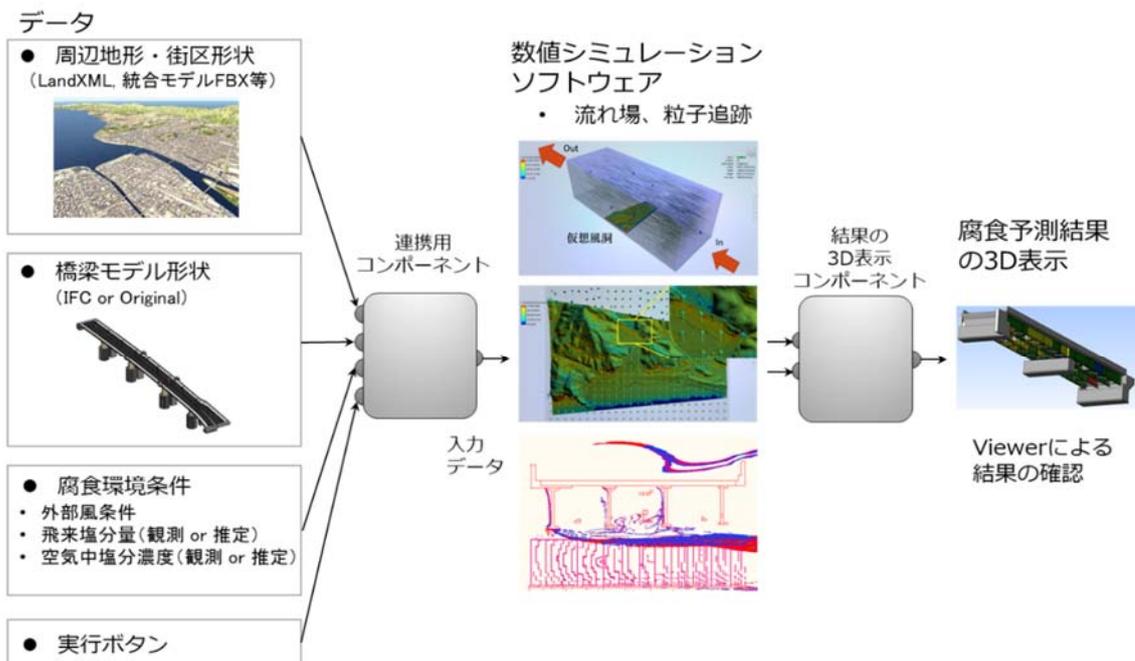


図-2.1 腐食予測シミュレーションシステムの概要図

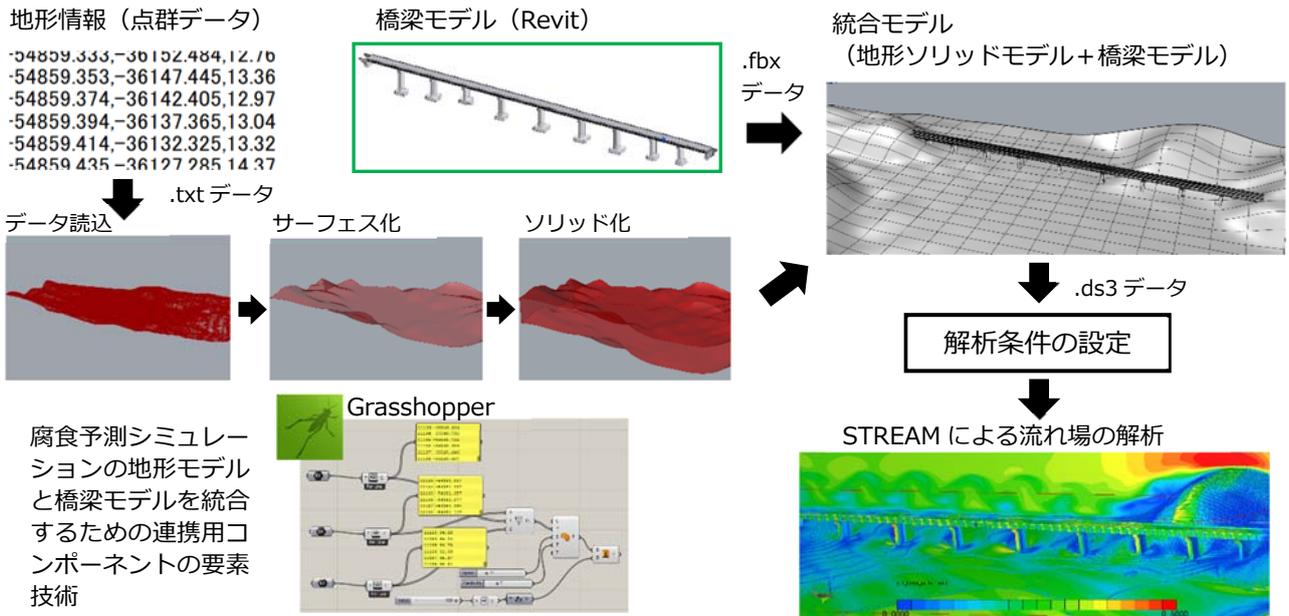


図-2.2 腐食予測シミュレーション手法の概要

a) 地形データと橋梁モデルの連携用コンポーネントの概要

本研究では、耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション手法として、建築、土木、電子機器などの様々な業界で使われている熱流体シミュレーションソフトウェアの STREAM を基本として、地形データと橋梁モデルの連携を図った。

地形データと橋梁モデルの連携用コンポーネントの開発にあたり、STREAM では流体解析用のメッシュ分割時に地形のようなサーフェスモデルは厚みを持たないため、要素分割ができないという課題があった。i-Construction の 3次元モデリングで用いられる Civil3D、Revit や InfraWorks などのソフトウェアでも地形データは基本的にサーフェスモデルとして取り扱うため、これらのソフトウェアでモデリングした 3次元データを STREAM で地形を取り込んだ解析を容易に行うことはできなかった。

そこで本研究では、国土地理院などの地形データ (DEM データ) や点群データを STREAM で解析可能な地形のソリッドモデルを容易に作成し、Revit などで作成した橋梁の 3D モデルデータと統合することで、橋梁の長寿命化対策に関する検討を容易に実施できる連携用コンポーネントの開発を試みる。連携用コンポーネントの開発には、数値流体解析ソフトウェア STREAM と相性の良い、Rhino のプラグインツールである Grasshopper を用いた。図-2.2 に開発した連携用コンポーネントを組み込んだ腐食予測シミュレーション手法の概要を示す。連携用コンポーネントの作成に用いた Grasshopper は容易に自由度の高いカスタムコマンドの作成ができるという特徴がある。地形モデルは国土地理院の基盤情報システムよりダウンロードした DEM の位置情報である xyz データ (点群データ) から、本研究で作成した Grasshopper のプログラムを用いてサーフェス化、ソリッド化を自動的に行う。橋梁の Revit モデル

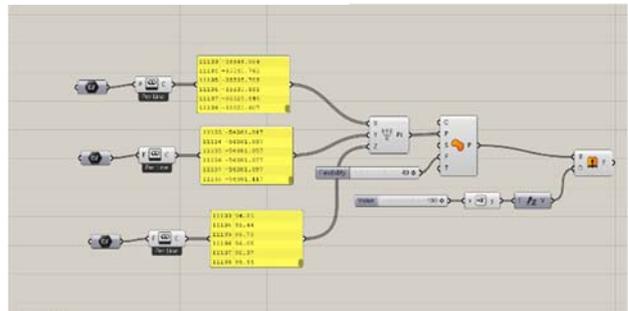


図-2.3 Grasshopper のプログラム (点群から地形)

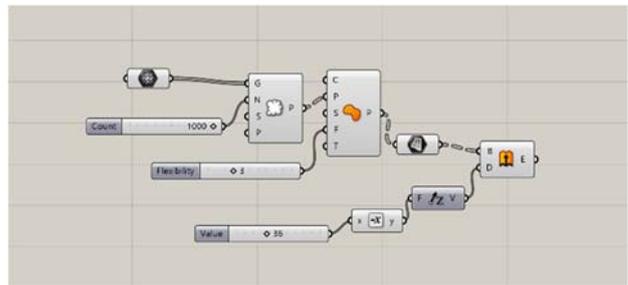


図-2.4 Grasshopper のプログラム (メッシュから地形)



図-2.5 メッシュデータより街モデル作成

は FBX データにエクスポートし、Rhino にそのデータをインポートした。地形のソリッドデータは、平面直角座標系の座標を持っていることから、

橋梁モデルに緯度経度の情報を平面直角座標に変換して埋め込み、橋梁と地形モデルの位置を合わせて統合した。

b) 連携用コンポーネントの要素技術

(1) Grasshopper によるプログラミング

本研究では、点群から地形のソリッドモデルを作成するプログラムと DEM 標高メッシュデータから地形のソリッドモデルを作成するプログラムを作成した。図-2.3 に地形の点群情報からソリッドモデルを作成する Grasshopper のプログラムを示す。このプログラムでは点群のファイルから点群を読み込み、各点の近くを通るサーフェスを作成し、サーフェスを下方向に押し出すことでソリッド化している。本システムで生成されるソリッドモデルは位置情報を有しているため、生成された地形のソリッドモデルも位置情報を有している。

図-2.4 は、地形のメッシュデータからソリッドモデルを作成する Grasshopper のプログラムを示す。このプログラムではメッシュデータのファイルからメ

ッシュデータを読み込み、メッシュ上に任意の数の点を作成することで図-2.3 と同様にソリッド化している。メリットとして建物、河川、水境界線、橋梁等が入っているデータを用いることで、建物、水、地形ごとに表面摩擦などの特性を変えながら街ごと解析することが可能となる。図-2.5 に本プログラムを用いて松江市内をモデル化した事例を示す。

(2) 点群データ

点群データは国土地理院の基盤情報データからダウンロードし、基盤地図情報ビューア (FGDV) に読み込みを行う。次に対象地域の矩形領域を設定することで、標高メッシュファイルへテキスト形式の xyz ファイルとしてエクスポートし、Excel でデータを整理することで得た。

(3) 地形モデルと Revit データの統合

Revit は属性情報を埋め込んだ 3 次元のモデルを FBX ファイルとしてエクスポートし、Rhinoceous にインポートすることで統合する。インポートすると

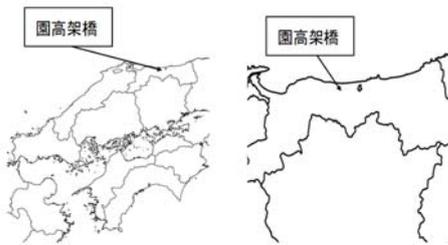


図-2.6 園高架橋の位置



図-2.7 地形モデルと橋梁モデルの 3 次元統合モデ

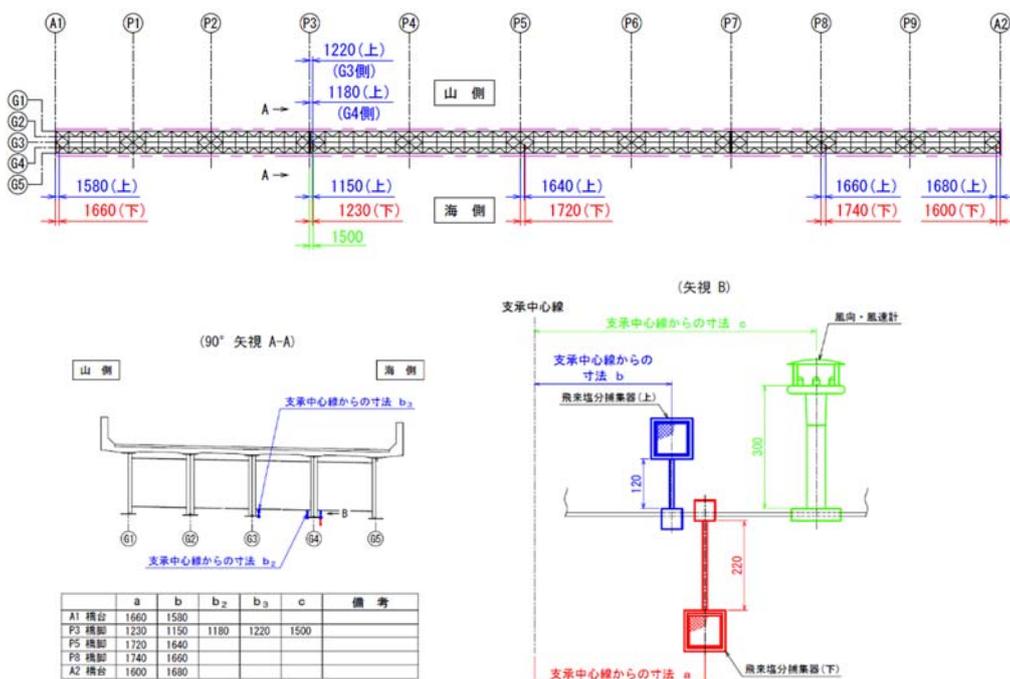


図-2.8 園高架橋の飛来塩分量の調査位置



(a) 園高架橋の全体外観



(b) A1 G4 桁



(c) P3 G4 桁 G5 側



(d) P3 G4 桁 G3 側

図-2.9 園高架橋の計測機器の設置状況

Revit データの基準点が Rhinoceros の原点上に表示されるが、Revit 構造物のある点における緯度経度情報を得ていれば、平面直角座標値に変換し、角度を調節することで地形モデルとの統合を行うことができる。

c) 園高架橋の腐食予測シミュレーションへの適用事例

(1)対象橋梁と環境測定結果

対象橋梁は、耐候性鋼橋梁の維持管理のための詳細調査が実施されている園高架橋（鳥取県東伯郡湯梨浜町：図-2.6 参照）である。図-2.7 に InfraWorks を用いて作成した地形モデルと園高架橋の3次元統合モデルを示す。

園高架橋の A1, P3, P5, P8, A2 において、桁下と桁内でドライガーゼ法による飛来塩分量および橋面と P3 桁内で風向・風速の観測が実施されている。機器の設置位置を図-2.8 に示す。また、設置状況を図-2.9 に示す。風向・風速の観測結果より、特に冬季に風速の大きな風向は、北西の風が卓越しており、日本海から飛来する海塩粒子による飛来塩分の影響を受け、異常腐食を生じているものと思われる。

図-2.10 に 2017 年 2 月から 2018 年 1 月までに実施された飛来塩分量の観測結果を示す。2 月からの観測であるが、冬季から春季にかけてかなりの量の飛来塩分量が観測されている。夏期から秋季にかけては減少している。A1 と A2 を比較すると、A1 の飛来塩分量が多く、A2 の飛来塩分量が他の観測位置に比べかなり少なく、周辺地形の影響を受けている

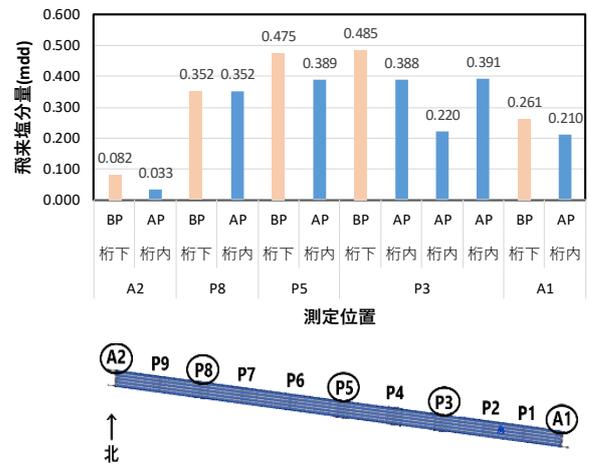


図-2.10 園高架橋の計測機器の設置状況

ものと思われる。P3, P5, P8 は同程度の飛来塩分量であるが、P8 が若干少なめである。桁下 (BP) と桁内 (AP) の比較図を見ると JSSC テクニカルレポートなどの結果では、1/2 以下となっているが、園高架橋は、全体的に飛来塩分量の桁内への流入量が多い特徴を示し、橋脚の影響を受け、桁内の流入量が多くなったものと推察される。また、P8 の桁内の流入量の割合は、P3, P5 に比べ多い結果となっている。

(2)解析モデルと解析条件

解析は、図-2.11 に示す地形を考慮した解析モデルと地形のないモデルで解析を行う。解析領域は x 方向 480m, y 方向 250m, z 方向 100m である。解析

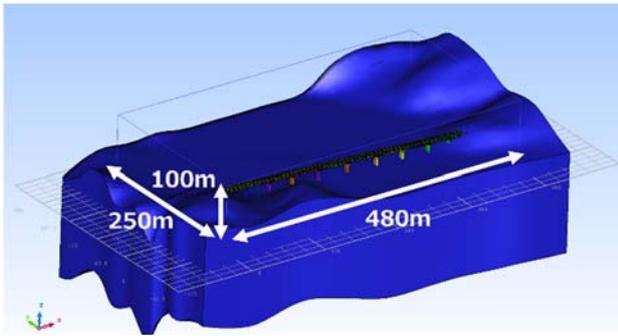


図-2.11 解析モデルと解析領域

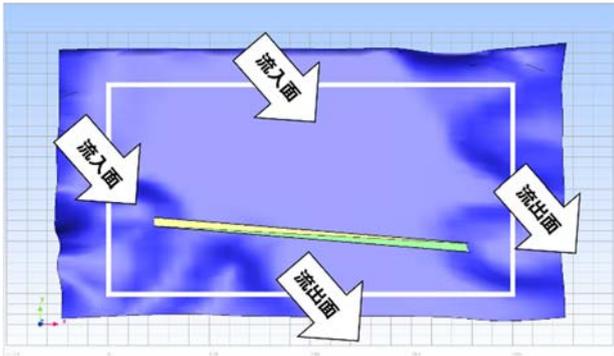


図-2.12 境界条件

用メッシュは、0.5mで均等に要素分割し、約7700万要素で解析を行った。

解析における境界条件の概要を図-2.12に示す。境界条件は、園高架橋の最多風向である北西方向からの風の流れ場を再現するため、モデルの北面、西面を流入部、東面、南面、上空面を自然流出面とした。流入風速は、環境省の風力発電所建設に向けた報告書を参考に、鳥取の沖合の海上風速の平均値に近い7.0m/sを採用した。乱流モデルは標準k-εモデル（高レイノルズ）を採用し、定常解析とした。

(3) 風況解析から飛来塩分を推定する手法

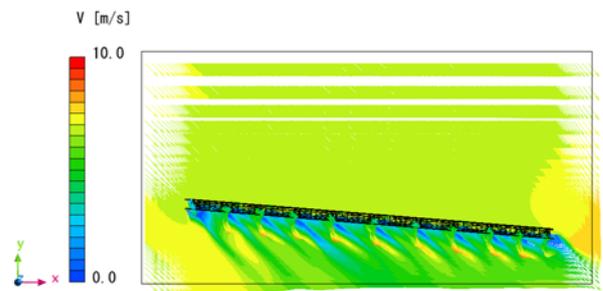
本研究では、紀平ら²⁾が提案する以下の式(2.1)を用いて解析結果の風速から飛来塩分量を計算する。

$$C = 8.64 \times 10^5 \cdot \gamma_x \cdot c \cdot |u_x| \quad (2.1)$$

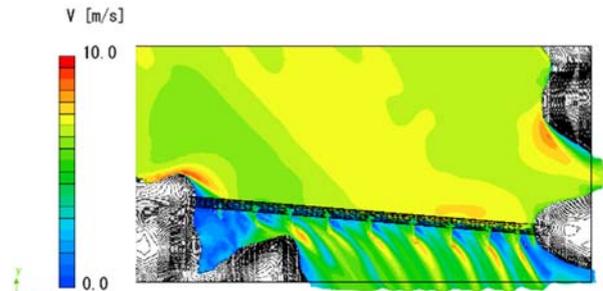
ここで、 C ：飛来塩分量 (mdd), γ_x ：測定における x 軸の捕捉率, c ：海塩粒子濃度 (g/m^3), u_x ：測定における x 軸の風速 (m/s)である。既往研究より、測定における x 軸の捕捉率³⁾は0.07である。海塩粒子濃度は $10 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 以下が確からしいという情報しか得られなかったため $2.6 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ とした。 x 軸とは、飛来塩分量を測定するため設置しているガーゼ表面の法線方向である。

(4) 数値解析結果と考察

図-2.13に地形モデルの有無による園高架橋周辺の風の流れ場の数値解析結果を示す。図-2.13は、風速の分布図でカット面は飛来塩分量の桁下のドライガーゼ (BP) の観測位置に近い z 軸19.5mである。数値解析結果より、図-2.13(a)と図-2.13(b)の

