

高腐食性環境における鋼構造物の塗膜下腐食現象と 防食性能向上法に関する研究

坂本, 達朗

<https://doi.org/10.15017/1785403>

出版情報：九州大学, 2016, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

高腐食性環境における
鋼構造物の塗膜下腐食現象と
防食性能向上法に関する研究

平成 28 年 9 月



九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻

坂本 達朗

高腐食性環境における鋼構造物の塗膜下腐食現象と 防食性能向上法に関する研究

目次

第 1 章 緒言	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究	4
1.2.1 鋼材の腐食挙動と腐食性評価に関する研究	4
1.2.2 塗装による防食機構に関する研究	6
1.2.3 実構造物の塗膜耐久性に関する研究	8
1.2.4 塗替え塗装時の鋼素地調整に関する研究	9
1.3 研究の目的	12
1.4 本論文の構成	12
第 2 章 高腐食性環境における鋼構造物の塗膜劣化と腐食度の調査	20
2.1 対象構造物	20
2.2 調査方法	26
2.2.1 調査項目	26
2.2.2 各項目の調査方法	26
2.3 調査結果と考察	29
2.3.1 塗膜断面調査	29
2.3.2 腐食生成物の性状および含有塩分量の分析	30
2.4 まとめ	38
第 3 章 高腐食性環境における塗装鋼構造物の腐食挙動	40
3.1 腐食鋼板の作製	40
3.1.1 試験片	41
3.1.2 腐食生成物の評価	42
3.1.3 試験結果と考察	43
3.2 高腐食性環境における塗装鋼構造物の腐食挙動の評価	46
3.2.1 試験項目	46
3.2.2 試験方法と評価方法	47

3.2.3	試験結果と考察	55
3.3	まとめ	66
第4章	鋼素地調整の方法が塗膜の防食性能に及ぼす影響	69
4.1	腐食生成物が塗膜の防食性能に及ぼす影響	69
4.1.1	試験方法	69
4.1.2	試験結果と考察	75
4.2	鋼素地の残留塩が塗膜の防食性に及ぼす影響	88
4.2.1	試験方法	89
4.2.2	試験結果と考察	90
4.3	塩の除去程度と塗膜防食性の関係	94
4.4	まとめ	96
第5章	鋼構造物の維持管理費用低減のための防食性能向上法	98
5.1	ブラストの性能評価	98
5.1.1	試験方法	98
5.1.2	試験結果	104
5.2	塗替え費用のライフサイクルコスト（LCC）評価	113
5.2.1	塗替え施工費用の算出方法	113
5.2.2	塗替え周期の算出方法	116
5.2.3	LCCの算出方法の提案	118
5.2.4	LCC評価による試算	118
5.3	まとめ	122
第6章	結言	125
	謝辞	128

第1章 緒言

1.1 研究の背景

我が国において、高齢化した鋼構造物のストックは年々増加している。例えば、道路橋梁については、その多くが高度経済成長期に建設されたため、その供用年数は40年以上となっている。一方、鉄道橋梁については、初期の鉄道網の拡大が明治期から大正期に行なわれたため、道路橋梁に比して長く供用されている橋梁が数多く存在している。市川らが1980年代に鋼鉄道橋の実態について調査した結果¹⁾では、当時の段階で建設から50年以上経過した橋梁が半数以上を占めている。また、何らかの措置を必要とする橋梁も経年とともに増加しているなど、今後の橋梁の維持管理の重要性が当時から示されている。

既設橋梁の耐用年数は、かつて50年程度と一般に言われてきたが、現在では今後100年程度の供用を目標とするなど、既設橋梁を供用し続けることを前提とした維持管理が求められている^{2),3)}。この理由として、社会基盤施設に対する要求の多様化や環境保全対策などによる維持管理費用の増大や、我が国の少子高齢化・人口減少などによる財政悪化にともなう維持管理費の減少等が挙げられる。これらの背景から、既設の鋼構造物を安全かつ経済的に長期間供用するための効果的な長寿命化技術の確立が求められている。

鋼構造物の耐久性を低下させ、安全性に影響を及ぼす主要な変状として、腐食と疲労による損傷が挙げられる。疲労については、構造的観点から様々な検討が進められており、その知見に基づき、「鋼構造設計基準」(日本建築学会)や「鉄道構造物等設計標準改訂」(国土交通省鉄道局監修)など、国内外で各種設計基準類が整備・活用されている。一方、腐食については、腐食に寄与する環境因子が多岐に及ぶことや、鋼構造物に適用される防食方法の劣化機構が複雑で未解明な点が多いことなどのため、設計基準類が十分に整備されているとは言えない。

鋼構造物の防食手法には、表面被覆や電気防食、耐食性材料の適用などが挙げられ、これらの中でも一般的な手法は塗装である。例えば、日本防錆技術協会腐食コスト調査委員会では様々な産業分野を対象としてUhlig方式による生産・製造面から算出した腐食対策費を1974年と1997年に調査しており、腐食対策費の合計は23年間の間に1.5倍以上となっていること、いずれの調査年においても表面塗装が腐食対策費の過半数を占めていることなどが報告されている⁴⁾。これらを考慮すると、塗装による防食技術の重要性や、塗装鋼構造物を適切かつ効率的に維持管理する必要性が伺える。

近年、塗装鋼構造物で確認される腐食形態は、塗膜の劣化過程を踏まえて2種類に大別される。一つは塗膜の初期欠陥部から進行する鋼の腐食や、塗膜自体の

劣化などによる付着性や環境遮断性の低下に基づく腐食形態である。もう一つは、塗装前の鋼材表面が清浄ではない状態で塗装したために腐食の反応場が塗膜／鋼材間で生じることによって発生する腐食形態である。本論文では後者の腐食形態を塗膜下腐食と呼ぶ。

塗膜下腐食が発見されるのは、沿岸環境や高湿度環境などの腐食性の高い環境に長期間架設されており、複数回の塗替えを経た塗装鋼構造物であることが経験的に知られている。したがって、塗膜下腐食は部材が腐食した段階で塗替える際に、飛来塩や塵埃のほか、腐食生成物が残置された状態で塗装されることによるものと推定される。

なお、環境による腐食性の分類は様々な分野で定性的に区分されている。例えば「鋼構造物塗装設計施工指針」では、表 1-1 に示す ISO 9223 Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation で規定される腐食性カテゴリを参考に、腐食性カテゴリ C4 以上の環境を腐食性環境、それ以外の環境を一般環境としている⁵⁾。本研究においても上記の環境区分に基づき、ISO9223 で規定される腐食性カテゴリ C4 以上の環境を高腐食性環境と呼ぶこととする。

塗膜下腐食の腐食形態は局所的であることが多いが、過去に腐食した部位で腐食が再発することによる部材の板厚減少を伴うことや、塗替え後の比較的早い段階において発生し、大きな腐食度を示す傾向にあることなどから、問題視されることが多い。代表的な塗膜下腐食を図 1-1 に示す⁵⁾。

表 1-1 ISO 9223 に規定される腐食性カテゴリの概要

腐食性 カテゴリ	低炭素鋼の暴露 1 年後の腐食量 r_{corr}		イメージ
	質量減少量 ($g / m^2 \cdot a$)	厚み減少量 ($\mu m / a$)	
C1	$r_{corr} \leq 10$	$r_{corr} \leq 1.3$	塩分の影響を受けない乾燥地帯、結露のない室内など
C2	$10 < r_{corr} \leq 200$	$1.3 < r_{corr} \leq 25$	塩分の影響を受けない山間地帯、結露のある室内など
C3	$200 < r_{corr} \leq 400$	$25 < r_{corr} \leq 50$	塩分の影響を受けない田園・都市地帯、結露の多い室内など
C4	$400 < r_{corr} \leq 650$	$50 < r_{corr} \leq 80$	塩分の影響をうける海岸に近い都市、道路散布の凍結防止塩の影響を受ける局地、常時結露する室内など
C5	$650 < r_{corr} \leq 1500$	$80 < r_{corr} \leq 200$	海岸付近での海塩粒子などの飛来塩分量の多い地帯
CX	$1500 < r_{corr} \leq 5500$	$200 < r_{corr} \leq 700$	日本海側の海岸付近など、塩分の影響が非常に大きい地帯

備考：a: 平均太陽年を示す。



塗膜下腐食による塗膜膨れ箇所



塗膜下腐食による塗膜膨れ箇所



塗膜下腐食の進行により
部材が破断した箇所



塗膜下腐食の進行により
部材が欠損した箇所

図 1-1 代表的な塗膜下腐食事例

現在、塗膜下腐食の腐食機構は詳細に解明されておらず、適切な対策手法を講じる段階に至っていない。このため、塗膜下腐食による安全性低下が懸念される鋼構造物においては、手工具や動力工具を用いた一般的な素地調整方法よりも入念な素地調整が可能な手法が求められている。近年では、ブラスト工法が比較的簡便かつ経済的に腐食生成物をおおむね除去可能であるとして、ブラスト工法の採用を前提とした塗装仕様が規定される⁶⁾など、道路橋を中心に採用が進みつつある。

しかしながら、ブラスト工法の適用が広く普及するには至っていない。この理由の一つに、ブラスト工法を適用する場合には専用の設備を必要とすることなどにより、一般的な素地調整方法と比較して高額であることが挙げられる⁷⁾。そのため、腐食の進行性の高い塗膜下腐食を生じる塗装鋼構造物のみをブラスト工法の対象とするなどの維持管理計画を策定することが望ましい。しかしながら、現段階では塗膜下腐食の発生原因が未解明のため、対象構造物の選定手法を確立することが重要になる。また、塗替えの際のブラスト工法の優位性をライフサイクルコストの観点などから論じるため、素地調整程度と塗膜の耐久性との関係を定量的に把握することが必要とされる。

以上から、塗膜下腐食への対応が必要とされる塗装鋼構造物を適切に維持管理するためには、以下の項目について検討する必要があると考える。

- ・塗膜下腐食の腐食機構の解明
- ・腐食の進行性の高い塗膜下腐食を生じる塗装鋼構造物の選定手法の構築
- ・素地調整程度と塗膜の耐久性との定量的な関係の把握

1.2 既往の研究

1.2.1 鋼材の腐食挙動と腐食性評価に関する研究

屋外鋼構造物で生じる腐食は金属表面に水分が介在することで生じる湿食であり、反応場となる金属表面に酸素と水が存在する必要がある。また、腐食は電気化学反応であり、物質の酸化反応を生じる領域（アノード領域）と還元反応を生じる領域（カソード領域）が存在する。鋼の腐食反応の一例として、鋼表面に水滴が存在する場合の局部腐食の模式図を図 1-2 に示す。

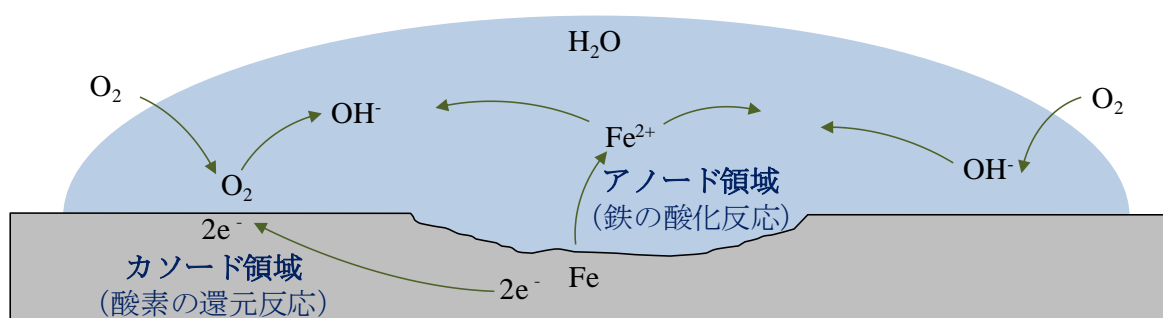


図 1-2 鋼の腐食の模式図

反応の過程では各領域の間を電子およびイオン物質が移動するため、腐食速度には電解質濃度が影響する。大気中に存在し、金属の腐食に影響するイオン性物質には、海塩や凍結防止剤などに由来する塩化物イオンや、硫黄酸化物由来の硫酸イオンなどが挙げられる⁸⁾。また、腐食は化学反応であることから、腐食速度は温度にも影響を受ける。

このように鋼材の腐食に寄与する環境因子は多岐にわたる。このため、一つの環境因子と鋼材の腐食程度の相関性は一定にとどまることが多い。鋼構造物に対する各因子の影響程度に関する測定および解析に関する検討としては、構造物の各部位に付着する飛来塩量の評価^{9),10)}や、部位別の濡れ時間の評価¹¹⁾⁻¹³⁾などが多数報告されている。ただし、各因子の影響程度が部位によって異なることを示す段階に留まり、鋼材の腐食速度の関係を定量的に評価するまでには至っていない。このような背景から、各種センサの腐食程度から大気腐食性を評価するモニタ

リング手法が様々な観点から検討されてきた。

大気の腐食性のモニタリング手法の初期的研究としては、1920年代に大気暴露した金属線や金属箔の電気抵抗と腐食量の関係を調査した報告がある^{14),15)}。また、長期間におよぶ屋外暴露調査から、金属の腐食には気象条件や大気中の汚染物質が寄与することが明らかにしている^{16),17)}。

1970年代以降は腐食量の測定装置の開発が進み、無抵抗電流計や電流積算計を用いた腐食時の微小電流の計測・積算を容易にした機器などが用いられるようになった¹⁸⁾⁻²¹⁾。近年では、ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) センサを用いた環境評価手法が多く報告されている。ACM センサとは主に2種類の異種金属を互いに絶縁した状態で配置した小型のセンサで、結露や降雨などにより金属同士が短絡すると、そのときに発生する腐食電流を計測することができる。この特性を利用し、篠原らは降雨の影響しない環境では ACM センサの測定結果から鉄の腐食速度を推定できることを提案した^{22),23)}。また、押川らは屋外での暴露試験を行ない^{24),25)}、降雨の有無に関わらず、同条件で暴露した鋼板の腐食速度を推定可能であることを示した。また、センサ表面における水膜の挙動に関する検討²⁶⁾や塩付着量および相対湿度を一定条件とした腐食挙動に関する検討²⁷⁾から、ACM センサを用いた鋼の腐食度の評価式を提案するなど、環境の腐食性を評価する手法としての有効性が示されている。近年では、構造物の部位別の腐食性評価に関する試みが行なわれている^{28),29)}。ただし、ACM センサと鋼の腐食現象は根本的に異なることから、鋼の腐食挙動、すなわち腐食生成物の保護作用によって鋼の腐食度が経時とともに低下する状態を定量的に評価した事例はまだ少ない。

ACM センサ以外に金属の腐食挙動をモニタリングする手法としては、インピーダンス法や水晶微小天秤 (QCM) 法などが挙げられる³⁰⁾。インピーダンス法は2種類の電極を同心円状に樹脂へ埋め込んだ形状のセンサを用い、交流インピーダンス測定により大気腐食性を評価するものである³¹⁾。ただし、ACM センサと同様、構造物の腐食挙動を定量的に評価するには至っていない。QCM 法は水晶振動子を用いてナノグラムオーダーの質量変化量を測定することにより対象金属の腐食挙動を評価するものであり³²⁾、近年では大気腐食挙動の評価事例が報告されている³³⁾。ただし、微量な腐食を評価する手法であり、長期間の腐食挙動を評価することは困難である。

このように、環境の腐食性を評価する手法は多数提案されているが、構造物自体の腐食度を定量的に評価する手法は少ないのが現状である。構造物の腐食度を評価する手法の一つに、ワッペン式暴露試験法が挙げられる^{34),35)}。これは構造物と同種の金属片 (以下、モニタリング鋼板) を構造物に設置し、その腐食度から構造物の腐食性を評価する手法である。モニタリング鋼板の設置方法や評価方法

によって構造物の腐食挙動と異なる結果が得られるなどの精度上の課題が挙げられるが、近年では、貝沼らがモニタリング鋼板の設置方法や、モニタリング鋼板の腐食度を平均腐食深さやさび厚み、さらには ACM センサの腐食電流値などから定量的に評価する方法を検討しており³⁶⁾⁻³⁸⁾、構造物を部位レベルで評価する手法が提案されている。しかしながら、モニタリング鋼板の腐食度と塗装鋼構造物の塗膜下腐食の腐食度の関係についてはこれまで検討されていない。

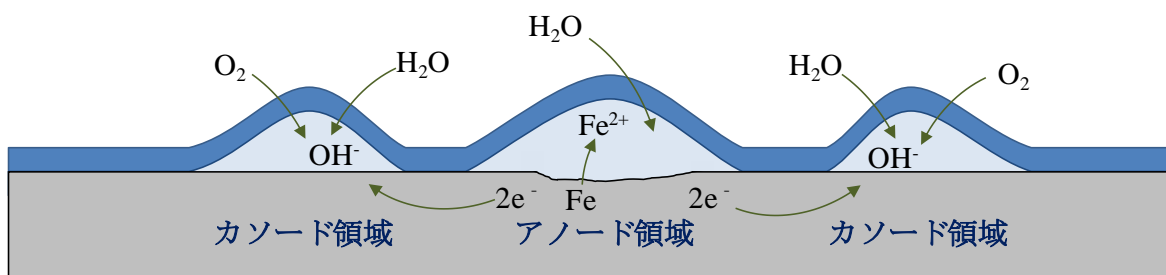
1.2.2 塗装による防食機構に関する研究

塗装による防食機構には、腐食の電気化学的理論を基本とした考えが古くから提案されている³⁹⁾。これは、金属表面に形成される電気化学的反応（腐食）に対して、電極となる金属表面を高抵抗体（塗膜）で被覆することで腐食電流を極めて小さくする（防食する）ことである。塗膜のイオン透過性については、塗膜のポリマー電離基が関与していることが推定されている⁴⁰⁾。

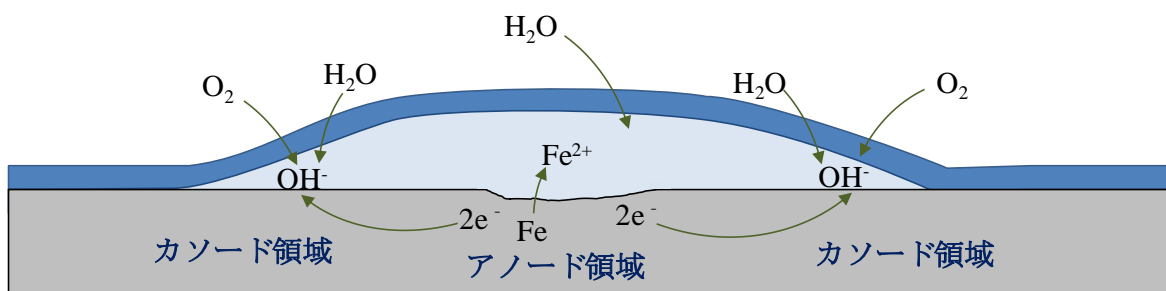
電気的特性以外の防食機構としては、環境因子の遮断性能や、各種顔料による防食性能の付与などが挙げられる。

塗膜は酸素や水分などの腐食に関わる環境因子の透過性を有しており、各因子の透過性に基づく防食機構が提案されている⁴¹⁾。このとき、各因子の透過性は塗料を構成する樹脂種によって異なることや、鋼表面で腐食反応が生じた場合の腐食挙動は塗膜／鋼材間の付着性に影響することが報告されている⁴²⁾。さらに、ここで取りうる腐食形態には、アノード領域およびカソード領域の範囲に応じて、微細な膨れが多数発生する形態（各々の膨れにアノード領域とカソード領域が分かれる場合）と、個々の膨れが成長する形態（単一の膨れにアノード領域とカソード領域が存在する場合）、さらにこれらの両方を取りうる形態（単一の膨れにアノード領域とカソード領域が存在するか、もしくはカソード領域のみの場合）に分類され、これらは塗膜の特性や環境などで分岐することが報告されている⁴³⁾。各腐食形態の模式図を図 1-3 に示す。

a) 微細な膨れが多数発生する形態



b) 個々の膨れが成長する腐食形態



c) a)および b)の両方を取りうる腐食形態

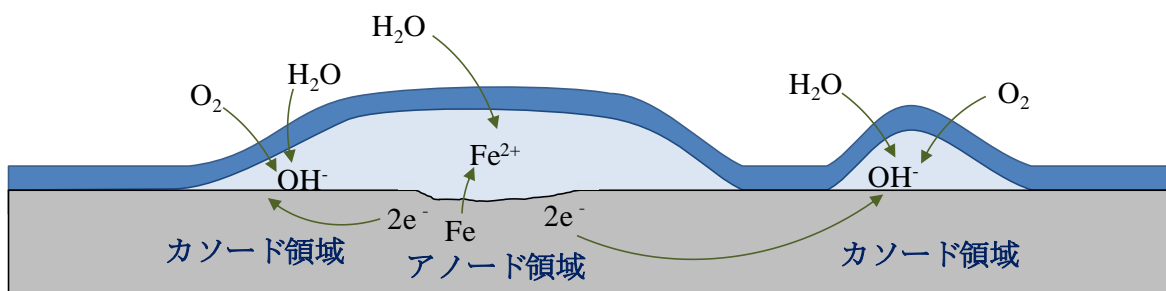


図 1-3 アノード／カソード領域の範囲が異なる腐食形態の模式図

防食性能に寄与する顔料としては、鋼表面を不動態化する機能を有する防食顔料⁴⁴⁾や、鋼との犠牲防食作用を想定した金属顔料^{45),46)}などが挙げられる。

以上の防食機構については、いずれも塗膜下で生じる腐食の初期過程について考察されたものが多い。これは、塗膜下での腐食が進行した場合、塗膜の防食機構に加えて、腐食生成物の反応機構も考慮する必要があるためだと推定される。したがって、経年により著しく成長した塗膜下腐食に関する塗膜の防食機構について、これまでに定量的に検討された事例は少ない。

一定量の腐食生成物が存在した状態で塗装した場合の防食機構に関する報告事例としては、日本鋼構造協会「さび面塗料小委員会報告」⁴⁷⁾があるが、提案され

た塗装仕様の耐久性の定性評価に留まっている。伊藤ら⁴⁸⁾や相賀ら⁴⁹⁾は、素地調整程度の異なる腐食鋼板に対して長期耐久性の期待できる塗装仕様を適用し、室内促進試験後の塗膜変状程度を定量的に比較・評価しているが、屋外における劣化挙動や残置された腐食生成物の組成については検討されていない。同種の検討を屋外暴露試験により実施した報告事例もある⁵⁰⁾⁻⁵²⁾が、いずれも腐食生成物の組成については検討されていないほか、人工的に導入した傷部からの塗膜変状程度から防食性を評価しており、健全な塗膜下で生じる腐食挙動については検討されていない。

黒沢らは、腐食生成物が残置された状態で塗装した場合の腐食挙動を定電流分極法から評価し、腐食生成物の還元反応などにより塗膜の付着性が早期に低下することを考察している⁵³⁾。田中は、類似した試験を行なった際の腐食生成物の性状評価を行ない、腐食生成物および鋼材から形成される電氣的閉回路による腐食反応が進行することや、含水水酸化鉄の還元反応によって脆弱な腐食生成物層が形成されることなどを報告している⁵⁴⁾。しかし、両者とも室内における評価であり、屋外における塗膜下の腐食挙動については検討されていない。

1.2.3 実構造物の塗膜耐久性に関する研究

我が国における鋼構造物の防食の始まりは明治時代初期からとされている。当時使用された塗料は輸入品の西洋ペイントであり、鉛系の防錆顔料を主体とした国産の防錆塗料は1880年代から製造された⁵⁵⁾。当時の塗料には天然油脂が用いられていたが、耐久性および品質の向上を目的に、様々な塗料が開発された。1960年代には本州四国連絡橋の建設を受け、海上橋などの腐食性の高い環境に対して長期耐久性を有する塗装仕様の検討が進められた⁵⁶⁾⁻⁵⁹⁾。その結果、従来塗料とは異なり2液混合型であることから作業性が低下したものの、高い環境遮断性や耐候性を有するエポキシ樹脂塗料やポリウレタン樹脂塗料などを用いた塗装仕様が提案され⁶⁰⁾、一般的な環境に架設された鋼構造物においても1990年代から広く適用されるようになった。

このように、鋼構造物に適用される塗料は塗装時期によって異なる。さらに、鋼構造物を塗替える際には、外観などから健全と判定された塗膜を活膜と称して残すことで防食に寄与させる考えが一般に採用されている。したがって、塗膜の耐久性評価が必要な長期間共用された構造物では、残存する活膜の履歴が複雑になる。複数種類の塗膜により構成されている活膜の断面を図1-4に示す。

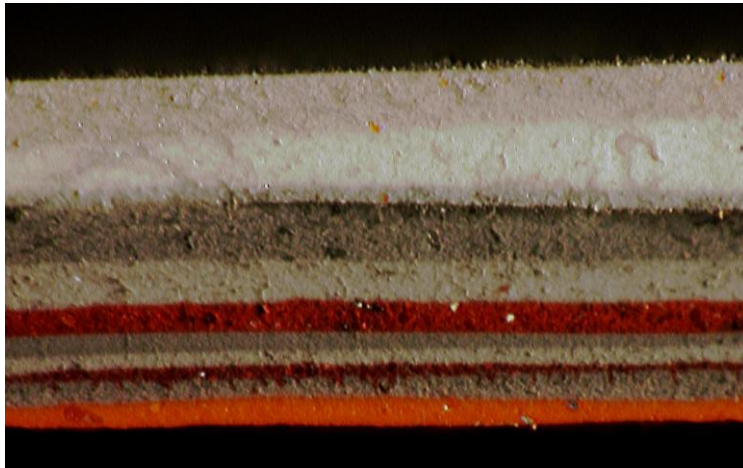


図 1-4 複数種類の塗膜が活膜として残存している塗膜の断面

これらの背景により，実構造物の腐食性に関する調査結果については，1.2.1 節での検討を含めて多く報告されているが，実構造物の塗膜の耐久性については，分野を問わず，定性的な評価に留まることが多い。すなわち，点さびや塗膜割れ，剥がれなどの腐食状態や塗膜変状の発生程度を 4～5 段階に区分し，外観上の塗膜の劣化状態として評価した調査結果が多く報告されている^{61)~64)}ものの，いずれの報告においても塗膜の特性や鋼素地の状態と塗膜劣化状態との関係について定量的に検討されていない。

また，塗膜のインピーダンスおよび吸水率を評価した報告⁶⁵⁾や，塗膜を採取して粘弾性などの機械的特性を評価した報告⁶⁶⁾があるが，経年での塗膜特性を比較するまでには至っていない。このように，現段階の技術レベルでは，実構造物における複合塗膜の耐久性を定量的に評価することが困難な状況にある。

1.2.4 塗替え塗装時の鋼素地調整に関する研究

1.2.2 節で述べた塗膜の防食機構において，鋼表面に油脂や塵埃などの汚染物質が付着していると，鋼表面の腐食速度が増大する。これは，汚染物質の介在によって鋼材に対する塗膜の付着性が低下するためとされている⁴¹⁾。また，塩などの電解質が付着した状態で塗装すると，浸透圧に伴う環境因子の透過速度の増大によって塗膜下腐食に伴う塗膜膨れが発生しやすくなるとの報告がある^{67),68)}。したがって，塗装前の素地調整は塗膜の防食性に大きく寄与すると言える。

素地調整方法には機械的処理法⁶⁹⁾と化学的処理法^{70),71)}が挙げられ，鋼構造物には主に機械的処理法が採用される。新設時の素地調整ではブラスト工法が用いられるのに対して，塗替え時には構造物の構造・形式や架設環境，騒音対策などを踏まえ，ディスクサンダーやグラインダーなどの動力工具を主体とした素地調整

が用いられることが多い。ブラスト工法を採用する場合には、上述した対象構造物の諸条件を踏まえてバキュームブラスト⁷²⁾や特殊研削材を用いたブラスト⁷³⁾、⁷⁴⁾などの乾式ブラスト工法のほかに、モイスターブラスト⁷⁵⁾やウォータージェットブラスト⁷⁶⁾などの湿式ブラスト工法が提案されているが、作業性や費用対効果などにおいて不明な点が多いことから、オープンプラストおよびバキュームブラストが一般に用いられている。

各種の素地調整方法と対象物の表面性状に関する検討として、表面あらさや塗膜の付着性などから評価した事例が多く報告されている⁷⁷⁾⁻⁸¹⁾。ただし、手工具や動力工具についてはその作業方法を明確に説明しにくく、定量的に評価した報告は少ない。一方、ブラスト工法では、腐食していない金属板に適切な表面あらさを得るための条件について、研削材の種類や投射量、投射速度をパラメータとした評価事例が報告されている⁸²⁾⁻⁸⁵⁾。しかしながら、腐食した鋼材の表面性状に対する定量的な評価についてはほとんど報告されていない。これは、対象とする鋼材の腐食程度によって素地調整の作業性や仕上がりが異なるためである。

以上の背景から、腐食面の清浄程度については、外観に基づく定性的な指標として除錆度が用いられることが多い。除錆度の規格についても、ISO で定められる ISO 8501-1 -Rust grades and preparation of uncoated steel substrates and steel substrates after overall removal of previous coatings - のほか、米国鋼構造物塗装協会の SSPC-SP、日本造船研究協会の SPSS などが挙げられる。一例として、ISO8501-1 に規定されている除錆度を表 1-2 に示す⁸⁶⁾。