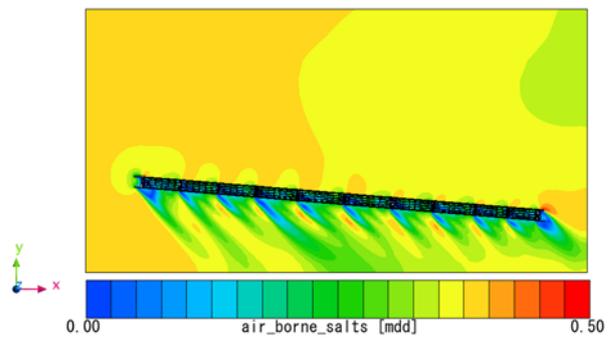


(a) 橋梁のみの風の流速分布

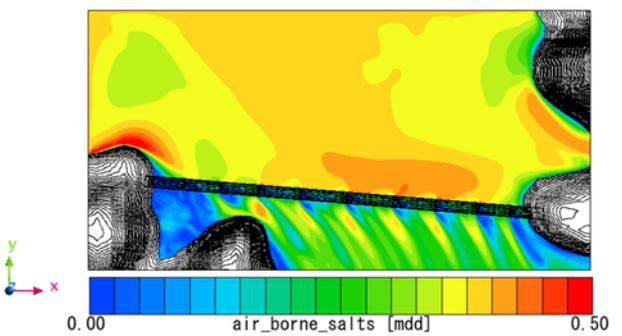


(b) 地形を考慮した風の流速分布

図-2.13 園高架橋の流れ場の解析結果



(a) 橋梁のみの飛来塩分量の推定値の分布



(b) 地形を考慮した飛来塩分量の推定値の分布

図-2.14 園高架橋の流れ場の解析結果

風速分布には差があり、風速分布に地形が大きく影響を及ぼすことが明らかである。

図-2.13(a)では、橋梁以外の障害物が何もないため、風は減速することなく橋梁にぶつかっており、橋梁到達時の風速に差はほとんど見られない。図-2.13(b)では、風が地形の影響を受けるため風速が変化し、橋梁到達時の風速に橋脚ごとに差がみられる。西側に比べ東側の橋脚に風が強く当たっている

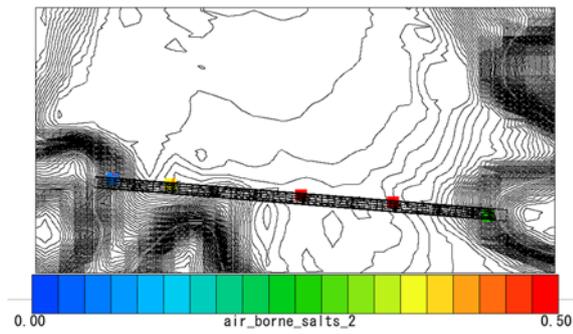
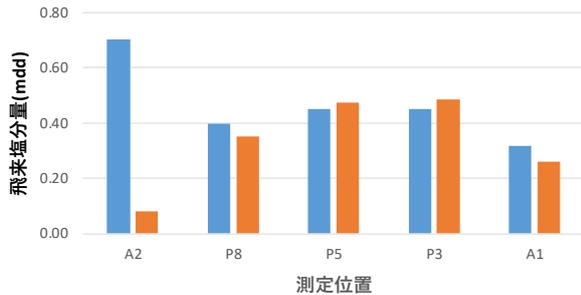
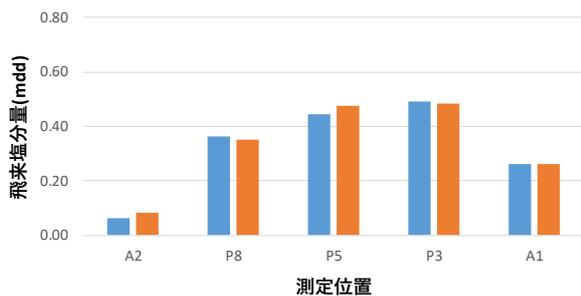


図-2.15 飛来塩分量の推定値と観測値の比較位置



(a) 橋梁のみの推定値と観測値の比較



(b) 地形を考慮した推定値と観測値の比較

図-2.16 飛来塩分量の推定値と観測値の比較結果

傾向がみられる。山の斜面で風がさえぎられており、A2, P9 付近の風速は大きな減速がみられる。

図-2.14 (a) と図-2.14 (b) は、風の流れ場の数値解析結果より計算した飛来塩分量の推定値を示す。飛来塩分量は、風速分布を用いて風向・風速結果から式 (1) を用いて計算し、視覚化した。カット面は風速分布と同様に z 軸 19.5m とし、カラーが飛来塩分量を表す。

飛来塩分量の推定結果から、図-2.15 に示すように実際のガーゼ捕集箇所付近にポイントを打ち、飛来塩分量のスカラ値を計測して図-2.16 の飛来塩分量の推定値を作成した。図-2.16 (a) と図-2.16 (b) は、地形ありと地形なしの各観測地点の桁下 BP の飛来塩分量の推定値と観測値の比較図である。図-2.16 (a) は A2 が大きく異なる値をとっているが、地形を考慮した図-2.16 (b) は、数値解析結果における推定飛来塩分量と実測飛来塩分量は良く一致し



図-2.17 橋脚周辺の風圧と橋脚周りの流線の状況

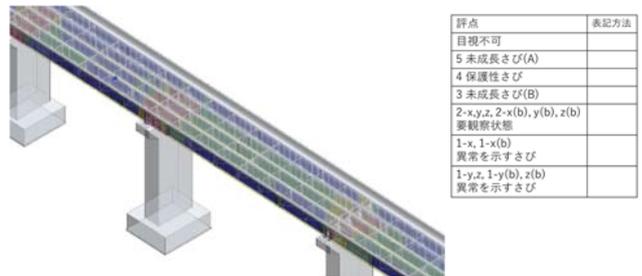


図-2.18 園高架橋の外観目視調査による腐食マップの3D表示結果

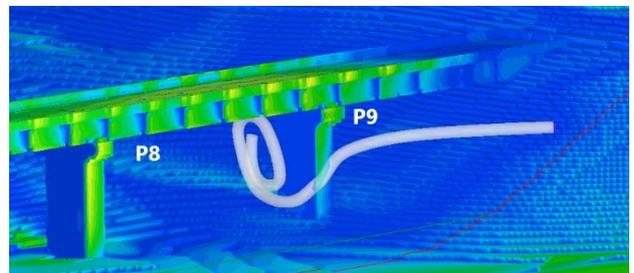


図-2.19 P8-P9 間の流れの特徴 (流線)

ており、地形を考慮することの重要性が明らかとなった。

図-2.14 (b) および図-2.16 (b) より、風速分布から推定した推定飛来塩分量が高くなっている橋脚は P3~P5 である。飛来塩分量の観測値も P3, P5 が高く、飛来塩分量の分布は良く一致している。更に、A2 の飛来塩分量が小さい値をとっていることも解析結果より確認された。これは、山の斜面に遮られ、風が当たりにくいためだと考えられる。

図-2.17 に園高架橋の橋脚にあたる風の状況を示す。図-2.17 より、北西からの風が橋脚にあたり、桁内に風が流れ込んでいる様子が確認できる。園高架橋の飛来塩分量は一般的な橋梁の桁下と桁内の飛来塩分量の比率に比べ、全体として BP に対する AP が高い傾向にある。これは橋脚に衝突した風が桁内に流入したものであると思われるが、本解析において、最多風向である北西での解析結果から各橋脚の西側上部に衝突した風が桁内に巻き込んでいく流れが確認された。図-2.18 に園高架橋の外観目視調査の結果を 3D 表示した結果を示す。園高架橋の腐食は、橋脚周辺で進行しており、北西の風が当たり、桁内に流入する橋脚周辺が特に進行している結果となった。風の流れと腐食状況が良く一致している。

図-2.10 の飛来塩分量の観測値より、P8 以外の飛来塩分量の各測定点は、桁下 BP に比べ桁内 AP の飛来塩分量は低い値となっているが、P8 は同程度の値

となっていることが確認できる。これは図-2.19 に示すように、地形を考慮した解析結果の P8-P9 間の流れを確認したところ、桁下に旋回流が発生しており、この現象により飛来塩分が桁内に流入しやすい環境であることが推察される。この旋回流は地形モデルを考慮しない橋梁モデルのみの解析では観測されず、地形を考慮したモデルの P8-P9 間のみで観測された。P8, P9 は 2 つの山の斜面に挟まれた場所にあり、地形と橋梁の関係により旋回流が発生したと考えられる。

本研究より、園高架橋は桁内部への巻き込み流が生じていることが確認されたため、図-2.20 に示す狭い領域で詳細な解析を行った。解析メッシュは、10cm ピッチで約 5400 万要素により解析を行った。図-2.21 に詳細解析モデルの境界条件の概要を示す。北西の方向からの風を想定し、北側と西側を流入面とし、東側、南側、上面は流出面として解析を行った。

橋梁の 3D モデルは、横構や対傾構、垂直補剛材や水平補剛材、支承部まで作成されている。3次元モデルの概要と外観目視の結果を重ねた図を図-2.22 に示す。桁内部の状況が分かりやすくするために部材の材料をクリスタルで作成している。図-2.23 に詳細モデルによる数値流体解析の結果を示すが、解析モデルは 10 cmピッチのボクセル要素となっているので、橋梁部材は若干凸凹が生じているが、ほぼ再現されている事が確認できる。色のコンターは、風圧の状況を示す。図-2.23 より、桁内への風の流入状況を確認すると、G2 と G3 の橋脚周辺の風圧力が高く、図-2.22 の外観目視の結果も同じ位置の Web 面が異常を示すさび（評点 1）を示していることが確認できる。腐食マップおよび解析結果ともに橋脚から西側に対傾構の 1 スパン分に大きな影響があることが確認できる。風圧が高い桁内の位置は、外観目視による調査において腐食が進行しており、今後対策が必要と思われる範囲と良く一致した結果を示している。

d) 大畑橋の腐食予測シミュレーションへの適用事例

(1)対象橋梁と環境測定結果

対象橋梁は、島根県益田市の沖田川に 1985 年に架設され、供用年数 34 年、橋長 35m の大型の圧延 H 形鋼を主桁に用いた合成鈹桁 (H-BB-C) の単純桁 2 連であり、鋼材は耐候性鋼材である。対象橋梁の位置と概況を図-2.24 (a) と (b) に示す。腐食環境調査として、ドライガーゼ法による飛来塩分調査が実施され、年平均飛来塩分量が桁下で 0.84mdd、桁内で 0.60mdd であった。また、ワッペン式曝露試験が実施され、桁端部での 1 年間の腐食減耗量は、ウェブ面内側で 0.06mm を超え、ウェブ面外側で 0.02mm、下フランジ上面内側で 0.04mm、下フランジ下面で 0.03mm 弱であった。したがって、ウェブや下フランジの耐腐食性能レベル I に相当する 1 年間の腐食減耗量の閾値である 0.03mm を超える腐食環境である。

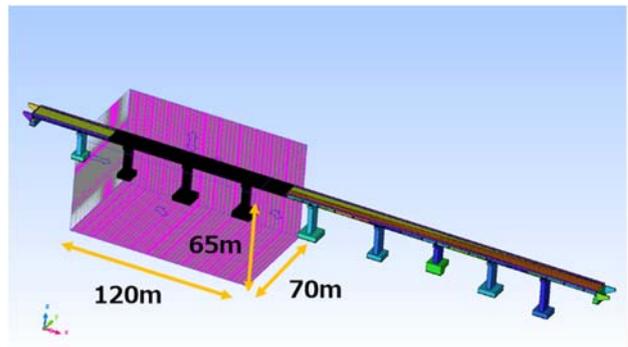


図-2.20 P8-P9 間の流れの特徴（流線）

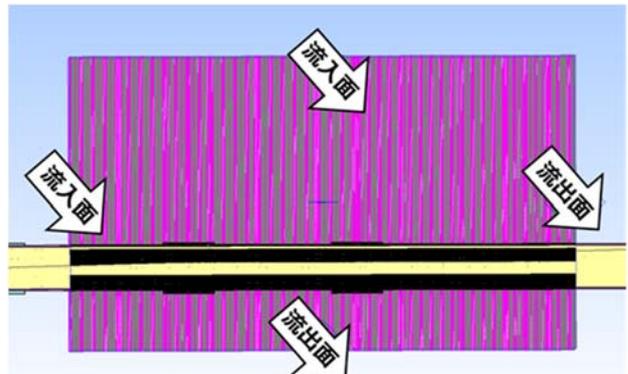


図-2.21 詳細解析領域の概要

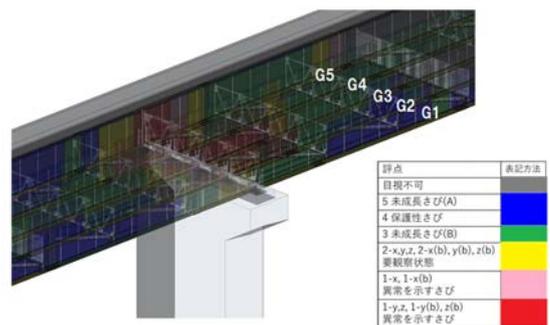


図-2.22 詳細 3D 解析モデルの概要と外観目視による腐食マップ (P4)

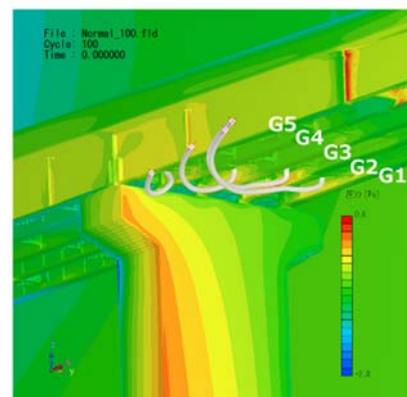


図-2.23 詳細モデルによる数値流体解析結果（風圧力と流線：P4）

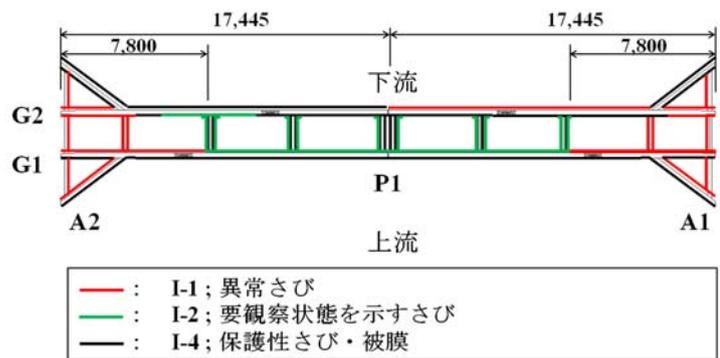
調査結果より、耐候性鋼橋梁の腐食環境としては、かなり厳しい環境であるため、補修塗装などによる補修工事が必要という判断となった。補修工事に向けた詳細調査が実施され、イオン透過抵抗法による



(b) 対象橋梁の概況



(a) 対象橋梁の位置



(c) I 評点結果による腐食マップ

図-2.24 対象橋梁の概要と腐食マッピング

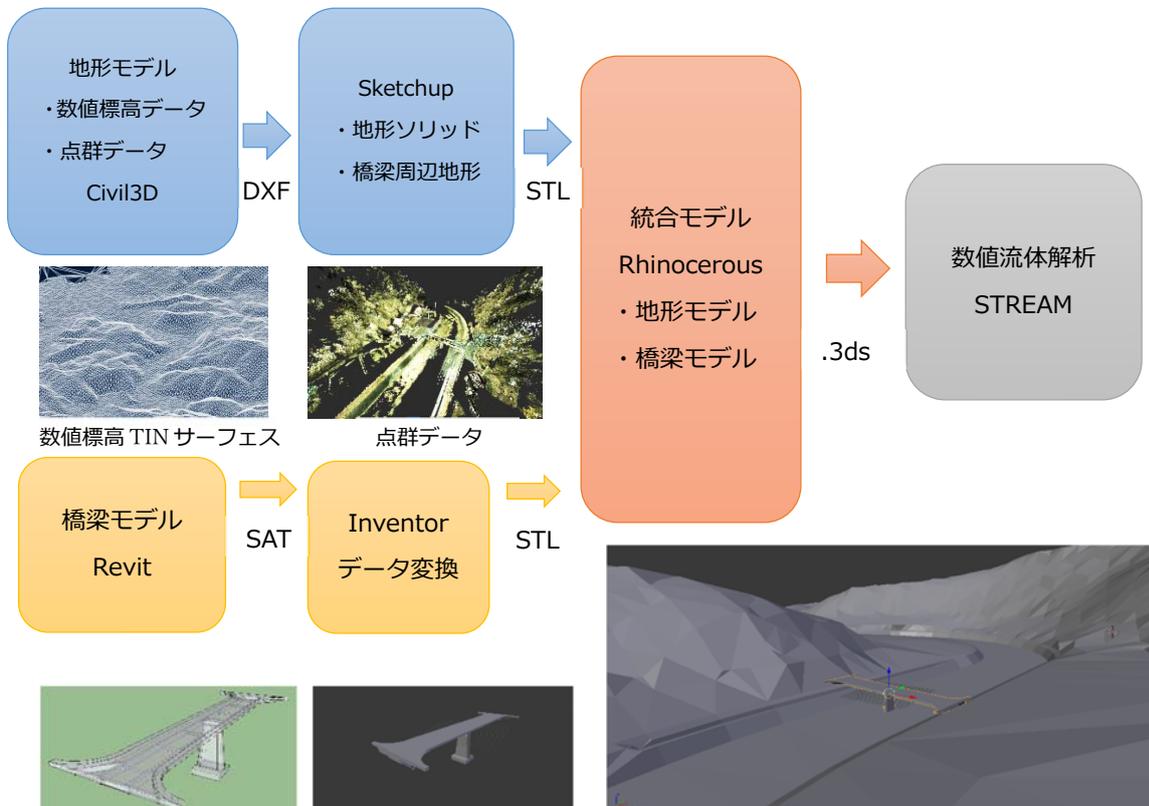


図-2.25 大畑橋の地形を考慮した数値シミュレーションの流れと解析モデル

腐食マッピングの結果⁴⁾を図-2.24(c)に示す。地形の状況から A2 付近の山の影響により、海からの海発生しているものと推察される。しかしながら、A2 付近の端部付近の下流側に異常腐食している部位があり、河川を遡上する別の流れがあるのではないかと推察される。

(2) 解析モデルと解析条件

解析は、平成 30 年度の研究成果を用い、図-2.25 に示す流れで、地形を考慮した数値流体解析により、腐食原因となる風の流れを検討する。解析を行う。解析領域は x 方向 480m、 y 方向 250m、 z 方向 100m である。解析用メッシュは、1m で均等に要素分割し、約 2500 万要素で解析を行った。

(3) 数値解析結果と考察

図-2.28 に地形モデルを考慮した大畑橋周辺の流れ場の数値解析結果を示す。図-2.28 より、大畑橋には A2 の横の山を越えてくる風の流れにより A1 に向かう風と河川が湾曲している地形にあたった風が曲がり A2 に向かう 2 つの風の流れが生じていることが分かる。図-2.29 に大畑橋周辺の風圧力の状況と流線の状況を示す。河川より上の風は、大畑橋の A1 の方向に向かい、河川の風は、A2 に向かっていくことが確認できる。図-2.24 の腐食マッピングの結果を見ると異常腐食をしている箇所には海からの風が強く当たっていることが分かる。

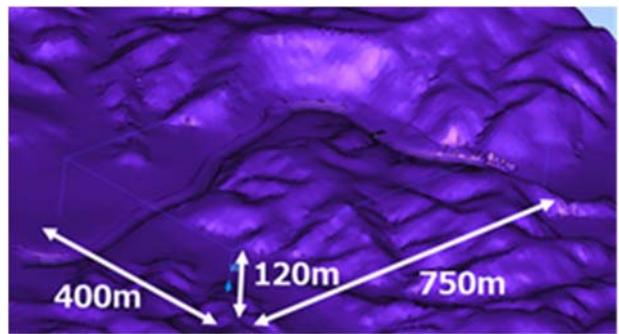


図-2.26 解析領域

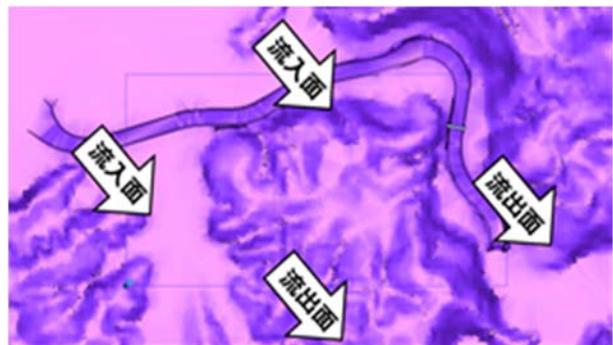


図-2.27 境界条件

2.2 数値シミュレーションの役割・活用および留意点

a) 数値シミュレーションの役割・活用

本研究で開発した地形を考慮した腐食予測シミュレーション手法を、園高架橋と大畑橋の腐食環境評価に適用し、かなりの精度で耐候性鋼橋梁の腐食状態を評価できることが確認された。

平成29年度の道路橋示方書の改定では、多様な構造や新材料に対応した性能規定型の設計手法の導入や長寿命化を合理的に実現するための規定が充実された。この中で橋梁構造物の設計供用期間が100年を標準とし、点検頻度や手法、補修や部材交換方法等、維持管理の方法を設計時点で考慮することが求められている。これらを検討するには、BIM/CIMによる3次元モデルの活用は有効な手法と成り得る。また、これから新たに橋梁等の建設を行う場合には、設計供用期間100年を念頭に置き、建設予定地の環境を適切に評価し、塩害などによる構造物の耐久性への影響を考慮した適切な防食対策を検討すること、また、点検および維持管理、補修が容易に実施可能となるように配慮した設計を行うことが求められている。

本システムは、インフラデータのプラットフォームとして整備されている国土地理院の基盤情報データ（数値標高データや点群データ）をベースに橋梁構造物の3次元モデルを用いて、橋梁建設時の調査、

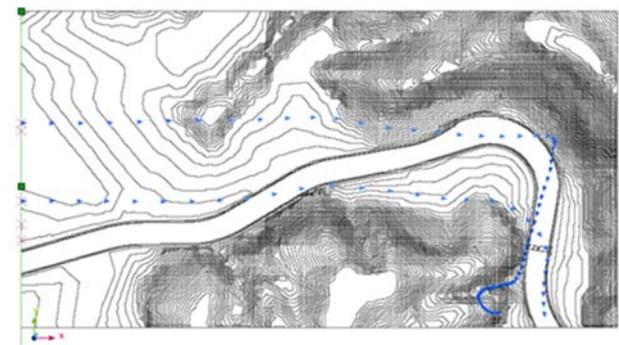


図-2.28 大畑橋の流れ場の解析結果

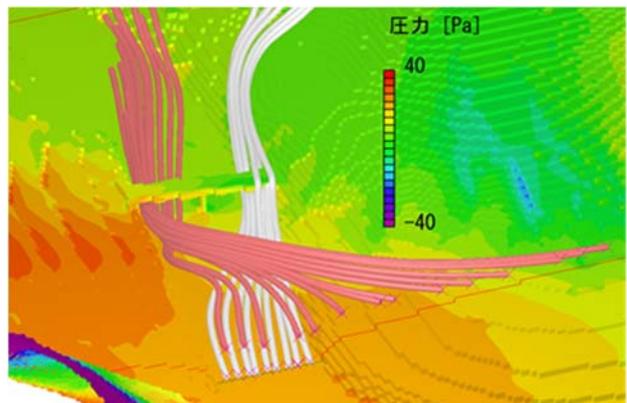


図-2.29 大畑橋周辺の風の流れの状況（風圧力と流線）

計画および設計時に長寿命化の対策を検討するためにツールとして有効に活用することが可能となるものと考えている。また、既設橋梁の腐食環境を評価

し、維持管理時の長寿命化対策を支援するツールとしても有効に活用できるものと考えている。

b) 腐食対策への数値シミュレーションの適用事例

システムの適用性を検討した園高架橋を対象に、耐候性鋼橋梁の腐食対策に数値シミュレーションを用いて検討した事例を示す。園高架橋は、北西の風が橋脚にあたり桁内部への巻き込み流が生じていることが確認された。図-2.30に橋梁の3次元モデルと流れ場の解析結果を示す。耐候性鋼橋梁の腐食対策としては、異常腐食が生じている部分に補修塗装を部分的に施す部分補修塗装が検討されることが多いが、近年、構造的な改善による腐食対策の事例も研究されている。園高架橋も橋脚周辺に局所的な異常腐食が生じていることから、構造的な対策の可能性を、本システムを用いて検討した。橋梁の3次元モデルに補修が必要と検討されている部分にカバープレートを設置した場合の風の流れの変化を示す。

図-2.31は、橋脚や点検通路へのアクセスを確保するために、橋脚部分に部分的なすき間がある場合である。また、図-2.32は、完全に橋脚周辺をカバープレートで覆った場合の解析結果である。図-2.31より、プレートが風を遮り、流入する面積は小さくなったものの点検用の隙間から風がかなりの速度で流入していることが分かる。図-2.32では、風がプレートに沿って流れ、桁内への侵入はなく、橋脚を通り抜ける流れと大部分の流れは桁下を横断して通り抜けていることが確認できる。

以上の結果より、防食に対する構造的な効果を検討する場合、本システムのように地形や構造の3次元モデルを活用することは有効であり、3次元モデルを活用すると点検の容易さや手法の検討、腐食部位や程度を設計時に検討することが可能であると思われる。

c) 数値シミュレーションの留意事項

耐候性鋼橋梁の建設予定地で、腐食環境を評価するための数値シミュレーションシステムを構築し、耐候性鋼橋梁への適用可能性を検討した。海塩粒子により腐食している耐候性鋼橋梁の場合、地形や橋梁の3次元モデルを用いることにより、腐食部位やその程度の検討をある程度の精度で実施することが可能なことが確認された。建設前や既存の橋梁の地域的な腐食環境の評価を行う場合には、有効な手法と成り得ると考えられる。

数値解析結果を用いて腐食環境を評価する場合、本研究では式(2.1)を用いて、解析結果の風速から捕捉率、海塩粒子濃度を仮定して飛来塩分量(mdd)を算出している。例えば、対象橋梁に対して、捕捉率や海塩粒子をどのような値に設定するのか、流速がどの程度の大きさなのかなど、数値解析の精度向上には、環境条件の設定方法に関する検討が必要である。

また、地形を考慮する場合、解析領域が大きくなり、橋梁の各部位の状態について、地形を考慮して直接評価することは難しく、要素サイズを考慮しながら解析を行う必要がある、適切な境界条件の設定

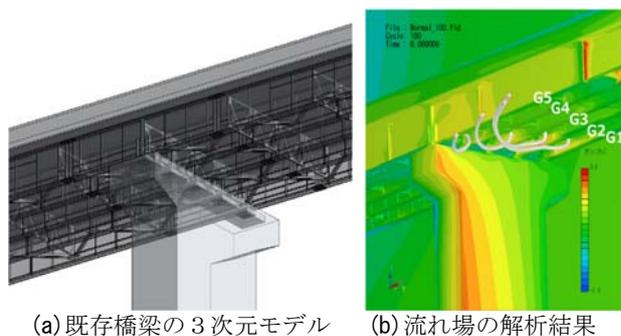


図-2.30 園高架橋の構造と現在の腐食環境

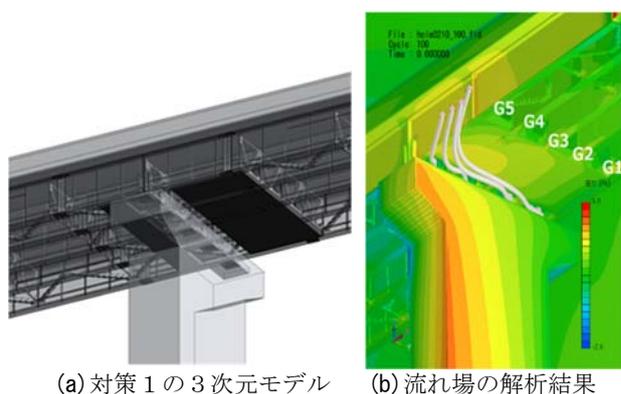


図-2.31 部分カバープレートによる対策1

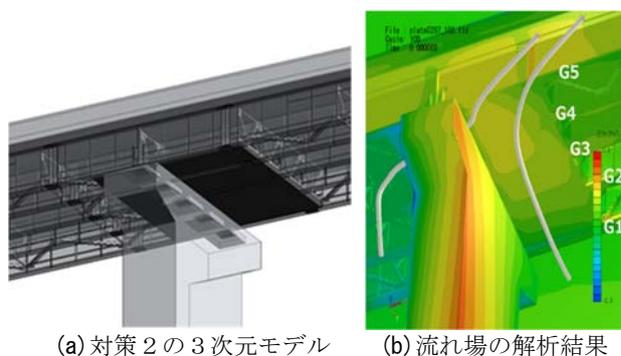


図-2.32 部分カバープレートによる対策2

なども重要である。更に、耐候性鋼橋梁の部位の腐食評価は、風による海塩粒子の影響だけでなく、温度や湿度、風による乾燥効果なども考慮する必要がある。

これらについては、今後の課題である。

2.3 本章のまとめ

本研究で開発したシステムは、耐候性鋼橋梁の建設前の腐食環境評価や防食設計、また、既設橋梁の腐食対策などを検討することが可能で、耐候性鋼橋

梁の長寿命化を合理的に実施する上で、有効なシステムとなり得ると期待できる。

本システムは、熱流体シミュレーションソフトウェアの STREAM を基本としており、地形モデルと 3 次元の橋梁モデルを統合した数値シミュレーションにより、耐候性鋼橋梁の腐食環境の評価が可能なシステムである。本研究では、地形モデルと 3 次元の橋梁モデルの統合に向け、要素技術として連携用コンポーネントの開発を行った。連携用コンポーネントの開発には、数値流体解析ソフトウェア STREAM と相性の良い、Rhinceros のプラグインツールである Grasshopper を用い、国土地理院の基盤情報システムよりダウンロードした DEM の位置情報である xyz データ（点群データ）から、開発した Grasshopper のプログラムを用いて、地形モデルのソリッド化を自動的に行い、橋梁の 3 次元モデルを地形ソリッドモデルと容易に適切な位置に統合することが可能なシステムを開発した。

本研究において開発を行った耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーションシステムの有効性を確認するために、(1) 耐候性鋼橋梁の維持管理のための詳細調査が実施された園高架橋の腐食環境の評価に適用した。また、(2) 供用年数 34 年の大型の圧延 H 形鋼を主桁に用いた合成鈹桁 (H-BB-C) が部分的に異常腐食を生じており、補修工事に向けた詳細調査が実施された大畑橋の腐食マッピングの異常腐食の発生原因の検討に適用した。既設橋梁の適用において、園高架橋で観測された飛来塩分量の飛来状況をかなりの精度でその傾向を評価可能であり、橋脚周辺の桁内への流入状況やその影響範囲と異常腐食を生じている範囲が良く一致していることを確認した。また、大畑橋の数値シミュレーションの結果から地形を考慮により、耐候性鋼橋梁の腐食状況と流れ場の状況が良く一致していることを確認した。

更に、園高架橋の腐食対策の一つとして、橋脚周辺の異常腐食が生じている部分に部分カバープレートを設置した場合の風の流れ状況の変化を、本システムを用いて解析的に分析を行った。本検討結果より、防食に対する構造的な効果を検討する場合、本システムのように地形や構造の 3 次元モデルを活用することは有効であることが確認された。

本研究により、腐食予測シミュレーションシステムを構築する上での各種要素技術の開発を行い、数値シミュレーションの結果が既設耐候性鋼橋梁の腐食環境の調査結果をかなりの精度で評価可能であることが確認でき、耐候性鋼橋梁の腐食環境を評価する上で有効な手法であることを確認した。本システムは、耐候性鋼橋梁の建設時の調査、計画および設計時に長寿命化の対策や既設橋梁の腐食環境を評価し、維持管理時の長寿命化対策を支援するツールとして有効なシステムと成り得ると思われる。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，2019.
- 2) 紀平寛ら：耐候性鋼の腐食摩耗予測モデルに関する研究，土木学会論文集，No.780/I-70，71-86，2005.
- 3) 坪倉佑太ら：数値流体解析によるドライガゼ法の塩分捕集効率の検討，令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，I-375，2019.
- 4) 大屋誠ら：耐候性鋼橋梁の適切な維持管理（点検・補修等）に関する技術開発，(一社) 中国建設弘済会平成 25 年度技術開発支援事業成果報告書．2016.

第3章 ICT技術を援用した腐食判定法の高度化

3.1 セロテープ試験

セロテープ試験は、鋼材表面に形成された浮きさびをセロテープ(またはポリプロピレンテープ)に付着させて回収し、さび粒子の状態から保護性さびの形成状態を評価するものである。付着するさび粒子が小さく、少ないほど保護性のさびが多く、良いさび状態と判断される。試験方法は、セロハンテープを鋼材表面に軽く貼り付け、軽く手でなぞり、テープを密着させる。その後、セロテープをはがし台紙に貼り付ける。

セロテープ試験の評点基準を表-3.1に、セロテープ試験の評点見本画像を図-3.1に示す。表-3.1において評点5、評点4、評点3は処置不要であり、評点2は経過観察を要する。評点1は板厚測定を行うとともに発生原因を究明し、対策処置を施すとされる。

表-3.1 セロテープ試験評点基準

外観 評点	さびの状態 (表層さびの粒子の大きさと外観)	さび層の厚さ
5	1) 色調は全体的に明るく気褐色でまだら状である 2) 殆ど凹凸はなく、さび粒子は細かい。 3) さびの量は少なく、最大粒径は1mm程度以下	200 μ m程度未満
4	1) 色調は暗褐色で色むらはない 2) 殆ど凹凸はなく、さび粒子は細かく均一 3) さびの量はやや多く、最大粒径は1mm程度以下	400 μ m程度未満
3	1) 色調は暗褐色から褐色で色むらなし 2) やや凹凸があり、さび粒子は粗く不均一 3) さびの量は多く、最大粒径は1~5mm程度	400 μ m程度未満
2	1) 色調は暗褐色から褐色でやや色むらがある 2) 大きい凹凸があり、さび粒子は粗くうろこ状 3) さびの量は多く、最大粒径は5~25mm程度	800 μ m程度未満
1	1) 局部的に様々な色調(激しい色むら)がある 2) 大きな凹凸があり、層状はくり(痕跡)がある	800 μ m程度を超える

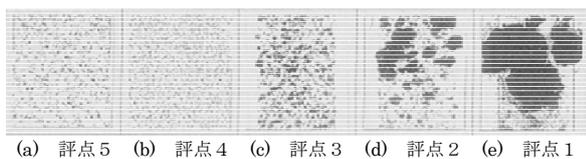


図-3.1 セロテープ試験評点見本画像

ている。なお、評点5は初期さびであり、耐候性鋼材に期待される保護性さびの形成状態を示すものではない。また、評点1においては層状剥離を目視により判断できるため、セロテープ試験により評点を判断することは容易と考える。そこで本研究では、画像解析を用いたさび評点評価において、評点4、評点3、評点2を評価することを目的とする。

3.2 画像処理による評価の概要

画像解析によりさび評点を定量的に評価する。セロテープ試験に画像解析を適用する研究は、これまでも実施されている。本研究では、このうちさび粒子を同じ面積をもつ円に置き換え、その円の直径による粒径加積曲線からさび評価を行う手法を使用する。この方法によれば、さびの形状の影響を排除できるとともに、さび粒子の大きさに関わらず、採取されたすべてのさびを考慮できる。画像解析による評価では、セロテープ試験画像をスキャンし粒子解析を行う。粒子解析により計測面積領域、粒子数、面積率、粒子面積、周囲長、長径、短径、円相当径等が得られる。ここで、円相当径とは、さび粒子の面積を同じ面積の円と置き換えた時の円の直径である。この円相当径により、粒径加積曲線を作成する。

さび評価のための閾値を設定するために、まず

表-3.2 粒径加積曲線を用いたさび評点評価基準

	円相当径	
	累加百分率40%	累加百分率100%
評点4	1mm未満	3mm以上~8mm未満
評点3	1mm以上~3mm未満	8mm以上
評点2	3mm以上	

表-3.3(a) 評価比較 コンサルタント

		推定評価		
		評点4	評点3	評点2
技術者評価	評点4	21.8%(12/55)	76.4%(42/55)	1.8%(1/55)
	評点3	0	64.7%(33/51)	35.3%(18/51)
	評点2	0	17.9%(5/28)	82.1%(23/28)

表-3.3(b) 評価比較 防食技術者

		推定評価		
		評点4	評点3	評点2
技術者評価	評点4	40.0%(2/5)	60.0%(3/5)	0
	評点3	50.0%(1/2)	50.0%(1/2)	0
	評点2	0	0	100.0%(4/4)

表-3.3(c) 評価比較 研究者A

		推定評価		
		評点4	評点3	評点2
技術者評価	評点4	100.0%(4/4)	0	0
	評点3	25.0%(4/16)	75.0%(12/16)	0
	評点2	0	0	100.0%(4/4)

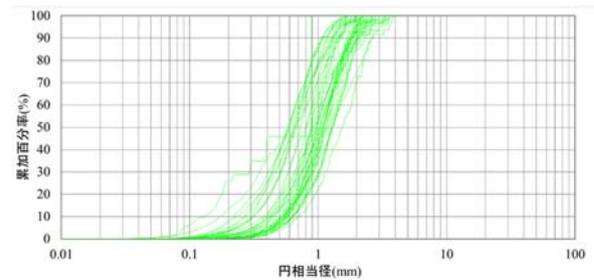
表-3.3(d) 評価比較 研究者B

		推定評価		
		評点4	評点3	評点2
技術者評価	評点4	71.1%(27/38)	28.9%(11/38)	0
	評点3	4.2%(1/24)	79.2%(19/24)	16.7%(4/24)
	評点2	0	8.8%(3/34)	91.2%(31/34)

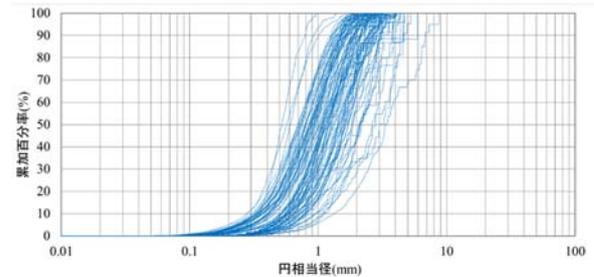
表-3.3(e) 評価比較 まとめ

		推定評価		
		評点4	評点3	評点2
技術者評価	評点4	44.2%(45/102)	54.9%(56/102)	1.0%(1/102)
	評点3	6.5%(6/93)	69.9%(65/93)	23.7%(22/93)
	評点2	0	11.4%(8/70)	88.6%(62/70)

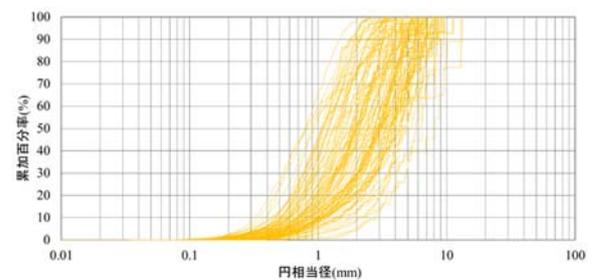
136 試料により表-3.2 に示す閾値を設定し、技術者による評価を実施した。耐候性橋梁について豊富な経験を有するコンサルタント1名、防食技術者1名、研究者1名の計3名に加えて、本研究代表者の研究室による評価を実施した。技術者評価と上記の基準による判定を比較して表-3.3(a)～(d)に示す。コンサルタント技術者では134試料中でさび外観評点が一致した試料が68試料であり一致率は50.7%である。また、防食技術者では11試料中でさび外観評点が一致した試料が7試料であり一致率は63.6%となっている。一方、研究者では研究者Aで24試料中20試料が一致（一致率83.3%）しており、研究者Bでは96試料中77試料が一致（一致率80.2%）している。これら4者による評価のまとめを表-3.3(e)に示す。技術者評価と推定評価の間に最も差があるものは、技術者が評点4と判断したものを推定では評点3としたものである。これはいずれの評点にしても健全との評価であり、問題は無いと考える。一方、技術者が評点2としたものを評点3と推定したものが僅かではあるが存在する。これは危険側の評価であり注意が必要である。全体での一致率は64.9%である。このような差が生じる原因の一つとして、表-3.2の基準を設定する際に用いたデータの偏りが考えられる。基準設定時には表-3.5に示す136試料



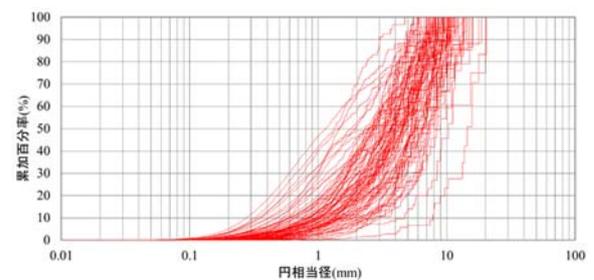
(a) 評点5 粒径加積曲線



(b) 評点4 粒径加積曲線



(c) 評点3 粒径加積曲線

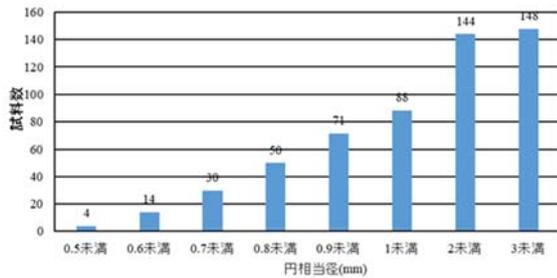


(d) 評点2 粒径加積曲線

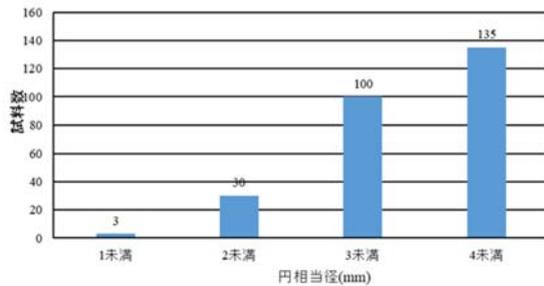
図-3.2 粒径加積曲線

を使用した。これら試料の評点判定にあたってはほぼ一人の技術者によっているため、主観的ずれの存在が否定できない。そのため、試料を377試料とし評点付けの判定技術者を増やすことにより、教師データの一般化をはかった。

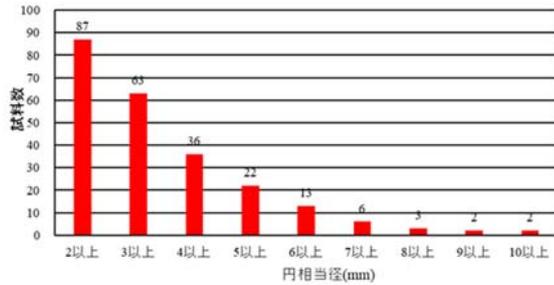
図-3.2(a)～(d)に377試料について評点別の累計加積曲線を示す。粒径加積曲線を算出した後、評点4および評点2の円相当径の特徴を把握するために、累加百分率40%と100%時の円相当径の分布を調査した。評点4の累加百分率40%時を図-3.3(a)に、100%時を図-3.3(b)に示す。また、評点2の累加百分率40%時を図-3.3(c)に、100%時を図-3.3(d)に示す。