表 1-2 ISO8501-1 に規定されている素地調整方法と除錆度による分類

素地調整方法	規格	処理方法	内容
ブラスト	Sa 1	軽いブラスト処理	拡大鏡なしで、表面には目に見える油、グリース、泥土、および弱く付着したミルスケール、さび、塗膜、異物がないこと。
	Sa 2	十分なブラスト処理	拡大鏡なしで、表面には目に見える油、グリース、泥土、および弱く付着したミルスケール、さび、塗膜、異物がないこと。残存したすべての汚れは固着したものであること。
	Sa 2 1/2	さらに十分なブラスト処理	拡大鏡なしで、表面には目に見える油、グリース、泥土、および弱く付着したミルスケール、さび、塗膜、異物がないこと。汚れの全ての残存している痕跡は、斑点あるいはすじ状の僅かな染みとしてのみ認められること。
	Sa 3	目視上洗浄な鋼板を得るためのブラスト処理	拡大鏡なしで、表面には目に見える油、グリース、泥土、および弱く付着したミルスケール、さび、塗膜、異物がないこと。表面は、均一な金属色をしていること。
手工具・動力工具	St 2	十分な手工具および動力工具仕上げ	拡大鏡なしで、表面には目に見える油、グリース、泥土、および弱く付着したミルスケール、さび、塗膜、異物がないこと。
	St 3	さらに十分な手工具および動力工具仕上げ	St 2と同様であるが、素地の金属光沢を呈するまで、より十分な処理を行うこと。

1.3 研究の目的

本研究では、塗装鋼構造物に生じる塗膜下腐食の腐食機構を解明し、高腐食性環境下における塗装鋼構造物の適切な防食手法を構築することを目的とする。

塗膜下腐食の腐食状態の把握は、実構造物を対象とした調査により行なった。塗膜下腐食の腐食挙動については、本研究で提案する手法により評価することとし、その手法の妥当性についても検証した。さらに、素地調整方法の観点から塗膜の耐久性を評価し、塗膜下腐食箇所に対する適切な素地調整方法を検討した。これらの結果に基づき、防食に関するライフサイクルコストの観点から適切な塗替え施工方法を検討し、高腐食性環境における鋼構造物を対象とした防食性能向上法を提案した。

1.4 本論文の構成

本論文は第1章から第6章までの6つの章で構成されている。本論文の構成として、研究フローを図1-5に示すとともに、各章の概要を以下に述べる。

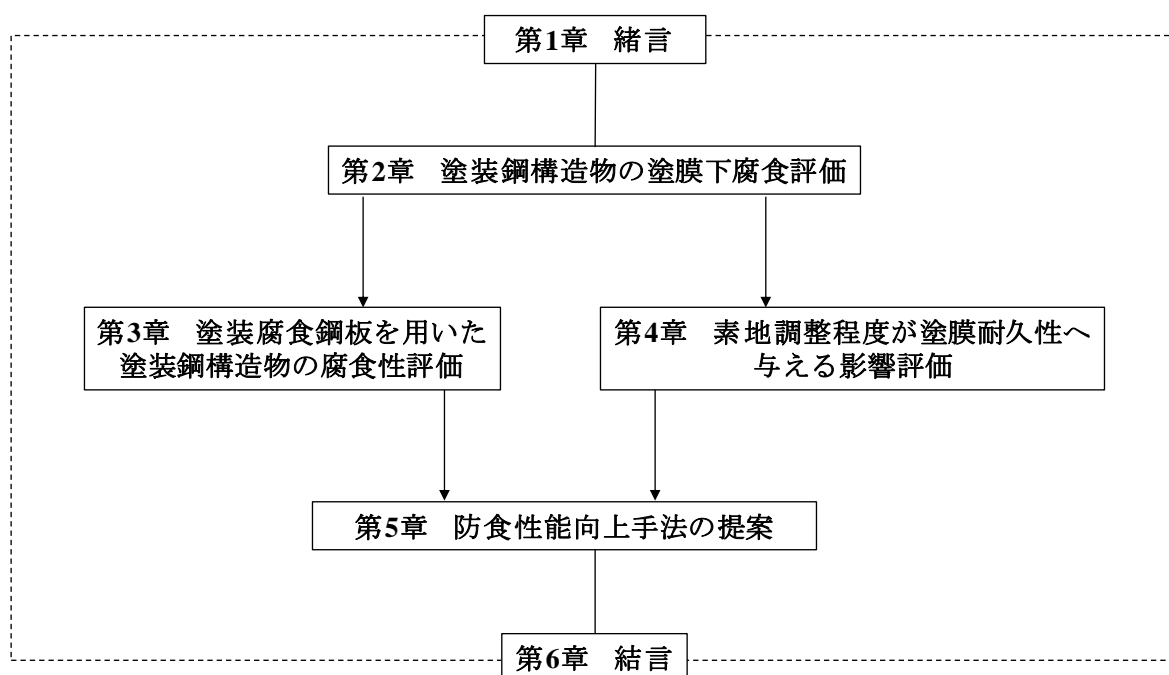


図 1-5 本論文の研究フロー

第1章では、本論文の研究の背景および目的について述べるとともに、本論文に関連する既往の研究として、鋼材の腐食現象や、鋼構造物をとりまく環境および鋼構造物の腐食性の評価手法に関する調査・研究結果のほか、構造物用塗装の防食特性や、塗装時の素地調整程度と塗膜特性に関する調査・研究結果などについて述べた。

第2章では、実際の鋼構造物に発生する塗膜下腐食の状態把握を目的として、高腐食性環境に架設された鋼鉄道橋の橋脚部位を対象とした塗膜劣化状態および腐食状態調査を実施した。この際、飛来塩や部材の面方向などに着目して腐食箇所の分布や腐食生成物などを分析し、塗膜下腐食と環境因子との関連や塗膜下腐食の腐食過程を明らかにした。

第3章では、高腐食性環境における塗装鋼構造物の腐食挙動を把握するため、塗膜下腐食の状態を模擬した塗装腐食鋼板を構造物の各部位に設置し、一定期間暴露した際の腐食程度を評価することで、構造物の設置箇所の塗膜腐食挙動を推定する手法を提案した。また、本手法の妥当性を検証するため、環境の異なる地域に塗装腐食鋼板と裸鋼板を屋外暴露することで、各々の腐食度を比較・検討した。さらに、塗装腐食鋼板と設置する部位の温度変化を測定して、塗装腐食鋼板の温度追随性を評価した。

第4章では、第3章で提案した手法により選定される、進行性の高い塗膜下腐食の発生が懸念される鋼構造物において、塗替え時の適切な素地調整程度を把握するための室内促進劣化試験を行なった。本試験では、一般的な素地調整手法である手工具、動力工具、ブラストを適用した腐食鋼板に対して、残置される腐食生成物の性状を分析した上で、塗装後の塗膜の変状箇所や変状過程などを評価することにより、腐食生成物の残存程度や成分などが塗膜の防食性能に及ぼす影響を明らかにした。

第5章では、高腐食性環境に架設された塗装鋼構造物の防食性能を向上するため、現状の素地調整手法として最も有効な手法と考えられるブラスト工法の性能を評価した。この評価に際して、まず、施工性や防食性と素地調整程度との関係を把握するための室内試験を行ない、費用対効果として妥当と考えられる素地調整程度を明らかにした。次に、塗替え施工におけるライフサイクルコストの観点から、ブラスト工法を用いた適切な施工条件を評価した。さらに、主なパラメータを素地調整方法、素地調整程度、適用する塗装仕様として、従来の施工条件とライフサイクルコストを比較した上で、高腐食性環境における鋼構造物を対象とした防食性能向上法を提案した。

第6章は、本研究で得られた知見を総括し、本論文の結論とした。

参考文献

- 1) 市川篤司：鋼鉄道橋の補修・補強の概要，橋梁と基礎，Vol.28, No.8, pp.17-21, 1994.
- 2) 井上嘉永，三宅政秀，加藤一志，南雲広幸：設計耐用期間 100 年間を目指した海上橋の耐久性設計と施工-中部国際空港連絡鉄道橋工事-, コンクリート工学, Vol.43, No.6, pp.36-43, 2005.
- 3) 岩田衛，山家京子：鋼構造建築物における環境負荷の評価，神奈川大学工学研究所所報，No.25, pp.36-42, 2002.
- 4) 腐食コスト調査委員会：わが国の腐食コスト，材料と環境，Vol.50, No.11, pp.490-512, 2001.
- 5) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，2013.
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，pp.II-116, 2014.
- 7) 西崎到，守屋進，浜村寿弘，黒川雅哲，後藤正承，岩見勉，斉藤誠，藤城正樹：鋼橋塗装のコスト削減方法に関する共同研究報告書，No.356, 2007.
- 8) 外川靖人：大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定(JIS Z2382 - 1998)の制定の要点，防錆管理，Vol.42, No.12, pp.434-437, 1998.
- 9) 山田文則，細山田得三：海岸構造物への飛来塩分の付着過程に関する研究，海岸工学論文集，Vol.51, No.2, pp.1126-1130, 2004.
- 10) 山田文則，細山田得三，下村匠：構造物表面に到達する飛来塩分量の数値解析による予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp.1041-1046, 2007.
- 11) 原修一，上村隆之，門長猛，幸英昭：山間部橋梁桁各部位の実測結露時間によるぬれ環境評価，材料と環境，Vol.55, No.2, pp.75-81, 2006.
- 12) 片山英樹，田原晃，小玉俊明：大気暴露された構造物模擬試験体各部位の腐食挙動，材料とプロセス，Vol.14, No.6, p1265, 2001.
- 13) 竹村誠洋：耐候性鋼の促進腐食試験法の現状と提言，腐食防食シンポジウム資料，Vol.132, 99.57-64, 2001.
- 14) E. Wilson : The corrosion products and mechanical properties of certain light aluminum alloys as affected by atmospheric exposure, Proceedings of the Physical Society of London, Vol.39, No.1, pp.15-25, 1926.
- 15) J. Hudson : The application of electrical resistance measurements to the study of the atmospheric corrosion of metals, Proceedings of the Physical Society of London, Vol.40, No.1, pp.107-131, 1927.
- 16) N. D. Tomashow : Atmospheric corrosion of metals, Theory of corrosion and Protection of Metals, pp367-398, 1966.

- 17) P. J. Sereda : Measurement of surface moisture, ASTM Bulletin, Vol.228, pp.53-55, 1958.
- 18) V. Kucera, E. Mattson : Electrochemical Technique for determination of the instantaneous rate of atmospheric corrosion, Corrosion in Natural Environment, Vol.558, pp.239-260, 1974.
- 19) F. Mansfeld, J. V. Kenkel : Electrochemical monitoring of atmospheric corrosion phenomena, Corrosion Science, Vol.16, pp.111-122, 1976.
- 20) S. E. Haagenrud : Atmospheric corrosion of zinc as measured by an electrochemical technique, Werkstoffe and Korrosion, Vol.31, pp.543-550, 1980.
- 21) 鈴木一郎, 升田博之, 久松敬弘 : 大気腐食モニターについて, 腐食防食協会春期学術講演大会講演予稿集, pp.146-147, 1977.
- 22) 竹本雅昭, 篠原正 : ACM 型腐食センサー自動計測システム, 腐食防食シンポジウム資料, Vol.59, pp.36-62, 1985.
- 23) 篠原正, 藤野陽三, 辻川茂男 : ACM 型腐食センサによる鋼橋のボックス構造内の腐食環境の検討, 腐食防食討論会講演集, Vol.37, pp.279-282, 1990.
- 24) 押川渡, 糸村昌祐, 篠原正, 辻川茂男 : 雨がかりのない条件下に暴露された炭素鋼の腐食速度と ACM センサ出力との関係, 材料と環境, Vol.51, No.9, pp.398-403, 2002.
- 25) 押川渡, 佐々木裕也, 篠原正 : 屋外環境下における ACM センサ出力と腐食速度の関係, 材料と環境討論会, Vol.52, pp.53-56, 2005.
- 26) 押川渡, 篠原正, 元田慎一 : 強電解質が吸水してできる水膜組成と水膜厚さの推定, 材料と環境, Vol.52, pp.293-298, 2003.
- 27) 押川渡, 山田学, 中野敦 : 恒湿試験における鋼材の腐食に及ぼす環境因子の影響, 材料と環境, Vol.59, pp.390-392, 2010.
- 28) 竹村誠洋, 藤田栄 : 腐食センサを用いた鋼構造物の部位別環境モニタリング, 防錆管理, Vol.10, pp.110-112, 2000.
- 29) 田中正明, 原直人, 柴崎剛, 藤野陽三 : 橋梁化粧板内部の環境腐食性評価と鋼桁防食性向上への提案:土木学会論文集 F, Vol.62, No.1, pp.67-78, 2006.
- 30) 篠原正 : 大気腐食の評価とモニタリング技術, 材料と環境, Vol.64, No.2, pp.26-33, 2015.
- 31) 片山英樹 : 電気化学インピーダンス法による屋外環境下での炭素鋼の腐食モニタリング, 腐食防食シンポジウム資料, Vol.149, pp.49-55, 2004.
- 32) 藤井和美 : 電気化学測定法の原理とその腐食・防食分野への応用例 VI QCM (水晶振動子マイクロバランス法) 法, 防錆管理, Vol.54, No.9, pp.341-349, 2010.

- 33) 藤井和美, 大橋健也, 橋本忠彦: マルチチャンネル水晶振動子微量天秤センサによる大気腐食環境定量化の試み, 材料と環境, Vol.56, No.10, pp.458-463, 2007.
- 34) 中山武典: 短期曝露試験による耐候性鋼材の新しい現地適用性評価方法, 腐食防食シンポジウム資料, Vol.160, pp.50-58, 2007.
- 35) 中野正則, 安波博道, 加納勇, 中島和俊: ワッペン式暴露試験結果を用いた腐食予測の試算例, 土木技術資料, Vol.57, No.8, pp.54-57, 2015.
- 36) 貝沼重信, 山本悠哉, 林秀幸, 山本悠哉, 伊藤義浩, 押川渡: 腐食生成物層の厚さを用いた無塗装普通鋼材の腐食深さとその経時性の評価方法, 材料と環境, Vol.61, No.12, pp.483-494, 2012.
- 37) 貝沼重信, J. H. Ahn, Y. S. Jeong, 宇都宮一浩: 空間統計学的手法を用いた大気腐食環境における無塗装普通鋼板の経時腐食表面性状の数値シミュレーション, 材料と環境, Vol.61, No.7, pp.283-290, 2012.
- 38) 貝沼重信, 山本悠哉, 林秀幸, 伊藤義浩, 押川渡: Fe/Ag 対 ACM 型腐食センサを用いた大気環境における無塗装普通鋼板の経時腐食深さの評価方法, 材料と環境, Vol.63, No.2, pp.50-57, 2014.
- 39) J. E. O. Mayne: Reseach, 6, 278, 1952.
- 40) C. C. Maitland, J. E. O. Mayne: Official Digest, 34, 972, 1962.
- 41) W. Funke: Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. , 17, 50, 1978.
- 42) S. J. Spadafora, H. Leidheiser: ibid. , 71, 276, 1988.
- 43) 佐藤靖: 塗装鋼の腐食と劣化, 塗装工学, Vol.22, No.8, pp.373-380, 2015.
- 44) 多記徹: 重金属フリー防食塗料の開発動向, 材料と環境, Vol.48, No.9, pp.557-562, 1999.
- 45) D. G. Mason, 松見信, 松永孝雄: ジンクリッチ塗料の特性と亜鉛末添加量, 防食技術, Vol.17, No.5, pp.223-225, 1968.
- 46) 水島健太郎: ジンクリッチペイントの基礎と最近の話題, 色材協会誌, Vol.88, No.2, pp.51-55, 2015.
- 47) 日本鋼構造協会: さび面塗料小委員会最終報告, JSSC レポート No.28, 1994.
- 48) 伊藤義人, 貝沼重信, 門田佳久: 素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.766, pp.291-307, 2004.
- 49) 相賀武英, 田内茂顕, 安藤克巳: 塗膜の三次元表面形状計測による防食性能評価, 材料と環境, Vol.54, No.3, pp.113-119, 2005.
- 50) 高橋定明, 守屋進: 塗膜の複合環境腐食促進試験条件の検討, 防錆管理, Vol.47, No.9, pp.343-349, 2003.

- 51) 堀田裕貴，森田さやか：塗料技術の新展開 カレントインタラプタ法による屋外暴露塗膜の耐久性評価，JETI，Vol.63，No.6，pp.81-84，2015.
- 52) 齊藤誠，守屋進，浜村寿弘，後藤宏明，内藤義巳，山本基弘，藤城正樹：重防食塗装系の性能評価試験，防錆管理，Vol.54，No.5，pp.169-183，2010.
- 53) 黒沢勝登志：定電流分極による塗装鋼の腐食挙動の研究，防食技術，Vol.35，No.5，pp.263-269，1986.
- 54) 田中誠：塗装さび鋼板のさび層構造と塗膜耐久性，防錆管理，Vol.34，No.11，pp.479-485，1990.
- 55) 田中誠：長期防錆型塗装の歴史と現状，Struct Paint，Vol.38，No.2，pp.18-25，2010.
- 56) 今井丈夫，住吉俊一，吉田真一，大川敏夫，橋本達知：海峡連絡鉄道橋の塗装，鉄道技術研究報告，No.422，1964.
- 57) 佐藤靖，吉田真一，橋本達知，今井丈夫，大川敏夫：本州四国連絡鉄道橋塗装試験，鉄道技術研究所速報，No.67-32，1967.
- 58) 佐藤靖，吉田真一，橋本達知，大川敏夫，今井丈夫，菅谷宏，滝永進：海洋環境の橋梁の防錆塗装，鉄道技術研究報告，No.771，1971.
- 59) 桐村勝也，橋本達知，佐藤靖，大川敏夫：海洋環境における防食塗装，鉄道技術研究報告，No.1070，1978.
- 60) 佐々木秀弥，橋本達知：鋼鉄道橋の長期防錆塗装，構造物設計資料，Vol.40，pp.22-25，1974.
- 61) 佐々木慎一，田口史雄，嶋田久俊：鋼橋塗装の塗膜劣化に関する調査，北海道開発土木研究所月報，No.594，pp.13-23，2002.
- 62) 田中誠：鉄道橋の腐食実態と対策，材料と環境，Vol.55，No.12，pp.526-531，2006.
- 63) 中村一平，西岡敬治，垣下賢，金本功：阪神高速道路における鋼構造物の点検，鋼構造論文集，Vol.4，No.15，1997.
- 64) 桐村勝也，江成孝文：鋼鉄道橋における塗膜の耐久性に関する一考察，色材協会誌，Vol.66，No.12，pp.730-735，1993.
- 65) 江成孝文，田中誠，町田洋人：25年経過の長期防錆型塗膜の調査結果，鉄構塗装技術討論会発表予稿集，Vol.30，pp.1-6，2002.
- 66) 田中誠，町田洋人，江成孝文，遠藤三郎，桐村勝也：多層の旧塗膜を持つ構造物の塗替え塗装，防錆管理，Vol.43，No.8，pp.293-298，1999.
- 67) 高垣たけし，高津和義，長谷川和夫：塩分濃度と塗膜の層間付着性について，防錆管理，Vol.28，No.9，pp.278-282，1984.

- 68) 富山禎仁, 西崎到, 現場塗装時の塩分が鋼道路橋の塗膜性能に及ぼす影響に関する検討, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.552-561, 2015.
- 69) 青木茂: ディスクサンダー仕上げとブラスト処理, 防錆管理, Vol.47, No.9, pp.356-360, 2003.
- 70) 小端高行, 佐藤正康: 熔融亜鉛めつき摩擦接合面へのりん酸塩処理の適用に関する研究, 鋼構造論文集, Vol.5, No.18, pp. 49-59, 1998.
- 71) 若原幸蔵: 塗膜はく離剤, 実務表面技術, Vol.30, No.5, pp. 213-219, 1983.
- 72) 千葉和則: バキュームブラスト工法 (ブラスト処理の重要性和バキュームブラスト工法の技術説明), 配管技術, Vol.53, No.2, pp.52-61, 2011.
- 73) G. Spur, E. Uhlmann, F. Elbing : Dry-ice blasting for cleaning process optimization and application, Wear, Vol.233/235, pp.402-411, 1999.
- 74) SNM アジア, 現地施工に最適な乾式サンドブラスト工法「スポンジブラスト」について, 塗装と塗料, No.652, pp.31-37, 2003.
- 75) 守屋進: 現場素地調整方法の検討, 鋼橋塗装, Vol.27, No.3, pp.3-7, 1999.
- 76) 園家啓嗣, 関直孝, 中村正信: ウォータージェットを用いたセラミックス溶射皮膜のはく離除去技術の評価, 日本溶射学会誌, Vol.50, No.4, pp.176-181, 2013.
- 77) 佐藤靖: 有機被覆による防食, 防食技術, Vol.27, No.7, pp.356-366, 1978.
- 78) N. L. THOMAS : The protective action of coatings on rusty steel, J. prot Coat Linings, Vol.6, No.12, pp.-63-71, 1989.
- 79) P. Chung Seo, K. Ki Hong, O. Ho Young, S. Chil Seok, B. Kwang Ki, P. Jin Hwan : Evaluation of various power tooling methods for surface treatment of protective coating, Pap Corros, pp.19-27, 2005.
- 80) 後藤宏明, 守屋進, 内藤義巳, 山本基弘, 藤城正樹, 斎藤誠: 耐候性鋼材の塗装による補修方法の検討, 材料と環境, Vol.59, No.1, pp.10-17, 2010.
- 81) 今井篤実, 山本哲也, 麻生稔彦: 耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施に関する一考察, Vol.68, No.2 pp.347-355, 2012.
- 82) やぶ野孝宏: ショットブラスティングによる変形加工, 塑性加工春季講演会講演論文集, pp.305-308, 1982.
- 83) 佐藤靖: ブラスト表面粗さと塗膜の関係, 実務表面技術, Vol.31, No.7, pp318-323, 1984.
- 84) 窪堀俊文, 山本祐也, 乾保之, 生田稔郎: ブラスト加工に関する研究 - 試験片温度がブラスト加工に及ぼす影響 -, 溶射, Vol.42, No.1, pp.1-5, 2005.
- 85) 窪堀俊文, 倉本健司, 乾保之, 森本純司: ブラスト材の耐久性に関する研究, 高温学会誌, Vol.35, No.6, pp.308-313, 2009.

86) 岩田恭一:ショットブラスト法による表面調整方法, 塗装技術, Vol.43, No.3,
pp.55-58, 2004.

第2章 高腐食性環境における鋼構造物の塗膜劣化と腐食度の調査

鋼構造物を取り巻く環境条件を完全に再現した腐食促進試験方法は、現状では確立されていない。このため、塗膜下腐食による塗膜劣化状況や腐食状況を把握するためには、実構造物の調査が必須となる。本章では、日本海沿岸に架設された鋼鉄道橋を対象に、部位別の塗膜の劣化状態および腐食状態を評価し、環境因子との関連について考察した。また、腐食生成物の成分分析や侵食度に関する分析を行ない、塗膜下腐食の腐食過程を推定した。さらに、第1章で述べたように、経年した実構造物では塗装履歴が複雑な場合があるため、対象構造物の塗装履歴を把握するための現地調査および文献調査を実施した。

2.1 対象構造物

調査した塗装鋼構造物は、1911年3月に架設された旧余部橋梁である。当該橋梁は2010年7月に撤去されており、約100年程度使用された。使用当時の外観写真を図2-1に示す。当該橋梁の全長は約310mであり、22連の上路プレートガーダと11基のトレッスル橋脚部から成る。両端以外の橋脚高さは約40mである。当該橋梁は日本海の海岸近傍に架設され、離岸距離は数十～100m程度である。そのため、海水由来の飛来塩分の影響を強く受けることから部材の腐食が著しく、過去に塗替え塗装や部材交換が頻繁に行われた¹⁾。このため、橋脚部の二次部材（斜材、水平材、レーシングバー等）は全て交換されたが、主桁および橋脚の主構部は、架設当初の部材のまま最後まで使用された。主構部の外観を図2-2に示す。



図 2-1 対象橋梁の概要（海側が北方向）



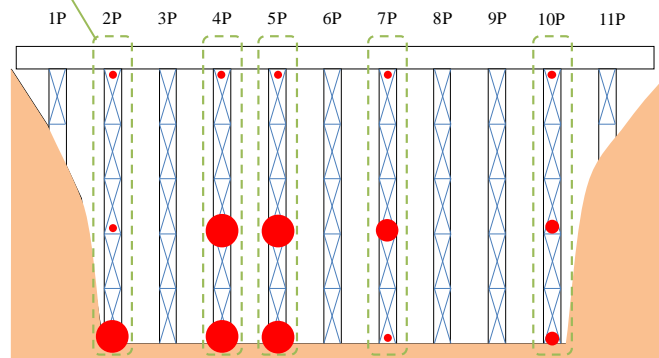
橋脚の外観

主構部の拡大写真

図 2-2 主構部の外観

当該橋梁は海岸に近接した大型構造物であり、腐食因子の影響が高さ方向および水平方向によって大きく異なると考えられる。過去に当該橋梁の架設環境を評価した事例があり、このときには1989年度から1994年度までの約5年間に渡り、橋脚部位において暴露試験片の腐食減量測定およびガーゼ法による飛来塩分量測定が行なわれた²⁾。暴露試験片にはJIS G 3101「一般構造用圧延鋼板」に規定される冷間圧延鋼板（SS400、寸法100×150×10mm）が用いられ、2,4,5,7号および10号橋脚の上部、中間部、下部（いずれも海側）に約5.7年設置し、設置前と回収後の質量差から腐食減量を測定した。飛来塩分測定は、JIS Z 2381「大気暴露試験方法通則」のガーゼ法に準拠し、橋脚の上部および下部で実施した。各橋脚における暴露試験片の腐食減量測定結果と、4号橋脚で実施した飛来塩分量測定結果を図2-3に示す。2,4,5号橋脚の下部では暴露試験片が著しく腐食した一方で、橋脚上部や7,10号橋脚の一部では田園などの一般環境に匹敵する腐食減量であるなど、部位によって腐食程度が大きく異なることが確認されている。また、飛来塩分は季節変動が激しく、上部と下部で飛来塩分量が異なった。4年間の平均値では上部が約70mg/(m²・day)、下部で約170mg/(m²・day)となり、高度が増すにつれて飛来塩分量が小さくなる傾向にあることが確認されている。なお、橋脚によって腐食環境が異なる要因としては、橋梁付近に点在する小規模の水産加工工場と民家の他に国道178号線が存在していることから、海風の遮蔽程度が場所により異なることや、海岸の地形が橋梁の起点側と終点側で異なるため各橋脚に飛来する塩分量に違いが生じていることなどが挙げられる。

調査対象部材



備考：表中の赤丸は，次の腐食減量を示す．

●…50mg/(dm²·day)以上， ●…30mg/(dm²·day)， ●…10mg/(dm²·day)， ●…5mg/(dm²·day)

図 2-3 当該橋梁のマイクロ環境評価

当該橋梁の橋脚部位における塗装履歴を表 2-1 に示す¹⁾．架設から 1950 年代頃までは鉛丹さび止め塗料と油性系調合ペイントによる塗装仕様，1960 年代から 1970 年代では鉛系さび止め塗料とフタル酸樹脂塗料による塗装仕様（鉄道橋用塗装系の旧塗装系 B に該当）が用いられており，3 年程度の短い周期で塗替えられていた．1971 年頃には塩化ゴム塗料を用いた塗装系が採用され，塗装周期は 4～5 年程度になった．1981 年には変性エポキシ樹脂系塗料を用いた塗装系（鉄道橋用塗装系の塗装系 G に該当）が採用され，さらに 1990 年代には上塗り塗料を厚膜型ポリウレタン樹脂塗料とした塗装系（鉄道橋用塗装系の塗装系 T に該当）によって 7～8 年周期で塗替えられた．このように，架設当初からの部材は 10 数回の塗替え塗装が実施された．また，当時の施工関係者から，各橋脚については 1980 年代に替ケレン-1（素地調整程度の呼称で，劣化塗膜および腐食箇所除去により鋼面露出面積が 70%以上となる）で素地調整した後に全面塗替えが 2 回程度実施されたことを確認しており，廃用された時点では全面塗替え後の塗替え塗膜のみが存在すると考えられる．塗装系 G および塗装系 T の概要を表 2-2 に示す．

表 2-1 当該橋梁の橋脚主構部の塗装履歴（1950年代～2000年代）

西暦	1960	1970	1980	1990	2000	
橋脚 番号	1P	▽ ▼		◇ ▲ ◆	◎	
	2P	▽ ▼ □	■ □ ◆	◇ ◆ ◇	○ ◎	◎
	3P	▽ ▼ □	■ □	◇ ◆ ▲	○ ● ◎	◎
	4P	▽ ▼ □	■ □ ◆	◇ ◆ ◇ ▲ ▲	○ ◎	◎
	5P	▽ ▼ □	□ ◆	◇ ◆ ◇ ▲ ▲	○ ◎	◎
	6P	▽ ▼ □	■ □ ◆	◇ ◆ ◇ ▲ ▲	○ ● ◎	◎
	7P	▽ ▼ □	■ □ ◆	◇ ◆ ◆ ◇	○ ◎	◎
	8P	▽ ▼ ▼ ▼	□ □	◇ ◆ ▲ ◇	◎ ◎	◎
	9P	▽ ▼ ▼ ▼	□ ■	◇ ◆ ▲ ◇	◎ ◎	◎
	10P	▽ ▼ □	◆	◇ ◆ ▲	○ ◎	◎ ◎
	11P	▽ ▼		◇ ▲ ○	◎ ◎	◎

備考：表中の記号は次の塗装仕様を示す。
 ▽, ▼…鉛丹さび止め塗料と油性系調合ペイントによる塗装仕様（▽は全面塗装, ▼は塗膜劣化部の部分塗装）
 □, ■…鉛丹さび止め塗料と長油性フタル酸樹脂塗料による塗装系（□は全面塗装, ■は塗膜劣化部の部分塗装）
 ◇, ◆…塩化ゴム系塗料の塗装系（◇は全面塗装, ◆は塗膜劣化部の部分塗装）, ▲…タールエポキシ樹脂系塗料の部分塗装
 ○, ●…厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料（塗装系 G-7）の塗装系（○は全面塗装, ●は塗膜劣化部の部分塗装）
 ◎…厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料+厚膜型ポリウレタン樹脂塗料（塗装系 T-7）の全面塗装

表 2-2 塗装系 G および塗装系 T の概要

工程	塗装系 G		塗装系 T	
	塗料名	塗布量 (g/m ²)	塗料名	塗布量 (g/m ²)
1層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
2層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
3層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
4層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料上塗	200	厚膜型ポリウレタン樹脂系塗料上塗	150