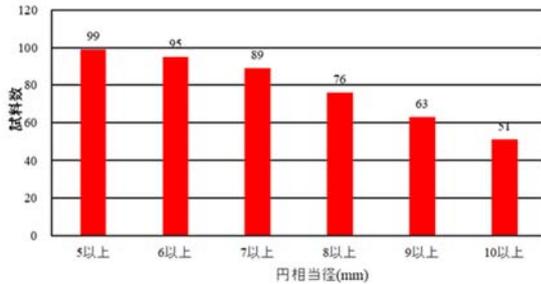
(a) 評点4 累加百分率 40%



(b) 評点4 累加百分率 100%



(c) 評点3 累加百分率 40%



(d) 評点3 累加百分率 100%

図-3.3 粒径加積曲線

これらの図において図中の数字は各円相当径を満たす試料数であり、例えば、図-3.3(a)において評点4の149試料中、累加百分率40%において148試料が3mm未満であり、1mm未満の試料は88試料であることを示す。評点4において、累加百分率40%時の円相当径(図-3.3(a))は、2mm未満が144試料と全試料の97%あり、従来基準の閾値である「1mm未満」では、評点4における一致率が低くなる。また、2mm以上3mm未満は4試料であり、閾値を「3mm未満」に変更すると、評点4の精度向上より、評点3の精度低下が顕著になることが考えられる。そのため、新閾値は「2mm未満」と

表-3.4 粒径加積曲線を用いたさび評点評価基準

	代表円相当径 (累加百分率40%)	最大円相当径 (累加百分率100%)
評点4以上	2mm未満	
評点3	2mm以上4mm未満	4mm以上7mm未満
評点2以下	4mm以上	7mm以上

表-3.5 技術者評価と本研究の画像解析評価の比較 (377 試料)

		画像解析評価		
		評点4以上	評点3	評点2以下
技術者評価	評点4以上	90.6% (135/149)	8.7% (13/149)	0.7% (1/135)
	評点3	26.8% (34/127)	43.3% (55/127)	29.9% (38/127)
	評点2以下	1.0% (1/101)	10.9% (11/101)	88.1% (89/101)

するのが妥当と考える。さらに評点4において、累加百分率100%時の円相当径(図-3.3(b))は、4mm未満が149試料中135試料で91%となるため、従来基準の閾値である「3mm未満」では、技術者評点4であるが評点3と判定する試料が増加し、評点4における一致率が低くなる。一方、評点2において、累加百分率40%時の円相当径(図-3.3(c))は、2mm以上が多い。しかし、閾値を「3mm以上」に変更すると、評点2の精度向上より、評点3の精度低下が顕著になることが考えられる。また、評点2は評点3の試料より粒子が大きい傾向にあるため、累加百分率100%時の円相当径は大きくなるものと考えられる。そのため、評点2においては累加百分率40%時の円相当径の閾値を小さくするより、累加百分率100%時の閾値を小さくするほうが、評点3と評点2の精度向上には有効であると考えられる。

以上より設定した新基準を表-3.4に示す。この基準を用いて実務者から提供された試料を含む377試料について一致率を検討した。セロテープ試験377試料における技術者評価評点別の試料数は、評点5が42試料、評点4が107試料、評点3が127試料、評点2が89試料、評点1が12試料である。表-3.5に、セロテープ試験377試料における技術者評価と本研究の画像解析評価の比較を示す。セロテープ試験377試料全体における技術者評価と本研究の画像解析評価の一致率は74.0%(377試料中279試料が一致)である。また、各評点における技術者評価と本研究の画像解析評価の一致率は、評点4以上では90.6%、評点3では43.3%、評点2以下では88.1%である。評点4以上および評点2以下はほぼ技術者評価と一致する結果となった。一方、評点3は一致率が低い。しかし、評点3は正常な状態であり、これを評点2以下と評価することは、安全側評価となるため、許容できると考える。そのため、本研究の画像解析評価は、詳細調査前のスクリーニングへの使用を前提とすれば、実用に供せる一致率であろう。この判定基準を使用する際の判定処理フローを図-3.4に示す。さび評点を

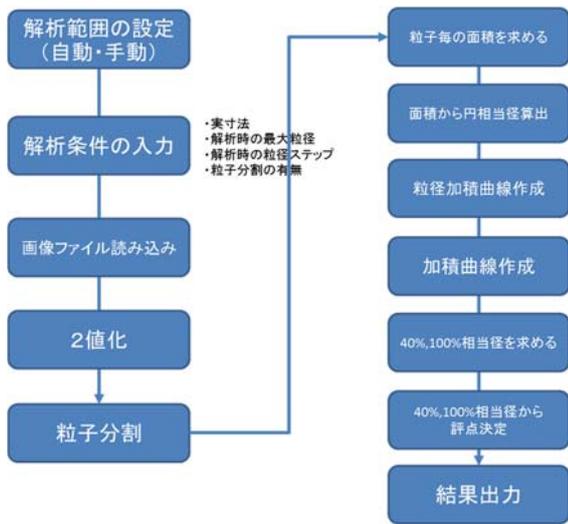


図-3.4 処理フロー

判定するプログラムでは、セロテープ試験のスキャン画像に画像解析を施す。画像解析ではまず、スキャンした試料（カラー画像）から白黒の2値の画像へ変換する処理（2値化処理）を施す。カラー画像は一度256階調のグレー画像に変換され、ある閾値によってそれ以上の値を白、それ以外を黒とすることで実現できる。本研究の評価プログラムでは、この時の2値化閾値を256階調に相当する画素がどの程度分布するか輝度ヒストグラムを用い、2値化アルゴリズム（反復閾値選択）により自動決定している。また、画像解析では、2値化処理の後、複数のさび粒子が重なるような箇所について、誤って一つのさび粒子として認識しないように粒子分割処理を施す。なお、これまでの研究では、粒子分割処理の方法にWaterShedアルゴリズムを用いている。

3.3 提案法の精度検証

a) テストデータへの適用

表-3.4の基準設定時とは別の試料に対して本研究の画像解析評価を行い、技術者評価と比較する。用いる試料は、実橋梁7橋で行われたセロテープ試験のスキャン画像38試料であり、技術者評価評点別の試料数は、評点5が18試料、評点4が12試料、評点3が3試料、評点2が2試料、評点1が3試料である。表-3.6に、表-3.4の基準設定時とは別のセロテープ試験38試料における技術者評価と本研究の画像解析評価の比較を示す。表-3.6より、セロテープ試験38試料全体における技術者評価と本研究の画像解析評価の一致率は92.1%である。また、表-3.6より、各評点における技術者評価と本研究の画像解析評価の一致率は、評点4以上では90.0%、評点3では100.0%、評点2以下では100.0%であることがわかる。評点4以上、評点3、評点2以下の全ての評点においてほぼ技術者評価と一致する結果となった。従って、本研究の画像解析評価法は、評価基準

表-3.6 技術者評価と本研究の画像解析評価の比較 (テストデータ)

		画像解析評価		
		評点4以上	評点3	評点2以下
技術者評価	評点4以上	90.0% (27/30)	10.0% (3/30)	0
	評点3	0	100.0% (3/3)	0
	評点2以下	0	0	100.0% (5/5)

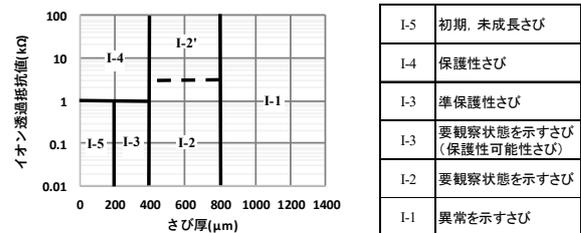


図-3.5 I 評点分類図

表-3.7 I 評点評価と技術者評価の比較

		技術者評価		
		評点4以上	評点3	評点2以下
I 評点評価	I-4以上	77.5% (55/71)	21.1% (15/71)	1.4% (1/71)
	I-3	62.5% (5/8)	25.0% (2/8)	12.5% (1/8)
	I-2'以下	2.1% (1/47)	19.1% (9/47)	78.7% (37/47)

表-3.8 I 評点評価と画像解析評価の比較

		画像解析評価		
		評点4以上	評点3	評点2以下
I 評点評価	I-4以上	81.7% (58/71)	16.9% (12/71)	1.4% (1/71)
	I-3	87.5% (7/8)	0	12.5% (1/8)
	I-2'以下	6.4% (3/47)	8.5% (4/47)	85.1% (40/47)

設定時と別の試料においても評価精度が高いことから、さび性状評価手法として実用に供せる精度を有する手法であろう。

b) I 評点評価との比較

本研究による画像解析評価の定量性を検証するため、定量的な評価が可能であるI評点評価と比較する。ここで、I評点は図-3.5に示すさび厚とイオン透過抵抗値からなる分類図からI-5~I-1の6段階に分類することができる。ここで、さび厚が400μmを超えらうるこ状さびなどの要観察さび、さび厚が800μmを超えると層状剥離さびなどの異常さびが発生していると判断できる。一方で、さび厚の増加はほとんどなく、イオン透過抵抗値が高まるとI-4に分類され、保護性さびが生成されていると判断

できる。

比較には、本研究の評価基準設定時の用いたセロテープ試験 377 試料と別の試料として用いた 38 試料の全 415 試料のうち、さび粒子が採取された部材において I 評点評価を実施している実橋梁 13 橋で行われたセロテープ試験 126 試料を用いる。なお、セロテープ試験 126 試料における I 評点評価別の試料数は、I-5 が 33 試料、I-4 が 36 試料、I-3 が 8 試料、I-2' が 8 試料、I-2 が 1 試料、I-1 が 40 試料である。

まず、I 評点評価と技術者評価を比較する。表-3.7 に、I 評点評価と技術者評価の比較を示す。ここで、本研究では、I-4 以上 (I-5, I-4) で、且つ、評点 4 以上の時を「I 評点評価と技術者評価 (画像解析評価) が一致した」とする。同様に、I-3 で、且つ、評点 3 の時、I-2' 以下 (I-2', I-2, I-1) で、且つ、評点 2 以下の時をそれぞれ「I 評点評価と技術者評価 (画像解析評価) が一致した」とする。126 試料全体における I 評点評価と技術者評価の一致率は 74.6% である。また、各 I 評点における I 評点評価と技術者評価の一致率は、I-4 以上では 77.5%、I-3 では 25.0%、I-2' 以下では 78.7% (あり、I-3 の試料における I 評点評価と技術者評価の一致率が低いことがわかる。さらに、I-3 で技術者評価評点 4 以上とされた試料が 62.5% (8 試料中 5 試料) あり、I-3 の試料で高い割合を占めていることがわかる。そのため、I-3 の試料における評点 4、評点 3 の区別は技術者であっても判断が難しいと考えられる。

次に、I 評点評価と本研究による画像解析評価を比較する。表-3.8 に I 評点評価と本研究による画像解析評価の比較を示す。表-3.8 より、126 試料全体における I 評点評価と本研究による画像解析評価の一致率は 77.8% であり、I 評点評価と技術者評価の一致率と大きな差がないと考えられる。また、表-3.7 より、各 I 評点における I 評点評価と本研究による画像解析評価の一致率は、I-4 以上では 81.7%、I-3 以下では 0%、I-2' 以下では 85.1% であり、I-3 の I 評点評価と本研究による画像解析評価の一致率が低いことがわかる。さらに、I-3 で本研究による画像解析評価評点 4 以上とされた試料が 87.5% であり、I-3 の試料で高い割合を占めており、I 評点評価と技術者評価の一致状況と同様の傾向であることがわかる。そのため、本研究による画像解析評価は技術者評価と同程度の定量的な評価が可能と考える。

3.4 不一致試料についての検討

ここで、本研究による画像解析評価と技術者評価および I 評点評価が一致しなかった試料について検討する。なお、技術者評価および I 評点評価に対し、本研究による画像解析評価が大きく乖離した試料に着目する。

図-3.6 に技術者評価に対し本研究による画像解析評価が大きく乖離した試料のうち、技術者評価評

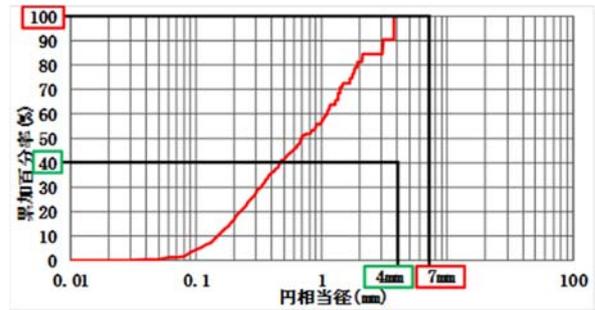


図-3.6 技術者評価評点 4 以上で画像解析評価評点 2 以下の試料



写真-3.1 技術者評価評点 2 以下で画像解析評価評点 4 以上の試料のセロテープ試験実施部位

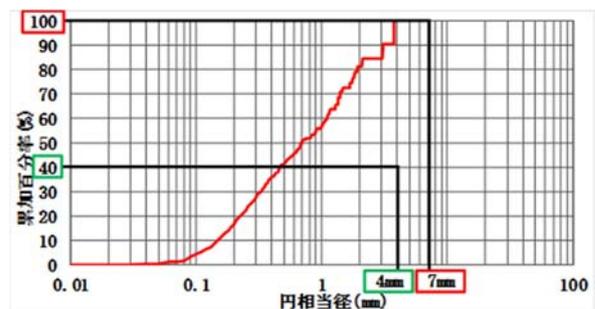
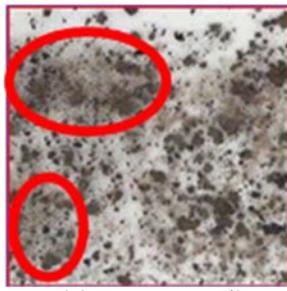
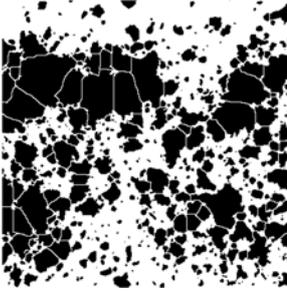


図-3.7 技術者評価評点 4 以上で画像解析評価評点 2 以下の試料

点 2 以下で画像解析評価評点 4 以上となった試料の粒径加積曲線をそれぞれ示す。このように判定した試料は、本研究で用いたセロテープ試験試料において 1 試料のみ存在しており、技術者評価に対して画像解析評価が危険側に判定した事例である。またこの試料は、表-3.8 に示す I-2' 以下で本研究の画像解析評価評点 4 以上とされた 3 試料のうちの一つである。図-3.6 より、この試料では代表円相当径、最大円相当径ともに評価基準閾値外で画像解析評価が大きく外れていることがわかる。なお、この試料を採取した部材では、写真-3.1 に示すように、層状剥離の痕跡があり、セロテープ試験によるさび採取は写真-3.1 の赤枠部に示す層状剥離後のさび層で実施されている。そのため、評点 2 以下の見本写真よりも粒子数が少なく、且つ、最大粒径が小さい。



(a) スキャン画像



(b) 2値化画像

図-3.8 技術者評価評点4以上で画像解析評価評点2以下の試料の画像

図-3.7, 図-3.8に, 技術者評価に対し本研究による画像解析評価が大きく乖離した試料のうち, 技術者評価評点4以上で画像解析評価評点2以下となった試料の粒径加積曲線とスキャン画像, 2値画像をそれぞれ示す. 図-3.7, 図-3.8に示す試料は, 本研究の評価基準設定時に用いたセロテープ試験377試料, および, 評価基準設定時とは別の38試料において1試料のみ存在しており, 技術者評価に対して画像解析評価が安全側に判定した事例である. 図-3.7より, この試料では, 代表円相当径, 最大円相当径ともに評点4以上の評価基準閾値外で画像解析評価が大きく外れている. また, 図-3.8の赤丸部より, さび粒子の画像解析において細かな粒子群を一つの粒子として処理していることがわかる. これにより, 代表円相当径, 最大円相当径ともに大きくなっており, 画像解析評価が大きく外れている. この細かい粒子は, さび粒子以外の塵埃であることも考えられる. セロテープ試験において, さび粒子以外の土砂やほこりといった塵埃が採取されることは, 採取時に注意すべきであろう. また, 使用するテープによる粒子の採取量や評価結果の差の有無, いかなる環境においてもテープが均一に圧着できるような圧着方法, 圧着力の検討といった, セロテープ試験の実施方法も検討する必要がある.

図-3.9にI評点評価に対し本研究による画像解析評価が大きく乖離した試料のうち, I-4以上で画像解析評価評点2以下とした試料の粒径加積曲線を示す. 図-3.9より, この試料では, 代表円相当径, 最大円相当径ともに評点4以上の評価基準閾値外で画像解析評価が大きく外れており, 特に最大円相当径が大きい. また, 粒径が10mmを越えていると見られるさび粒子があり, 技術者評価も評点2以下である. こ

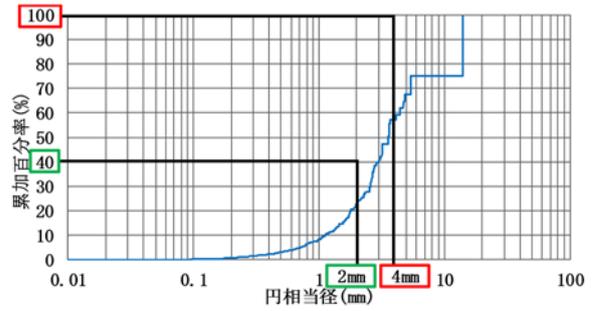


図-3.9 I-4以上で技術者評点2以下, 画像解析評価評点4以上の試料



写真-3.2 I-4以上で技術者評点2以下, 画像解析評価評点4以上の試料のセロテープ試験実施部位

のセロテープ試験試料は, 写真-3.2に示す測定箇所における赤枠部のような健全部と腐食部が混在している箇所から採取されたものであり, セロテープ試験を用いた評価では, 画像解析評価, 技術者評価ともに腐食部の影響を大きく受けていると考える. 一方, さび厚とイオン透過抵抗値の測定も同様に赤枠部のような健全部と腐食部が混在している箇所で行われており, さび厚 $386\mu\text{m}$, イオン透過抵抗値 3340Ω でI-4となっている. 本研究におけるさび厚は, 測定範囲において15点測定しその最大値と最小値を除いた13点の平均を測定箇所のさび厚としているため, 腐食部と健全部両方の影響を受けていると考えられる. このような, セロテープ試験実施箇所とI評点測定箇所の相違により評価に乖離が見られたと考えられる.

3.5 画像処理によるさび評価における留意点

前節に示したように, 従来の技術者の目視によるさび外観評点, イオン透過抵抗とさび厚によるI評点および本研究で提案する手法のそれぞれは完全に一致するものではなく, 一致率は75~80%である. その主たる原因は次の事項が考えられる.