調査部位を図 2-4 に示す。調査部位は、全橋脚の中でも離岸距離が最も小さく飛来塩分の影響が大きいと想定される 3号橋脚の 4本の主構部とし、設置位置に応じてそれぞれ「北東」、「北西」、「南東」、「南西」と称する。なお、主構部に二次部材として残存するタイプレートおよび添接板は、交換時期が不明のため調査対象外とした。

当該橋梁は撤去時に溶断され、全ての主構部は高さ方向に 5等分された。以後、溶断された主構を地上に近い方から順番に 1～5段目と呼ぶこととする。各主構部の調査対象箇所は、タイプレート取付け面および各段の添接部を除いた箇所とし、図 2-4 に示すように、タイプレート取付け側を外面 A、その他の面を外面 B～外面 Dとした。このとき、架設当時における各主構部の面方向はそれぞれ異なる方向に設置されていた。各主構部の面方向を整理した結果を表 2-3 に示す。

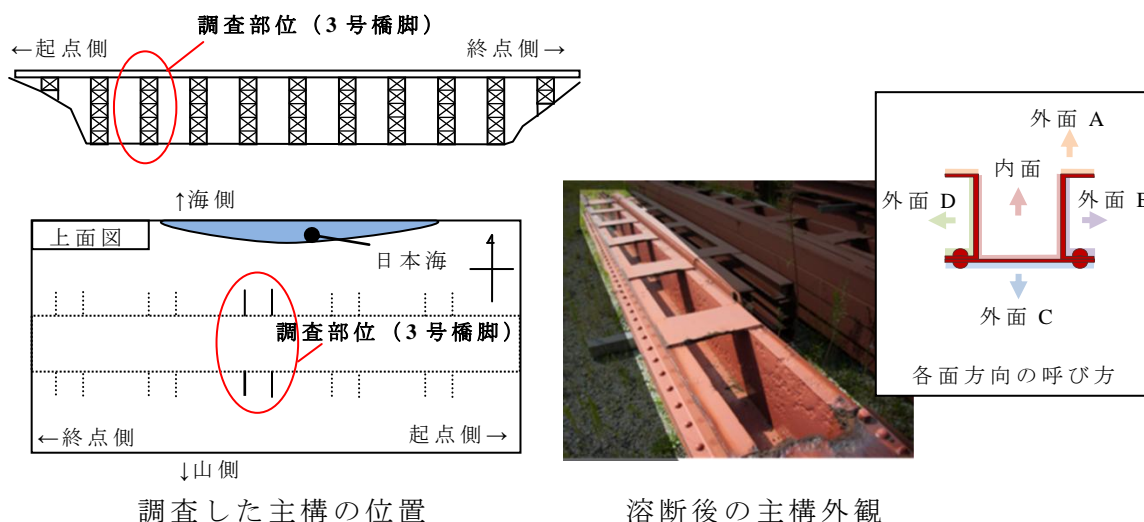


図 2-4 調査部位概要

表 2-3 各主構部における面方向の方角

主構部の位置	面	方角	主構部の位置	面	方角
	外面 A	南		外面 A	北
北東または	外面 B	東	南東または	外面 B	西
北西	外面 C	西	南西	外面 C	東
	外面 D	北		外面 D	南

備考：面方向は、図 2-4 の主構外観に示す通りである。

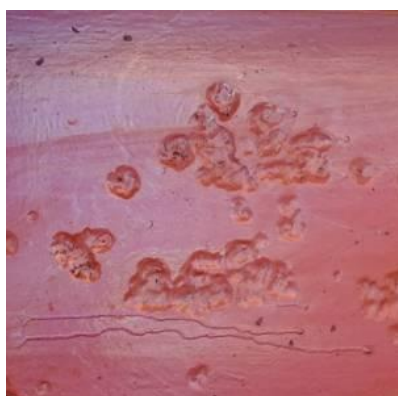
3号橋脚主構部で見られた代表的な腐食状態を図 2-5 に示す。部材のエッジ部およびリベット部を中心に、塗膜下腐食によるものと考えられる塗膜膨れや、塗膜割れに伴い腐食生成物が露出している。部材の平坦部分においても、部分的にはあるが同様の塗膜変状が生じている。また、過去に著しい腐食が生じて板厚が減少したと考えられる凹部状の箇所も存在している。



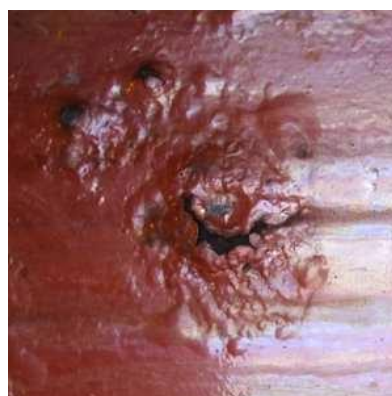
図 2-5 3号橋脚主構部の外観

当該橋梁に近年適用された塗替え用の塗装系 G および塗装系 T は、エポキシ樹脂系塗料を主体とした長期耐久性の期待できる塗装系である。類似の塗装系を新設時に適用された鋼鉄道橋では、当該橋梁と同程度の腐食性環境においても 30 年以上に渡り鋼材を防食した事例がある³⁾。このため、当該橋梁で確認された塗膜変状は、過去に腐食した箇所ですでに十分に腐食生成物を除去できずに塗装され、塗膜下で腐食が進行することで顕在化したと推定される。ここでは腐食を生じた箇所や凹部状の箇所等について、次に示す 3 種類に分類した。

- (a) 健全箇所：板厚の減少や塗膜割れ、膨れなどの変状が見られず、過去に腐食を生じていないと想定される部位。
- (b) 変状箇所①（図 2-6(a)）：過去に局所的な腐食を生じて板厚が部分的に減少してくぼみを形成しているが、塗替え時に腐食生成物が十分に除去されたと想定され、外観上では塗膜膨れや塗膜割れなどの変状が確認されず、塗膜下腐食がほとんど進行していないと判断した状態。
- (c) 変状箇所②（図 2-6(b)）：塗膜膨れが生じており、塗膜下腐食が進行していると判断した状態。または塗膜割れによって腐食生成物が露出し、明らかに鋼材に腐食が生じていると確認された状態。



(a) 変状箇所①の外観



(b) 変状箇所②の外観

図 2-6 変状箇所①と変状箇所②の外観

2.2 調査方法

2.2.1 調査項目

高腐食性環境下に架設された塗装構造物の腐食状態を把握するため、塗膜断面調査、腐食生成物の性状分析、塗膜変状箇所①の面積率測定、塗膜変状箇所②の変状厚みと板厚減少量の測定を行なった。実施した各調査内容を以下に述べる。

(1) 塗膜断面調査

現存する塗膜の塗装履歴および塗膜下で生じる腐食の発生時期の推定を目的として、健全箇所および変状箇所②における塗膜厚測定と塗膜の断面観察を行った。

(2) 腐食生成物の性状分析

腐食箇所における腐食生成物の性状と塗膜の外観変状との関係を把握するため、変状箇所②について変状程度の異なる箇所を複数選定し、X線回折による腐食生成物の結晶成分の分析および、イオンクロマトグラフィーによる腐食生成物中の塩分量測定を行なった。

(3) 塗膜変状箇所②の変状厚みと板厚減少量の測定

腐食箇所における腐食生成物と部材の板厚減少量の関係を把握するため、変状箇所②を対象として、塗膜変状の厚みを測定した後に腐食生成物を除去し、板厚減少量の測定を行なった。

(4) 外観調査に基づく変状面積の測定

部材の面方向や高さ方向による塗膜状態の違いを評価するため、変状箇所①および変状箇所②の面積を測定し、面方向・高さ方向で区分した場合の表面積に対する各変状箇所①の面積率をそれぞれ算出した。

2.2.2 各項目の調査方法

(1) 塗膜断面調査

表 2-1 の塗装履歴より、3号橋脚主構部 4本の塗装履歴は同一と考えられる。そこで、調査対象部材を南東の主構部 1～5段目の外面 Dとした。

調査対象部材の健全箇所および変状箇所②において、カット式膜厚計を用いて塗膜断面を観察した。カット式膜厚計とは、切削刃で塗膜を一定角度にてすり鉢状に切削する機器である。また、電磁膜厚計を用いて切削した塗膜近傍の塗膜厚を 10点測定し、その平均値を算出した。カット式膜厚計で作製した塗膜断面を拡大観察し、各層の塗膜の色相および厚みから塗装履歴を推定した。また、腐食生成物が存在する位置から鋼材が腐食した年代を推定した。

(2) 腐食生成物の性状分析

調査対象には、塗膜変状程度の異なる箇所が比較的多く存在する 5段目の内面

を選定した。測定箇所は、健全箇所、変状箇所①および変状箇所②からそれぞれ選定した。ただし、変状箇所②については塗膜膨れが直径数 mm～数十 mm 程度で発生していたため、塗膜膨れの大きさを三段階に区分し、それぞれに対して 2 箇所ずつ選定した。選定した塗膜変状箇所の例を図 2-7 に示す。各箇所について、バンドソーを用いて部材が発熱しないように約 15mm×20mm の寸法で試料を切り出した（図 2-8）。なお、試料には塩化物イオン量測定用および断面分析用の 2 種類を作製した。

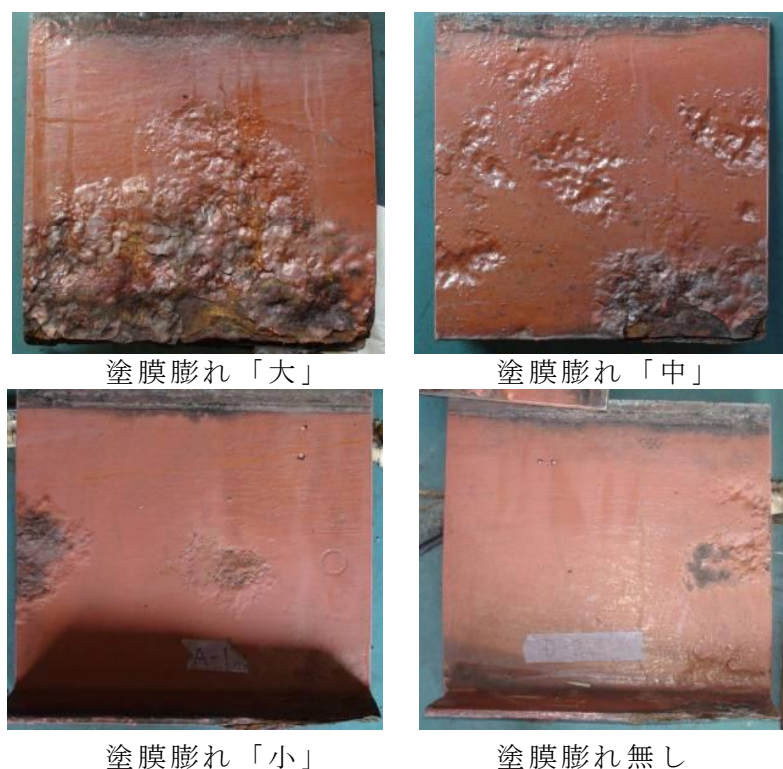


図 2-7 選定した塗膜膨れの例

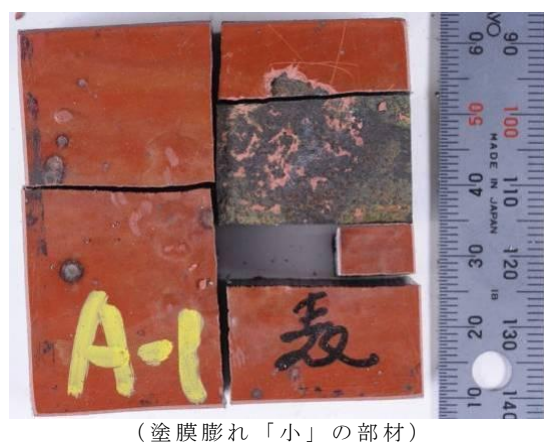


図 2-8 2 種類の試料の切出し例

断面分析用の試料は、不飽和ポリエステル樹脂に埋込みした後、試料の塗膜／鋼素地間の界面が観察できるように精密カッターで切断・研磨した。この試料断面について、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた拡大観察を行ない、さらに波長分散型 X 線分析である電子線マイクロアナライザ（EPMA）により腐食生成物中に存在する酸素と塩素の元素マッピングを実施した。

腐食生成物の性状分析の具体的な実施手順を以下に示す。

- 1) 動力工具を用いて測定対象面以外の塗膜を除去した後に、カッターナイフやスパチュラーなどの手工具を用いて測定対象面の塗膜および腐食生成物を採取した。
- 2) 採取した腐食生成物の一部を用いて X 線回折を行ない、腐食生成物を構成する結晶成分の割合について定性分析を行なった。このとき、採取した腐食生成物は乳鉢を用いて粒径が約 100 μm 以下になるように調整した。分析には縦型ゴニオメータの X 線回折装置を用い、管電流および電圧は、200mA および 50kV とした。対陰極には Cu を用い、発散スリットおよび散乱スリットは 0.5 度、受光スリットは 0.15mm とした。
- 3) 採取した塗膜および腐食生成物と、固着した腐食生成物が残存する試料のそれぞれについて、純水約 40ml と共にビーカーに投入し、水温 60 $^{\circ}\text{C}$ の超音波洗浄器内で 10 分間攪拌し、それぞれの試料中に含まれる塩化物イオンを抽出した。
- 4) イオンクロマトグラフィーを用いて、抽出液中の塩化物イオン量を測定し、各試料に含まれる塩分量を式 (2-1) から算出した。ここで、 x は試料中の塩分量 ($\text{g}_{\text{Cl}}/\text{m}^2$)、 Y は測定値 (ppm)、 L は抽出液の質量 (g)、 A は腐食生成物の採取箇所 の面積 (m^2) を示す。

$$x = \frac{Y \times 10^{-6} \times L}{A} \quad (2-1)$$

(3) 塗膜変状箇所の変状厚みと板厚減少量の測定

変状箇所②のうち、代表的なものを 2 箇所選定した。塗膜下腐食箇所の変状厚みおよび腐食深さの測定には CCD レーザ変位計（スポット径： $\phi 30\mu\text{m}$ 、分解能： $0.05\mu\text{m}$ ）を用い、ブラストによる腐食生成物および塗膜の除去前後の表面状態をそれぞれ計測することで、変状厚みおよび腐食深さを測定した。このとき、局部腐食箇所では腐食生成物の上に塗膜が存在するため、変状厚みには塗膜厚も含まれる。そこで、本試験の測定値から(1)塗膜断面調査で測定した塗膜厚を差し引いた値をさび厚みとした。

(4) 外観調査に基づく変状面積の測定

部材の面方向や高さ方向による塗膜状態の違いを評価するため、主構部 4 本の 1～5 段目において、変状箇所①および変状箇所②の面積を測定し、内面および外面 A～D の各面における面積率を算出した。

2.3 調査結果と考察

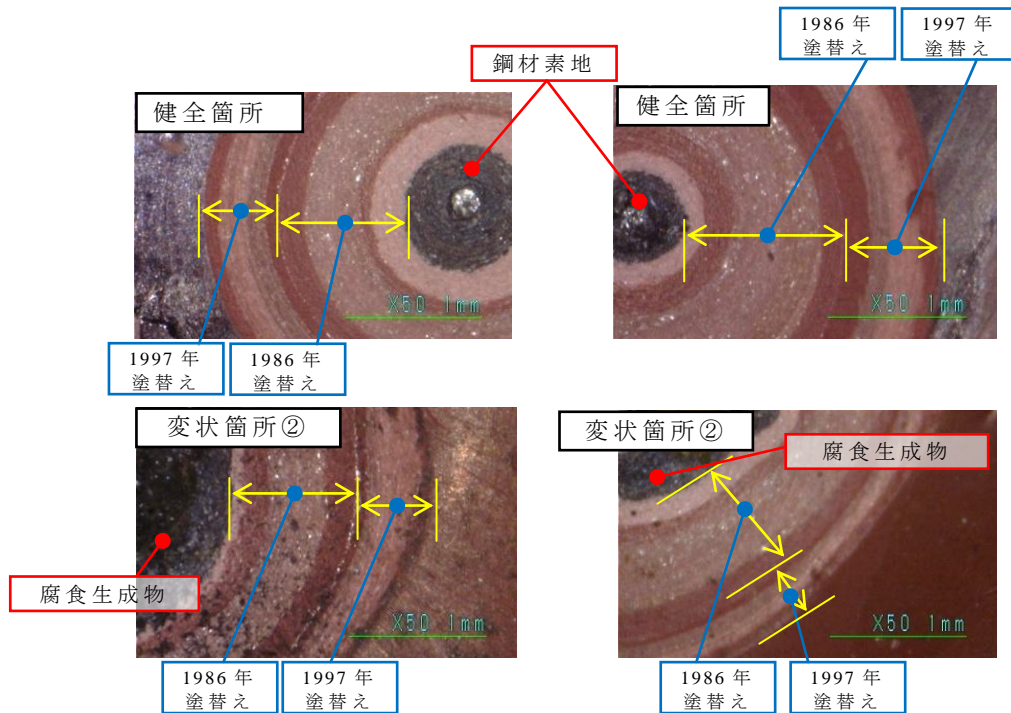
2.3.1 塗膜断面調査

南東方向の主構部における電磁式膜厚計での塗膜厚測定結果として、1～5 段目の左側面および 1 段目の内面における塗膜厚の 10 点平均測定値を表 2-4 に示す。これより、各段における塗膜厚の平均値は 430～507 μm の範囲に分布し、測定値のばらつきを考慮すると、その差異は小さいと考えられる。

表 2-4 南東方向の主構部の塗膜厚測定結果

段数	面方向	塗膜厚（10 点測定）（ μm ）	
		平均値	標準偏差
1 段目	外面 D	482	54
	内面	436	34
2 段目	外面 D	443	24
3 段目	外面 D	507	20
4 段目	外面 D	449	31
5 段目	外面 D	451	31

また、カット式膜厚計で観察した場合においても、塗装履歴に大きな違いは見られなかった。代表例として、1 段目の健全箇所および変状箇所②で実施した塗膜断面の拡大写真を図 2-9 に示す。塗膜の色相から塗膜層数は 8 層程度であり、塗装系 G および塗装系 T が過去 2 回分（1986 年、1997 年）の塗替え塗膜として残存していることが確認された。また、変状箇所②ではこれらの塗替え塗膜と鋼素地の間に腐食生成物が存在していた。したがって、1 段目の変状箇所②は 1986 年の塗替え時に素地調整した箇所のうち、十分に腐食生成物を除去できなかった部分であり、1997 年の塗替え時に素地調整させずに塗装系 T-7 が塗り重ねられたと考えられる。このことから、1997 年の時点では目立った塗膜変状は発生しておらず、その場合、当該箇所の塗膜膨れは 1997 年以降（1986 年の塗装から 11 年～25 年後）に顕著となったことが推定される。



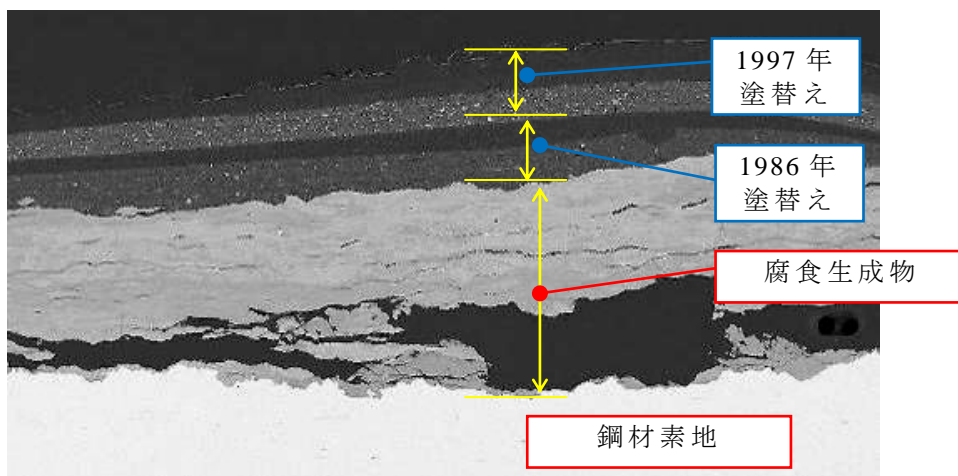
注：塗膜膨れ部は平滑な表面でないため、塗膜断面に歪みが生じている

図 2-9 健全部および変状箇所の塗膜断面写真

2.3.2 腐食生成物の性状および含有塩分量の分析

(1) 塗装鋼材の断面観察と元素分析

試料を SEM 観察した結果、調査対象とした全ての箇所で同一の構成であった。観察結果の一例として、塗膜膨れ「大」の試料断面を図 2-10 に示す。図 2-9 と同様に、過去 2 回分の塗替え塗膜が観察された。

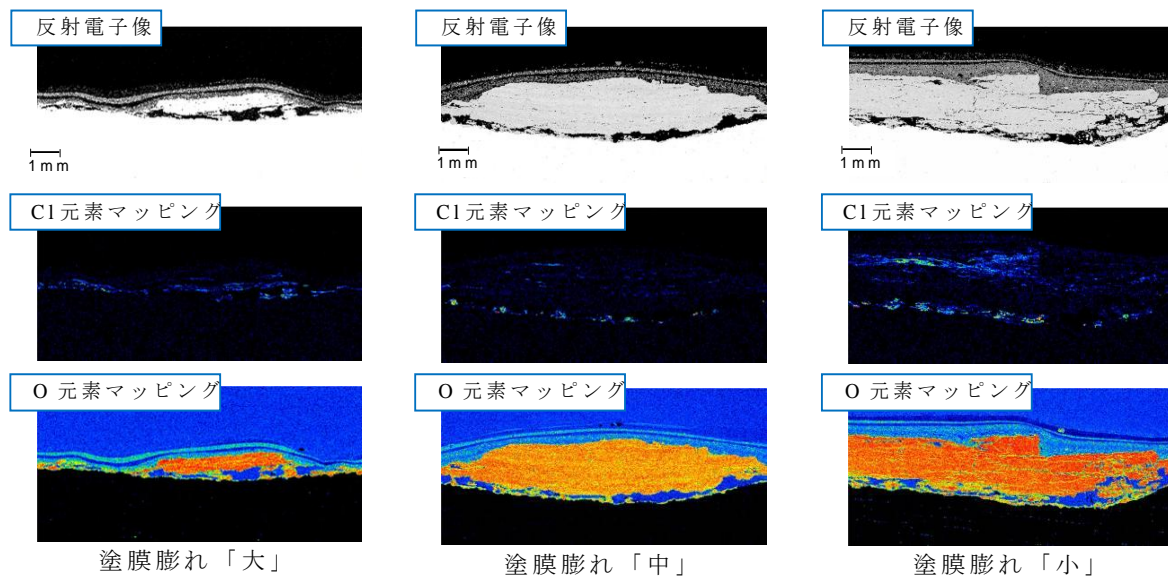


(塗膜ふくれ「大」の箇所)

図 2-10 断面観察用試料の SEM 写真

塗膜膨れ程度の異なる試料断面の反射電子像および元素定性分析結果（O（酸素）と Cl（塩素）の元素マッピング）を図 2-11 に示す。酸素の分布から、主に酸化鉄から構成される腐食生成物と鋼素地の界面の位置が明瞭となり、いずれの試料においても腐食生成物／鋼素地間に空隙が存在するとともに、Cl（塩素）が存在していることが確認された。また、塗膜膨れ「大」では塗膜／腐食生成物間の界面にも Cl が存在していた。健全な複合塗膜は塩化物イオンをほとんど透過しない⁴⁾ことを考慮すると、塗膜膨れの拡大とともに塗膜へ物理的な損傷が生じたことが推定される。

また、図 2-11 から腐食生成物の厚みを測定した結果、塗膜膨れ「小」では約 0.8mm、塗膜膨れ「中」および「大」では約 2.0mm であり、塗膜膨れが大きい場合には腐食生成物の厚みも大きくなる可能性が示唆された。



備考：マッピング写真における各元素の分布は、赤>橙>黄>緑>青の順に多く分布していることを示す。

図 2-11 塗膜膨れ程度の異なる試料断面の元素定性分析結果

(2) X線回折による腐食生成物の組成分析

各試料から採取した腐食生成物の X 線回折結果を表 2-5 に示す。塗膜膨れの程度に係わらず、腐食生成物の組成はマグネタイト (Fe_3O_4)、ゲーサイト ($\alpha\text{-FeOOH}$) およびレピドクロサイト ($\gamma\text{-FeOOH}$) を主成分としている。ただし、石毛らが実施した炭素鋼の 1 年間の屋外暴露試験結果^{5),6)}と比較すると、本試験結果ではマグネタイトの割合が大きく、ゲーサイトおよびレピドクロサイトの割合が少ない。この要因について過去の文献から考察した。三澤らは、屋外暴露した腐食鋼は経年によってマグネタイトおよびゲーサイトの増加とレピドクロサイトの減少が生

じ、腐食生成物の性状が変化することを報告している⁷⁾。田中らは、促進劣化試験に伴う塗膜下の腐食生成物の性状を分析した結果、試験時間の経過とともにマグネタイトが増加し、ゲーサイトが減少していることを報告している⁸⁾。以上の知見から、本試験結果が屋外暴露試験結果と異なった要因としては、経年による腐食生成物の性状変化や、塗膜下腐食による特有の現象などが挙げられる。

結晶成分の割合を比較すると、マグネタイト、ゲーサイト、レピドクロサイトの相対強度は各試料ともほぼ同一である。この結果から、いずれの試料においてもほぼ同程度の時期から塗膜下での腐食が進行したものと考えられる。また、上述したように複合塗膜が健全な状態では、塩化物イオンをほとんど透過しないことを考慮すると、塗膜膨れの大きさは、塗替え時の素地調整における腐食生成物の残存割合に影響されていることが考えられる。すなわち、腐食生成物の残存量が多く、塩化物イオン量が多く含まれる箇所ほど大きな塗膜膨れを生じたことが推定される。

なお、塗膜膨れ「中」では他の試料と比較してマグネタイトの強度が若干小さい。これは他の試料で検出されていないルチル(TiO_2)、タルク($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)、バライト(BaSO_4)が存在したためと考えられる。これらは塗料中の着色顔料や粘度調整剤などの顔料に用いられる成分であり、採取した腐食生成物中に塗膜片が混入し、X線回折結果に反映されたと考えられる。

表 2-5 X線回折試験結果（各組成の相対強度）

結晶成分の組成	対象とした塗膜膨れ程度						
	無し	「小」		「中」		「大」	
		n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
マグネタイト Fe_3O_4	+++	+++	+++	++	+++	+++	+++
ゲーサイト $\alpha\text{-FeOOH}$	++	++	++	++	++	++	+++
レピドクロサイト $\gamma\text{-FeOOH}$	+	+	-	+	+	+	+
ヘマタイト $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	-	-	-	++	-	++	-
ルチル TiO_2	-	-	+	++	-	+	-
タルク $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-	-	-	++	-	+	-
バライト BaSO_4	-	-	-	+	-	+	-

備考：表中の記号は相対強度を示したものであり、存在比の高い順に+++ > ++ > + > -（検出下限以下）とした。

各試料のイオンクロマトグラフィー結果を表 2-6 に示す。表中には、採取した腐食生成物および固着した腐食生成物に含まれる塩化物イオン量と、それらを総合した全ての腐食生成物中に含まれる塩分量（塩化ナトリウム換算）の測定結果を示す。これより、塩化物イオンは固着した腐食生成物の方に多く存在する傾向にある。また、塗膜膨れ「大」では採取した腐食生成物にも多くの塩化物イオンが含まれている。これらの結果は、図 2-11 における塩化物イオンの分布と同様の傾向にある。また、健全箇所では塩化物イオンがほとんど存在しない一方で、変状箇所①および変状箇所②のような凹部状の箇所では塗膜膨れの有無に係わらず腐食生成物に約 0.7g/m^2 以上の塩分が含まれている。また、塗膜膨れの程度が大きくなるにつれて、腐食生成物に含まれる塩化物イオン量は増加する傾向にある。

表 2-6 イオンクロマトグラフィー測定結果

分析対象	塗膜膨れの程度	塩化物イオン量 (gCl/m^2)		全腐食生成物 中の塩分量 (g/m^2)
		採取した 腐食生成物	固着した 腐食生成物	
健全箇所	膨れ無し	-	0.01	0.02
変状箇所①	膨れ無し	0.23	0.17	0.66
変状箇所②	「小」	0.19	0.14	0.54
		0.20	0.36	0.92
	「中」	0.49	0.36	1.41
		0.18	0.48	1.10
	「大」	0.75	0.94	2.78
		1.55	1.08	4.33

ここで、各試料の腐食生成物に含まれる塩分量について考察するため、厳密には晒される環境条件は異なるが、過去に実施された耐候性鋼材の腐食生成物中の塩分測定結果との比較を行なった。過去の調査文献によると、日本海の海岸に 1 年間暴露した鋼板の腐食生成物に含まれる塩分量は約 3.0g/m^2 であり、海岸から数 km 離れた橋梁（架設から 9 年経過）の腐食生成物に含まれる塩分量は 1.1g/m^2 、海岸から 12km 離れた橋梁（架設から 11 年経過）の腐食生成物に含まれる塩分量は 0.5g/m^2 であった^{9), 10)}。この調査結果を考慮すると、塗膜膨れ「大」と判断した部位の塗膜下の腐食生成物には、海岸に 1 年間暴露した鋼板に匹敵する塩分が含まれていると言える。また、塗膜膨れが見られない場合であっても、以前に腐