1) 測定位置の不一致

本手法による評価と各手法による評価結果と

一致しなかった試料の特徴から、同じ部材でも腐食部と健全部、腐食部健全部の混在部の測定位置の違いが原因の事例が生じたことから、評価前にさびを採取した位置とその位置の腐食状態を目視で確認し、評価時に留意する必要があると考える。

2) 実施時期の違い

橋梁の定期点検に本手法を導入する際、外観評価やI評点評価と本手法の併用により総合的に評価する場合は、各手法による評価の時期が異なることで、さび粒子の採取状況やさび厚、イオン透過抵抗の計測値に差異が生じることで評価結果に乖離が生じることが示唆されるため、各手法の実施時期はできる限り同時とすることが望ましい。

3) 目視評価時の見落とし

剥離を伴ううろこ状さびや層状剥離、またはその痕跡が存在する異常さびに相当する状態では、セロテープ試験のさび採取量に依存する本手法は、実際の鋼材状態と乖離した評価となることが容易に考えられるため、このような目視で確認が容易な異常さびが存在する部材での本手法による評価では、異常さびの存在を承知の上で評価する必要がある。

4) セロテープ試験実施前の鋼材の準備

本研究で用いたセロテープ試験試料において、さび粒子以外の塵埃と示唆されるものが同時に採取されている事例を確認した。そのため、さび採取前に鋼材上の土砂やほこりを落とす必要があると考える。なお、文献(社団法人 日本鉄鋼連盟, 社団法人 日本橋梁協会: 耐候性鋼の橋梁への適用〔解説書〕, 2002. 9.)より、「測定箇所を選定し鋼板表面のほこり等を軽く掃除する」とされているが、さび粒子を同時に除去しないよう留意する必要がある。

5) セロテープの圧着方法

セロテープ試験では、テープの圧着力によりさび粒子の採取量が異なることが考えられる。そのため、どのような部材においてもテープを均一に圧着できる方法の検討が必要であると考え。

6) 画像データの読み込み方法

セロテープ試験試料を画像データとして読み込む際、スキャナーを用いると試料が押さえられることで、さび粒子が割れる、つぶされて実際の大きさよりも大きくなるといったさび粒子の破損やさび粒子がテープから落ちる可能性があるため、読み込む際にはカメラ撮影によるデータの読み込みが望ましいと考える。

7) 試料の実寸の把握

本手法の画像解析では、実寸値の入力が必要であることから、スケールを別途用意のうえ同時に読み込む、または、使用するテープの寸法を把握し画像解析するような処置が必要である。

このため、本研究によるさび評価を実施・解釈す

る上で、以下の事項については留意する必要がある。

1) セロテープ試験および本評価手法の実施時期

外観評価やさび厚測定といった他のさび性状評価法と本研究による評価法の併用時には、セロテープ試験を同時に行うことが望ましい。また、採取したさび粒子の破損および欠損を防ぐため、セロテープ試験試料は早めに画像データ化する。

2) セロテープ試験実施箇所の選定

まず、対象とする部材の全体を目視確認し、対象部位に異常さびの有無を把握する。特に、層状剥離さびの痕跡がありその剥離後の表面でさびを採取する際は、さび粒子が採取できず誤った評価となりやすいので注意が必要である。

3) セロテープ試験実施前の鋼材表面の掃除

対象鋼材の表面にさび粒子以外の塵埃がないか確認し、存在する場合は刷毛で軽く掃除した後、セロテープ試験を実施する。その際、さび粒子を破損しないよう注意する。

4) テープの圧着方法

テープを指で軽くなぞって圧着する際は、さび粒子の破損に注意しながらできる限り均一に圧着する。また、圧着力となぞる回数は他のセロテープ試験試料と統一する(2回程度なぞるのが望ましいと考える)。

5) セロテープ試験試料を画像データにする際の読み込み方

セロテープ試験試料を画像データとして読み込む際は、カメラ撮影の様なさび粒子を破損しないような方法で行うことが望ましい。また、さび粒子の画像解析の際に実寸を入力するため、スケールを同時に取り込む、または、実寸を把握した上で読み込む。

3.6 本章のまとめ

耐候性鋼橋梁に生成したさびを客観的に評価するために、従来用いられているセロテープ試験の高度化を目的とした。そのために、さび画像から個々のさび粒子を同じ面積を持つ円に置き換え、その円の直径である円相当径により粒径加積曲線を求め、この粒径加積曲線の累加百分率40%および100%の円相当径と、さび評点を関連付ける閾値を示した。

これまでの研究により、上述したさび評点を判定するプログラムを開発した。そこで、本年度はこのプログラムを実務者に提供し、本研究で提案する方法およびプログラムについての実用性評価をおこなった。本評価により得られた意見より、本研究による評価の評価精度は、技術者の目視評価に近い精度があることが明らかとなった。また、評価プログラムに使用性については、改善の余地が多く、さび粒子の画像解析において2値化および粒子分割についてはその方法が複数存在するため、さらなる検討が必要でことが明らかとなった。そこで、本研究では、2値化方法4手法、粒子分割方法4手法を用い、さ

び粒子の画像解析方法による画像解析評価への影響を検討した。本研究でこれまで用いている反復閾値選択による2値化およびWaterShedアルゴリズムによる粒子分割を用いたさび粒子の画像解析は、本研究で提案する評価において技術者評価と高い一致率を有することが明らかとなったことから、反復閾値選択による2値化およびWaterShedアルゴリズムによる粒子分割を用いたさび粒子の画像解析は、本研究で提案する評価手法において問題ないことを確認した。

本研究で設定した評価基準による画像解析評価では、技術者評価との一致率が、評価基準設定時に用いたゼロテープ試験試料における74.0% (377試料中279試料が一致) となり、評点4以上および評点2以下はほぼ技術者評価と一致する結果となった。また、評価基準設定時とは別のゼロテープ試験試料における技術者評価と本研究で設定した評価基準による画像解析評価の一致率は92.1% (38試料中35試料が一致) となり、技術者評価とほぼ一致していることが明らかとなった。従って、本研究の画像解析評価法は、評価基準設定時と別の試料においても評価精度が高く、詳細調査前のスクリーニングへの使用を前提とすれば、実用に供せる精度を有する手法であろう。さらに、I評点評価と本研究による画像解析評価を比較し、本研究による画像解析評価は、実用に供せる精度を有し、技術者評価と同程度で、且つ、既往

の研究による画像解析評価よりも定量的な評価が可能であることが明らかとなった。

以上のことから、本研究で検討した手法によるゼロテープ試験を用いた定量的な評価は可能と考え、本手法を定量的な評価手法として提案する。なお、本手法の実用には、さび粒子の採取方法（ゼロテープ試験の実施方法）や画像データの読み込み方法に留意する必要があると考える。

参考文献

- 1)Ridler, TW & Calvard, S (1978), "Picture thresholding using an iterative selection method", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 8: 630-632.
- 2)Otsu, N (1979), "A threshold selection method from gray-level histograms", IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. 9: 62-66, doi:10.1109/TSMC.1979.4310076.
- 3)Shanbhag, Abhijit G. (1994), "Utilization of information measure as a means of image thresholding", Graph. Models Image Process. (Academic Press, Inc.) 56 (5): 414--419, ISSN 1049-9652.
- 4)Ridler, TW & Calvard, S (1978), "Picture thresholding using an iterative selection method", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 8: 630-632.
- 5)Vincent, L., & Soille, P. (1991), "Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations", IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 13(6), 583-598.

第4章 腐食耐候性鋼材の補修効果の解明

腐食が進行した耐候性鋼橋梁を補修する場合、鋼道路橋防食便覧（平成26年3月、日本道路協会）に示されているRc-I塗装系による補修塗装が行われることが多い。しかし、Rc-I塗装系はブラストによる下地処理が必要であり、数層の塗装も必要となる。そこで、従来の塗装系による補修塗装に加え、より簡便な補修塗装の実施が可能かを検討するために、表-4.1に示す種々の補修塗装を施した試験片を腐食環境の異なる地点で曝露することにより補修効果を比較・検証する。そのために、さび外観評点試験片、各種下地処理試験片、塗装試験片を製作し、沖縄、山口、島根にて曝露試験を実施し、経時変化を評価

する。

製作した曝露試験片を沖縄県糸満市（日鉄防食㈱ 沖縄曝露試験場）、島根県松江市（松江高専屋上）、山口県宇部市（山口大学工学部構内）に36枚（各水準2枚）設置し曝露試験を開始した。設置場所の位置図を図-4.1に示す。飛来塩分による再腐食を評価するために沖縄県および島根県での曝露試験は遮蔽曝露とする。これは降雨による飛来塩分の洗い流しを避けるためである。一方、山口県での曝露は飛来塩分の影響を排除するために密閉箱内曝露としている。各地点における曝露試験の状況を写真-4.1(a)～(c)に示す。ここで、写真-4.1(a)および写真-4.1(b)

表-4.1 曝露試験片水準

水準No.	水準名	元板のさび評点	各曝露地での曝露枚数			素地調整			塗装				
			沖縄	山口	松江	工程1	工程2	工程3	下層塗料 --- 上層塗料				
1	評点5	5	2	2	2	—	—	—	—				
2	評点4	4	2	2	2	—	—	—	—				
3	評点3	3	2	2	2	—	—	—	—				
4	評点2	2	2	2	2	—	—	—	—				
5	評点1(無処理)	1	2	2	2	—	—	—	—				
6	動力工具	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	—	—	—				
7	動力工具+水洗	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	高圧水洗 (5MPa以上)	—	—				
8	Rc-III	1	2	2	2	ペーパーグラインダー処理 St.2	—	—	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	ふっ素樹脂塗料用 中塗	ふっ素樹脂塗料用 上塗
									60μm	60μm	60μm	30μm	25μm
9	Rc-II	1	2	2	2	ペーパーグラインダー処理 St.2	—	—	有機ジンクリッチペイント 下塗	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	ふっ素樹脂塗料用 中塗	ふっ素樹脂塗料用 上塗
									75μm	60μm	60μm	30μm	25μm
10	ブラスト処理 [付着量分量 50mg/m ² 以下]	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	ブラスト処理 [付着量分量 50mg/m ² 以下]	—	—				
11	ブラスト処理 [付着量分量 100~150mg/m ² 程度]	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	ブラスト処理 [付着量分量 100~150mg/m ² 程度]	—	—				
12	ブラスト処理 [付着量分量 400~500mg/m ² 程度]	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	ブラスト処理 [付着量分量 400~500mg/m ² 程度]	—	—				
13	ブラスト処理 +さび安定化補助処理	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	ブラスト処理 Sa 2.5	—	さび安定化補助処理	—	—	—	—
									45μm				
14	ブラスト処理 +有機ジンクリッチペイント	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	ブラスト処理 Sa 2.5	—	有機ジンクリッチペイント	—	—	—	—
									75μm				
15	実性エポキシ樹脂塗料	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	ブラスト処理 Sa 2.5	—	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	—	—	—	—
									120μm				
16	Rc-I	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	ブラスト処理 Sa 2.5	—	有機ジンクリッチペイント 下塗	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	ふっ素樹脂塗料用 中塗	ふっ素樹脂塗料用 上塗
									75μm	60μm	60μm	30μm	25μm
17	Rc-I(水洗工法)	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	付着量分量50mg/m ² 以下となるまでブラスト処理→高圧水洗繰り返し	—	有機ジンクリッチペイント	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	ふっ素樹脂塗料用 中塗	ふっ素樹脂塗料用 上塗
									75μm	60μm	60μm	30μm	25μm
18	Rc-I(水洗レス工法)	1	2	2	2	ダイヤモンド処理 St.3	腐食抑制剤塗布処理 2回塗布(1回/日)	—	有機ジンクリッチペイント	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	実性エポキシ樹脂塗料 下塗	ふっ素樹脂塗料用 中塗	ふっ素樹脂塗料用 上塗
									75μm	60μm	60μm	30μm	25μm
合計枚数			36	36	36								

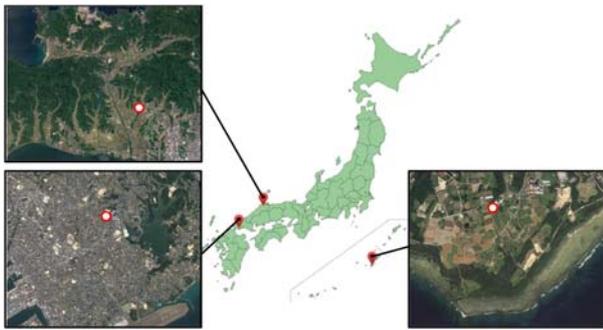


図-4.1 曝露試験位置



写真-4.1 曝露試験片設置状況

では、試験片の設置状況が明瞭となるように側部覆いを外して撮影している。なお、各地点での曝露開始日は、沖縄が2017年11月24日、島根と山口が2017年11月30日である。

4.1 ワッペン試験による曝露試験環境評価

沖縄、山口、島根の各曝露場所において、腐食環境を評価するためにワッペン試験片の曝露試験を併せて実施している。今回、2018年12月に曝露後約2年経過したワッペン試験片6枚の分析・評価を実施した。腐食環境は曝露後約2年経過時点での腐食減耗量より評価することとし、腐食減耗量はワッペン試験片裏面の両面粘着テープを除去した後さび除去を行い、重量を測定して腐食減耗量を算出する。なお、表-4.2に各曝露試験所の概況を示す。

ワッペン試験片のさび厚を表-4.3に示す。さび厚は沖縄が最も厚く602 μm と653 μm であり、次いで島根が126 μm と137 μm 、山口が最も薄く26 μm と21 μm である。表-4.4に測定重量を、表-4.5に腐食減耗量をそれぞれ示す。重量減から算出した腐食減耗量は、沖縄が0.176~0.178mm、島根が0.026~0.027mm、山口が0.002mmを示した。以上の曝露2年目の評価から、曝露試験場の腐食環境は、厳しい方から沖縄、島根、山口の順となった。

4.2 曝露試験鋼材の計測

曝露開始後、山口と島根では1~2か月ごとに、沖縄では概ね6か月ごとに曝露試験片の状況を調査した。本調査は曝露試験が順調に開始されていることの確認を目的としており、さび厚を測定すると

表-4.2 曝露試験場概況

場所	試験方法	曝露開始日	曝露期間 平均気温(°C)	曝露期間 平均湿度RH(%)	曝露期間 平均飛来塩分量(mgd)
沖縄県糸満市	遮蔽曝露	2017年11月24日	23.5	76.4	0.295
島根県松江市	遮蔽曝露	2017年11月30日	15.8	73.9	0.296
山口県宇部市	密閉箱内曝露	2017年11月30日	18.4	69.3	-

表-4.3 ワッペン試験片 さび厚

鋼種	曝露場所	試験片 No.	さび厚(μm)									
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	平均
JIS-SMA	沖縄	M2862	624	572	632	597	591	583	645	632	539	602
		M2863	588	662	625	618	795	712	643	582	653	653
	山口	M2866	19	24	27	31	36	23	14	34	30	26
		M2867	27	5	28	25	28	12	25	23	18	21
	島根	M2870	132	121	123	118	137	134	115	125	132	126
		M2871	152	192	110	114	103	101	172	163	125	137

表-4.4 ワッペン試験片 重量

鋼種	曝露場所	試験片 No.	重量(g)		
			初期	さび除去後	減量
JIS-SMA	沖縄	M2862	38.176	34.100	4.076
		M2863	38.525	34.484	4.041
	山口	M2866	38.312	38.260	0.052
		M2867	38.481	38.427	0.054
	島根	M2870	38.442	37.854	0.588
		M2871	38.555	37.944	0.611

表-4.5 ワッペン試験片 減耗量

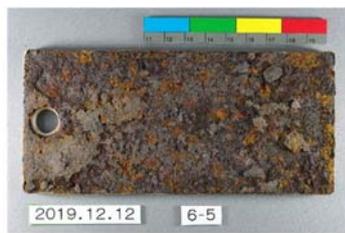
鋼種	曝露場所	試験片 No.	重量(g)			表面積(cm^2)	腐食量(g/cm^2)	腐食減耗量(mm)
			初期	さび除去後	重量減			
JIS-SMA	沖縄	M2862	38.176	34.100	4.076	29.12	0.140	0.178
		M2863	38.525	34.484	4.041	29.19	0.138	0.176
	山口	M2866	38.312	38.260	0.052	29.11	0.002	0.002
		M2867	38.481	38.427	0.054	29.13	0.002	0.002
	島根	M2870	38.442	37.854	0.588	29.10	0.020	0.026
		M2871	38.555	37.944	0.611	29.11	0.021	0.027

*1) 比重=7.86 g/cm^3
 [重量減]=[初期重量]-[さび除去後重量]

もに写真撮影をおこなった。さらに、イオン透過抵抗値と付着塩分量の計測も実施したが、これら2つの測定は鋼材表面の付着塩分を除去することになるため、実施回数を制限した。

写真-4.2~写真-4.13に補修を施した鋼材(水準6~17)の曝露開始後2年目の状況を示す。

曝露期間中に測定したさび厚の変化のうち、無塗装による補修を施した鋼材について図-4.2に示す。山口では、5つの補修方法すべてにおいて、さび厚の増加は見られなかった。沖縄、松江では、5つの補修方法すべてでさび厚の増加が見られた。沖縄と松江のさび厚を比べると、全ての無塗装鋼材において沖縄では松江の2倍のさび厚を記録した。腐食反応は温度が高いほど反応しやすく、湿度が高いほど塩の潮解現象が起きやすい。図-4.3に、簡易塗装鋼材の被膜厚、膜厚を示す。沖縄、松江では、さび安定化補助処理剤、有機ジンクリッチペイント、変性エポキシ樹脂塗料、3つ全ての補修方法において徐々に膜厚、被膜厚の増加が見られるため、今後腐



沖縄



島根



山口

写真-4.2 水準6 (動力工具)



沖縄



島根



山口

写真-4.3 水準7 (動力工具+水洗)



沖縄

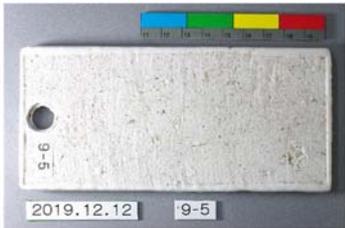


島根



山口

写真-4.4 水準8 (Rc-III)



沖縄



島根



山口

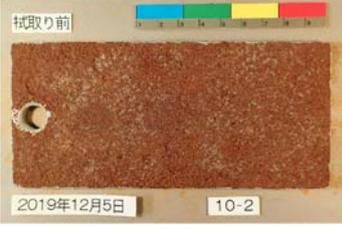
写真-4.5 水準9 (Rc-II)



沖縄



島根



山口

写真-4.6 水準10 (ブラスト処理①)



沖縄



島根



山口

写真-4.7 水準11 (ブラスト処理②)

食が進行することが考えられる。一方、山口では、3つ全ての補修方法において膜厚、被膜厚の増加はほとんど見られなかった。図-4.4に、重防食塗装鋼材の膜厚を示す。沖縄、松江では、Rc-IIIは膜厚が増

加したが、初期値からのさび厚の伸びは沖縄が約50 μm 、松江が約100 μm と小さく、今後の腐食の進行が考えられるが、現段階では他の塗装との比較が困難である。重防食塗装の膜厚の変化を、それぞれ地点

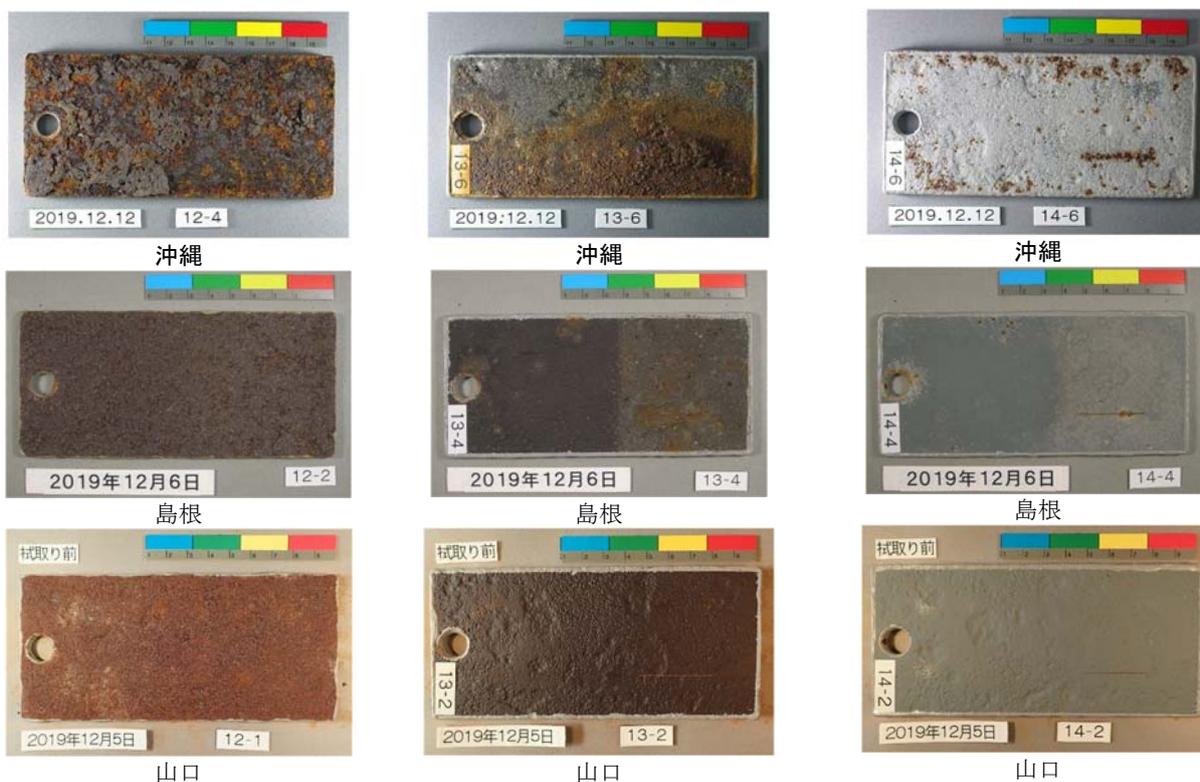


写真-4.8 水準12 (ブラスト処理③) 写真-4.9 水準13 (さび安定化处理)

写真-4.10 水準14 (有機ジンク)



写真-4.11 水準15 (変性エポキシ)

写真-4.12 水準16 (Rc-I)

写真-4.13 水準17 (Rc-I:水洗)

ごとに比べると、差異がほぼ見られなかった。このことから、膜厚だけでは重防食塗装による補修効果の差異は判断できないと考える。なお、以下の検討では曝露試験片を無処理鋼材(水準1~5)、無塗装