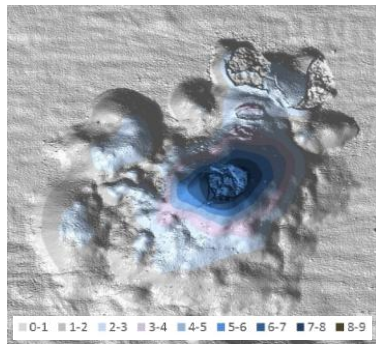
食して凹部を生じた箇所については、日本海から 12km 離れた耐候性鋼製橋梁と同程度の塩分を塗膜下の腐食生成物に含んでいると言える。

(3) 塗膜変状箇所の変状厚みと板厚減少量の測定

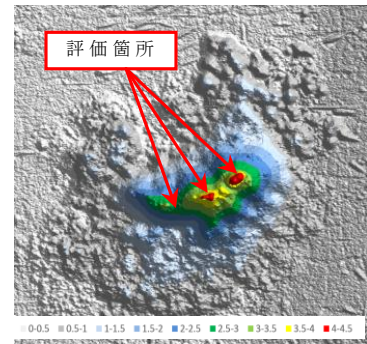
各試験体におけるブラスト前の外観写真とブラスト前後のレーザ変位計測定結果（コンター図）を図 2-12 に示す。これより、いずれの試験体もブラスト前には塗膜下腐食の進行によるものと考えられる複数の塗膜膨れや塗膜割れが確認されるほか、ブラスト後の鋼材表面にはピット状の板厚減少箇所が膨れの個数よりも明らかに多数存在している。また、最も大きな変状厚みが計測された箇所は、最も大きな腐食深さを計測した箇所とほぼ一致し、それらの箇所は塗膜下腐食箇所の中心付近である。



試験体①における
変状箇所の外観

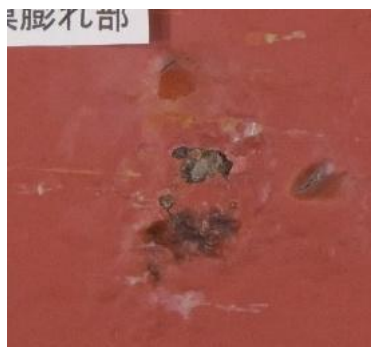


ブラスト前の変状厚み

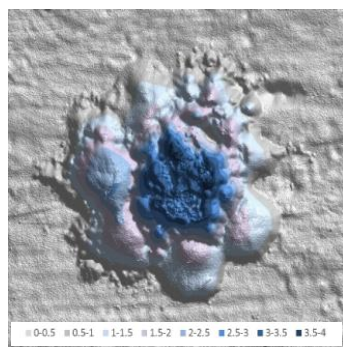


ブラスト後の腐食深さ

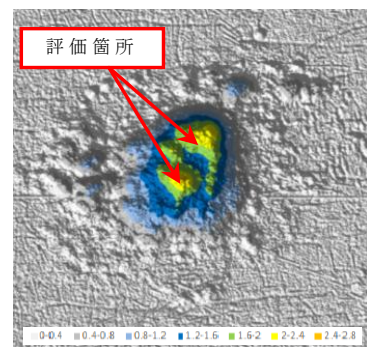
レーザ変位計を用いたコンター図



試験体②における
変状箇所の外観



ブラスト前の変状厚み



ブラスト後の腐食深さ

レーザ変位計を用いたコンター図

図 2-12 腐食鋼材の変状厚みと腐食深さの関係

次に，レーザ変位計による測定結果に基づき，腐食深さが比較的大きな箇所において「さび厚さ = 変状厚み + 腐食深さ) - 塗膜厚」とした場合のさび厚さと腐食深さとの関係性を評価した．評価箇所は図 2-12 に示すように，試験体①から 3 箇所，試験体②から 2 箇所を抽出した．さび厚さと腐食深さには，図 2-13 に示すように，線形の相関性がある．

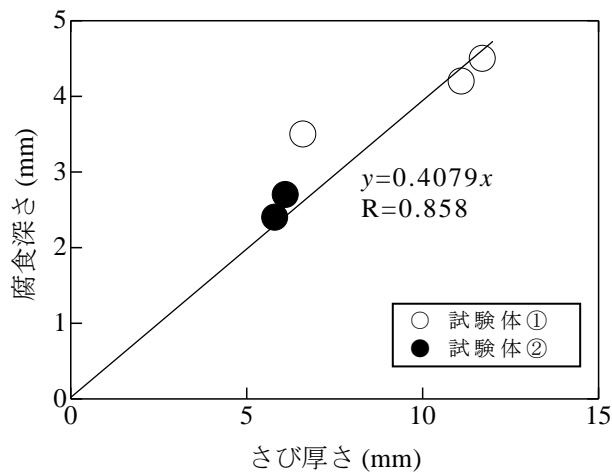
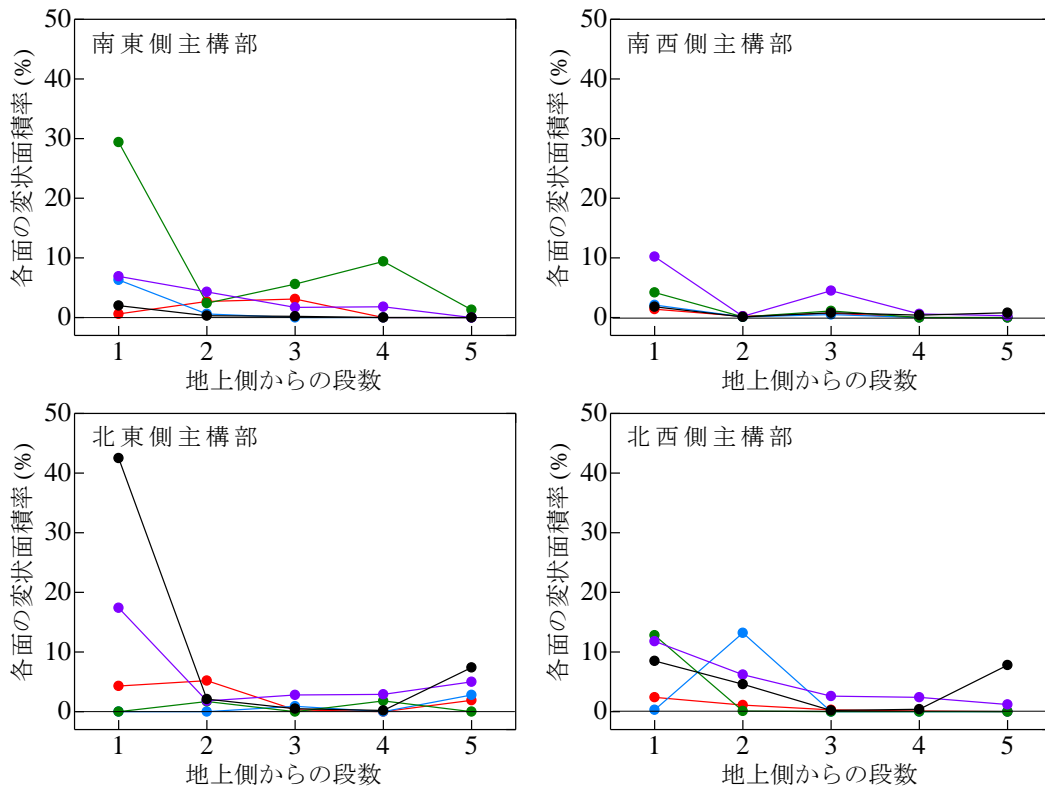


図 2-13 さび厚さと腐食深さの関係

(4) 外観調査に基づく変状面積の測定

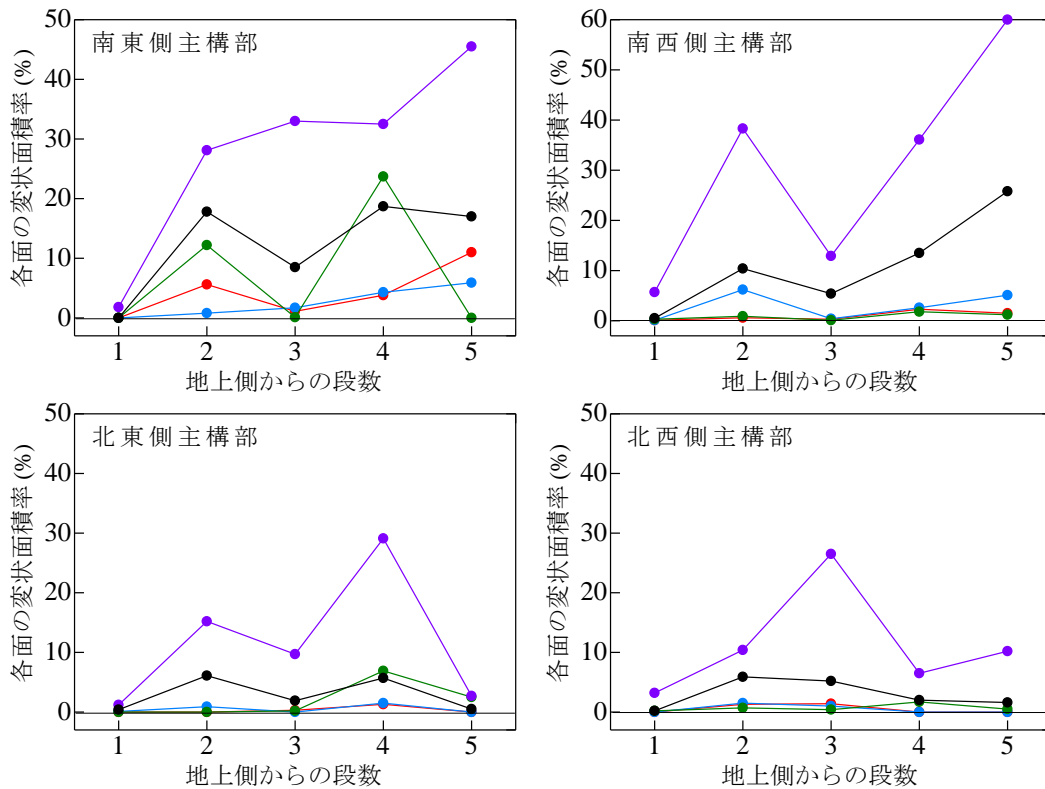
各部位における変状箇所①および変状箇所②の面積率を図 2-14 および図 2-15 示す．この結果から，いかに示す知見が得られた．

- (a) 1 段目は，他の段と比較して変状箇所①の面積率が大きく，変状箇所②の面積率が非常に小さい傾向にある．
- (b) 変状箇所①の面積率は，1 段目を除いて 10%以下となる傾向にある．面方向や高さ方向で比較した場合，面積率の大きな違いは見られない．
- (c) 変状箇所②の面積率を高さ方向で比較すると，一部の主構部で面積率の大きな増減を示すものの，全体としては高さの増加に伴って面積率が大きくなる傾向にある．
- (d) 変状箇所②の面積率を面方向で比較すると，上面および内面の変状面積率が大きい傾向にある．
- (e) 変状面積②の面積率を各主構部で比較すると，南東方向および南西方向の主構部の方が高い変状面積率を示す傾向にある．



備考：各線は次の通り． 紫...外面 A, 青...外面 B, 緑...外面 C, 赤...外面 D, 黒...内面

図 2-14 各主構部における変状箇所①の面積率



備考：各線は次の通り． 紫...外面 A, 青...外面 B, 緑...外面 C, 赤...外面 D, 黒...内面

図 2-15 各主構部における変状箇所②の面積率

(a)の結果は、過去には腐食しやすかったが現在では腐食しにくい状況に変化したのが1段目で顕著であることを示す。他の部位と比較して適用する塗装系は同一であることや、腐食性環境はむしろ厳しいことを考慮すると、塗替え時の素地調整程度が他の部位と比較して良好だったことが推定される。

(b)および(c)の結果は、図 2-3 から予想される結果（飛来塩の影響が1～3段目で大きいいため、変状箇所②の面積は低い段数ほど大きくなる）に反する。この要因として、一般的な腐食因子とされていた飛来塩分量や雨水等の水分だけでなく、塗替え時の素地調整程度などが腐食程度に大きな影響を与えることが挙げられる。ただし、その影響の詳細は本調査からは明らかにならなかったため、次章以降の検討で明らかとする。

(d)の結果が得られた原因の一つに、主構の内面は飛来塩が付着した際に雨洗効果が得られにくい構造であることが挙げられる。また、上面は他の面よりも平坦部分の面積が小さく、一般的に腐食しやすいとされる部材の端部や二次部材接合面が多く存在することから、他の面よりも変状面積率が大きくなったと考えられる。

(e)の結果については、塩の飛来方向が主構部の各面における腐食程度に影響した可能性があるため、主構部の面方向から考察した。各主構部の2～5段目について、各面の変状箇所②の面積率を平均化し、さらに表 2-3 を参考にして各面の方角を基準に整理した結果を表 2-7 に示す。総じて、南東および南西に位置する主構部の方が高い変状面積率を示すが、日本海側（北側）を向く外面 A および内面の変状面積率が著しく高い。一方で北東および南西の主構部の場合、北側を向く外面 C よりも外面 A および内面の変状面積率が最も大きい。これらの結果から、主構部の腐食要因のうち、部材形状などの構造に起因する要因が比較的大きな影響を及ぼしていることと、腐食しやすい構造部位が塩の飛来方向を向く場合には相乗効果によって腐食程度が著しくなることが推定される。

表 2-7 各面の変状面積率を方角別に区分した結果
(2～5段目における変状箇所②の面積率の平均値)

主構部の 設置位置	各面の向く方角				
	内面	外面 A	外面 C	外面 B	外面 D
南東方向	15.5	34.8	9.0	5.4	3.2
南西方向	13.8	36.8	1.0	1.2	3.6
北東方向	3.5	14.2	2.4	0.4	0.6
北西方向	3.7	13.4	0.8	0.7	0.6

備考：表中の色は各面の向いている方角を示す。

(青...北側，緑...南側，橙...東側，紫...西側)

2.4 まとめ

第2章では、実構造物に発生する塗膜下腐食の塗膜劣化状況や腐食状況を把握するため、日本海沿岸に架設された鋼鉄道橋を対象に、部位別の塗膜の劣化状態および腐食状態を評価し、環境因子との関連について考察した。また、腐食生成物の成分分析や侵食度に関する分析を行ない、塗膜下腐食の腐食過程を推定した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 主構部の塗装履歴は全て同一であり、過去2回分（1986年、1997年）の塗替え塗膜が残存している。塗膜下腐食は、1986年の塗替え時に腐食生成物が残置されたために発生したと推定される。さらに、1997年の塗替え以降で顕著な腐食膨れを生じ、現在の状態に至ったと推定される。
- (2) 膨れの大きさの異なる腐食変状箇所から採取した腐食生成物のX線回折結果に大きな違いは見られない。このことから、各変状箇所はいずれもほぼ同一の腐食過程を経たと考えられる。
- (3) 腐食変状箇所の腐食生成物に含まれる塩分量は、塗膜膨れの大きさに応じて塩分量が増大する傾向にある。このことから、腐食生成物中の塩分量は塗膜下腐食の腐食度に影響を与えると考えられる。
- (4) 主構部の各面における塗膜変状箇所の面積率は、雨洗効果が期待しにくい箇所や部材端部、接合面の多い箇所で腐食程度が大きくなる傾向にある。
- (5) その一方で、1段目は他の段よりも再腐食しにくい傾向にある。さらに、高度が増すにつれて腐食面積が増大するなど、飛来塩の影響だけでは説明できない変状傾向を示している。したがって、塗替え時の素地調整程度などが塗膜の変状面積率に大きく寄与すると考えられる。

参考文献

- 1) 足立誠, 中岡敬典: 余部橋梁の保守と支承部修繕, 日本鉄道施設協会誌, Vol.29, No.1, pp.24-28, 1991.
- 2) 神野嘉希, 石井勝美, 上出博保, 古寺貞夫, 田中誠: 橋梁部位別腐食状況把握のための暴露試験結果, 防錆管理, Vol.40, No.5, pp.146-150, 1996.
- 3) 坂本達朗, 園佳寿郎, 後藤宏明, 江成孝文, 橋本康樹, 山本基弘, 吉田陽一, 木村武久, 真田祐介: 実橋梁に適用した長期耐久型塗装系の追跡調査(その 1) 工場塗装から 35 年経過した塗膜の防食性評価, 鉄構塗装技術討論会発表予稿集, Vol.35, pp.1-6, 2012.
- 4) 江成孝文, 田中誠, 遠藤三郎, 坂本達朗: 海岸橋梁試験施工塗膜の 30 年間追跡調査結果, 鉄構塗装技術討論会予稿集, No.30, pp.1-6, 2007.
- 5) 石毛篤, 山口富三雄, 外川靖人, 田原晃, 篠原正: 模擬構造物を使用した大気暴露試験 (その 1)-暴露サイト, 暴露方位, 部位による腐食量の相違-, 材料と環境講演集, Vol.2005, pp.199-202, 2005.
- 6) 石毛篤, 山口富三雄, 外川靖人, 田原晃, 篠原正: 模擬構造物を使用した大気暴露試験 (その 2)- XRD 内部標準法を用いた暴露試験片に生成したさびの解析 -, 材料と環境講演集, Vol.2005, pp.199-202, 2005.
- 7) 三澤俊平: 鉄鋼腐食科学の温故知新, 材料と環境, Vol.50, No.12, pp.538-545, 2001.
- 8) 田中誠, 桐村勝也: さび面用塗料の耐久性, 鉄道総研報告, Vol.5, No.5, pp.12-19, 1991.
- 9) 田中誠: 塗装さび鋼板のさび層構造と塗膜耐久性, 防錆管理, Vol.34, No.11, pp.479-485, 1990.
- 10) 江成孝文, 田中誠, 町田洋人, 遠藤三郎: 耐侯性鋼材を使用した無塗装桁の補修塗装, 鉄構塗装技術討論会予稿集, No.22, pp.77-82, 1999.

第3章 高腐食性環境における塗装鋼構造物の腐食挙動

第2章から、高腐食性環境下における塗装鋼構造物で生じる塗膜下腐食には、過去に生じた腐食生成物が残置された状態で塗替えすることが大きく影響していることが示唆された。すなわち、古くから Funke や Mayer らが提案し、一般的に議論されている塗膜下腐食の腐食機構（図 1-3）のように、塗膜を通過した大気中の水分や酸素と鋼材との腐食反応だけでなく、黒沢や田中が報告したように、既に存在する腐食生成物を含めた電気化学的反応が塗膜下で進行して腐食が生じると考えられる^{1),2)}。

したがって、塗装鋼構造物における塗膜下腐食の腐食挙動を把握するためには、再腐食を生じる前の段階で塗膜下に存在する腐食生成物の性状や、塗膜下腐食の進行程度と環境因子の影響程度との関係などを評価する必要がある。環境因子の影響程度は鋼構造物の部材形状や面方向によって異なることから、構造物の局所的な腐食度（一定期間における腐食程度（腐食速度）を指す）や環境程度を評価した事例が複数報告されている³⁾⁻⁵⁾。これらの報告事例の一つに、小片の裸鋼板を設置し、その鋼板のさび厚や回収した鋼板の質量減少量から構造物の部位レベルの腐食深さやその経時性を評価する手法がある⁶⁾。この手法では、塗装鋼構造物において塗膜が劣化し腐食面が露出した場合における部位レベルの腐食度を評価することを主目的としていることから、塗膜下腐食の腐食度を評価するには塗装腐食鋼板を試験片として使用することが適切と考えられる。

そこで本研究では、塗装腐食鋼板を構造物の各部位に設置して一定期間暴露し、回収した塗装腐食鋼板に生じる塗膜下腐食領域（面積）を評価することによって構造物の設置箇所の塗膜腐食挙動を推定する手法を提案した。本章では、この手法の妥当性を検証するため、塗装腐食鋼板と裸鋼板の腐食度を評価するとともに、鋼板を設置した部材の温度追従性を評価した。また、塗装腐食鋼板を実構造物に設置し、面方向に対する腐食度を評価した。

3.1 腐食鋼板の作製

本章で検討する塗装腐食鋼板は、なるべく実構造物で生じる塗膜下腐食の状況を模擬したものである必要がある。また、本研究で提案する手法のように構造物の複数箇所に対して同一条件の塗装腐食鋼板を設置する場合、塗装前の各鋼板の腐食状態は同程度であることが望ましい。また、準備する腐食塗装鋼板の数量が多くなることから、腐食状態の再現性が求められる。そこで、本試験では室内での連続塩水噴霧によって腐食鋼板を作製した。このとき、腐食生成物の性状分析および腐食生成物に含まれる塩分量測定を行ない、適切な腐食鋼板の作製方法を

検討した。

3.1.1 試験片

試験鋼板には、JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」に規定される冷間圧延鋼板（SS400，両面サンドブラスト処理，寸法 150×70×3.2mm）を用いた。試験鋼板の片面のみを腐食させるため，エポキシ樹脂塗料で片面を塗り包んだ後に，JIS K 5600-7-1「塗料一般試験方法-第 7 部：塗膜の長期耐久性-第 1 節：耐中性塩水噴霧性」に準拠した連続中性塩水噴霧試験を行ない，塗装していない側の鋼面を腐食させた。塩水噴霧時間が鋼材の腐食程度に与える影響を評価するため，塩水噴霧時間は 48 時間から 840 時間とした。塩水（塩化ナトリウム水溶液）の濃度が高い場合，アノード領域とカソード領域が固定化されやすく腐食生成物がこぶ状の形態を示す傾向にあるなど，実構造物で散見される腐食状態を模擬できない。このため本腐食条件では，塩化ナトリウム水溶液の濃度を 0.01wt%または 0.05wt%とした。

本試験に用いた溶液噴霧試験機を図 3-1 に示す。槽内温度は $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，加湿器の温度は $47\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，噴霧用空気の圧力は $0.098\pm 0.002\text{MPa}$ ，塩水噴霧量は 80cm^2 に対して $1.0\sim 2.0\text{ml/h}$ とした。また，槽内に設置した鋼板に対して噴霧液の影響が一定ではない可能性を考慮し，24 時間毎に槽内に設置した試験片の位置を変えた。塩水噴霧が終了した後，腐食鋼板に対して蒸留水噴霧を 168 時間行なった。これは，腐食生成物の表面に付着する塩分を除くことと，腐食生成物／鋼材間での剥離を抑制するためである。蒸留水噴霧後の腐食鋼板は，室内（ $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）で 3 日間養生した。最後に，固着した腐食生成物のみを残存させるため，ワイヤブラシを用いてゆるく付着する腐食生成物を除去した。



図 3-1 溶液噴霧試験機の外観

3.1.2 腐食生成物の評価

(1) 腐食生成物の性状分析

腐食生成物の性状は、X線回折による腐食生成物の各種結晶性成分を定量分析することで評価した。このとき、内部標準試料として試料の30wt%のZnOを添加した。分析には縦型ゴニオメータのX線回折装置を用い、管電流および電圧は200mAおよび40kVとした。対陰極にはCuを用い、発散スリットおよび散乱スリットは0.33度、受光スリットは0.25mmとした。走査速度は毎分0.2度とした。

(2) 腐食生成物に含まれる塩分量測定

第2章の調査結果から得られたように、塩分が影響する環境において腐食した鋼材には腐食生成物/鋼材の界面に塩化物イオンが濃縮しやすい。この塩化物イオンの抽出は水洗程度では困難であり、酸溶解や、腐食鋼板を電解液に浸して電気化学的手法により塩化物イオンを抽出する手法が用いられることが多い⁷⁾。ここでは、以下に示す電気化学的手法を用いて、各種の素地調整を行なった腐食鋼板に存在する塩化ナトリウム量を測定した。採用した電気化学的手法の試験状況および概要を図3-2と図3-3に示す。

- 1) 0.1mol/lの硝酸カリウム水溶液に腐食鋼板を浸漬し、白金電極を正極、腐食鋼板を負極として、定電流電源による約1Aの電流を1時間印加した。これにより、腐食鋼板中の塩化物イオンを溶液中に溶出させた。
- 2) JIS K 0101「工業用水試験方法」の3.2.1チオシアン酸水銀(II)に規定される吸光光度法に準拠して、分取した溶液中の塩化物イオン量を測定し、塩化ナトリウム量に換算した。



図 3-2 試験状況

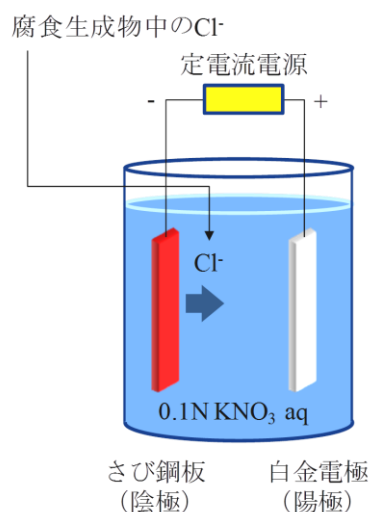


図 3-3 電気化学的手法の概要

3.1.3 試験結果と考察

ワイヤブラシ処理した腐食鋼板の外観を図 3-4 に示す。腐食生成物の残存部には、明るい色相の領域（以下、明色域とする）および暗い色相の領域（以下、暗色域とする）が存在している。さらに腐食生成物が概ね除去されて鋼素地が露出した領域が存在している。また、塩水噴霧時間が長い場合には鋼素地の露出領域と暗色域の割合が増える傾向にある。塩水濃度で比較した場合、外観上の大きな違いは見られない。

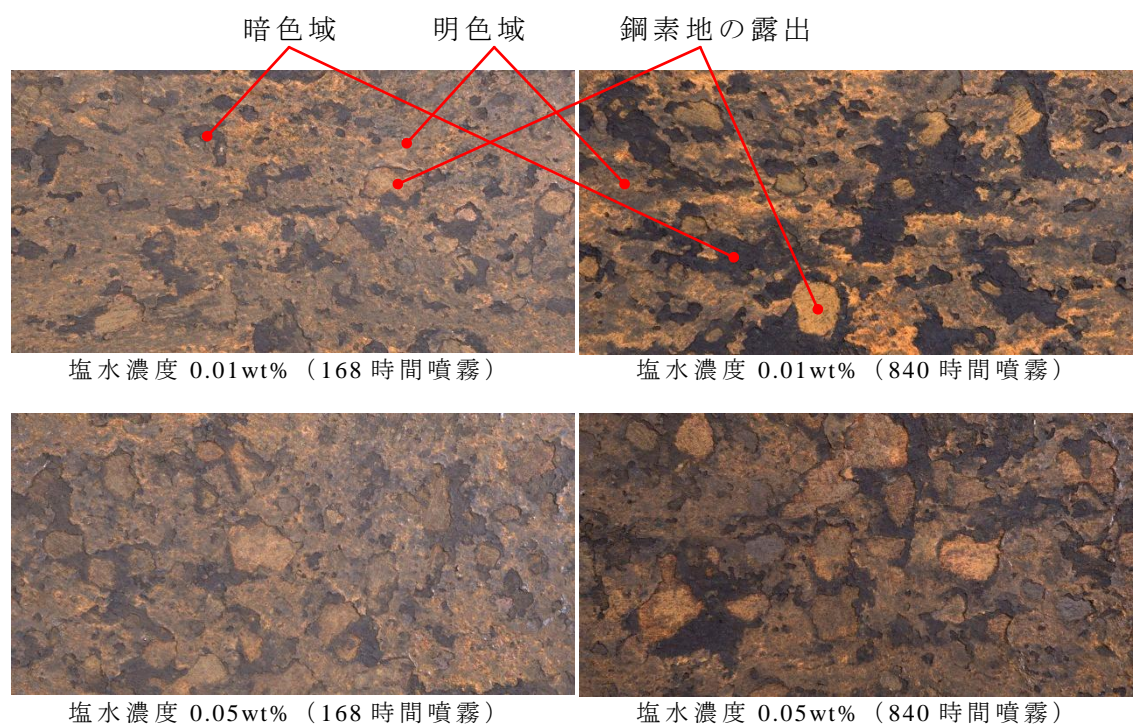


図 3-4 作製した腐食鋼板の外観（ワイヤブラシ処理後）

明色域および暗色域からそれぞれ採取した腐食生成物の X 線回折結果を表 3-1 に示す。いずれの領域においても、主な結晶成分は酸化鉄である含水水酸化鉄 (FeOOH) およびマグネタイト（四酸化三鉄, Fe_3O_4 ）である。一般に、大気腐食環境下で生成される含水水酸化鉄はゲーサイト ($\alpha\text{-FeOOH}$)、アカガナイト ($\beta\text{-FeOOH}$) およびレピドクロサイト ($\gamma\text{-FeOOH}$) であり、このうちアカガナイトは塩の影響しやすい環境で生成される⁸⁾。本試験結果では、ゲーサイトおよびレピドクロサイトについては全体的に明色域の方が大きい傾向にある。その一方で、塩の介在下で生成されるアカガナイトに着目すると、明色域ではほとんど存在しない。したがって、明色域と暗色域では色相だけでなく腐食生成物の組成が異なると言える。

アカガナイトの割合は塩水濃度 0.05wt% で作製した腐食鋼板の方が高い傾向にある。これより、塩水濃度と塩の介在程度は相間すると考えられる。また、塩水濃度 0.01wt% で作製した腐食鋼板の暗色域におけるアカガナイトの質量割合は、噴霧時間の経過と共に増加して 336 時間で極大となり、その後減少する傾向にある。塩化ナトリウムの存在下で鋼が腐食する場合、塩化物イオンはアノード領域へ移動する。これより、噴霧時間が 336 時間程度まではマクロセル腐食が支配的な腐食形態であり、明色域がカソード領域、暗色域がアノード領域であったことが推定される。一方で噴霧時間が 336 時間を越えた場合にはマイクロセル腐食が支配的な腐食形態となり、アノード領域の拡散に伴ってアカガナイトの割合が相対的に低下したと推定される。

表 3-1 各腐食鋼板の腐食生成物の割合 (%)

採取域	腐食生成物の種類	塩水濃度 0.01wt%				塩水濃度 0.05wt%			
		96h	168h	336h	504h	840h	168h	504h	840h
暗色域	α -FeOOH	2.8	1.6	1.9	1.9	1.6	2.9	1.1	2.6
	β -FeOOH	0.5	1.2	1.9	0.7	0.3	1.1	1.8	0.8
	γ -FeOOH	1.1	0.6	1.2	1.0	0.8	1.6	0.0	0.2
	Fe ₃ O ₄	23.6	29.6	20.4	23.6	20.3	21.0	21.8	27.7
	その他の成分 (非晶質含む)	71.1	65.8	73.4	71.7	74.7	73.3	74.0	68.7
明色域	α -FeOOH	4.4	3.2	2.9	2.0	2.7	3.3	2.7	5.2
	β -FeOOH	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	γ -FeOOH	1.4	1.3	2.0	1.8	2.6	1.4	1.3	3.1
	Fe ₃ O ₄	22.8	24.2	24.1	24.1	21.1	17.7	20.4	20.3
	その他の成分 (非晶質含む)	69.9	69.7	69.7	70.9	70.8	76.6	73.8	71.2

分析した全結晶成分の質量割合を図 3-5 に示す。塩水噴霧時間が増大すると、暗色域における質量比の合計は明色域よりも減少する傾向にある。このことから、異なる塩水噴霧時間で腐食鋼板を作製すると、暗色域の腐食生成物の構成は明色域と比較してより大きく変化すると推定される。

なお、第 2 章で示した塗装鋼構造物の腐食生成物の成分分析（表 2-5）では定量分析を実施していないものの、マグネタイトが最も多く存在し、次いでゲーサイト、レピドクロサイトの順に存在しており、本試験結果と比較すると大きな相

違は無い。これにより、塗装鋼構造物に生じる塗膜下腐食を模擬するにあたり、塩水噴霧により作製した腐食鋼板を使用することは妥当と考えられる。

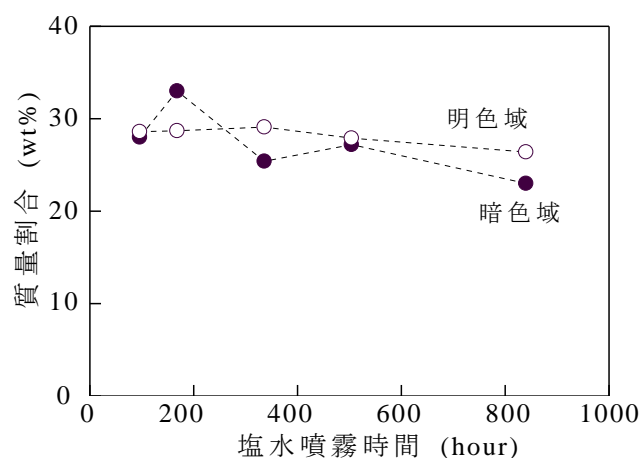


図 3-5 腐食生成物中の全結晶成分の質量割合

腐食生成物に含まれる塩分量を図 3-6 に示す。塩水噴霧時間の増大に伴って塩分量が増加するが、その増加程度に関して線形性は無く、徐々に塩分量の増加割合が低下している。この要因として、鋼材表面に堆積する腐食生成物の厚みが増大することで腐食因子の侵入を阻害したことが推定される。この結果から、室内促進試験により作製できる腐食鋼板の腐食生成物に含まれる塩分量は、約 3g/m^2 までの範囲で制御できると言える。

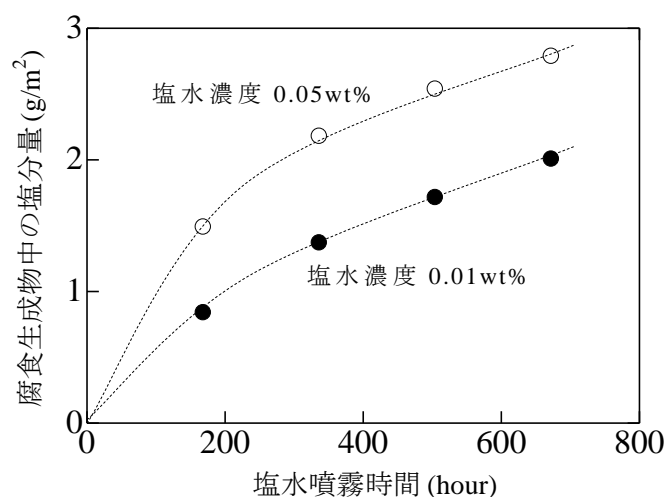


図 3-6 腐食鋼板中の塩分量

3.2 高腐食性環境における塗装鋼構造物の腐食挙動の評価

塗装腐食鋼板を用いた鋼構造物の腐食挙動の評価にあたり、塗装腐食鋼板の腐食度を把握するための各種評価を実施した。

3.2.1 試験項目

実施項目は塗装腐食鋼板の腐食度評価、鋼構造物に対する鋼板の温度追従性評価、塗装腐食鋼板を用いた塗装鋼橋の腐食度評価である。実施した項目の概要を以下に示す。

(1) 塗装腐食鋼板の腐食度評価

塗装腐食鋼板に生じる塗膜下での腐食は、基材（鋼）および腐食生成物の酸化・還元反応によるものである。これらの反応が生じるためには塗膜を通じて塗膜／基材間へ侵入する大気中の水分や酸素が必要であり、これは無塗装の鋼材が腐食する際の因子と同様である。ただし、腐食面が塗膜で覆われた状態でのこれらの因子の影響程度は、裸鋼板と異なることが予想される。本試験項目では塗装腐食鋼板の腐食度を把握するため、塗装腐食鋼板および裸鋼板を屋外暴露して両鋼板の腐食度を比較・評価した。

(2) 鋼構造物に対する鋼板の温度追従性評価

裸鋼板を用いた腐食環境評価法は、あくまで局所的な環境の評価を目的としている。したがって、裸鋼板と貼付けた部材の腐食度を比較しないことから、部材と鋼板の環境条件を一致させる必要は無い。一方、本研究では塗装腐食鋼板を用いて塗装鋼構造物の腐食度を評価することを目的としており、塗装鋼構造物と塗装腐食鋼板の環境条件をなるべく同一にする必要がある。特に、鋼板の貼付けには後の回収を考慮して一般に粘着テープ材料が用いられるが、塗膜に加えて粘着テープが鋼板／部材間に介在すると鋼板と部材との間に温度差を生じる可能性がある。

温度は鋼板表面の結露時間および腐食反応速度に影響するため、腐食鋼板と部材の温度が異なると、構造物の腐食度を腐食鋼板の腐食状況から推定することが困難となる。そこで本試験項目では、塗装鋼板および貼付け箇所の部材の表面温度を測定して面方向や日照条件の影響を評価した。

なお、腐食に影響する他の因子（酸素や飛来塩に代表される電解質など）については、熱伝導と直接関係しない、または評価対象物の面方向に依存せず、塗装腐食鋼板と部材との違いは大きくないと考えられる。そのため、本試験項目の検討から除外した。また、本試験では塗装腐食鋼板は用いず、ブラスト鋼板に塗装したものをを用いた。これは、腐食生成物の厚みは百 μm 程度であり、さらに塗装することで腐食生成物の影響をほとんど受けないと考えたためである。

(3) 塗装腐食鋼板を用いた塗装鋼橋の腐食度評価

塗装鋼橋の腐食度を評価するため、高腐食性環境下に架設された鉄道鋼橋および、腐食性の低い環境である都市部の模擬桁の複数部材を対象として、腐食塗装鋼板および裸鋼板を設置し、各部材の面方向に対する腐食度を評価した。

3.2.2 試験方法と評価方法

本試験で用いた小型鋼板の材質は全て JIS G 3101 に規定される冷間圧延鋼板（SS400，両面サンドブラスト処理）である。ただし、試験によって寸法や腐食程度、適用した塗装系が異なる。各試験項目で用いた塗装腐食鋼板および裸鋼板の概要を表 3-2 に示す。

表 3-2 各試験項目で用いた塗装腐食鋼板および裸鋼板の概要

試験項目	塗装腐食鋼板の腐食度評価	塗装腐食鋼板の温度追従性評価	塗装腐食鋼板を用いた塗装鋼橋の腐食度評価
共通 試験片寸法	150×70mm	150×70mm	75×70mm
試験片厚み	3.2mm	3.2mm, 6mm, 10mm	3.2mm
塗装腐食鋼板 腐食条件 ^注 (塩水濃度, 噴霧時間)	0.01wt% 168 時間 0.05wt% 168 時間	-	0.01wt% 168 時間 0.05wt% 168 時間
素地調整方法	ワイヤブラシ処理 カップワイヤ処理 ブラスト処理	-	ワイヤブラシ処理
塗装系	塗装系 B 相当 塗装系 T	塗装系 T	塗装系 B 相当 塗装系 T

注：塩水噴霧を終了した腐食鋼板は、腐食生成物の脱落の防止と腐食生成物の表面に付着する塩分を除去するため、蒸留水噴霧を 168 時間行なった後に室内(23±1℃)で 1 ヶ月以上養生した。

(1) 塗装腐食鋼板の腐食度評価

a) 試験片

試験片は寸法 150×70×3.2mm の裸鋼板および塗装腐食鋼板とした。いずれの鋼板についても片面のみを腐食させるため、一方の面をエポキシ樹脂塗料で塗り包んだ。塗装腐食鋼板用の試験片は、第 3.1 節と同様の条件で腐食させた鋼板に所定の塗装系を適用したものをを用いた。具体的には、JIS K 5600-7-1 に準拠した連続中性塩水噴霧試験に供し、鋼の露出面を腐食させてから所定の素地調整を行ない、その後に鋼鉄道橋で一般的に使用される塗装系を適用した。

塩水噴霧試験に用いる塩水の濃度は、実構造物の塗膜下腐食箇所の腐食生成物に含まれる塩分量を再現するため、0.01wt%または0.05wt%とし、168時間噴霧した。

素地調整には、腐食生成物の残存程度を変えるため、ワイヤブラシ処理、カップワイヤ処理、ブラスト処理の3種類を選定した。各処理方法を腐食生成物の残存量の大きい順に並べると、ワイヤブラシ処理>カップワイヤ処理>ブラスト処理となる。各処理を適用した腐食鋼板の外観を図3-7に示す。

①ワイヤブラシ処理

ワイヤブラシを用いて腐食面にゆるく付着する腐食生成物を除去した。この処理は、脱落する腐食生成物がなくなるまで続けた。

②カップワイヤ処理

ワイヤブラシ処理を適用後、カップワイヤを用いて腐食面に残存する腐食生成物を除去した。この処理も、脱落する腐食生成物がなくなるまで続けた。

③ブラスト処理

ワイヤブラシ処理を適用後、ブラスト処理により腐食生成物をおおむね除去した。ブラスト機器には直圧式のエアブラストマシンを用い、投射圧力は約0.6MPa、ブラストノズル（口径φ10mm）から腐食鋼板までの距離は約150mmとした。研削材にはJIS Z 0312「ブラスト処理用非金属系研削材」に規定されるグリット形状のフェロニッケル系研削材を用いた。当該研削材の50%平均粒径は約0.77mmである。仕上がりについては、ISO 8501-1 -Rust grades and preparation of uncoated steel substrates and steel substrates after overall removal of previous coatings -に規定されるD Sa 2程度の除錆度で腐食面に残存する腐食生成物を除去した。

素地調整後に適用した塗装系は、鋼鉄道橋での多くの使用実績を有する塗装系B相当（鉛・クロムフリーさび止めペイント+長油性フタル酸樹脂塗料中塗および上塗）または塗装系T（厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料+厚膜型ポリウレタン樹脂塗料上塗）とした。なお、塗装系B相当としているのは、塗装系Bで使用されている鉛系さび止め塗料が現在入手困難であり、鉛・クロムフリーさび止め塗料に変更したためである。各塗装系の塗装工程を表3-3に示す。

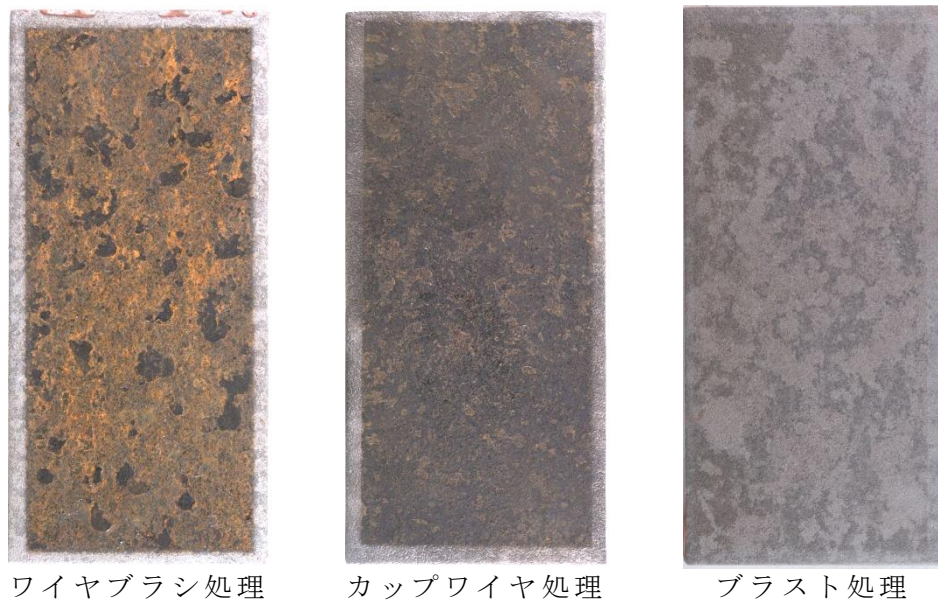


図 3-7 各種素地調整を適用した腐食鋼板の外観

表 3-3 塗装系 B 相当および塗装系 T の塗装工程

工程	塗装系 B 相当		塗装系 T	
	塗料名	塗布量 (g/m ²)	塗料名	塗布量 (g/m ²)
1 層目	鉛・クロムフリーさび止めペイント	140	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
2 層目	鉛・クロムフリーさび止めペイント	140	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
3 層目	長油性フタル酸樹脂塗料中塗	110	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
4 層目	長油性フタル酸樹脂塗料上塗	105	厚膜型ポリウレタン樹脂塗料	150

b) 試験方法および評価方法

作製した塗装腐食鋼板および裸鋼板を日本ウエザリングテストセンター宮古島暴露試験場に設置した。設置条件は、JIS Z 2381「大気暴露試験方法通則」に準じた方法とし、正南面に対して設置角度を 30 度とした。また、過去に報告された文献から鋼の腐食度が判明している暴露試験場（福岡県 2 箇所，沖縄県 2 箇所）に塗装腐食鋼板を設置した⁹⁾。設置箇所の概略を表 3-4 に示す。暴露時期は、宮古島暴露試験場に設置した試験片については 2015 年 4 月から約 6 ヶ月とし、それ以外の暴露場に設置した試験片については 2013 年 12 月から約 1 年間とした。

表 3-4 設置箇所の概要

名称 (緯度・経度)	概要	地上面に対する 試験片の設置角度
九州大学 Lat.33°35'N Long. 130°12'E	東側海岸線から約 2.5km, 西側海岸線から約 5.3km に位置する. 降雨の影響はあるが飛来海塩の影響をほとんど受けない.	45 度
百道 Lat.33°35' N Long.130°21'E	博多湾の海岸線から約 70m 南に位置する. 高架下のため降雨の影響を受けず, 飛来海塩量が多い.	0 度
琉球大学 Lat.26°15'N Long.127°46'E	沖縄本島の東側海岸線から約 2.3km, 西側海岸線から約 4.4km に位置する. 降雨の影響があり飛来海塩は比較的多い.	45 度
許田 Lat.26°32' N Long.127°57'E	沖縄本島の西側海岸線から約 30m 南に位置する. 高架下のため降雨の影響を受けず, 飛来海塩量が多い.	0 度

塗装腐食鋼板の腐食度は, 塗膜下での腐食に起因すると考えられる塗膜膨れの面積率から評価した. 塗膜膨れの面積率は, 「塗膜の検査方法」を参考にした¹⁰⁾.

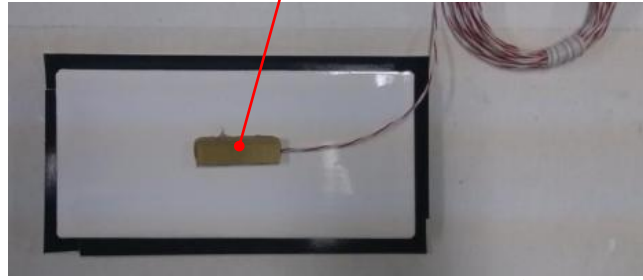
裸鋼板の腐食度は, 暴露前後の基材の質量変化量から算出した侵食度から評価した. なお, 暴露後の裸鋼板の腐食生成物の除去には JIS Z 2383 「大気環境の腐食性を評価するための標準金属試験片及びその腐食度の測定方法」に記載される方法を用いた. 具体的には, 75~90℃に加熱したクエン酸水素二アンモニウム 50w/v%水溶液に腐食鋼板を約 20 分間浸漬し, 腐食鋼板の表面に付着する腐食生成物を除去した. このとき, 腐食生成物だけでなく鋼もわずかに溶解するため, 腐食していない同寸法の裸鋼板を同時に浸漬し, 浸漬前後の質量変化量を裸鋼板の鋼の溶出量として暴露した裸鋼板の質量変化量を補正した.

(2) 鋼構造物に対する鋼板の温度追従性評価

a) 試験片および貼付け先部材

試験片は, 寸法 150×70mm のサンドブラスト処理鋼板に対して, 表 3-3 に示す塗装系 T を鋼板両面に適用したものとした. 鋼板の熱容量による表面温度への影響を評価するため, 試験片の板厚は 3.2mm, 6mm, 10mm の 3 種類とした. 表面温度の測定には 3 端子の白金測温抵抗体を用い, 熱伝導性の高い銀粉末を含有したポリウレタン樹脂塗料を用いて試験片に接着した. 続いて, 放射熱や輻射熱などによる熱影響を排除するため, 測温抵抗体の表面を発泡スチロールおよびアルミテープで覆った¹¹⁾. 測温抵抗体を接着した試験片の外観を図 3-8 に示す.

測温抵抗体



断熱材およびアルミテープでの被覆前



断熱材およびアルミテープでの被覆後

図 3-8 試験片の外観

試験片を貼付ける部材には、第 2 章で調査した塗装鋼構造物の主桁を切り出した部材（以下、切り出し部材と呼ぶ）を用いた。切り出し部材の外観を図 3-9 に示す。切り出し部材の寸法は幅 9.0m、高さ 1.6m の上路プレートガーダで、腹板両面に補剛材がリベット接合されている。切り出し部材は東京都国分寺市内に設置されており、腹板が南北を向くように設置されているほか、地表面と下フランジ間の距離が約 0.8m となるようにコンクリート架台で支持されている。なお、切り出し部材の周囲には長時間日光を遮るような建築物や樹木等は存在しない。



図 3-9 切り出し部材の外観

b) 温度測定方法

切り出し部材の腹板（南面側）および上フランジ上面に試験片を設置し、試験片およびその近傍の切り出し部位の表面温度を測定した。測定時期は、2013年4月とした。試験片の設置にはブチルゴム系の粘着テープおよび熱伝導シートを用い、溶剤を用いて表面を洗浄した塗膜上に貼付けた。使用した熱伝導シートの熱伝導率は、 $1.2\text{W/m}\cdot\text{K}$ （JIS R 2616「耐火断熱れんがの熱伝導率の試験方法」の熱線法）である。このとき、電磁式膜厚計を用いて設置箇所の膜厚を測定した。表面温度の測定にはデータロガーを用いた。測定間隔は2秒とし、データ回収後に測定温度の10分平均値および1分あたりの温度上昇速度（ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）を算出した。また、切り出し部材と試験片間の熱伝達に際して切り出し部材の塗膜の影響程度を評価するため、切り出し部材の腹板（南面側）にて塗膜の一部を除去して鋼材素地に測温体を貼付け、鋼材素地と塗膜表面の表面温度を比較した。試験片および測温体の貼付位置を図3-10に示す。

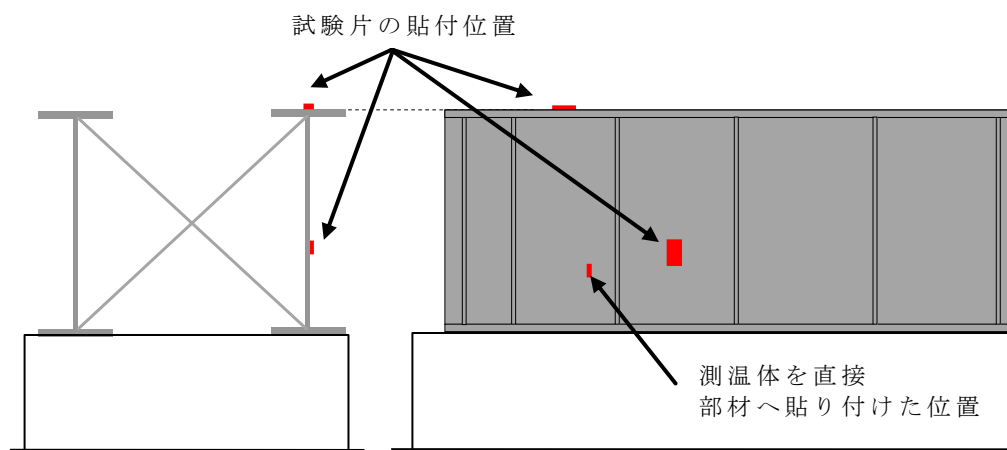


図 3-10 試験片の貼付位置

(3) 塗装腐食鋼板を用いた塗装鋼橋の腐食度評価

a) 試験片

試験片は寸法 $75\times 70\times 3.2\text{mm}$ の裸鋼板および塗装腐食鋼板とした。塗装腐食鋼板用の試験片については片面のみを腐食させるため、一方の面をエポキシ樹脂塗料で塗り包んだ。その後、JIS K 5600-7-1 に準拠した連続中性塩水噴霧試験に 168 時間または 840 時間供して鋼の露出面を腐食させた。ワイヤブラシ処理により腐食面を素地調整した後に、表 3-3 に示す塗装系 B 相当または塗装系 T を適用した。

b) 試験方法および評価方法

試験片を設置する対象構造物は図 3-11 および図 3-12 に示す 4 種類の鋼鉄道橋（A 橋～D 橋と呼ぶ）と、(2) 鋼構造物に対する鋼板の温度追従性評価で用いた

切り出し部材とした。対象とした鋼鉄道橋はいずれも沿岸に架設されており，過去に著しい腐食が局所的に発生していることから高腐食性環境下であることが示唆されている。なお，切り出し部材の設置位置は前述したように東京都国分寺市内であり，腐食性の低い環境である。

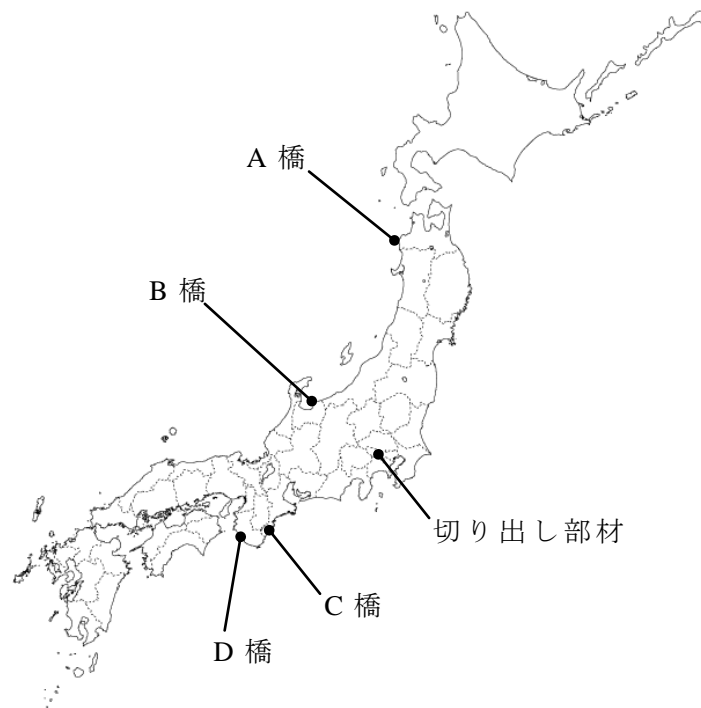


図 3-11 試験片を設置する対象構造物の位置



A 橋



B 橋



C 橋



D 橋

図 3-12 試験片を設置する鋼鉄道橋の外観

試験片の設置箇所は各構造物の主桁に該当する I 桁の腹板および下フランジ下面とし，粘着テープおよび熱伝導シートを用いて試験片を貼付けた．試験片を設置した主桁の面方向別の記号を図 3-13 に示す．なお，試験片の暴露試験は A 橋のみ先行で実施しており，試験片の種類や設置位置が他の構造物と異なる．A 橋での暴露期間は 2013 年 10 月から 2014 年 10 月までの約 1 年間であり，それ以外は 2014 年 8 月から 2015 年 8 月までの約 1 年間である．設置位置は，A 橋のみ S1～S3 および M1～M3 であり，それ以外は S1，S2，M3 である．また，A 橋のみカップワイヤ処理した塗装腐食鋼板を設置していない．各構造物の概要および試験片の設置位置を表 3-5 に示す．

各試験片の腐食度は，(1) 塗装腐食鋼板の腐食度評価と同様に評価した．すなわち，塗装腐食鋼板の腐食度は塗膜膨れの面積率から評価し，裸鋼板の腐食度は暴露前後の鋼板質量の差分から算出した侵食度を用いて評価した．

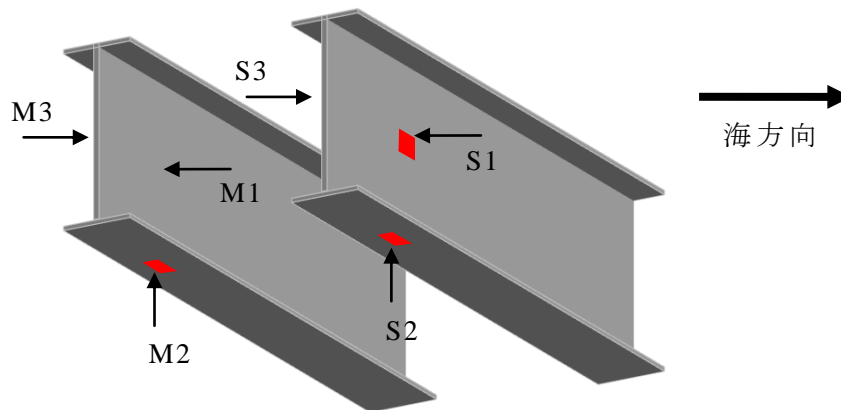


図 3-13 試験片の設置位置の概要および面方向の記号

表 3-5 各構造物の概要および設置した試験片種類

設置先	離岸距離	形式	試験片の設置位置						試験片の暴露時期
			S1	S2	S3	M1	M2	M3	
A 橋	10m 以内	Gd	○	○	○	○	○	○	2013.10～2014.10
B 橋	約 200m	Gt	○	○	—	—	—	○	2014.10～2015.10
C 橋	10m 以内	Gd	○	○	—	—	—	○	2014.10～2015.10
D 橋	約 50m	Gt	○	○	—	—	—	○	2014.10～2015.10

注：表中の記号は，○…試験片を設置した箇所，—…試験片を設置していない箇所である．

3.2.3 試験結果と考察

(1) 塗装腐食鋼板の腐食度

宮古島暴露試験場に設置した塗装腐食鋼板の暴露経過月数に対する塗膜膨れ面積率を図 3-14 に示す。同一暴露期間において最も大きな塗膜膨れ面積率を示したのはワイヤブラシ処理面に塗装した試験片であり、次いで大きな塗膜膨れ面積率となったのはカップワイヤ処理面に塗装した試験片である。なお、ブラスト処理面に塗装した試験片では塗膜膨れが確認されなかったため、測定結果を図へ表記していない。これらの結果から、塗膜膨れ面積率は腐食生成物の残存程度に依存すると言える。

適用した塗装系に着目すると、いずれの素地調整方法においても、塗装系 B 相当を適用した試験片の方が大きな塗膜膨れ面積率を示す傾向にある。この要因の一つに、塗装系 T に使用される塗料の方が水分や酸素の透過性が低いため塗膜下腐食の腐食度を低下させたことが挙げられる。