鋼材(水準6, 7, 10, 11, 12)、簡易塗装鋼材(水準13~15)、塗装鋼材(8, 9, 16~18)に分類して示す。

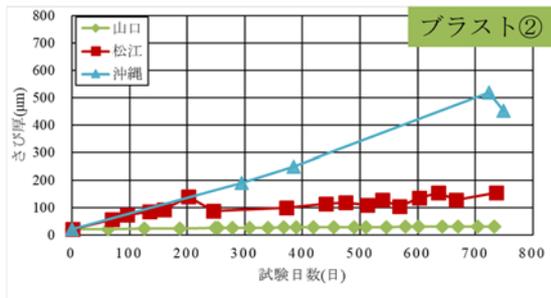
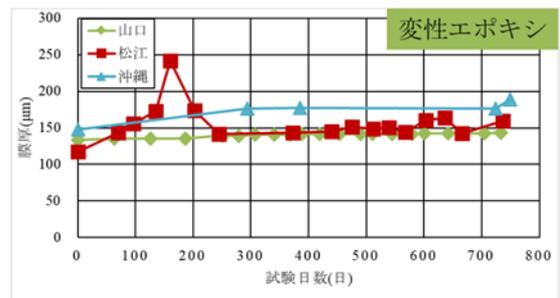
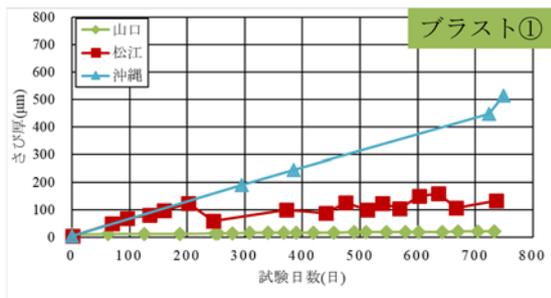
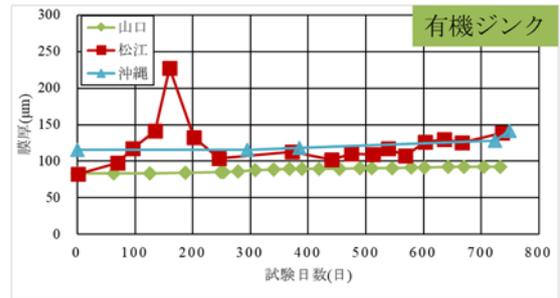
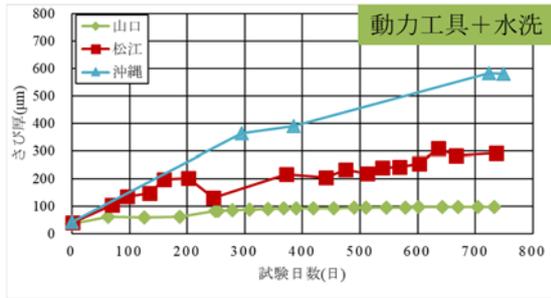
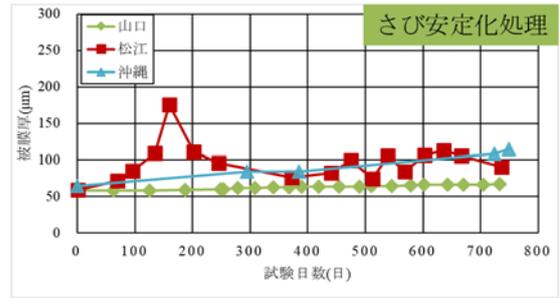
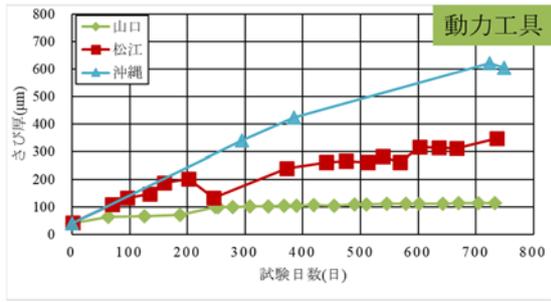


図-4.3 簡易塗装鋼材のさび厚変化

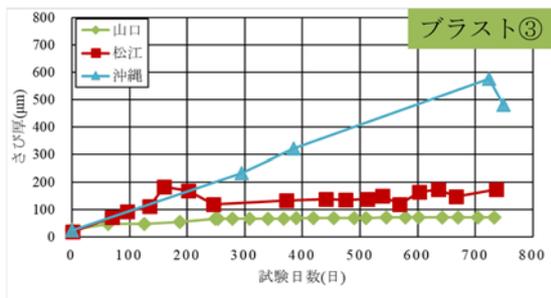


図-4.2 無塗装鋼材のさび厚変化

4.3 塗装試験片評価

2019年12月に、曝露後約2年経過した塗装試験片の外観観察評価を実施した。外観観察評価では、一般部のふくれ、さびの評価、カット部からのふくれ、さびの最大幅の計測を行った。なお、ふくれ評価とさび評価はそれぞれASTM D174-02, ASTM D610-01に準ずる。外観観察の総括を表-4.6に示す。

a) Rc-III 塗装系

沖縄においては、さび評価が5G（全体の1~3%）、ふくれ評価が2MD（約5mmのふくれが多数）と評価された。さらに、外観写真を見ると全面にさび汁が広がっており、塗膜内部でも腐食が進行していると考えられる。島根においては、さび評価は9P（全体の0.01~0.03%）でありさびの発生はほとんど見られなかったが、ふくれ評価は2M（約5mmのふくれが少数）でありふくれがやや発生していた。また、疵有の試験片では疵部からのふくれが9mm進展しており、周辺にはさび汁が広がっていることから、塗膜内部でさびが発生していると考えられる。一方、山口では、島根と同等のふくれの発生は見られたが、さびの発生や疵部からの腐食進行はほとんど見られない。

b) Rc-II 塗装系

Rc-II 塗装系は、全地点において一般部でのさびの発生はほとんど見られなかった。一般部におけるふくれも、4F（約3mmのふくれが僅かに）~2F（約5mmのふくれが僅かに）であり、Rc-III 塗装系と比較すると、良好な状態を維持している。これは、有機ジンクリッチペイントによる効果であると考えられる。しかし、疵有の試験片では、沖縄、島根において疵部からのさびやふくれの発生が見られ、疵からの腐食進行が懸念される。

c) ブラスト処理+さび安定化補助処理

沖縄では、さび評価が1G（全体の33~50%）であり、全塗装鋼材中で最もさびが発生していた。島根ではさび評価が5Gであり、ややさびの発生が見られたが、山口ではさび、ふくれともに見られず、健全な状態を維持していた。

d) ブラスト処理+有機ジンクリッチペイント

沖縄ではさび評価が5Gであり、外観写真から小さな孔食が多数発生していることが確認できる。島根でも孔食がいくつか確認でき、今後腐食が進行していくと予想される。山口では、さび安定化補助処理と同様にさび、ふくれの発生は見られなかった。

e) ブラスト処理+変性エポキシ樹脂塗料

変性エポキシ樹脂塗料は全地点において、さび、ふくれともに8以上を維持しており、外観写真からも疵部を除いて目立った腐食は見られなかった。このことから、簡易塗装の中では変性エポキシ樹脂塗料が最も補修効果を発揮していると考えられる。

f) Rc-I 塗装系（水洗工法、水洗レス工法）

Rc-I 塗装系は、全地点において、一般部ではさび、ふくれは観察されなかった。しかし沖縄では、

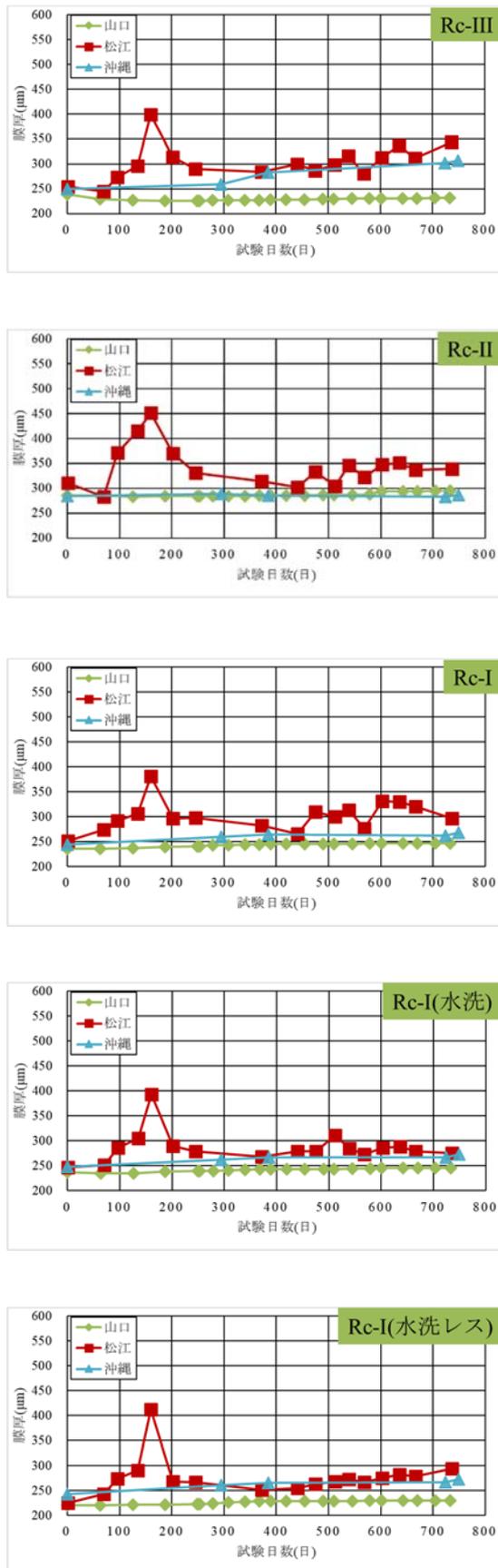


図-4.4 重防食塗装鋼材のさび厚変化

表-4.6 曝露2年目外観評価総括

水準	試験片記号	疵の有無	観察部	沖繩	松江	山口	
Rc-III	8-2	無	一般部	さび	5G	9P	8S
	8-3		ふくれ	2MD	2M	2M	
	8-1		さび	5G	9P	8S	
	8-5	有	一般部	さび	5G	9P	8S
	8-6		ふくれ	2MD	2M	2M	
	8-4		疵部	最大さび幅(mm)	1.0	0.0	0.8
			最大ふくれ幅(mm)	5.6	9.0	1.4	
Rc-II	9-5	無	一般部	さび	9S	9P	9P
	9-3		ふくれ	4F	2F	2F	
	9-1		さび	8S	9P	9P	
	9-6	有	一般部	さび	2F	2F	2F
	9-4		ふくれ	1.0	0.0	0.0	
	9-2		疵部	最大さび幅(mm)	4.6	3.6	0.0
			最大ふくれ幅(mm)	4.6	3.6	0.0	
プラスト + さび安定化 補助処理	13-5	無	一般部	さび	1G	5S	10
	13-3		ふくれ	4F	10	10	
	13-1		さび	2G	7G	10	
	13-6	有	一般部	さび	4F	10	10
	13-4		ふくれ	10.5	1.0	0.0	
	13-2		疵部	最大さび幅(mm)	10.5	0.0	0.0
			最大ふくれ幅(mm)	10.5	0.0	0.0	
プラスト + 有機ジンクリッチ ペイント	14-5	無	一般部	さび	5G	7G	10
	14-3		ふくれ	10	10	10	
	14-1		さび	5G	9G	10	
	14-6	有	一般部	さび	10	10	10
	14-4		ふくれ	10	10	10	
	14-2		疵部	最大さび幅(mm)	5.2	1.0	0.0
			最大ふくれ幅(mm)	2.0	0.0	0.0	
変性エポキシ 樹脂塗料	15-5	無	一般部	さび	8S	9S	9P
	15-3		ふくれ	8F	8F	8F	
	15-1		さび	8S	9S	9S	
	15-6	有	一般部	さび	8F	8F	8F
	15-4		ふくれ	1.4	0.2	0.0	
	15-2		疵部	最大さび幅(mm)	7.0	4.0	0.0
			最大ふくれ幅(mm)	7.0	4.0	0.0	
Rc-I	16-2	無	一般部	さび	10	10	9S
	16-3		ふくれ	10	10	10	
	16-1		さび	10	10	9S	
	16-5	有	一般部	さび	10	10	10
	16-4		ふくれ	10	10	10	
	16-6		疵部	最大さび幅(mm)	1.0	0.0	0.0
			最大ふくれ幅(mm)	2.8	0.0	0.0	
Rc-I (水洗工法)	17-3	無	一般部	さび	10	10	10
	17-1		ふくれ	10	10	10	
	17-5		さび	10	9S	9S	
	17-4	有	一般部	さび	10	8F	10
	17-2		ふくれ	10	8F	10	
	17-6		疵部	最大さび幅(mm)	0.5	0.0	0.0
			最大ふくれ幅(mm)	1.2	0.0	0.0	
Rc-I (水洗レス工法)	18-2	無	一般部	さび	10	10	10
	18-1		ふくれ	10	10	10	
	18-5		さび	10	10	9P	
	18-3	有	一般部	さび	10	10	10
	18-4		ふくれ	10	10	10	
	18-6		疵部	最大さび幅(mm)	0.8	0.0	0.0
			最大ふくれ幅(mm)	2.0	0.0	0.0	

疵有の試験片の疵部においてさび、ふくれの進展が見られ、今後疵部周辺からの腐食進行が懸念される。なお、Rc-I塗装系の一般的な方法、水洗工法、水洗レス工法には現時点で腐食程度の差異はほとんど見られない。

4.4 I 評点による補修効果の整理

曝露開始後2年目の補修効果を検討するために、さび厚とイオン透過抵抗値から腐食程度を評価可能なI評点を用いる。図-4.5に、I評点の分類図を示す。この分類図からI-5~I-1の6段階に分類することができる。ここで、さび厚が400μmを超えたらこ状さびなどの要観察さび、さび厚が800μmを超えたら層状剥離さびなどの異常さびが発生していると判断できる。一方で、さび厚の増加はほとんどなく、イオン透過抵抗値が高まるとI-4に分類され、保護性さびが生成されていると判断できる。また、塗装鋼材においては、イオン透過抵抗値が減少すると、塗膜が劣化していると判断できる。今回は、初期値

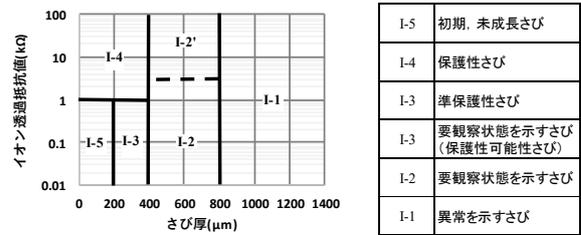


図-4.5 I 評点分類図

と曝露開始後1年目、2年目のプロットにより補修効果を検討する。

図-4.6に無処理鋼材のI評点図を示す。沖繩では評点5~2の鋼材でさび厚の顕著な増大が認められる。これらは腐食が進行していることを示している。島根でも評点5~3で沖繩ほどではないもののさび厚が増加し、腐食の進行が認められる。また、島根の評点2では1年目では沖繩に近い割合でさび厚が増加しており、2年目にはさびが剥離しさび厚が減少している。評点2の鋼材では、さび層に内在される塩分も多量と考えられるため、飛来塩分や温湿度に併せて内在塩分量の影響が大きいものと考えられる。一方、山口の評点5~3ではさび厚はほとんど増加せず、イオン透過抵抗が上昇している。これは保護性さびの生成を示唆している。山口では飛来塩分の影響を受けない密閉箱内曝露であるため、このような状況になると考えられる。ただし、評点2の鋼材では沖繩、島根と同様の傾向を示しており、飛来塩分の影響がない場合でも、内在塩分による腐食の進行が確認できる。評点1の鋼材は曝露場所に関わらず、さび厚の増加は少なく、イオン透過抵抗の変化も小さい。評点1の鋼材は既に層状剥離が発生している鋼材であるため、空隙も多く測定値に大きな変化が無いと考えられる。これらのように、各曝露地点とも無処理状態では腐食が進行する環境であり、各種の補修を施した鋼材の再腐食過程をみることにより、補修効果の検討が可能である。

図-4.7に無塗装鋼材のI評点図を示す。ここで無塗装鋼材とは、試験片作成にあたって層状剥離さびを除去しただけで、塗装や何らかの皮膜を形成していない試験片を指す(水準6, 7, 10, 11, 12)。無塗装処理は最も簡便な補修であり、鋼材表面に存在するであろう塩分を除くために、表面のさびの除去のみを目的とする補修である。今回はさび除去の方法として動力工具(水準6, 7)とプラスト(水準10, 11, 12)を採用した。沖繩では、すべての無塗装鋼材がうろこ状さびを示すI-2にプロットされており、沖繩のような腐食環境が厳しい場所では、無塗装鋼材はさび除去の方法を問わず腐食が進行すると考えられる。また、動力工具を用いた方法は、島根でも沖繩ほどではないが腐食が進行している。一方、プラストを用いた方法は、曝露開始後2年では大幅なさび厚の増加は見られないが、山口と比較するとややさび厚が上昇しており今後の腐食進行が懸念される。全く飛来塩分の影響を受けない山口では、

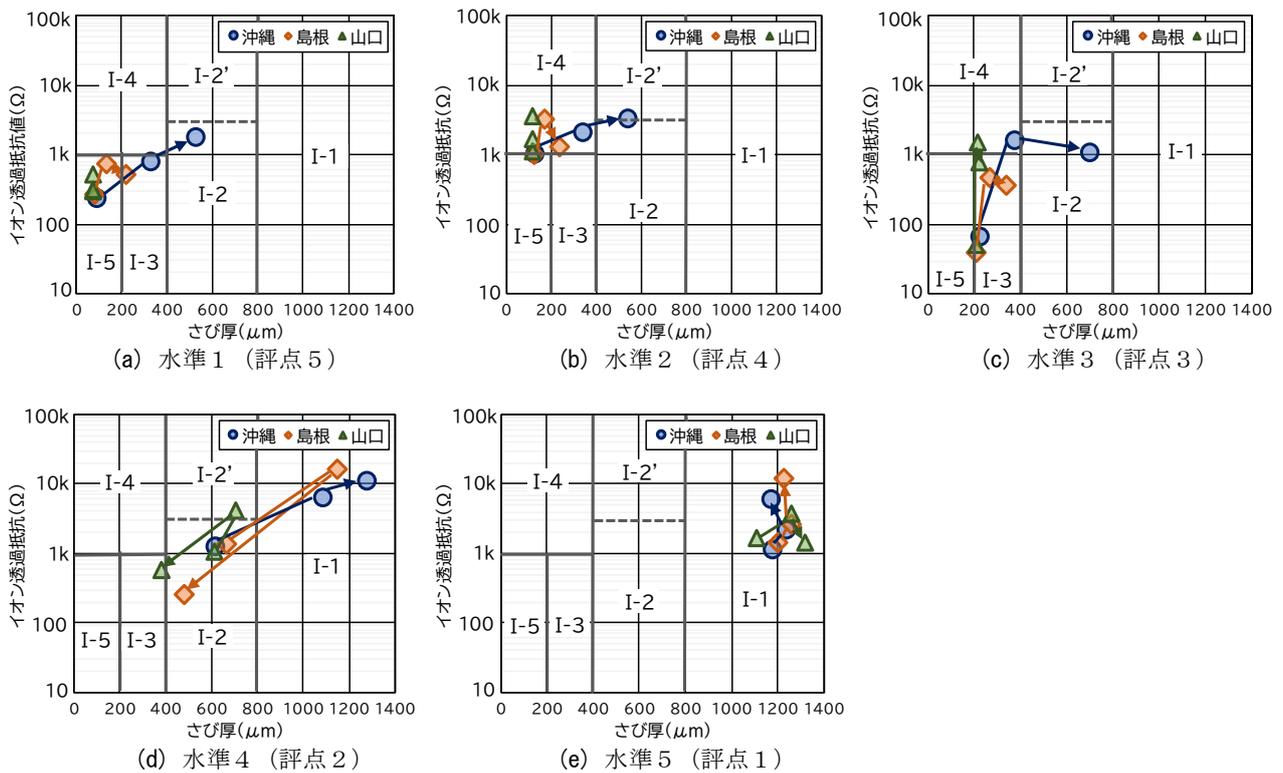


図-4.6 無処理鋼材 I 評点図

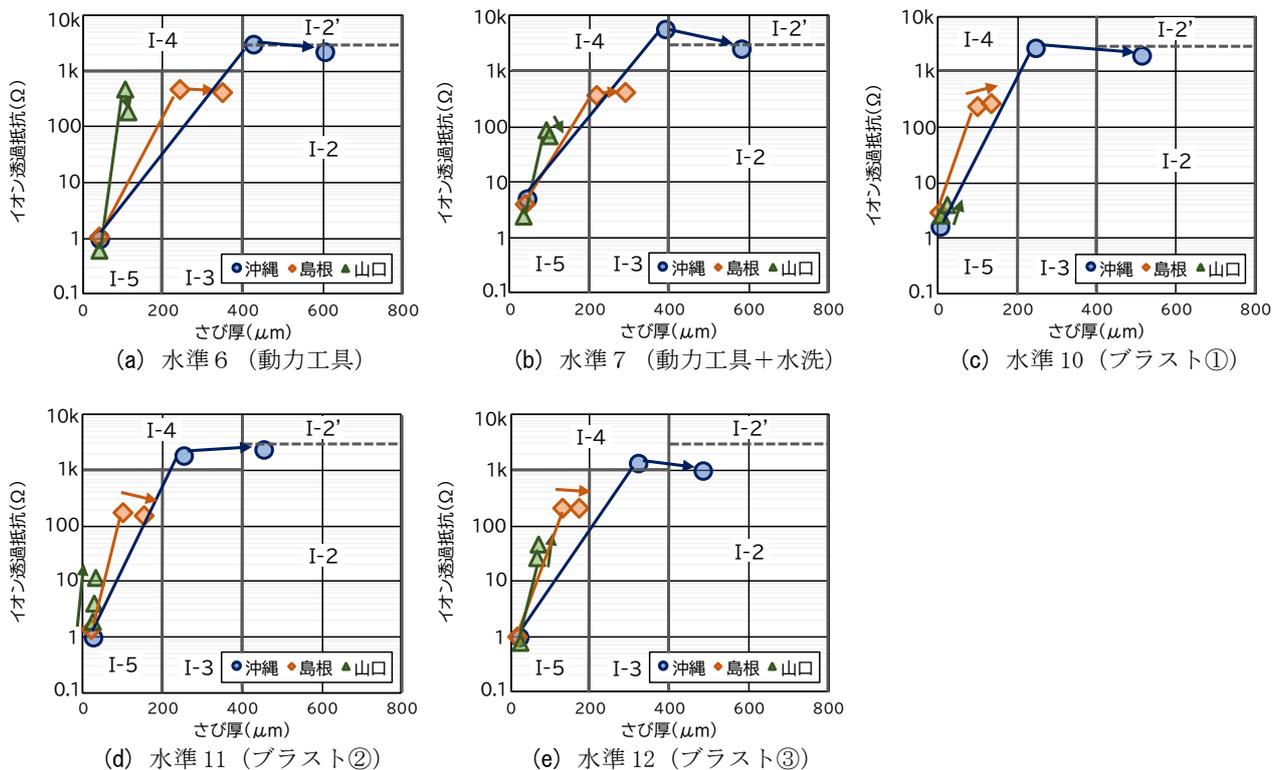


図-4.7 無塗装鋼材 I 評点図

すべての試験片において保護性さびを示すI-4を指向している。特にブラストを施したブラスト①(付着塩分量50mg/m²以下)とブラスト②(付着塩分量100~150mg/m²程度)では、腐食の進行はほとんど認めら