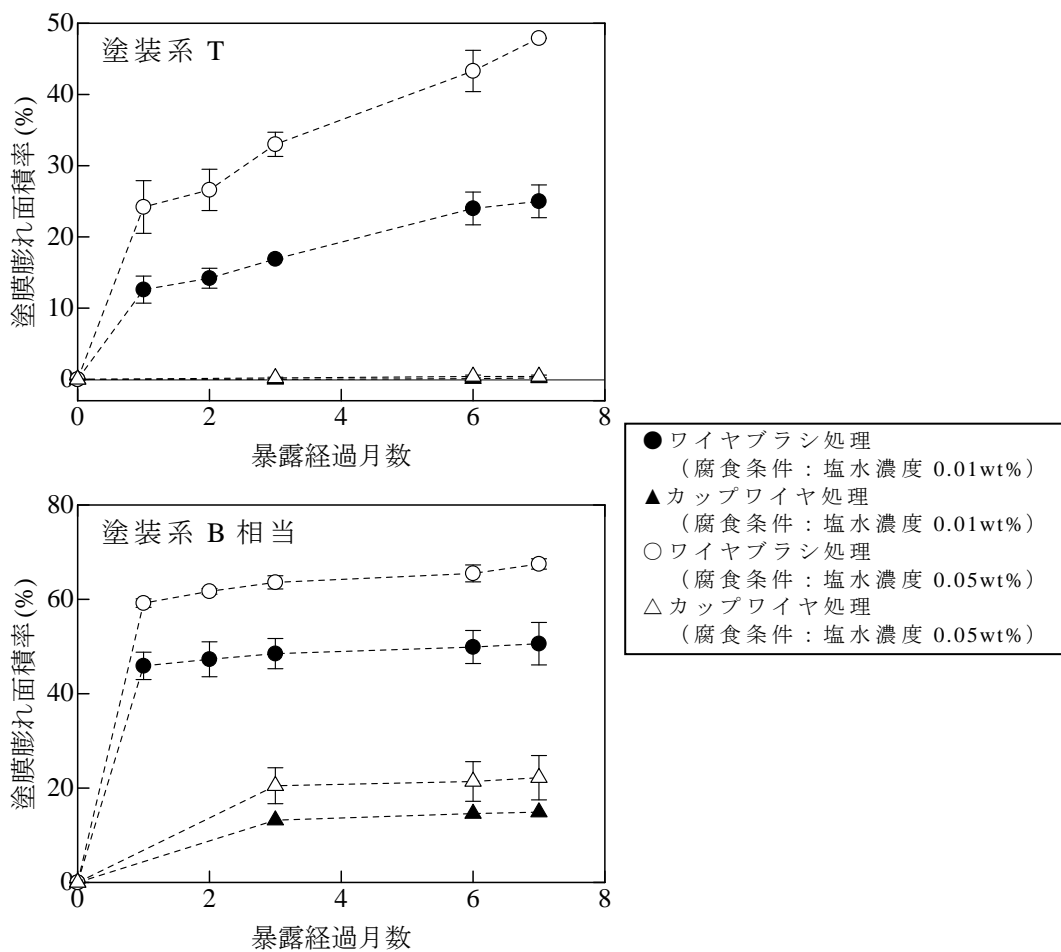


図 3-14 宮古島暴露試験場に設置した塗装腐食鋼板の膨れ面積率

続いて、暴露月数に対する試験片の質量変化量を評価した。このとき、塗膜割れや剥がれなどによって腐食面が著しく露出する試験片については塗膜下での腐食が進行した状態といえない。このため、塗膜膨れのみを生じており塗膜表面に割れやさび汁の発生が見られない試験片を評価した。暴露前と暴露から3ヶ月および6ヶ月後における各試験片の外観を図 3-15 から図 3-18 に示す。塗装系 B 相当を適用した試験片では、ブラスト処理した試験片を除き、暴露3ヶ月後には塗膜割れの発生に伴って腐食した鋼表面が露出している。また、ブラスト処理した試験片については、前述の通り塗装系に関わらず塗膜膨れが発生しておらず、質量変化を評価困難である。そこで、塗膜膨れのみを生じており塗膜表面に割れやさび汁が発生しない試験片として、ワイヤブラシ処理面に塗装系 T を適用した塗装腐食鋼板を選定した。

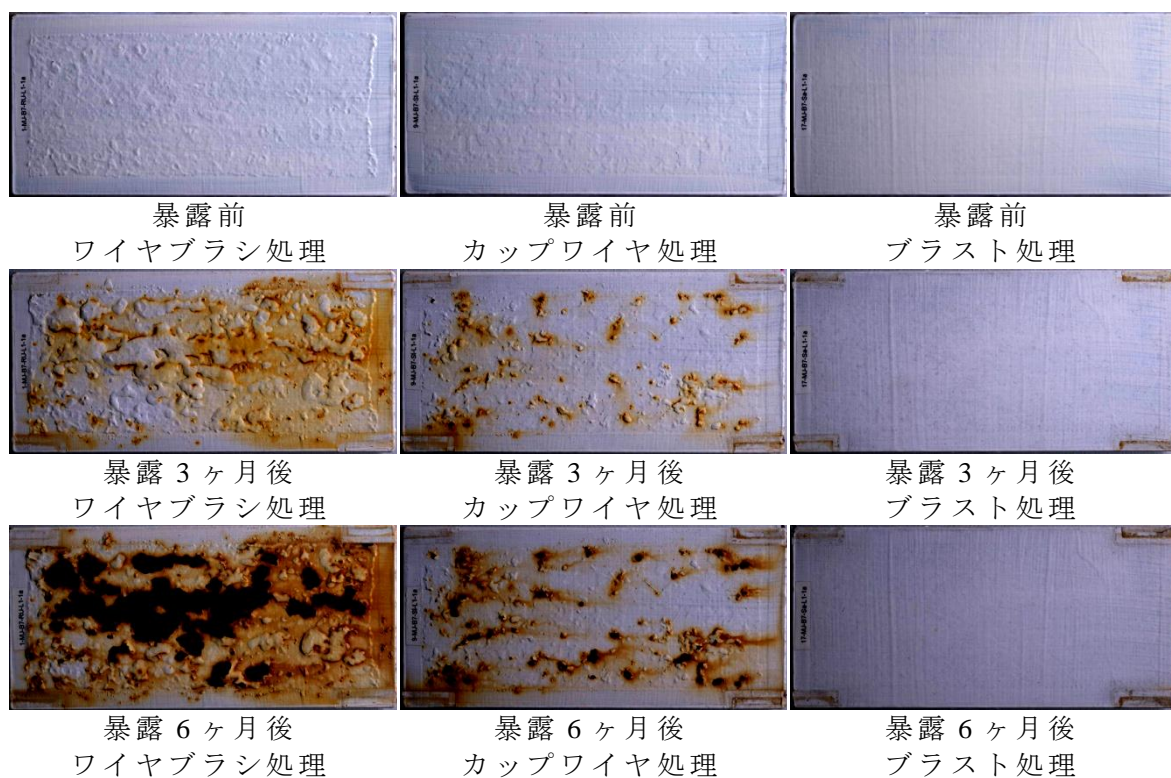


図 3-15 暴露前および暴露中の試験片の外観(塗装系 B 相当, 塩水濃度 0.01wt%)

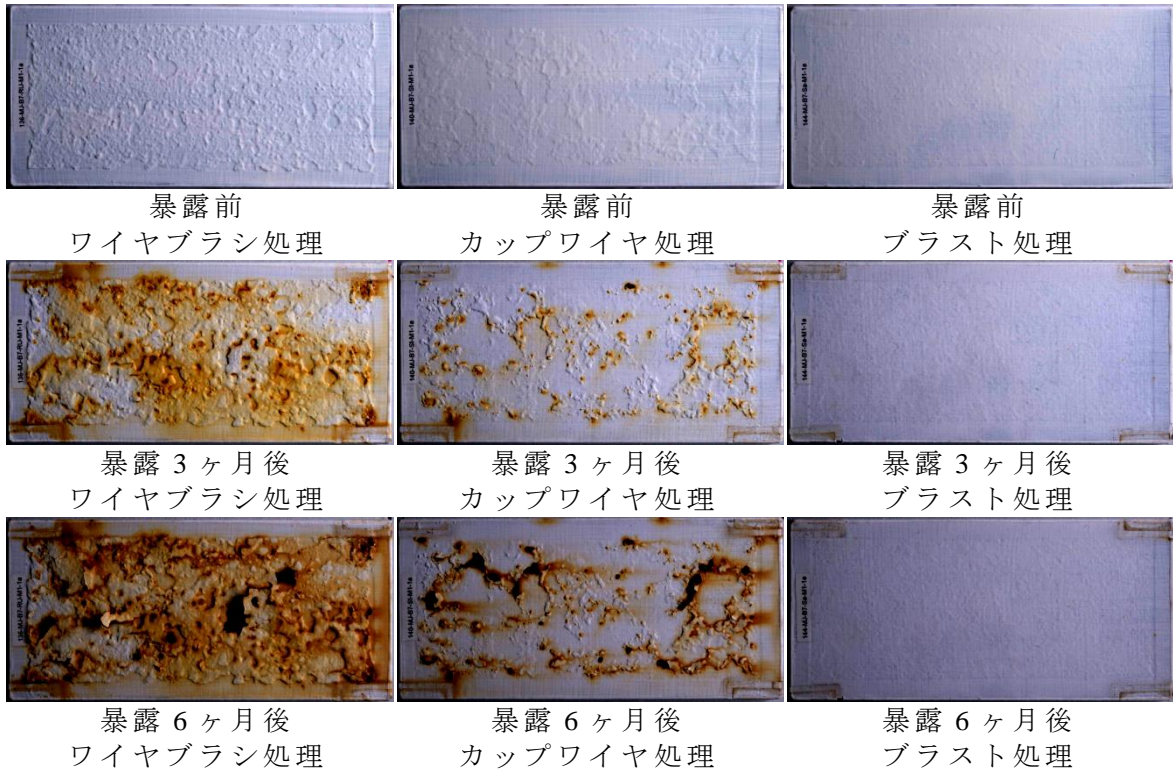


図 3-16 暴露前および暴露中の試験片の外観(塗装系 B 相当, 塩水濃度 0.05wt%)

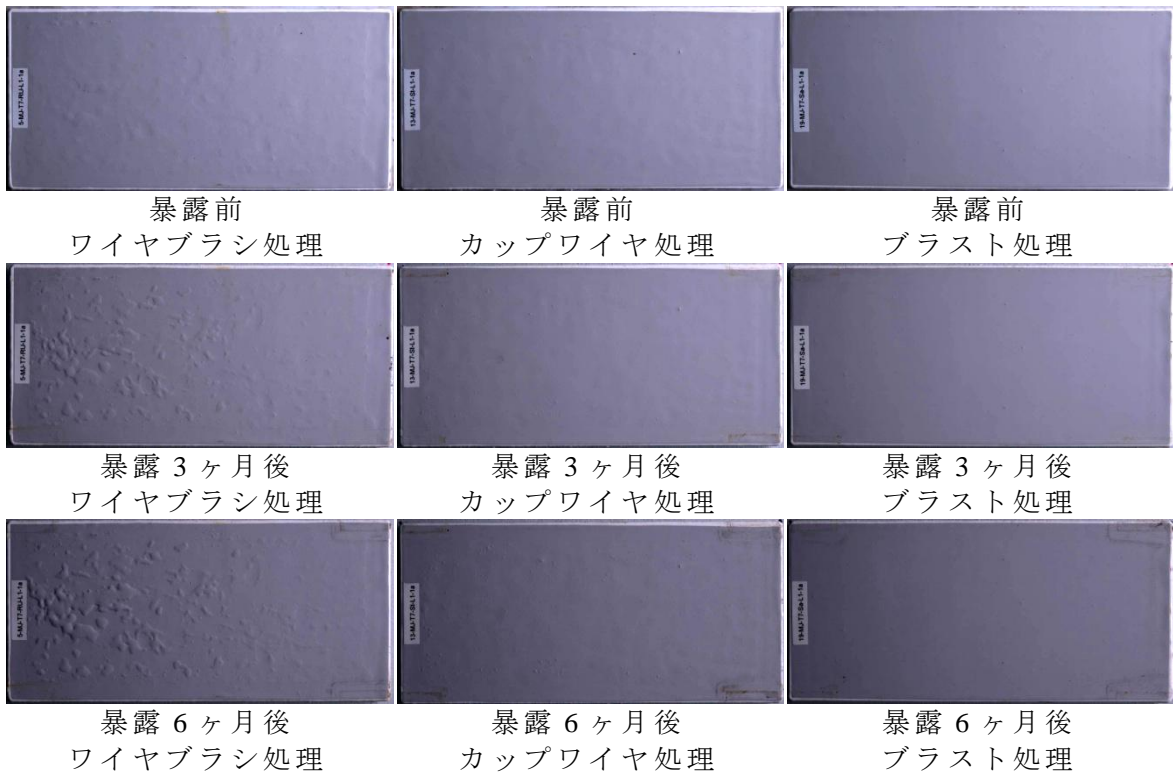


図 3-17 暴露前および暴露中の試験片の外観(塗装系 T, 塩水濃度 0.01wt%)

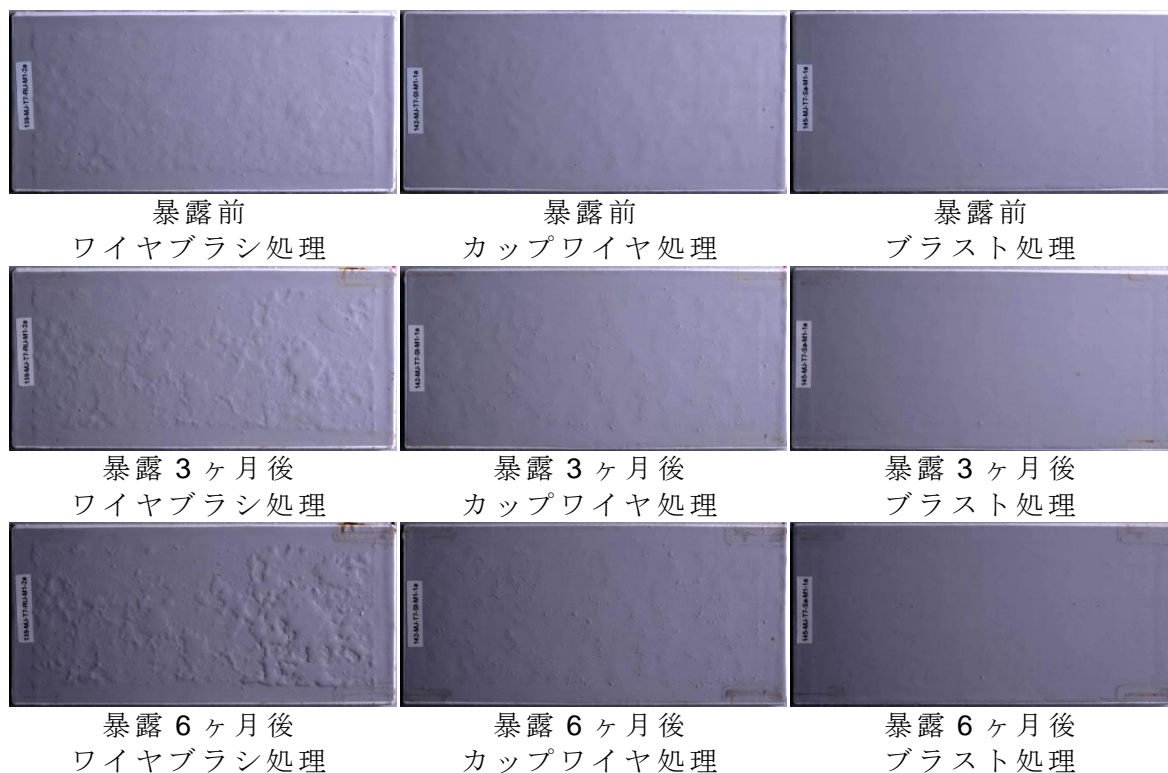


図 3-18 暴露前および暴露中の試験片の外観（塗装系 T，塩水濃度 0.05wt%）

ワイヤブラシ処理面に塗装系 T を適用した試験片の暴露月数に対する質量変化量を図 3-19 に示す。試験片の質量は暴露期間とともに指数関数的に増加している。これは、塗膜膨れを生じた箇所では塗膜下腐食が進行していることを示す。

一般的な大気環境では、鉄は腐食により水酸化鉄（ FeOH_2 ）や含水水酸化鉄（ FeOOH ）、マグネタイト（ Fe_3O_4 ）などの化合物に変化する。塗膜下腐食が進行する場合においても、既に存在する腐食生成物の還元反応と鋼の酸化反応によって腐食が進行することが報告されている²⁾。したがって、図 3-19 に示す試験片の質量の増加傾向から、本試験で暴露した塗装腐食鋼板では暴露中に塗膜下での腐食が常に進行しており、その腐食度は暴露期間が長くなるほど大きくなる傾向にあると言える。

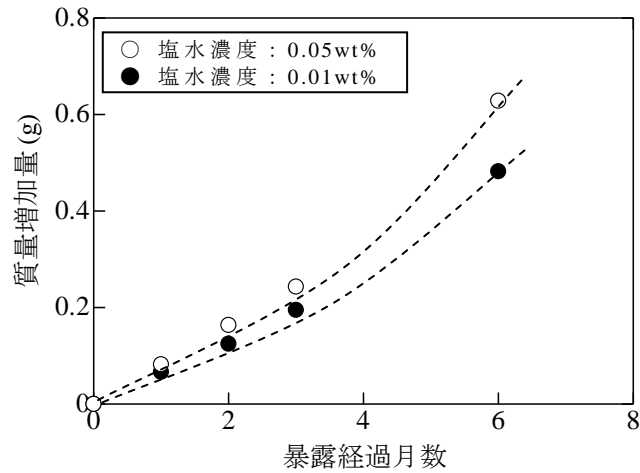


図 3-19 ワイヤブラシ処理面に塗装系 T を適用した塗装腐食鋼板の質量増加量

次に、裸鋼板の侵食度と暴露年数の関係を図 3-20 に示す。裸鋼板の侵食度は以下の式 (4-1) に近似することが知られている⁵⁾。ここで、 y は侵食度、 a, b は腐食速度パラメータ、 x は暴露年数である。

$$y = a \times x^b \quad (4-1)$$

式 (4-1) を用いて最小二乗法により累乗回帰曲線を作成した結果、測定値は計算値によく一致し、暴露期間が延びるほど裸鋼板の腐食度は小さくなる傾向にあった。これは、腐食に影響する環境因子に対して腐食生成物層が保護性を示したためと考えられる。

以上の結果から、塗装腐食鋼板の腐食度は裸鋼板と異なる傾向を示すと言える。この要因として、塗膜の環境遮断性が塗膜下での腐食進行にともなって低下した可能性と、腐食生成物が環境因子に対して保護性を示さない可能性が挙げられる。すなわち、塗膜下での腐食進行によって塗膜が押し上げられて膨れとして顕在化する過程において、大小の塗膜割れが発生するなどの理由により塗膜の環境遮断性が低下し、暴露期間が長くなるほど塗膜下での腐食が進行しやすい状態となったことが推定される。また、塗膜下腐食が進行する場合には、既に存在する腐食生成物のうち結晶性および非晶性の含水水酸化鉄が式 (4-2) に示す還元反応を生じる²⁾。



このとき、水分子の離脱にともなう体積収縮が生じるため、空隙を有する腐食生成物層が形成されることになる。このため、腐食生成物を水分や酸素が通過し易くなり、腐食に対する保護性を示さないことが推定される。

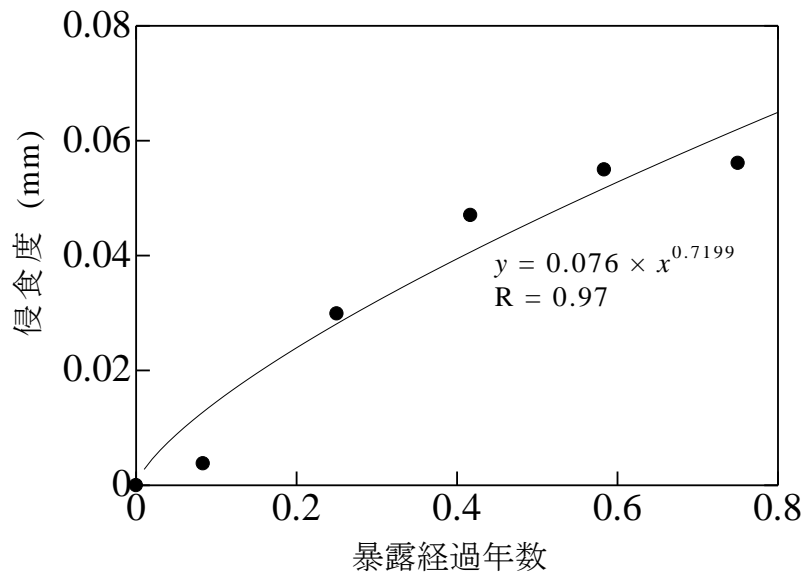


図 3-20 裸鋼板の侵食度と暴露月数の関係

宮古島暴露試験場以外の箇所で暴露した塗装腐食鋼板を含めた結果として、暴露1年後の塗膜膨れ面積率と文献[9]に示された裸鋼板の侵食度との関係を表3-6に示す。ここで、裸鋼板の腐食度については暴露1年間の侵食度としている。塗装腐食鋼板の塗膜膨れ面積率と裸鋼板の侵食度を各暴露箇所で比較した結果、両鋼板の腐食程度は相関する傾向にあり、最も腐食した箇所から順番に並べると許田>琉球大学>九州大学≒百道となる。したがって、裸鋼板が腐食しやすい環境条件では塗装腐食鋼板も同様に腐食しやすくなると考えられる。

表 3-6 暴露1年後の塗膜膨れ面積率と裸鋼板の侵食度⁹⁾との関係

暴露箇所	九州大学	百道	琉球大学	許田	
裸鋼板の侵食度 ⁶⁾	0.022mm	0.022mm	0.031mm	0.036mm	
塗膜膨れ 面積率	塗装系 B 相当・ 条件①	0.6%	0.4%	1.5%	3%
	塗装系 B 相当・ 条件②	2%	0.5%	10%	17%
	塗装系 T・条件①	1%	-	3%	3%
	塗装系 T・条件②	5%	-	7%	6%

注1：条件①，②は塗装前に実施した鋼板腐食時の塩水濃度を示す。

条件①...塩水濃度 0.01wt%，条件②...塩水濃度 0.05wt%

注2：表中のハイフンは、試験を実施しなかったことを示す。

(2) 塗装腐食鋼板の温度追従性

試験片の貼付箇所の膜厚を測定した結果によると、いずれの貼付位置についても塗膜厚は1~2mmである。したがって、対象部材の塗膜は幾層にも塗り重ねられた厚い塗膜であると言える。

切り出し部材の腹板（南面側）における塗膜と鋼材の表面温度測定結果を図3-21に示す。朝方から正午にかけては鋼材の温度の方がわずかに高く、正午から夕方にかけては鋼材の温度の方が低い傾向にある。この要因の一つに、材料の比熱の違いが挙げられる。一般に鋼材は塗膜よりも小さい比熱であるため、熱しやすく冷めやすいことから、本試験結果が得られたものと考えられる。

また、部材および塗膜の温度を上昇させるエネルギーは日射であることから、塗膜と鋼材の温度差を生じる要因として塗膜の熱伝導率が挙げられる。塗膜の熱伝導率が低い場合、塗膜が断熱材のような効果を示し、塗膜表面の温度が鋼材よりも高くなると考えられる。しかしながら、本試験結果では日射の影響の大きい正午前後において塗膜表面と鋼表面の温度差はほとんど生じていない。したがって、一般的な防食塗膜が鋼材表面を数mm程度で覆っていても、塗膜表面から鋼材への熱伝導にはほとんど影響しないと考えられる。

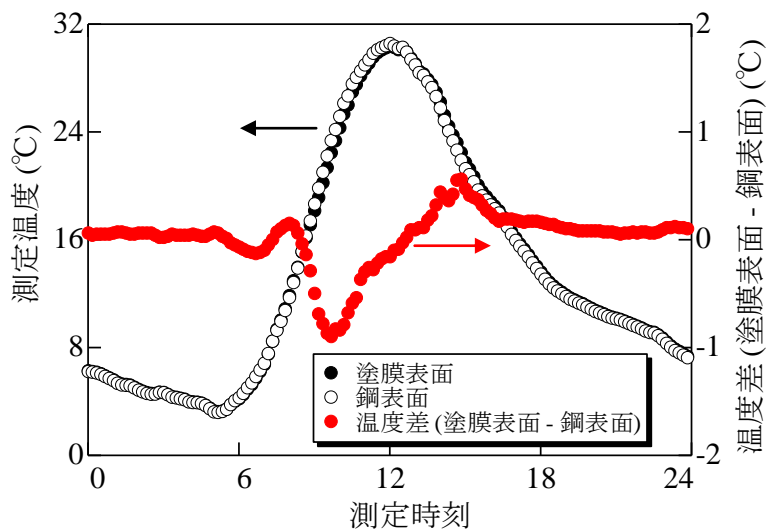


図 3-21 塗膜と鋼板素地の温度測定結果（2013年4月下旬に測定）

切り出し部材の上フランジ上面および腹板に貼付けた試験片および部材の表面温度測定結果を図3-22に示す。日照に伴い温度が上昇した段階での最高温度を高い順に並べると、いずれも切り出し部材 ≧ 試験片（3.2mm厚） > 試験片（6mm厚） > 試験片（10mm厚）となる。したがって、3.2mm厚の試験片以外は、切り出し部材と試験片が同一温度となるような熱伝導が得られていないと言える。この要因として、板厚みの大きな試験片ほど温度差を生じる理由の一つに、鋼板の

寸法の違いに伴う熱容量の違いが挙げられる。

温度が上昇した段階での各部位の試験片の温度差を比較すると、腹板よりも上フランジ上面の方が大きい。上フランジ上面の方が腹板よりも高い温度であることから、日照に伴う試験片の温度上昇速度が大きい場合に、熱容量の異なる鋼材間で温度差を生じた可能性がある。

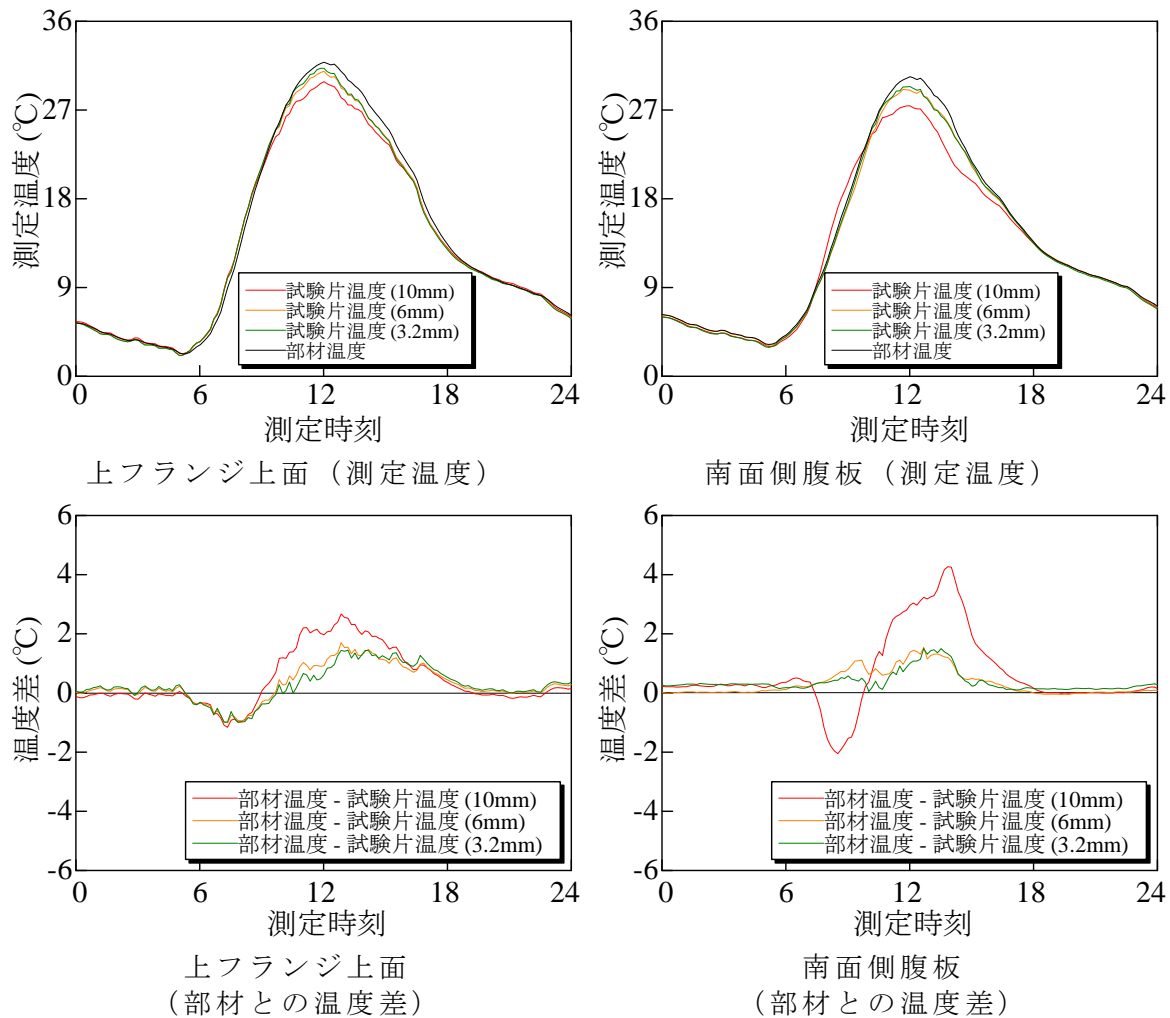


図 3-22 各箇所贴付けた試験片および切り出し部位の温度測定結果

上フランジ上面における温度上昇速度の算出結果を図 3-23 に示す。明け方から 6 時頃までは温度上昇速度は $0.05^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以下であり、各試験片での大きな違いは見られない。しかしながら、6 時を過ぎて太陽の仰角が大きくなり、温度上昇速度が $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 前後となった段階で、10mm 厚の試験片が他の試験片と比較して小さな値を示す傾向にある。これより、試験片および試験片を貼付けた部位の温度差は測定時期や試験片の板厚に影響を受けることが推定される。ただし、この影響は比較的板厚が大きい 10mm 厚の試験片のみに見られた現象である。したが