れない。飛来塩分の影響を受けない地域では、ブラストにより表面塩分量を150mg/m²程度以下にすることも有力な補修方法の一つとなりうる。なお、動力工具によりさびを除去した後に水洗いを実施すると、

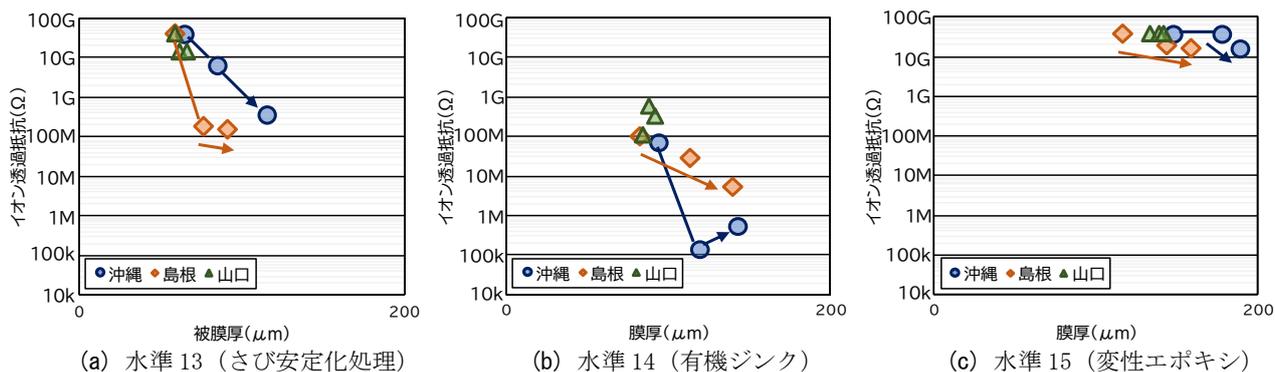


図-4.8 簡易塗装鋼材 I 評点図

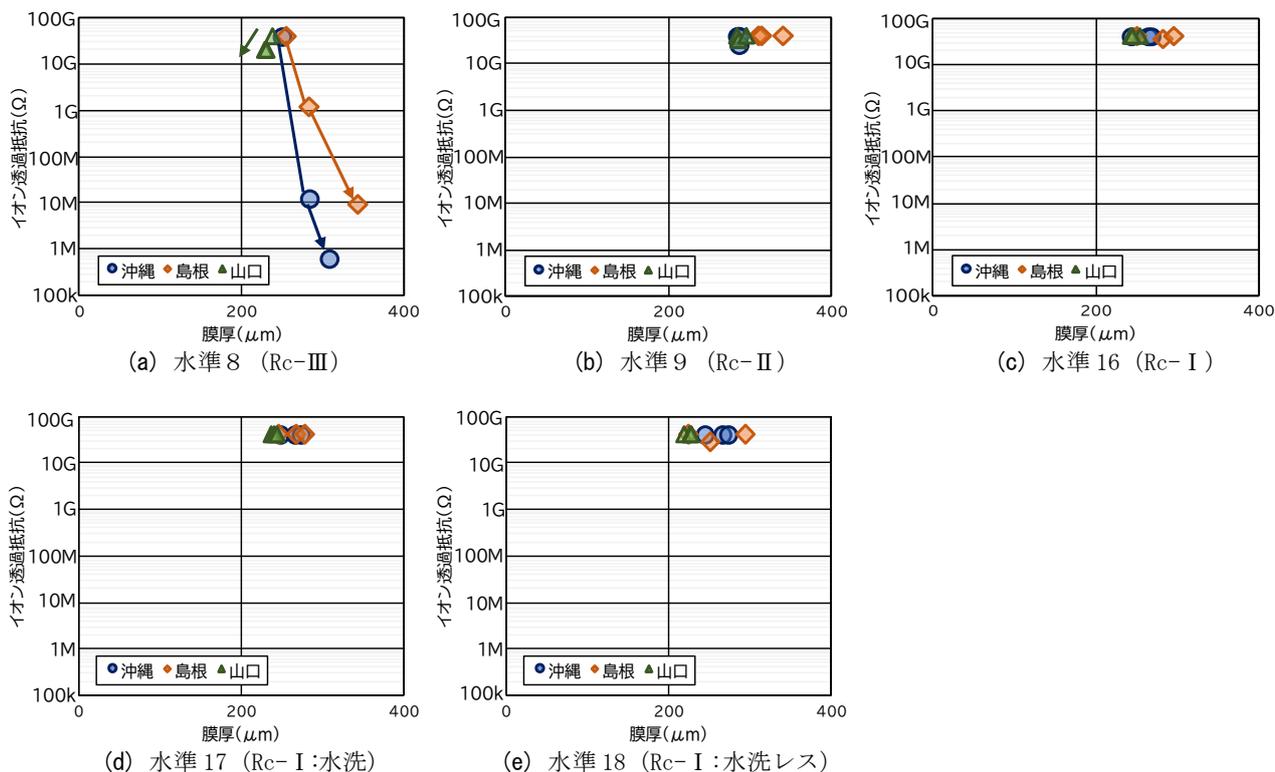


図-4.9 重防食塗装鋼材 I 評点図

島根と山口では腐食の進行を抑えられている。

図-4.8に簡易塗装鋼材のI評点図を示す。簡易塗装鋼材とはブラストにてさびを除去した後に、重防食塗装ではない塗料等を1層のみ塗装した鋼材である(水準13~15)。今回は、さび安定化補助処理剤(水準13)、有機ジンクリッチペイント(水準14)、変性エポキシ樹脂(水準15)の3種類とした。これらの簡易塗装では、イオン透過抵抗の低下により皮膜・塗膜の劣化が評価できる。さび安定化補助処理剤と有機ジンクリッチペイントは沖縄と島根で皮膜の劣化が認められたが、変性エポキシ樹脂はさび厚、イオン透過抵抗値の変化はほとんど見られず塗膜を維持していると考えられる。一方、山口では3つの方法どれもほとんど変化は見られなかった。このこと

から、飛来塩分の影響が少ない地域では、さび安定化補助処理剤や有機ジンクリッチペイント、変性エポキシ樹脂による簡易塗装も、補修効果が期待できるものと考えられる。また、飛来塩分の影響を受ける地域でも、変性エポキシ樹脂による補修は効果的であると考えられる。なお、これらの簡易塗装においても下地処理はブラストであり、鋼材表面の塩分の除去が実施されていることに注意が必要である。

図-4.9に重防食塗装鋼材のI評点図を示す。重防食塗装はRc-III(水準8)、Rc-II(水準9)、Rc-I(水準16~18)とした。Rc-IIIは沖縄と島根においてさび厚の増加やイオン透過抵抗の低下がみられ、塗膜の劣化が確認できる。一方、Rc-IIとRc-Iは曝露開始後2年の段階では正常な状態を維持している。こ

表-4.7 I 評点分類図

処理	水準	補修方法	沖縄	島根	山口
重防食塗装	水準8	Rc-III	×	×	○
	水準9	Rc-II	○	○	○
	水準16	Rc-I	○	○	○
	水準17	Rc-I(水洗工法)	○	○	○
	水準18	Rc-I(水洗レス工法)	○	○	○
簡易塗装	水準13	プラスト処理+さび安定化補助処理	×	×	○
	水準14	プラスト処理+有機ジンク	×	△	○
	水準15	プラスト処理+変性エポキシ	○	△	○
無塗装	水準6	動力工具	×	×	○
	水準7	動力工具+水洗	×	△	○
	水準10	プラスト処理① (付着塩分量 50mg/m ² 以下)	×	△	○
	水準11	プラスト処理② (付着塩分量 100~150mg/m ² 程度)	×	△	○
	水準12	プラスト処理③ (付着塩分量 400~500mg/m ² 程度)	×	△	○

のことから、重防食塗装でも、素地調整が不十分であるRc-IIIは腐食が進行しやすく、さびや表面塩分をできるだけ除去することで防食性能が高まると考えられる。また、Rc-IIIと同じ電動工具による素地調整程度のRc-IIでは腐食が見られないことから、防食下地である有機ジンクリッチペイントが防食に大きく寄与していると考えられる。

以上の結果をまとめて表-4.7に示す。従来使用されているRc-I 塗装系は腐食環境によらず防食効果を発揮している。また、下地処理が電動工具ながら防食下地を塗布するRc-IIも同様に防食効果は高い。変性エポキシによる簡易塗装も、防食効果が期待できる。また、さびを除去するのみの無塗装鋼材では、飛来塩分の影響を受けない場合には効果が期待できるものの、島根では曝露試験の継続実施により判断する必要がある。

4.5 補修実施のための留意点

曝露試験および前年度までに調査した実橋梁の補修実績より、本研究で検討した各種補修方法を実施する上での留意点を示す。なお、耐候性鋼材の腐食にあたっては、腐食原因の排除を第一に実施しなければならないことに留意が必要である。

以下の留意点のまとめにおいて、腐食環境の「飛来塩分少」は耐候性鋼材を裸にて使用できる環境の内、離岸距離が十分に遠く、かつ凍結防止剤を含んだ雨水が桁等にかからない環境を想定している。また、「飛来塩分多」は耐候性鋼材を裸にて使用できる環境の内、比較的離岸距離が短い、または凍結防止剤を含んだ雨水が桁等にかかる環境である。

a) 重防食塗装

重防食塗装は、耐候性鋼材の持つ防食機能である「緻密な保護性さびによる腐食速度の低減」が期待できないときに実施する補修法となり、橋梁の防食

表-4.8 重防食塗装の適用性と留意点

水準名	仕様	腐食環境	
		飛来塩分 少	飛来塩分 多
水準8	Rc-III	飛来塩分の過多によらず、さび層内部の塩分除去が十分にできない可能性がある。そのため、腐食が進展した部位への適用は困難である。	
水準9	Rc-II	Rc-IIIと同様にさび層内部の塩分除去が十分にできない可能性があるものの、ジンクリッチペイントの犠牲防食作用により、防食効果が期待できる。ただし、地鉄表面に残留する塩分の影響により、長期耐久性はRc-Iより劣ると予想される。	
水準16	Rc-I	Rc-Iは施工実績もあり、長期耐久性にも優れる。施工にあたっては、表面塩分を水洗により十分低減することが望ましいが、洗浄水の処理が問題となることもある。その際には、腐食抑制剤を含んだ防食下地処理も有効である。	
水準17	Rc-I(水洗工法)		
水準18	Rc-I(水洗レス工法)		

表-4.9 簡易塗装の適用性と留意点

水準名	仕様	腐食環境	
		飛来塩分 少	飛来塩分 多
水準13	プラスト処理+さび安定化補助処理	耐候性鋼材の防食性能の回復を期待する。	適用は困難である。
水準14	プラスト処理+有機ジンク	小規模な補修として適用できる。通常の塗装とは異なるため定期的な点検が必要である。	適用は困難であるが、応急的延命措置としての可能性はある。
水準15	プラスト処理+変性エポキシ		

表-4.10 無塗装の適用性と留意点

水準名	仕様	腐食環境	
		飛来塩分 少	飛来塩分 多
水準6	動力工具		
水準7	動力工具+水洗		
水準10	プラスト処理① (付着塩分量 50mg/m ² 以下)	無塗装補修を選択する場合には、腐食要因が完全に排除されることが前提となる。	適用は困難である。
水準11	プラスト処理② (付着塩分量 100~150mg/m ² 程度)		
水準12	プラスト処理③ (付着塩分量 400~500mg/m ² 程度)		

方法の変更ととらえることができる。重防食塗装ではさび層内の塩分の除去が重要となる。そのため、プラスト処理に加え有機ジンクリッチペイントを施工するRc-Iが有利であり、施工実績も多い。なお、現状での腐食原因が明確であり、腐食原因を排除することによる腐食の進展が無いと予想される場合には、重防食塗装を施す必要は無い場合がある。表-4.8に重防食塗装を施す際の適用性と留意点を示す。

b) 簡易塗装

簡易塗装による補修は、明白な腐食原因により局部的な腐食が進行した状態が対象となる。そのため、腐食原因の排除が確実に見込め、他の部位は健全状態が維持されるとの判断が重要である。一方、飛来塩分が多い地域にあっても、抜本的な補修までに時間を要する場合には応急的延命措置としての使用も可能かもしれない。

さび安定化補助処理剤の塗布は、本研究では対象とした飛来塩分の多い地域では効果が無い。プラスト後に有機ジンクあるいは変性エポキシを塗布すると、補修箇所の防食は図れるものの、あくまでも簡易な補修であるため、その適用範囲は可能な限り小規模とするべきであろう。また、本来の塗装とは異

なるため、定期的な点検が必要となる。表-4.9に簡易塗装を施す際の適用性と留意点を示す。

c) 無塗装

無塗装による補修は局所的な腐食に対して、腐食部位のさびを除去しその後は裸仕様のまま使用を継続する補修である。そのため、補修後も耐候性鋼材の特性を活かす防食方法となる。無塗装での補修を選択する場合には、腐食要因が完全に排除されることが前提となる。表-4.10に無塗装による補修を施す際の適用性と留意点を示す。

4.6 本章のまとめ

耐候性鋼橋梁の補修を実施するにあたり、多くの場合には部分補修塗装が適当と考える。その際、防食性能の確保の観点からはRc-I 塗装系の適用が望ましいと考えるが、対象部位の状況によっては、ブラスト処理が必要なRc-I 塗装系の適用が困難な場合もありうる。そこで本研究では、Rc-I 塗装系を含め種々の補修塗装を施した試験片を曝露することによりその補修効果を明らかにする。そのために、計18水準の試験片を製作し、腐食環境の異なる沖繩、島根、山口において曝露試験を継続実施した。このうち、山口では飛来塩分の影響を除くために、密封箱内曝露としている。これは、耐候性鋼橋梁の補修にあたっては腐食原因の排除がまず実施されるため、腐食原因が排除されかつ塩分環境が穏やかな条件を再現するためである。

今回、塗装試験片において、曝露開始2年後の外観観察評価を行った。さび安定化補助処理と有機ジンクリッチペイントは、沖繩、島根においてさびやふくれの発生が見られたが、同じ簡易塗装の変性エポキシ樹脂塗料は、良好な塗膜を維持していた。また、Rc-III 塗装系ではさびやふくれの発生が見られたが、Rc-II 塗装系は沖繩においても塗膜の異常はあまり見られず、有機ジンクリッチペイントが防食機能を発揮していると考えられる。

また、曝露開始2年後のさび厚およびイオン透過抵抗から、補修効果を検討した。従来使用されているRc-I 塗装系は腐食環境によらず防食効果を発揮している。また、下地処理が電動工具ながら防食下地を塗布するRc-II も同様に防食効果は高い。さらに、変性エポキシ樹脂塗料を用いた補修方法でも、沖繩、島根においても腐食進行はほとんど見られず防食効果が期待できる。一方、さびを除去するのみの無塗装鋼材では、飛来塩分の影響を受けない場合には効果が期待できるものの、島根では曝露試験の継続実施により判断する必要がある。

以上の結果より、補修実施のための留意点を検討した。腐食環境を踏まえた各補修方法の適用性を分類した。飛来塩分の影響を受ける地域では、Rc-II 塗装系、Rc-I 塗装系（水洗レス工法含む）、また、応急延命的措置として有機ジンクリッチペイントと変性エポキシ樹脂塗料が適用可能であると判断した。飛来塩分の影響を受けない地域では、Rc-II 塗装系、Rc-I 塗装系（水洗レス工法含む）、簡易塗装、さらに腐食要因が完全に排除された場合には無塗装による補修も有効であると考えられる。

第5章 耐候性鋼材の診断・補修に関するフロー

本章では、診断補修マニュアルとして一般に普及する観点から、(1)腐食予測シミュレーション技術、(2)腐食判定法、(3)補修効果の解明における腐食評価や補修フローについて、マニュアルのプロト案として整理を行う。

5.1 腐食予測シミュレーション

耐候性鋼橋梁において、点検において腐食の進展が認められ、その腐食の評価を行う際の腐食原因の推定において、腐食予測シミュレーションが必要となる。腐食原因推定の流れを図-5.1に示す。腐食原因については、対象橋梁の構造、腐食環境の調査を実施し、原因の推定を行う。原因推定の際に、腐食予測シミュレーションを用いると、定量的な評価を行うことが可能である。腐食予測シミュレーションシステムのためには、周辺地形モデル、橋梁モデル、外部風条件や対象橋梁周辺の飛来塩分量、または空气中塩分濃度の腐食環境条件が必要である。

a) 周辺地形モデル

i-ConstructionにおいてCIMモデルとして、今後、統合モデルが成果品として納入される。統合モデルがある場合は、このモデルを活用する。ない場合には、国土地理院基盤地図情報のデータより、標高データ、軌道の中心線、道路の中心線、水涯線、建物の外周線などのデータを活用して周辺地形モデルを作成する。また、UAV等を利用し、点群データから地形モデルをより精密に作成する方法がある。ただし、数値流体シミュレーションに地形モデルを取り込むためには、ソリッドモデルの地形モデルが必要となる。

b) 橋梁モデル

i-ConstructionにおいてCIMモデルとして、今後、橋梁モデルは成果品として納入される。橋梁モデルは、オリジナルデータか中間ファイルとして、形状データと属性データが格納されたIFCファイルが納品される。中間ファイルのIFCファイルがあれば、

多くの3D-CADのソフトウェアで3次元のソリッドモデルを容易に作成することができる。

c) 腐食環境条件

本システムにおける腐食環境条件として、対象橋梁周辺の外部風条件、腐食環境の加速因子としての飛来塩分量または空气中塩分濃度が必要である。飛来塩分量は、ドライガーゼ法による観測結果を毎月採取する必要がある。最低でも1年間のデータが必要である。大屋らが提案する風力エネルギー係数から推定する方法でデータを得ることができるが、1年間の飛来塩分量の観測結果があるとよい。また、直接大気中塩分濃度を観測する方法やメソスケール気象シミュレーションにより、大気中の塩分濃度を推定する手法がある。

5.2 腐食判定法

耐候性鋼橋梁の腐食判定は点検時に実施することとなる。そこで、まず点検の流れを図-5.2に示す。通常の点検（定期点検）では、部材の健全性の把

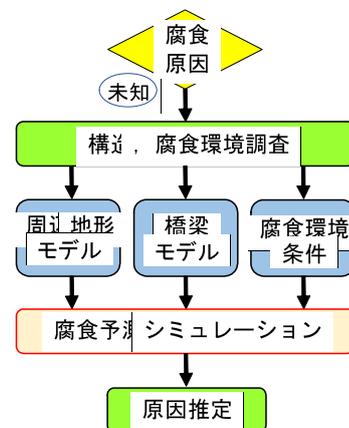


図-5.1 腐食原因推定の流れ

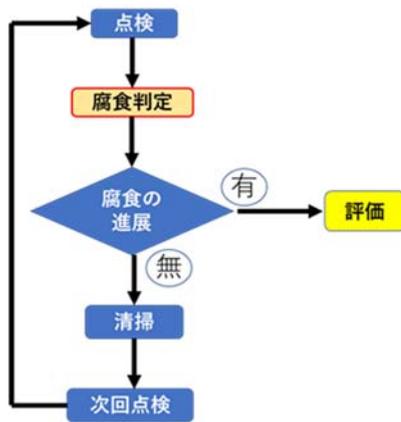


図-5.2 点検の流れ



写真-5.1 層状剥離さび



写真-5.2 うろこ状さび・こぶ状さび

握が必要となる。耐候性鋼橋梁の場合、部材の健全性とさび性状は密接に関係する。そのため、定期点検においては従来の目視点検に加えて腐食判定を行うことが必要となる。さらに、腐食についてはその速度が問題となる。すなわち、点検時点で腐食が進んでいる状態であってもその腐食が現に進行しているのか、あるいは過去に進行し点検時には腐食の進行が抑制されているのかの判断が必要である。

定期点検時の腐食判定にあたっては、本研究で提案するセロテープ試験が簡便である。また、セロテープ試験を実施し、本研究で示した判定を行えばデジタル画像としてさびを保存することも可能となり、以後の腐食速度の評価にも使用可能となる。画像処理による腐食判定については第3章に述べているので、ここでは試料の採取（セロテープ試験の実施）に関する留意事項をまとめる。

a) 事前観察

セロテープ試験の実施にあたっては、その実施場所を決定する必要がある。そのために、まず橋梁全体を目視により観察し、層状剥離さび（写真-5.1）やうろこ状さび（写真-5.2）の発生の有無を確認する。これらの発生が認められれば、その部位をセロテープ試験の実施位置とする。なお、観察にあたっては、さびの剥離・落下がある場合もあり、桁下の地面にも注意する。これとは別に、将来の腐食進展が予想される桁端部において、セロテープ試験を行う。この際、鉸桁であれば、各桁について下フランジの上下面およびウェブについて桁の両側の計5か所を選定する。

b) 事前準備

セロテープ試験は風化さびや堆積した塵埃を除いて、鋼材表面のさびをセロテープの付着力により剥離・採取する。そのために、セロテープ試験の実施にあたり、対象鋼材表面の塵埃等を除去する必要がある。これには刷毛を用いるのが一般的と考えられるが、その際に過度に掃くと対象とするさびまで除去されることがある。写真-5.3は鉸桁橋の下フランジ上面の堆積物を掃いた状態であるが、こぶ状さびの頭部まで掃きとってしまっている。このようにな