って、一般的に使用される 3.2mm 厚の試験片については、貼付けた部材との温度差はほとんど生じないと考えられる。

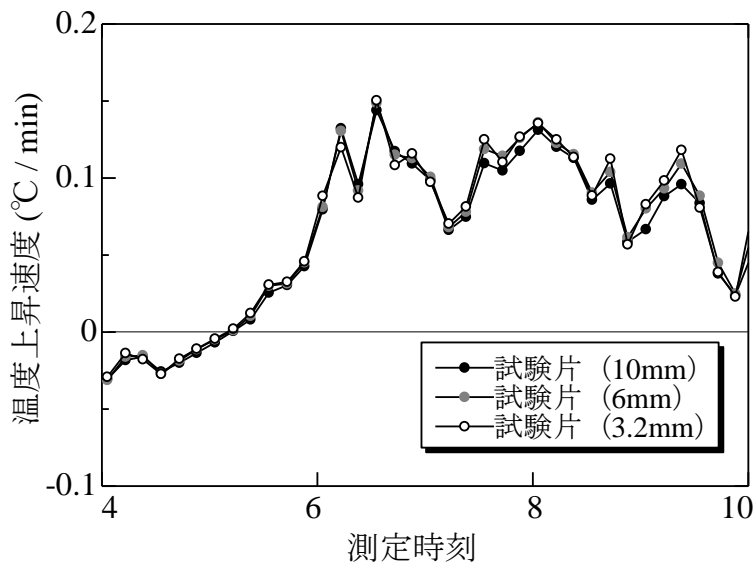
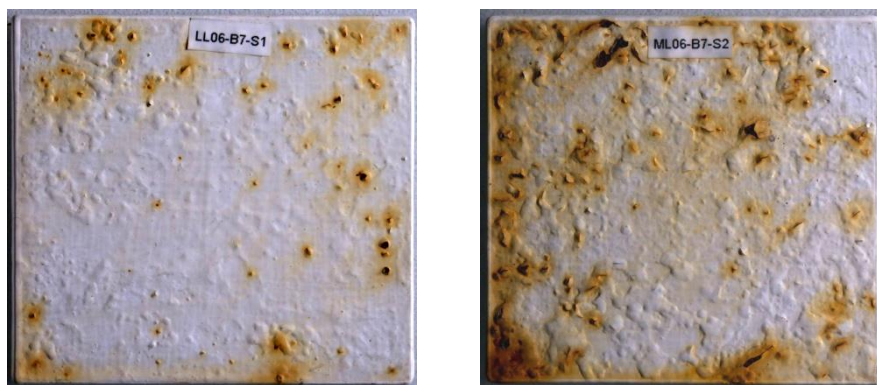


図 3-23 上フランジ上面における温度上昇速度の算出結果

(3) 塗装腐食鋼板を用いた塗装鋼橋の腐食度

各塗装鋼橋および切り出し部材に裸鋼板および塗装腐食鋼板を約 1 年間設置した結果、塗装系 B 相当を適用した試験片はいずれも局所的に塗膜の割れや剥がれが生じ、腐食した鋼材面が露出した。その一例として、B 橋に設置した塗装腐食鋼板を図 3-24 に示す。(1) 塗装腐食鋼板の腐食度で述べたように、塗膜割れや剥がれなどによって腐食面が著しく露出する試験片については塗膜下での腐食が進行した状態といえない。そこで、塗装系 B 相当の試験結果は除外した。



塩水濃度 0.01wt%, B 橋に設置 塩水濃度 0.05wt%, B 橋に設置

図 3-24 塗膜割れおよび剥がれを生じた塗装腐食鋼板（塗装系 B 相当）

裸鋼板の侵食度を表 3-7 に示す。また、塗装腐食鋼板の塗膜膨れ面積率を表 3-8 に示す。切り出し部材に設置した試験片の侵食度および塗膜膨れ面積率は、A～D 橋の値と比較して最も小さい傾向にある。したがって、塗装腐食鋼板は裸鋼板と同様、部材の腐食性を評価できると考えられる。

各部位に設置した裸鋼板の侵食度を部材別に比較すると、切り出し部材に設置した場合には大きな違いが見られないのに対して、A 橋～D 橋に設置した場合には、雨洗効果の期待しにくい下フランジ下面で最も侵食度が大きくなる傾向にある。その一方で、塗装腐食鋼板の塗膜膨れ面積率を部材別に比較すると、最も大きな膨れ面積率を示したのは下フランジ下面に設置した試験片ではなく、切り出し部材では南面を向く腹板面に設置した場合、A 橋～D 橋では海を向く腹板面に設置した場合に最も大きな膨れ面積率を示す傾向にある。

表 3-7 約 1 年間設置した裸鋼板の侵食度 (mm)

試験片の 設置箇所	A 橋	B 橋	C 橋	D 橋	切り出し部位
S1	0.04	0.04	0.11	0.04	0.02
S2	0.13	0.06	0.16	0.13	0.02
S3	0.02	-	-	-	-
M1	0.20	-	-	-	-
M2	0.20	-	-	-	-
M3	0.02	0.02	0.10	0.10	0.01

注 1：切り出し部材では、南面を向く腹板に設置したものを海側腹板、北面を向く腹板に設置したものを山側腹板とした。

注 2：赤文字は、各部位のうち最も大きな侵食度となった箇所を示す。

表 3-8 約 1 年間設置した塗装腐食鋼板（塗装系 T）の膨れ面積率 (%)

試験片の 設置箇所	A 橋		B 橋		C 橋		D 橋		切り出し部位	
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
S1	30	50	15	35	20	40	16	38	0.1	7
S2	5	2	10	13	10	17	9	15	0	4
S3	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-
M1	20	15	-	-	-	-	-	-	-	-
M2	3	15	-	-	-	-	-	-	-	-
M3	4	20	1	13	10	20	7	30	0	4

注 1：切り出し部材では、南面を向く腹板に設置したものを海側腹板、北面を向く腹板に設置したものを山側腹板とした。

注 2：鋼板を腐食させる際の条件が、①...塩水濃度 0.01wt%，②...塩水濃度 0.05wt%であることを示す。

注 3：赤文字は、各部位のうち最も大きな塗膜変状面積率となった箇所を示す。

設置部位によって裸鋼板と塗装腐食鋼板の腐食度が異なる要因について、次のように考察した。裸鋼板の場合、付着した飛来塩は鋼の腐食に直接影響することから、付着塩が流出しないような部位、すなわち雨がかりの無い部材下面において最も腐食度が大きくなると考えられる。その一方で、塗装腐食鋼板は塗装されているため、水分や酸素は透過するものの、塩化物イオンなどの海塩に由来する陰イオンはほとんど透過しない¹²⁾。したがって、付着した塩の滞留程度は、塗装腐食鋼板の腐食度に大きな影響を及ぼさない可能性がある。過去に A 橋では、各部位の付着塩分量を調査している。累積した付着塩分量および 1 日あたりの付着塩分量の測定結果を図 3-25 に示す。本試験の対象部位で比較すると、海側の腹板では比較的多くの塩が付着しており、降雨や結露などによって付着した海塩が除去されやすいが、海塩の付着量自体は多いことが考えられる。したがって、塩の付着による潮解によって水分が塗膜下の腐食生成物に供給されやすい状況となり、塗膜下腐食が進行したことが推定される。

また、日照量の観点から、腹板の温度は下フランジよりも高くなりやすい。温度は腐食反応に影響することから、塗装腐食鋼板の場合も腹板に設置した方が塗膜下腐食を進行しやすい状況にあったことが推定される。

以上の結果から、無塗装鋼橋のような鋼面が露出した裸鋼材の腐食度は、雨洗効果の期待しにくい部材下面において最も大きくなる一方で、塗装鋼橋における塗膜下での腐食度は腹板面、特に海を向く腹板面で最も大きくなるなど、塗装の有無によって腐食しやすい部位が異なる。

また、塗装腐食鋼板を用いて塗装構造物の腐食性を評価する場合、安全性の観点から、最も腐食度が大きくなる測定値を参照することが望ましい。このため、塗装腐食鋼板の設置に当たっては海側を向く部材を主体とするのが適切であると言える。

なお、本評価法では腐食性の評価のみを対象としており、腐食の進行にともなう部材強度への影響については検討していない。今後の課題は、構造上の重要部材に塗膜下腐食が生じた場合の腐食度と部材強度の関係把握であり、この場合には塗膜下腐食の進行程度を塗膜膨れ体積から評価する必要があると考えられる。

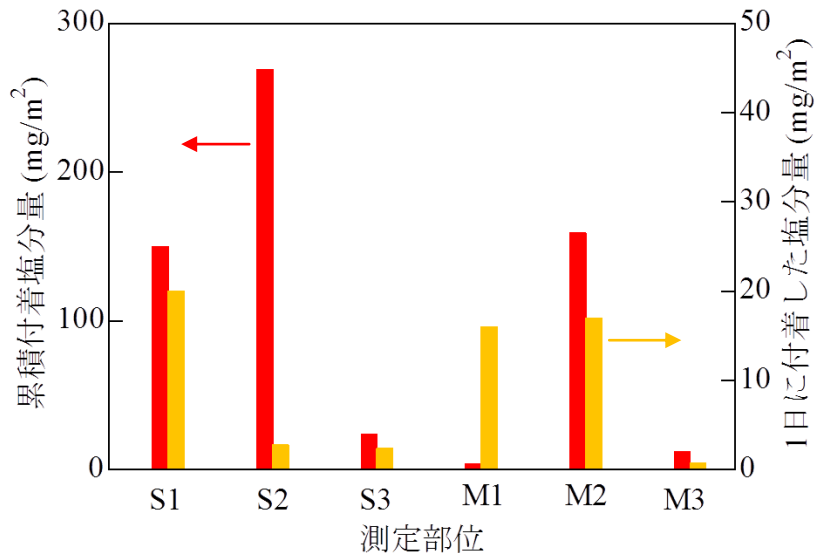


図 3-25 各部材における付着塩分測定結果

3.3 まとめ

第3章では、塗装腐食鋼板を構造物の各部位に設置して一定期間暴露し、その後回収した塗装腐食鋼板の腐食程度を評価することによって構造物の設置箇所の塗膜腐食挙動を推定する手法を提案した。

本手法の妥当性を検証するため、塗装腐食鋼板と裸鋼板の腐食度を評価するとともに、鋼板を設置した部材に対する温度追随性を評価した。また、塗装腐食鋼板を実構造物に設置し、面方向に対する腐食度を評価した。その結果、塗装腐食鋼板を設置することによって塗装鋼構造物の各部位の腐食度を評価できる可能性を得た。以下に得られた知見を示す。

- (1) 塗装腐食鋼板を屋外暴露した場合の塗膜下腐食の進行に伴う塗膜膨れ面積率の増加程度は、塗装前の腐食生成物の残存程度に依存している。
- (2) 塗装腐食鋼板の腐食度は裸鋼板と異なる傾向を示し、暴露期間が長くなるほど腐食度が大きくなる傾向にある。
- (3) 鋼橋模擬部材に設置した試験片の温度は、部材温度とは厳密には異なり、測定時期や試験片の板厚などによって温度差を生じる。なお、3.2mm厚の試験片を用いる場合には、貼付けた部材との温度差はほとんど生じない。
- (4) 実構造物に設置した裸鋼板の腐食度は、雨洗効果の期待しにくい部材下面において最も大きくなる。この要因として、塩化物イオンなど鋼の腐食に寄与する因子の影響が大きいことが挙げられる。
- (5) 一方で塗装腐食鋼板の腐食度は、腹板面において大きくなる傾向にあり、特に海を向く面に設置した場合に顕著となる。この要因として、塗膜表面へ海塩が付着して潮解することでの濡れ時間の増加や、腹板と下フランジの温度差などが推定される。

(6) 塗装腐食鋼板を用いて塗装構造物の腐食性を評価する場合、塗装腐食鋼板の設置に当たっては、海側を向く部材を主体とするのが適切であると言える。

参考文献

- 1) 黒沢勝登志：定電流分極による塗装鋼の腐食挙動の研究，防食技術，Vol.35，No.5，pp.263-269，1986.
- 2) 田中誠：塗装さび鋼板のさび層構造と塗膜耐久性，防錆管理，Vol.34，No.11，pp.479-485，1990.
- 3) 日本鋼構造協会：耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術，日本鋼構造協会テクニカルレポート，No.73，2006.
- 4) 紀平寛，田辺康児，楠隆，竹澤博，安波博道，田中睦人，松岡和巳，原田佳幸：耐候性鋼の腐食減耗予想モデルの研究，土木学会論文集，No.780，I-70，pp.71-86，2005.
- 5) 鹿毛勇，塩谷和彦，竹村誠洋，小森務，古田彰彦，京野一章：実暴露試験に基づくニッケル系高耐候性鋼の長期腐食量予測，材料と環境，Vol.55，pp.152-158，2006.
- 6) 道野正嗣，貝沼重信，板井麻理子，仲健一：ダム建設前後における鋼上路トラス橋の各構造部位の腐食性評価，材料と環境討論会講演集，Vol.62，pp.209-212，2015.
- 7) 田中誠：腐食鋼板の脱塩処理法の検討，材料と環境講演集，Vol.2003，pp.191-194，2003.
- 8) 長野博夫，山下正人，鈴木重夫：耐候性鋼および鉄文化財における耐食性とさびの構造，材料，Vol.44，No.506，pp.1314-1319，1995.
- 9) 貝沼重信，山本悠哉，林秀幸，山本悠哉，伊藤義浩，押川渡：腐食生成物層の厚さを用いた無塗装普通鋼材の腐食深さとその経時性の評価方法，材料と環境，Vol.61，No.12，2012.
- 10) (財)日本塗料検査協会：塗膜の評価基準，2003.
- 11) 坂本達朗，田中誠，江成孝文：鋼構造物における部位別局所環境条件の考察，防せい防食技術発表大会講演予稿集，Vol.25，pp.61-64，2005.
- 12) 江成孝文，田中誠，遠藤三郎，坂本達朗：海岸橋梁試験施工塗膜の30年間追跡調査結果，鉄構塗装技術討論会予稿集，No.30，pp.1-6，2007.
- 13) 真田祐介，園佳寿郎，後藤宏明，江成孝文，橋本康樹，山本基弘，吉田陽一，坂本達朗，木村武久：実橋梁に適用した長期耐久型塗装系の追跡調査（その5）経年劣化した上塗り塗膜の部位別表面状態評価手法の検討，鉄構塗装技術討論会発表予稿集，Vol.35，pp.25-30，2013.

第4章 鋼素地調整の方法が塗膜の防食性能に及ぼす影響

前章において提案した，塗装鋼構造物の塗膜下腐食の腐食挙動を推定する手法により，進行性の高い塗膜下腐食の発生が懸念される塗装鋼構造物を抽出することが可能と考えられる．このような塗装鋼構造物は，早期に塗膜下腐食が発生することで維持管理に苦慮している構造物であり，長期間の供用時にあたって従来と同様の素地調整方法や塗替え塗装系の適用による維持管理を実施しても，塗膜下腐食の進行を抑制することは困難と考えられる．

特に，これらの鋼構造物では従来の油性系塗料から成る塗装仕様からエポキシ樹脂塗料を主体とした長期耐久性の期待できる塗装仕様に変更されている場合が多い．このため，塗装仕様の変更により防食性能を向上させるよりも，塗替え時に適切な素地調整方法を選定する方法を検討することが望ましいと考えられる．

そこで本章では，塗替え時の適切な素地調整手法を提案することを目的として，塗装前に残置されている腐食生成物の残存程度や成分などが塗膜の防食性能へ及ぼす影響程度について評価した．

4.1 腐食生成物が塗膜の防食性能に及ぼす影響

塗膜下に残存する腐食生成物中の塩分量と塗膜耐久性の関係を定量的に把握するため，第2章の実構造物の調査で確認された塗膜下腐食箇所の腐食生成物と同程度の塩分量を含む腐食鋼板を作製し，その腐食鋼板に塗装した場合の塗膜の防食性能を室内促進劣化試験から評価した．このとき，塗装前に種々の素地調整手法を適用し，腐食生成物の残存程度が塗膜の防食性能に与える影響を評価した．

4.1.1 試験方法

(1) 腐食鋼板の製作

試験鋼板は JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」に規定される冷間圧延鋼板 (SS400, 両面サンドブラスト処理, 寸法 150×70×3.2mm) で，片面のみを腐食させるためにエポキシ樹脂塗料で裏面を塗り包んだ後に，JIS K 5600-7-1「塗料一般試験方法-第7部：塗膜の長期耐久性-第1節：耐中性塩水噴霧性」に準拠した連続中性塩水噴霧試験を行なうことで鋼の露出面を腐食させた．なお，一部の試験片には各辺から 5mm の範囲にテープを貼付けて，腐食しない箇所を設けた．

噴霧する塩化ナトリウム水溶液の濃度は，実構造物で散見される腐食状態を模擬するため 0.01wt%とした．塩水噴霧時間は 168 時間または 840 時間とした．このときの腐食生成物に含まれる塩分量はそれぞれ約 0.85g/m², 約 1.5g/m²であり，第2章での実構造物における塗膜膨れ「小」および「中」の腐食生成物に含まれ

る塩分量に該当する。

塩水噴霧試験機の槽内温度は $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，加湿器の温度は $47\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，噴霧用空気の圧力は $0.098\pm 0.002\text{MPa}$ ，塩水噴霧量は 80cm^2 に対して $1.0\sim 2.0\text{ml/h}$ とした。また，試験片表面への塩水噴霧程度を均一にするため，24 時間毎に槽内の試験片の位置を変えた。

塩水噴霧を終了した腐食鋼板は，蒸留水噴霧を 168 時間行なって腐食生成物の表面に付着する塩分を除いた後に，室内 ($23\pm 1^{\circ}\text{C}$) で 1 ヶ月以上養生した。最後に，ワイヤブラシを用いてゆるく付着する腐食生成物を除去した。作製した腐食鋼板の外観を図 4-1 に示す。

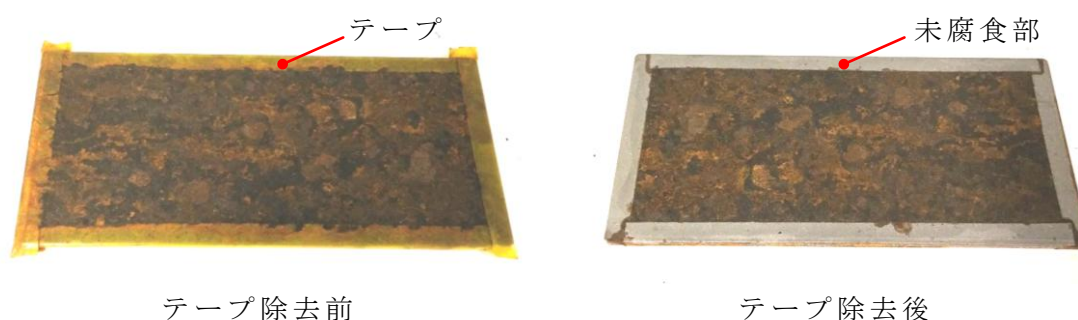


図 4-1 作製した腐食鋼板の外観

(2) 塗装前の腐食鋼板における腐食生成物の評価方法

塩水噴霧によって作製した腐食鋼板の腐食生成物は色相によって暗色域と明色域に区分され，各領域の腐食生成物を構成する結晶成分の割合は異なる。これらの知見は第 3 章で既に説明している。本章では，各種の素地調整器具を適用した場合の腐食生成物の残存程度を評価するため，素地調整前後における腐食面の表面形状をレーザ変位計によって測定した。また，残存した腐食生成物に含まれる塩分量を測定した。

腐食生成物に含まれる塩分量の測定では，動力工具またはブラストを用いて素地調整した各腐食鋼板に対して測定を行なった。レーザ変位計による表面形状の測定では，同一の試験片に対して，ワイヤブラシ処理，動力工具処理，ブラスト処理の順で素地調整を行ない，それぞれの素地調整を適用した後の表面形状を測定した。また，腐食生成物の除去前後の表面形状から腐食生成物の厚みを測定した。このとき，動力工具処理やブラスト処理を実施すると鋼素地の表面形状も変化する可能性があるため，腐食生成物の厚みを測定するための試験片を別途準備し，第 3 章と同様にクエン酸水素二アンモニウム水溶液を用いた酸処理によって腐食生成物を除去し，除去前後の表面形状から腐食生成物の厚みを計測した。

なお，動力工具処理にはカップワイヤを用いたので，以下，動力工具処理をカ

ップワイヤ処理と呼ぶ。また、ブラスト処理には直圧式のエアブラストマシンを用い、投射圧力は約 0.6MPa、ブラストノズル（口径 φ10mm）から腐食鋼板までの距離は約 150mm とした。研削材には JIS Z 0312「ブラスト処理用非金属系研削材」に適合するグリット形状のフェロニッケル系研削材を用いた。当該研削材の 50%平均粒径は約 0.77mm であり、現場のブラスト施工時に一般に使用されるグレードを使用した。また、代表値として公表されている当該研削材の組成を表 4-1 に示す。仕上がりについては、ISO 8501-1 -Rust grades and preparation of uncoated steel substrates and steel substrates after overall removal of previous coatings -に規定される D Sa 2 程度の除錆度で腐食面に残存する腐食生成物を除去した。

各評価試験に用いた腐食鋼板の素地調整条件を表 4-2 に示すとともに、各試験の詳細を以下に記載する。

表 4-1 本試験に用いた研削材の組成（代表値）

成分	SiO ₂	Fe ₂ O ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
含有量	53.2	8.0	2.6	5.1	28.7

表 4-2 各評価試験に用いた試験鋼板の素地調整条件

塩水噴霧 時間	素地調整方法	評価試験および使用した 腐食鋼板 ^{注1}	
		腐食生成物中の 塩分量測定	レーザ 変位測定
168 時間	ワイヤブラシ処理	○	—
	ワイヤブラシ処理+カップワイヤ処理	○	—
	ワイヤブラシ処理+ブラスト処理 ^{注2}	○	—
840 時間	ワイヤブラシ処理	○	
	ワイヤブラシ処理+カップワイヤ処理	○	● ^{注3}
	ワイヤブラシ処理+ブラスト処理 ^{注2}	○	

注 1：表中の記号は次の通り。○...片面が全面腐食した腐食鋼板，●...各片から 5mm の範囲を腐食させていない腐食鋼板，— ...試験を行なわないことを示す

注 2：ブラスト時の除錆度は、ISO 8501-1 に規定される D Sa 2 程度とした。

注 3：ワイヤブラシ処理 → カップワイヤ処理 → ブラスト処理の順に素地調整し、各工程における表面形状を測定した。

a) 腐食生成物に含まれる塩分量の測定

腐食鋼板に残存する腐食生成物中の塩分量の測定には、第 3 章で示した方法と同様に、以下に示す電気化学的手法を用いた。具体的には、0.1mol/l の硝酸カリウム水溶液に腐食鋼板を浸漬し、白金電極を正極、腐食鋼板を負極として、定電流電源による約 1A の電流を 1 時間印加した。これにより、腐食鋼板中の塩化物

イオンを溶液中に溶出させた。続いて JIS K 0101「工業用水試験方法」の 3.2.1 チオシアン酸水銀(II)に規定される吸光光度法に準拠して、分取した溶液中の塩化物イオン量を測定し、さらに塩化ナトリウム量に換算した。

b) レーザ変位計を用いた腐食面の表面形状測定

腐食面の表面形状測定に使用したレーザ変位計のスポット径は約 $80\mu\text{m}$ 、分解能は $1\mu\text{m}$ である。X-Y ステージ上に試験片を設置し、試験片を移動させることにより測定を行なった。測定ピッチは短辺方向で $50\mu\text{m}$ 、長辺方向で約 $165\mu\text{m}$ とした。測定範囲は $70\times 35\text{mm}$ とし、試験鋼板の一部を測定した。測定装置の外観および測定範囲を図 4-2 に示す。

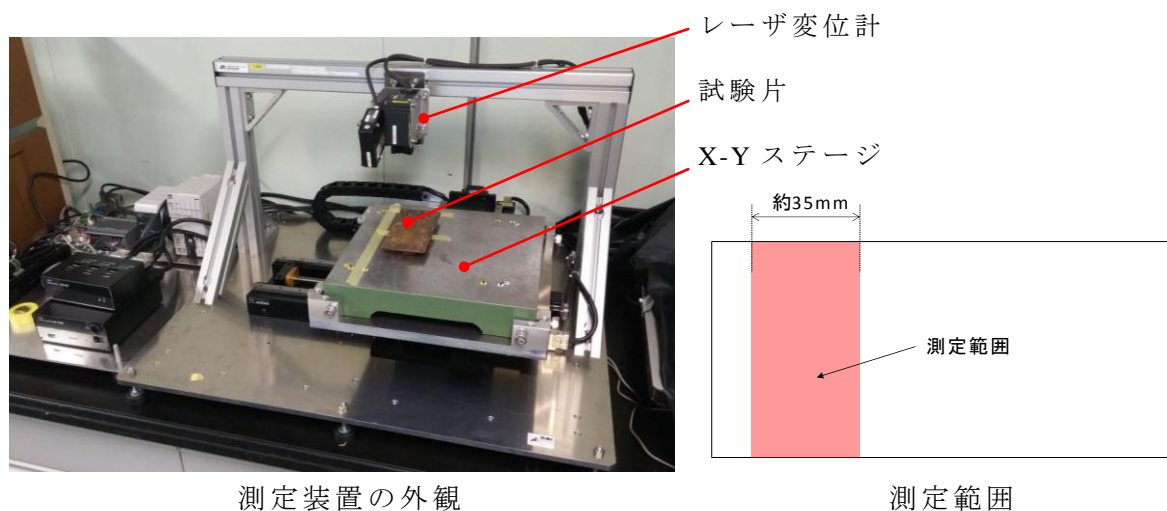


図 4-2 レーザ変位計の外観および測定範囲

(3) 塗装腐食鋼板の室内促進劣化試験

a) 塗装方法

作製した腐食鋼板の腐食面に対して各素地調整（ワイヤブラシ処理，カップワイヤ処理またはブラスト処理）を適用した後に塗装系 B 相当を塗装し，乾燥・養生したものを試験片とした。ここで塗装系 B 相当を用いたのは，塗膜の変状程度を早期に評価するためである。

また，促進劣化試験の経過にともなう鋼素地の状態を可視化して観察するため，顔料を配合しないクリアタイプの長油性フタル酸樹脂塗料を適用した試験片を準備した。このとき，塗布量は通常長油性フタル酸樹脂塗料と同量とし，塗装回数は 3 回とした。また，腐食鋼板の腐食条件は塩水噴霧 840 時間とし，塗装前の素地調整方法はワイヤブラシ処理，カップワイヤ処理，ブラスト処理の 3 種類とした。ブラスト処理した腐食鋼板については，除錆度のグレードを D Sa 2 程度

として腐食生成物をわずかに残存させた。

各塗装系の塗装工程を表 4-3 に示す。なお、試験片の繰り返し数は 2 とした。

表 4-3 各塗装系の塗装工程

工程	塗装系 B 相当		クリヤー塗料を用いた塗装系	
	塗料名	塗布量 (g/m ²)	塗料名	塗布量 (g/m ²)
1 層目	鉛・クロムフリーさび止めペイント	140	長油性フタル酸樹脂塗料	110
2 層目	鉛・クロムフリーさび止めペイント	140	長油性フタル酸樹脂塗料	110
3 層目	長油性フタル酸樹脂塗料中塗	110	長油性フタル酸樹脂塗料	110
4 層目	長油性フタル酸樹脂塗料上塗	105		

b) 促進劣化試験方法

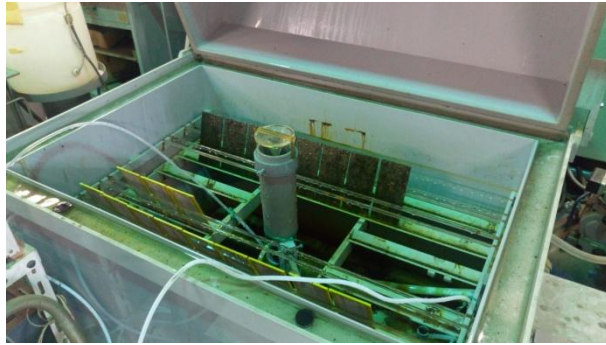
促進劣化試験には、複合塗膜の耐久性評価試験方法として「鋼構造物塗装設計施工指針」（鉄道総合技術研究所）の附属書 C に記載されている鉄道総研式複合サイクル試験を用いた¹⁾。当該の複合サイクル試験は、数百μm 程度となる鋼構造物用の複合塗膜の耐久性評価を目的に提案されたものである。サイクルの行程は、塗膜の劣化および塗膜吸水量の増加を目的としたオゾン暴露と、鋼素地の腐食促進を目的とした人工海水噴霧、模擬濃縮雨水噴霧、乾燥の 4 行程から成る。オゾン暴露により塗膜の吸水速度を増加させ、さらに日本の一般的な環境条件を模擬することで、比較的長時間の濡れ・乾燥の繰り返しを作用させている。これらの行程により、数百μm 程度となる鋼構造物用の複合塗膜／鋼材間の界面に水分を供給することができる²⁾。

本試験ではオゾン暴露用の溶液噴霧試験機および、2 つの溶液噴霧塔を有する複合サイクル試験機を使用した。本サイクル試験条件および使用した試験機の外観を表 4-4 および図 4-3 に示す。

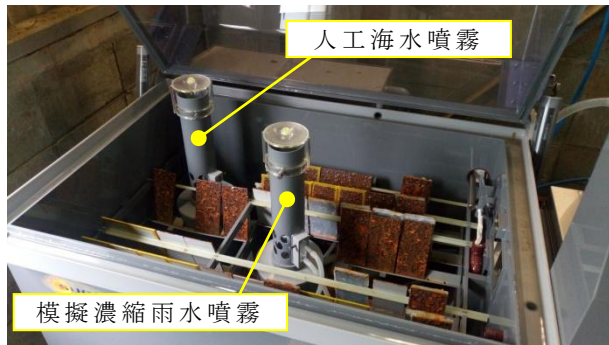
表 4-4 鉄道総研式複合サイクル試験条件

行程	試験名	条件	試験時間	次の行程	1サイクルの行程
1	オゾン暴露	O ₃ : 槽内濃度 700±50ppm, 蒸留水噴霧: 水平捕集面積 80cm ² に対して 0.3~0.5cm ³ /h, 35±2℃, RH: 95±3%	12h	2	
2	人工海水噴霧	噴霧量: 水平捕集面積 80cm ² に対して 1~2cm ³ /h, 温度: 40±2℃, RH: 95±3%	4h	3	
3	模擬濃縮雨水噴霧	噴霧量: 水平捕集面積 80cm ² に対して 1~2cm ³ /h, 温度: 40±2℃, RH: 95±3%	44h	4	
4	乾燥	45±2℃, RH: 30% 以下	48h	2	