写真-5.3 塵埃の除去

ると正確な腐食判定が困難となるので、注意が必要である。このような状態を避けるためには、ある程度塵埃を除去した後、セロテープ試験を同一個所で複数回行い、得られたセロテープのうちから腐食判定に用いる試料を選定する方法も考えられる。

c) セロテープ試験

セロテープ試験では幅50mm程度のセロテープを長さ100mm程度で鋼材表面に密着させる。この際、押し付け力について厳密に管理することは困難であるが、テープ面を長手方向に数回往復するように手で撫でる。この際、あまりに力を入れるとテープの接着剤が鋼材表面に残る場合がある。このようになると、さびの採取が困難であるため、位置をずらして再度採取する必要がある。同一個所において複数回（2～3回）実施することが望ましいが、腐食判定に使用する試料は原則として初回に採取した試料とする。ただし、初回の試料に塵埃等のさび以外のものが多く付着する場合には、2回目の試料を用いることもある。この際、初回と2回目では付着するさびに大きな差がないことを確認する必要がある。

d) 試料の保存

採取したさびが付着したセロテープは現場にてOHPシートのような透明シートあるいは白紙に張り付ける（写真-5.4）。同一部位でのセロテープは1橋梁あたりの採取量が多くなるので、シートはクリア

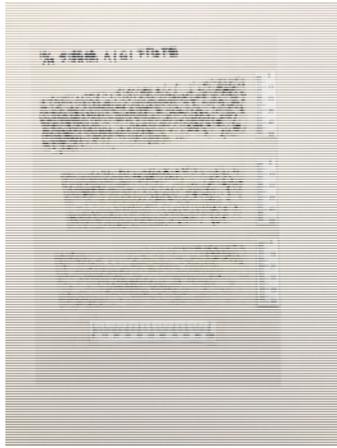


写真-5.4 試料の保存

ポケット等により整理すると良い。今回開発している画像処理による腐食評価は現場においても実施可能であるが、橋梁点検の効率化のためには、後日に内業として評価作業を行うのが良い。さびが付着したセロテープを写真にとり、画像解析によりさび評価をおこなう。さびが付着したセロテープを長時間放置すると変色する場合があります、その場合には画像解析の精度が落ちる可能性があるため、写真撮影は可能な限り早期に実施する。

e) 腐食判定

採取した試料を用いて第3章で示した方法により、腐食判定をおこなう。この際、層状剥離さびは現場にて目視で確認できるため画像処理による判定の対象としていない。

この判定法は経験の少ない技術者でも簡易にさびの性状を判断するためのものであり、スクリーニングの意味合いが強い。そのため、評点2と判断された場合には、腐食原因を含めた詳細調査が望まれる。

5.3 補修フロー

前章の腐食判定により異常さびの進展が認められた場合には、評価のフェイズとなる。評価フェイズの流れを図-5.3に示す。評価フェイズにあたって、既に板厚減少等により緊急に補修が必要な状態となっていれば、補修フェイズに移る。緊急補修が必要でない場合には、まず腐食原因を解明する。その際、漏水等の原因が特定される場合と、原因が容易には解明できない場合が考えられる。腐食原因が容易に判明しない場合には、第2章で示した腐食シミュレーションおよび腐食環境調査により原因を推定することとなる。腐食原因が特定あるいは推定されれば、次に腐食速度を評価する。これには前回の点検結果が有効である。腐食速度が速く今後の腐食の進展が見込まれ早期の補修が必要と判断されれば補修フェイズに進み。一方、腐食速度が遅い場合には経過観察とし、点検間隔を設定する。特に問題がなければ定期点検の5年として良いが、特段考慮する事情が

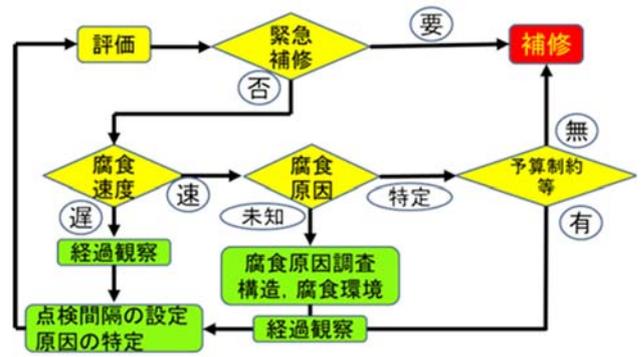


図-5.3 評価の流れ

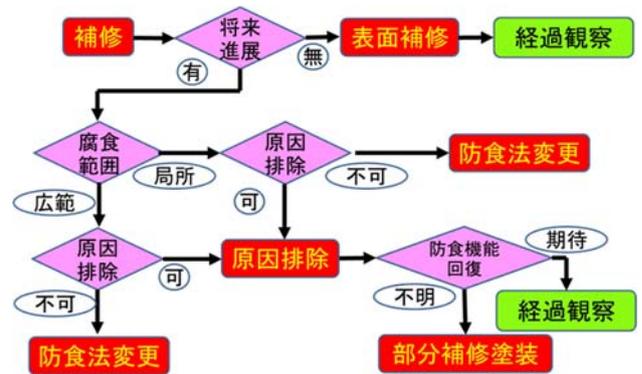


図-5.4 補修の流れ

あれば適宜短い期間を設定する。

補修フェイズの流れを図-5.4に示す。補修に実施にあたって、腐食原因が特定され将来腐食の進展がない場合には、塩分環境の良否により表面補修（無塗装）で実施する場合と、部分補修塗装を施す場合が想定される。ここで、表面補修とは鋼材表面のさびを除去することを言い、部分補修塗装とは何らかの塗膜を形成することを言う。第4章で示した通り、塩分環境により補修鋼材の再腐食が異なることから、マニュアル作成にあたっては目安となる腐食環境と補修方法の関係を整理する必要がある。

補修にあたっては補修範囲を確定する必要がある。そのため、腐食マップを作成する。腐食した耐候性鋼橋梁の補修にあたっては、原因の排除を第1に考えなければならない。腐食範囲の広狭によらず、腐食原因が排除可能な場合には排除する。しかし、腐食が橋梁の広範囲に渡り、原因の排除が困難な場合には防食方法の変更も必要である。防食方法の変更にあたっては、耐候性鋼橋梁のさびを除去することは現実的でない。そのため、桁を覆うカバープレートのようなものを設置し、腐食環境を変更する方法が現実的であろう。また、腐食範囲が局部的でかつ原因の排除ができない、あるいは原因を排除しても早期に腐食が再現されると想定される場合には、重防食塗装による部分補修塗装が良い。写真-5.5はRc-1による桁端部の部分補修塗装の例である。腐食部に補修塗装を施す場合には、鋼材表面の塩分の除

去が肝要である。残存塩分が多い場合には、補修塗装が短期間のうちに剥がれることも懸念される（写真-5.6）。

原因の排除が可能となった場合には、無塗装での使用が継続可能であることもある。その場合にはさびおよび表面塩分を除去する表面補修を施したのち、裸で使用を続ける。しかし、裸での継続使用に懸念が持たれる場合には、簡易な補修塗装を施すこともあろう。



写真-5.5 桁端部補修塗装

5.4 管理者への意見聴取

本研究において対象としたシミュレーション技術、さび評価技術、補修技術について、管理者である山口県土木建築部道路整備課に意見聴取をおこなった。その概要を以下に示す。

なお、山口県は図-5.5に示す88橋の耐候性鋼橋梁を管理している。その多くが鉄桁であり、離岸距離は飛来塩分の影響が少ないと考えられる10~20kmである（図-5.6）。

管理者には以下のQ.で示す問いを設定し、それぞれ得られた回答を要約して示す。

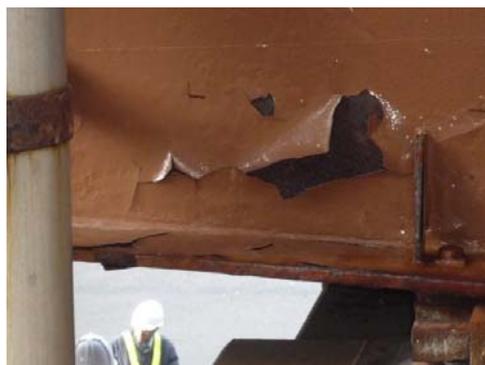


写真-5.6 塗膜はがれ

a) 設問と回答

Q.1 山口県が管理する耐候性鋼橋梁の維持管理についての問題点

法定点検の1巡目点検を終えて、早期に措置を講ずべき状態のものはないが、水等が影響し部分的にさびの進行が速いものも見受けられる。こうした中、県では、原因の特定が困難なものの特定期間、発生しているさびが保護性さびなのか、異常さびなのかの判断、また、部分的な異常さびに対する補修方法などについて、検討に時間を要するため、効果的、効率的に対応していきたいと感じている。

Q.2 山口県が管理する耐候性鋼橋梁のうち、補修実施橋梁数

補修については、検討を始めたところである。

Q.3 上記補修橋梁の補修内容

原因の除去と補修工法を検討中。

Q.4 上記補修橋梁の補修にあたって問題となった点

補修検討にあたり、早急に対応を必要とする異常さびかの判断、また、部分的な対応となるため、その効果的、効率的な補修工法の判断に苦慮しており、現在、検討を進めているところである。

Q.5 腐食予測シミュレーションの改善点、実施するための問題点は何か。

腐食時の原因究明等と事前の腐食予測には、非常に有益であると考えられるが、シミュレーションの実施にあたっては、コスト面が気になる。このため、実施

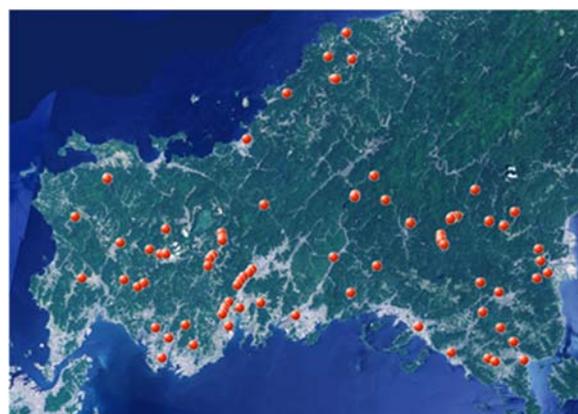


図-5.5 耐候性鋼橋梁位置

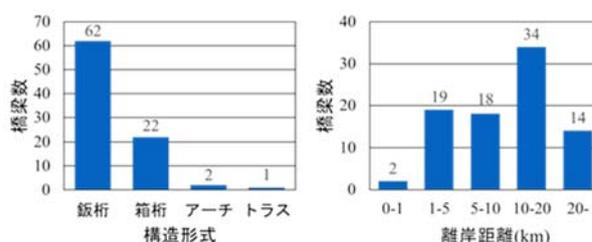


図-5.6 構造形式・離岸距離

するためには、維持管理全体のコスト削減が求められる。例えば、本シミュレーションの基本モデルをもとに、効果的な予防対策の検討や診断の支援、補

修工法の選定など様々な用途に広げるなどにより、効率的、効果的な維持管理に繋げていくことも考えられる。

Q.6 耐候性鋼橋梁の維持補修にあたって、さび評価のばらつきをどのように考慮するか。

層状剥離など明らかな腐食を除き、原因の除去を行ったうえで、ばらつきを考慮し、経過観察を行いその後の進展性を確認していくこととなるのではないかと考える。

Q.7 各種補修工法の曝露試験の結果を、実際の補修に適用する場合に必要な条件は何か、適用する場合の問題点は何か。

維持管理コストを含めその効果を確認し、適用していくこととなるが、各工法の耐用年数の設定に苦慮することになると思われる。

b) 回答を踏まえた整理

腐食予測シミュレーションにおける問題点として、以下を設定した。

- 精度向上には、環境条件の設定方法に関する検討が必要
- 適切な要素サイズ、境界条件の設定が重要
- 温度や湿度、風による乾燥効果等も考慮することが必要

これに対し、管理者の意見を聴取したところ、シミュレーションの有用性は認識しながらも、コスト面についての疑念が示された。

本シミュレーションの基本的コンセプトは、腐食原因推定を図-5.3に示すフローで実施することにある。これによれば、腐食原因の推定に伴い、腐食の進行が懸念される部位の抽出も可能である。この結果より予防保全対策を施すべき部位や重点的に点検を実施すべき部位も明らかとなる。これらの解析を組み合わせることにより、維持管理にも資する効率的なシミュレーションが可能となろう。

意見聴取によれば、管理者としては発生しているさびが保護性さびなのか、異常さびなのかの判断が重要であるとの認識である。ここで、異常さびを外観評点2または1と考えれば、本研究により開発したシステムによる判別も可能である。この点で、本研究で開発した腐食判定システムは実務において有用であると考えられる。

一方、本研究で構築したセロテープ試験と画像処理による評価を行う場合には、3.5で示した点に留意が必要である。また、評価法により評価結果にばらつきが出ることも明らかとなった。意見聴取によれば、「ばらつきを考慮し、経過観察を行いその後の進展性を確認」との意見が得られた。さび評価にばらつきが生じうることを認識することは重要であるとともに、腐食の進行について継続的に監視することは耐候性鋼橋梁の維持管理においてあるべきスタンスであろう。

管理者が効率的な補修工法の選定に苦慮している実態が明らかとなった。本研究で目的とした各種補修工法の効果解明は、このような管理者ニーズに応えるものである。本研究により、部分的な異常さびの補修方法を提示することができた。

意見聴取では、補修工法選択の際にコストと耐用年数の設定に苦慮するとの意見があった。この意見に対しては、以下の点に注意が必要であろう。

- 1) 耐候性鋼橋梁の異常さびの補修にあたっては、異常さび部分のみが対象となる。そのため施工面積は小さくなり、施工費は割高になる場合がある。
- 2) 補修工法には重防食塗装から、さびの除去のみまで幅がある。これらは初期施工費用に差があるのみでなく、事後の維持管理にあたっての費用も異なる。
- 3) 補修工法の耐用年数も工法により考え方が異なる。重防食塗装を施した場合には、通常の塗装と同じ耐用年数となる。一方、さび除去の場合には耐候性鋼材の裸使用と同じであり、耐用年数は特に定められない。

5.5 本章のまとめ

本研究において対象としたシミュレーション技術、さび評価技術、補修技術について、管理者である山口県土木建築部道路整備課に意見聴取をおこなった。これより、橋梁管理者が考える耐候性鋼橋梁の維持管理についての問題点が示された。

聴取した意見を踏まえ、本研究で開発した技術の適用について整理した。

第6章 まとめ

本委託研究は、耐候性鋼橋梁の効率的かつ合理的な維持管理を可能とするために、耐候性鋼材の腐食の診断技術および補修技術の体系的高度化を目的とし、腐食予測シミュレーション、並びにさび画像を活用した腐食判定システムを開発し、診断補修マニュアルの構築を目指すものである。本研究により得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 地形モデルと3次元の橋梁モデルを統合した数値シミュレーションにより、耐候性鋼橋梁の腐食環境の評価が可能なシステムを構築した。本システムは、耐候性鋼橋梁の建設時の調査、計画および設計時に長寿命化の対策や既設橋梁の腐食環境を評価し、維持管理時の長寿命化対策を支援するツールとして有効なシステムと成り得ると思われる。
- 2) シミュレーションシステムの有効性を確認するために園高架橋と大畑橋を対象にシミュレーションを実施した。その結果、園高架橋で観測された飛来塩分量の飛来状況をかかなりの精度でその傾向を評価可能であり、橋脚周辺の桁内への流入状況やその影響範囲と異常腐食を生じている範囲が良く一致していることを確認した。また、大畑橋の数値シミュレーションの結果から地形を考慮することにより、耐候性鋼橋梁の腐食状況と流れ場の状況が良く一致していることを確認した。また、シミュレーションを実施する際の注意事項を整理した。
- 3) 従来行われているセロテープ試験によるさび評価を、技術者の練度に依存することなく定量的に評価するための手法を示し、これを実施するために反復閾値選択による2値化およびWaterShedアルゴリズムによる粒子分割を用いたプログラムを開発した。熟練技術者の評価と本手法での推定は74%の一致が得られた。
- 4) 評価基準設定時とは別のセロテープ試験試料における技術者評価と本研究で設定した評価基準による画像処理評価の一致率は92.1% (38試料中35試料が一致) となり、技術者評価とほぼ一致していることが明らかとなった。したがって、本研究の画像解析評価法は、評価基準設

定時と別の試料においても評価精度が高く、詳細調査前のスクリーニングへの使用を前提とすれば、実用に供せる精度を有する手法であろう。

- 5) イオン透過抵抗値からさび状態を評価するI評点法と技術者評価および本手法での評価を比較した。その評価は必ずしも一致しないことが明らかとなった。これを踏まえ、本研究の評価を実施する際の注意点を整理した。
- 6) 曝露開始2年後のさび厚およびイオン透過抵抗から、補修効果を検討した。従来使用されているRc-I塗装系は腐食環境によらず防食効果を発揮している。また、下地処理が電動工具ながら防食下地を塗布するRc-IIも同様に防食効果は高い。さらに、変性エポキシ樹脂塗料を用いた補修方法でも、沖縄、松江においても腐食進行はほとんど見られず防食効果が期待できる。一方、さびを除去するのみの無塗装鋼材では、飛来塩分の影響を受けない場合には効果が期待できる。
- 7) 塗装試験片において、曝露開始2年後の外観観察評価を行った。さび安定化補助処理と有機ジンクリッチペイントは、沖縄、松江においてさびやふくれの発生が見られたが、同じ簡易塗装の変性エポキシ樹脂塗料は、良好な塗膜を維持していた。また、Rc-III塗装系ではさびやふくれの発生が見られたが、Rc-II塗装系は沖縄においても塗膜の異常はあまり見られず、有機ジンクリッチペイントが防食機能を発揮していると考えられる。
- 8) 補修実施のための留意点を検討した。腐食環境を踏まえた各補修方法の適用性を分類した。飛来塩分の影響を受ける地域では、Rc-II塗装系、Rc-I塗装系(水洗レス工法含む)、また、応急延命的措置として有機ジンクリッチペイントと変性エポキシ樹脂塗料が適用可能であると判断した。飛来塩分の影響を受けない地域では、Rc-II塗装系、Rc-I塗装系(水洗レス工法含む)、簡易塗装、さらに腐食要因が完全に排除された場合には無塗装による補修も有効であると考

えられる。

- 9) 診断補修マニュアルとして一般に普及する観点から、(1)腐食予測シミュレーション技術、(2)腐食判定法、(3)補修効果の解明における腐食評価や補修フローについて、マニュアルのプロト案として整理を行った。
- 10) 本研究において対象としたシミュレーション技術、さび評価技術、補修技術について、管理者である山口県土木建築部道路整備課に意見聴取をおこなった。これより、橋梁管理者が考える耐候性鋼橋梁の維持管理についての問題点が示された。聴取した意見を踏まえ、本研究で開発した技術の適用について整理した。

耐候性鋼橋梁は無塗装で使用できることからLCCの観点から有利となるため、近年多くの橋梁が架設された。本研究の成果はこれらの橋梁の維持管理に適用でき、耐候性鋼橋梁の長寿命化に貢献できる成果である。すなわち、耐候性鋼橋梁に予期せぬ腐食が発生した場合に、腐食原因を推定するためのシミュレーション、腐食状態の評価、長寿命化のための補修を一連の流れとして捉えた研究である。本研究の成果は広い範囲の橋梁管理者、点検業者、施工業者により実施可能であり、道路政策の質の向上に大いに資する成果と考える。

本研究が目指した開発については概ね達成できたと考える。しかし、本研究に関連して今後解決すべ

き課題もいくつかある。以下に今後の課題・展望を列挙する。

防食に対する構造的な効果や周辺環境の影響を検討する場合、本研究で用いたシステムのように地形や構造の3次元モデルを活用することは有効であり、点検時の容易さや手法の検討、腐食部位やその程度を設計時に検討することが可能であるため、鋼橋の長寿命化に有効な手法と成ることを確認した。数値解析を用いた橋梁の腐食評価には、解析領域の大きさ、モデルの詳細度、要素サイズ、適切な境界条件の設定や風の高塩粒子の影響だけでなく温度、湿度、風による乾燥効果などの環境条件の設定など検討課題はあるが、鋼構造物の長寿命化を考慮した設計の高度化向け、さらなる研究を行いたい。

AIを援用したさび判定においては、概ね技術者と同一評価が可能となるシステムが構築できた。一方、教師データの信頼性（技術者間の相違）は常に問題となる。本研究では技術者によらない定量的評価手法との比較も行い良好な結果を得ているものの、中間評価での指摘にもあるように現行の評価レベル自体に関する検討を実施したい。

曝露試験により補修方法と腐食環境の定性的な関係を明らかにできた。今後はこの成果をもとに実橋梁に対する試験補修を実施、曝露試験との比較検討により補修方法のさらなる信頼性の向上に努めたい。