備考: 行程 2 から行程 4 の作業は, 1 サイクルにつき 3 回繰り返す。



(a) 溶液噴霧試験機



(b) 複合サイクル試験機

図 4-3 促進劣化試験に用いた試験機の外観

c) 評価方法

第3章で示したように、塩水噴霧により作製した腐食鋼板をワイヤブラシ処理した場合、腐食生成物の色相に応じて暗色域と明色域に大別されるほか、鋼の露出域が存在する。本試験では、各領域の状態が塗膜の耐久性に与える影響を評価するため、塗装前にこれらの領域の面積率を計測した。また、試験経過によって発生した塗膜変状のうち、塗膜膨れの発生程度をサイクル毎に観察するとともに塗膜膨れ面積率を算出した。

なお、本複合サイクル試験の促進倍率は JIS で規定される複合サイクル試験などよりも低いため、塗膜変状が相当に進行するまでには長時間を要する可能性がある。そこで、塗膜変状速度に関する理論を適用して、変状程度の予測を試みた。塗装材料の使用年数と塗膜劣化程度の関係や、促進劣化時間と塗膜変状程度の関係については様々な検討が行なわれているが³⁾⁻⁵⁾、一般的には生物曲線（ロジスティック）に従うと考えられている。そこで、11 サイクルまでの試験結果を基にしたロジスティック回帰を行ない、一定の変状面積率に達すると想定されるサイクル数を計算した。ロジスティック関数には、下記の式（4-2）および式（4-3）を用いた。

$$p(x) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (4-3)$$

$$z = \alpha + \beta \quad (4-4)$$

$$\ln(L) = \sum [d_j \times \ln(p(x_j)) + (n_j - d_j) \times \ln(1 - p(x_j))] \quad (4-5)$$

α 、 β は式（4-4）に示す尤度関数（ L ）を最大にするときの値で、このうち β は対数尤度関数（ $\ln(L)$ ）を最大にする値でもある。 d_j は各サイクルの塗膜膨れ面積率、 m は促進試験のサイクル回数、 n_j は塗膜変状面積の収束値で、最終的に全面が変状すると仮定し、100%とした。

4.1.2 試験結果と考察

(1) 腐食鋼板の性状評価

a) 腐食生成物に含まれる塩分量の測定

種々の素地調整を適用した腐食鋼板に残存する腐食生成物中の塩分量を表 4-5 に示す。腐食鋼板を作製する時の塩水噴霧時間が長いほど塩分量は大きくなり、素地調整により腐食生成物の除去程度が大きいほど塩分量は小さくなる傾向にある。ただし、除錆度 Sa 2 程度までブラスト処理を行なっても、塩分量はワイヤブ

ラシを適用した場合の 30%～40%程度までしか低減できない。この要因として、腐食生成物が部分的に鋼表面に残存しているだけでなく、研削材衝撃時に押し込まれた腐食生成物が鋼素地内部に残存していることが挙げられる。

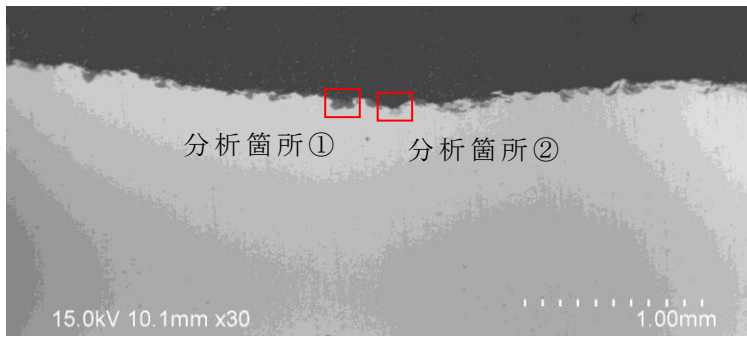
表 4-5 腐食生成物に含まれる塩分量の測定結果

素地調整方法	腐食生成物中の塩分量 (g/m ²)	
	塩水噴霧 168 時間	塩水噴霧 840 時間
ワイヤブラシ処理	0.77	1.50
カップワイヤ処理	0.55	1.16
ブラスト処理	0.35	0.42

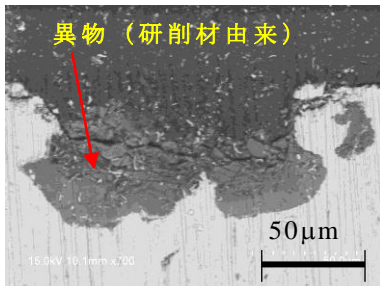
注：ブラスト処理における除錆度は ISO 8501-1 D Sa 2 を目標とした。

そこで、塩水噴霧 168 時間により作製した腐食鋼板に対して、除錆度 Sa 3 を目標にブラストを適用した場合の表面状態を走査型電子顕微鏡で断面観察し、異物が存在する場合には異物の構成を元素マッピングにより分析した。分析結果を図 4-4 に示す。除錆度 Sa 3 でブラストした場合においても鋼材表面には異物が残留している。さらに、これらの異物は鋼材の内部に存在しているように見える。これは、研削材衝突時のエネルギーによるものと推定される。

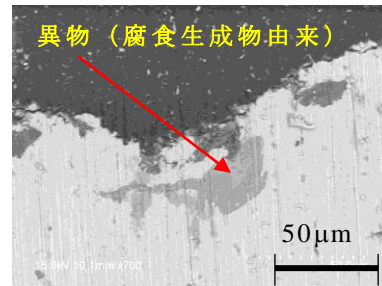
異物の成分を定性分析した結果、酸素および鉄から構成される異物とケイ素を主体とする異物の 2 種類が存在することを確認した。本試験に使用した研削材は表 4-1 に示すように二酸化ケイ素および酸化鉄を含んでおり、鋼表面に確認されたケイ素および鉄は、研削材に由来すると考えられる。しかしながら、当該研削材には塩化物イオンは含まれていないことから、鋼表面の異物が全て研削材由来とした場合、塩化物イオンの存在を説明できない。したがって、異物は鋼素地に残留する腐食生成物および研削材であると考えられる。



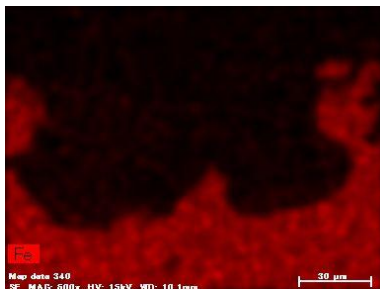
評価箇所の反射電子像



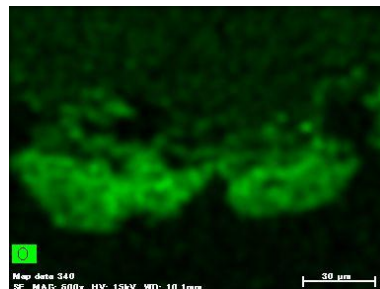
分析箇所①の反射電子像



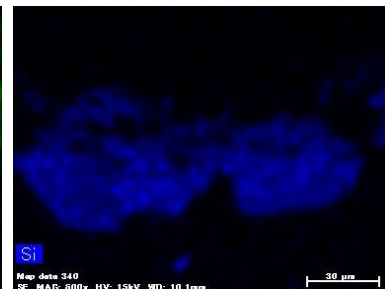
分析箇所②の反射電子像



Fe (鉄)

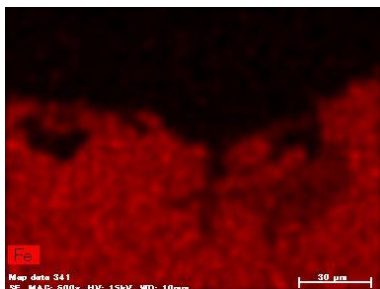


O (酸素)

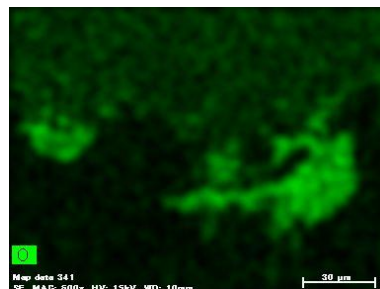


Si (ケイ素)

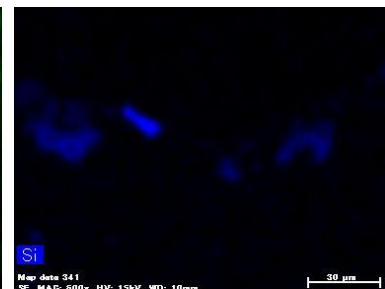
分析箇所①の元素マッピング



Fe (鉄)



O (酸素)



Si (ケイ素)

分析箇所②の元素マッピング

図 4-4 ブラストした鋼材表面の分析結果

b) レーザ変位計を用いた腐食面の表面形状測定

塩水噴霧を 840 時間行なうことで作製した腐食鋼板について、各素地調整後における腐食鋼板の測定範囲の外観およびコンター図を図 4-5 に示す。ブラスト後のコンター図から、腐食箇所は短辺近傍に設けた未腐食箇所よりも減肉している。カップワイヤ処理後とブラスト処理後のコンター図を比較すると、腐食した箇所にはブラスト面よりも表面高さが大きな箇所が存在しており、カップワイヤ処理では除去できない腐食生成物が存在している。また、ワイヤブラシ処理後とカップワイヤ処理後の外観から、ワイヤブラシで除去できない腐食生成物は明色域に多く存在している。したがって、鋼の露出している箇所はもともと暗色域であったが、腐食生成物が鋼素地に対して強く付着せず、ワイヤブラシ処理の際に全ての腐食生成物が脱落した箇所と考えられる。

また、ワイヤブラシ処理後の外観とブラスト後のコンター図から、腐食による鋼板の減肉程度は暗色域の方が大きい傾向にある。各領域における鋼板の減肉程度について、腐食生成物の厚みから考察した。腐食生成物の厚みについては、各領域のうち約 $5 \times 5 \text{mm}$ の範囲を選定し、測定データのうち上位 5% のデータの平均値を腐食生成物の厚みとした。測定結果を表 4-6 に示す。これより、塩水噴霧時間の増加とともに腐食生成物の厚みが増大する傾向にあるとともに、暗色域における腐食生成物の方が大きな厚みを有している。この要因は 3 章で述べたように、暗色域は鋼板表面で生じる電気化学的反応のアノード領域に該当し、鉄が酸化反応によって含水水酸化鉄やマグネタイトなどの腐食生成物が生成されたためと考えられる。

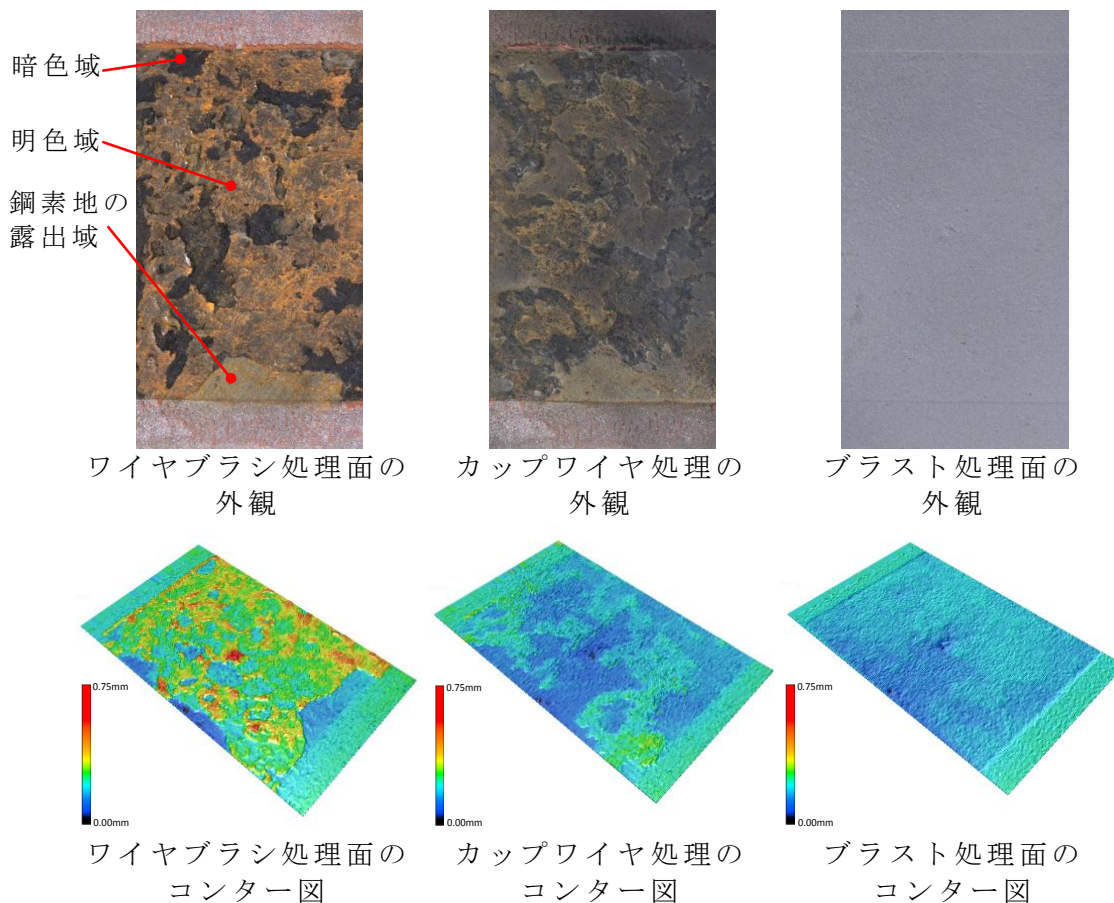


図 4-5 レーザ変位測定結果

表 4-6 腐食生成物の厚み

塩水噴霧時間	測定領域	腐食生成物の厚み (μm)
168 時間	暗色域	1.2×10^2
	明色域	0.4×10^2
840 時間	暗色域	3.1×10^2
	明色域	1.3×10^2

(2) 塗装腐食鋼板の室内促進劣化試験

a) 塗装系 B 相当を適用した塗装腐食鋼板

塗装系 B 相当を適用した塗装腐食鋼板では、サイクル経過に伴い、全ての試験片表面に大きさの異なる塗膜膨れが発生した。サイクル回数と塗膜膨れ面積率の関係について、実測値 (n=2) とロジスティック回帰曲線を示したものを図 4-6 に示す。

各試験片の塗膜膨れの発生程度を素地調整方法で比較すると、塗膜膨れ面積率の大きい順に、ワイヤブラシ処理、カップワイヤ処理、ブラスト処理となる。し

たがって、塗膜の防食性能は塗装前における鋼表面の腐食生成物の残存程度に影響すると言える。また、鋼板腐食時の塩水噴霧時間で比較すると、いずれの素地調整方法においても塩水噴霧 840 時間の方が大きな塗膜膨れ面積率を示す。この要因として、表 4-6 で示したように塩水噴霧の時間が長いほど電気化学反応の進行によって腐食生成物が多く付着していることや、腐食の進行にともなって鋼表面に微細な凹凸が形成されることで素地調整による腐食生成物の除去が困難になることなどから、腐食生成物が残存しやすい状態にあることが挙げられる。また、第 3 章で示したように、鋼板腐食時の塩水噴霧時間の増加にともない、腐食生成物に含まれる塩化物イオンが増大していると考えられる。塩化物イオンは鋼の腐食を促進させる物質であるため、鋼板腐食時の塩水噴霧時間が長いほど大きな塗膜膨れ面積率を示したのは、腐食生成物に含まれる塩化物イオンの影響も考えられる。この点の考察については後述することとする。

続いて、サイクル回数と塗膜膨れ面積率との関係について考察する。ブラスト処理した試験片では、塗膜変状として直径 1mm 程度の微細な塗膜膨れがわずかに発生したのみであり、10 サイクル以上経過した段階の塗膜膨れ面積率はおよそ 1%以下である。したがって、防食性能を定量的に評価可能な段階に至っていないと考えられる。

その一方で、カップワイヤ処理した試験片については、10 サイクル以降の塗膜膨れ面積率は 5~10%であり、ワイヤブラシ処理した試験片については 20~60%である。この中で、塗膜変状面積の収束値を 100%と仮定して計算した回帰曲線とよく一致したのは塩水噴霧 168 時間のワイヤブラシ処理した試験片のみであり、塩水噴霧 840 時間のワイヤブラシ処理した試験片や、カップワイヤ処理により固着した腐食生成物を概ね除去した試験片では、約 8 サイクル以降において変状面積率の増加程度が緩和し、11 サイクルの時点では実測値が回帰曲線を若干下回っている。すなわち、本試験で作製した塗装腐食鋼板では塗膜変状面積がロジスティックに全面に広がっていくのではなく、変状しやすい箇所と変状しにくい箇所があると考えられる。これは、腐食鋼板の腐食状態が均一ではなく、明色域および暗色域に区分した腐食生成物の性状の違いや、鋼の露出程度などが影響していると推定される。そこで、これらの領域と塗膜変状箇所の分布状態から考察した。塗装前および 13 サイクル後の試験片の外観を図 4-7 に示す。

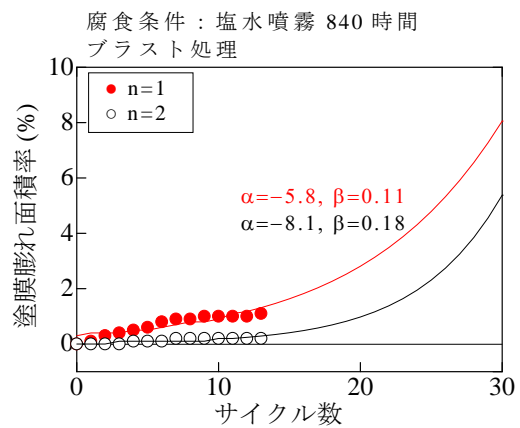
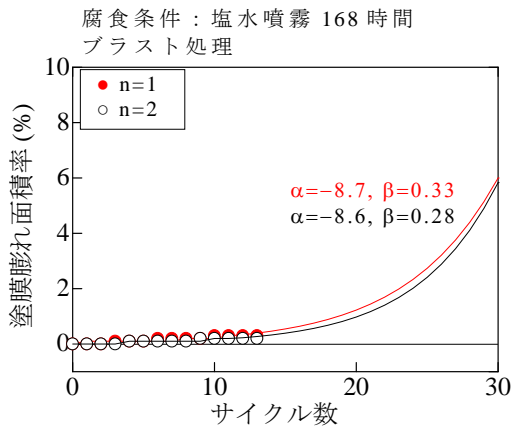
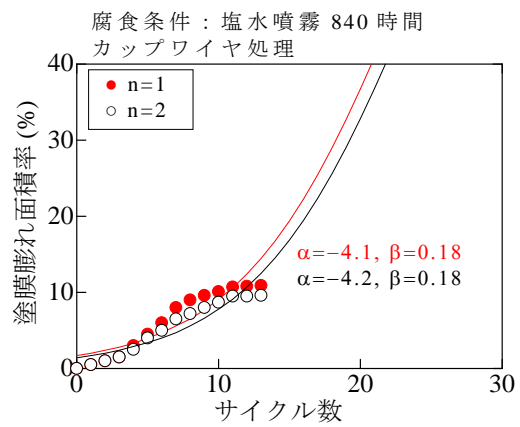
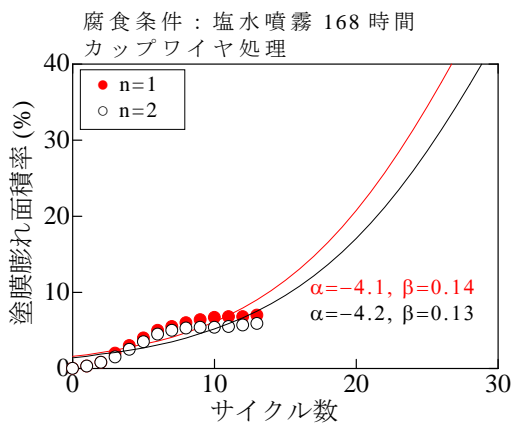
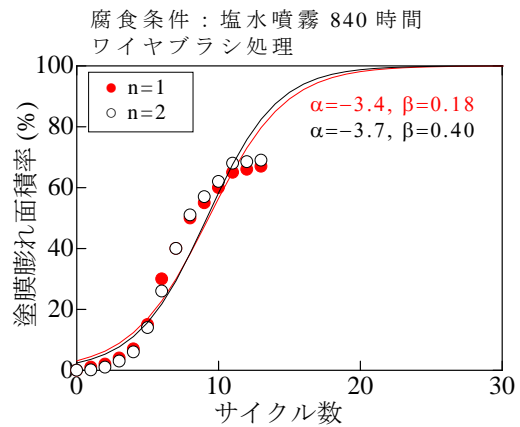
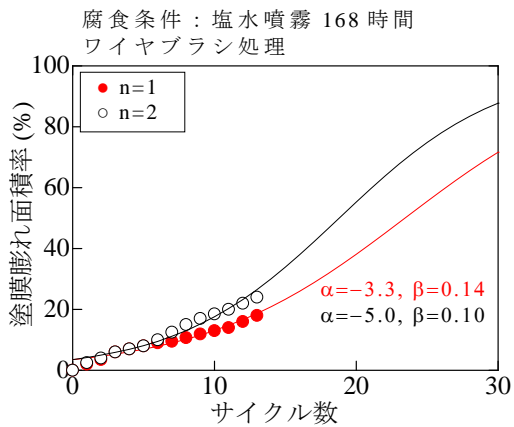


図 4-6 複合サイクル試験結果

塗装前		塗装後
ワイヤブラシ処理	カップワイヤ処理	13 サイクル後
	—	
塩水噴霧 168 時間 ワイヤブラシ処理 (n=1)		
	—	
塩水噴霧 168 時間 ワイヤブラシ処理 (n=2)		
塩水噴霧 168 時間 カップワイヤ処理 (n=1)		
塩水噴霧 168 時間 カップワイヤ処理 (n=2)		
	—	
塩水噴霧 840 時間 ワイヤブラシ処理 (n=1)		
	—	
塩水噴霧 840 時間 ワイヤブラシ処理 (n=2)		
塩水噴霧 840 時間 カップワイヤ処理 (n=1)		
塩水噴霧 840 時間 カップワイヤ処理 (n=2)		

黄枠は、図 4-8 に示す各領域の面積を計測した範囲を示す。

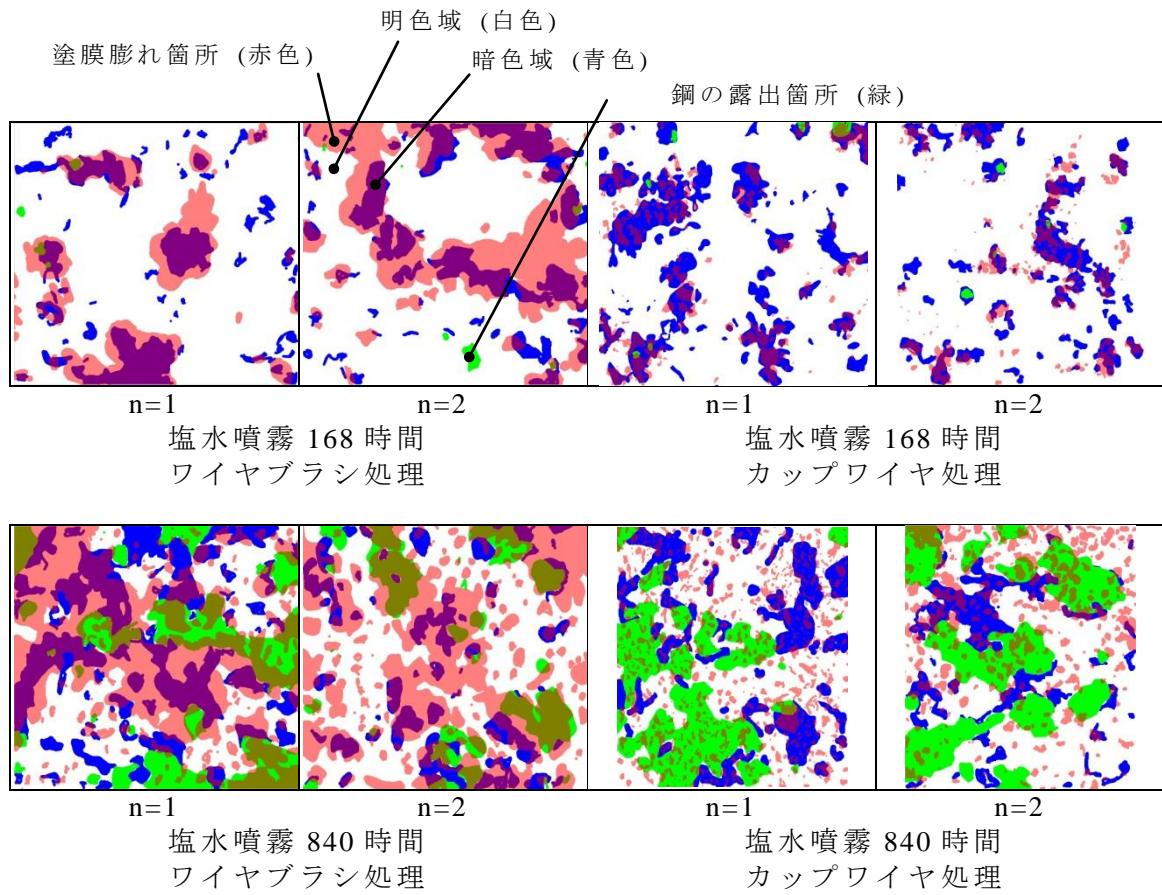
図 4-7 複合サイクル試験結果

図 4-7 より，いずれの試験片においても，塗膜膨れは暗色域および鋼の露出箇所近傍で生じる傾向にある．この傾向を定量的に評価するため，各試験片の一定範囲において明色域，暗色域および鋼の露出箇所と塗膜変状箇所を図示し，それぞれの面積を計測した．

図 4-7 の黄枠内における各領域の分布図を図 4-8 に示す．ワイヤブラシ処理した試験片では比較的大きな塗膜膨れが発生しており，腐食鋼板のどのような領域から塗膜膨れが発生しているのか評価可能である．すなわち，腐食鋼板の各領域を基準とした評価が妥当と考えられる．その一方で，カップワイヤ処理した試験片では比較的小さな塗膜膨れが発生しており，各々の膨れがどの領域から発生しているのかを評価するのが妥当と考えられる．そこで，塗膜膨れ面積率 (S_{bl})，暗色域および明色域の面積率 (S_{da} , S_{li})，鋼の露出箇所の面積率 (S_{st}) を算出するとともに，以下の割合を算出した．

- ・暗色域および鋼の露出箇所の全面積に対する，塗膜膨れ箇所と暗色域および鋼の露出箇所の重なり合う面積の割合 (S_a)
- ・塗膜膨れの全面積に対する，暗色域および鋼の露出箇所と塗膜膨れ箇所が重なり合う面積の割合 (S_b)

ワイヤブラシ処理した試験片では S_a ，カップワイヤ処理した試験片では S_b により評価した．上記の面積率および割合の算出結果を表 4-7 に示す．



注：塗膜膨れ箇所と暗色域，明色域，鋼の露出箇所との重なりあう箇所を表すため，塗膜膨れ箇所を半透明の赤色で図示した。

図 4-8 図 4-7 の黄枠内における各領域の分布図

表 4-7 各領域の面積率の算出結果 (単位：%)

腐食条件 素地調整	塩水噴霧 168 時間				塩水噴霧 840 時間			
	ワイヤブラシ 処理		カップワイヤ 処理		ワイヤブラシ 処理		カップワイヤ 処理	
繰り返し数	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
S_{bl}	22.2	38.6	11.6	10.0	55.5	55.2	22.3	16.8
S_{da}	15.3	19.9	23.9	16.1	30.9	16.7	24.7	15.6
S_{li}	84.3	79.4	75.5	83.5	46.4	68.5	48.7	53.2
S_{st}	0.4	0.7	0.7	0.4	22.7	14.8	26.6	31.1
S_a	72.1	78.1	35.9	37.3	62.4	64.5	24.4	18.8
S_b	51.1	41.6	76.3	61.3	60.3	36.8	58.7	52.3

ワイヤブラシ処理した試験片では、いずれの試験片においても S_a が 60% 以上となり、暗色域および鋼の露出箇所の上半分が塗膜膨れ箇所と重なり合っている。また、カップワイヤ処理した試験片ではいずれも S_b が 50% 以上となり、上半分の塗膜膨れ箇所は暗色域および鋼の露出箇所と重なり合っている。この要因について、腐食生成物の電気化学反応過程から考察した。

腐食生成物を残置した状態で塗装し、そのときの塗膜下の腐食生成物の性状について分析した結果⁶⁾によると、腐食生成物が残置された状態で塗装した場合、含水水酸化鉄の一種であるレピドクロサイト ($\gamma\text{-FeOOH}$) と X 線回折的非晶成分が還元反応を受けてマグネタイト (Fe_3O_4) が増加し、さらに腐食生成物/鋼素地間の界面に塩化物イオンが多く分布する領域が存在する場合、塩化物イオンの影響によってアノード領域が固定化されることによるマクロセル腐食が生じ、このときのカソード領域は表層に近い腐食生成物となることが考察されている。

このことを考慮すると、第 3 章で示したように本試験で供した腐食鋼板の暗色域には塩化物イオンが存在していることから、促進劣化試験によって塗膜下での腐食が進行するとき、暗色域は鉄の腐食反応におけるアノード領域となる。その結果、暗色域はマクロセル腐食を生じ、暗色域を中心に局所的に腐食が進行することになる。なお、鋼の露出箇所についても、もともと暗色域だったことが示唆されているため、暗色域と同様の挙動を起こす可能性がある。このため、暗色域および鋼の露出箇所における塗膜下での腐食速度は明色域と比較して大きく、その結果、腐食生成物の体積増加にともなう塗膜膨れを生じたものと推定される。

なお、カップワイヤ処理を行なった場合にも暗色域において塗膜膨れが生じたのは、腐食によって鋼表面に生じた微細な窪みに腐食生成物が残存しており、腐食生成物を完全に除去できていないためだと考えられる。

このような塗膜変状程度の発生状況について、促進試験時間との関係について考察した。ワイヤブラシ処理した試験片のサイクル数に対する S_a の推移を図 4-9 に示す。サイクル数が経過しても、 S_a はほとんど変化していない。この要因として、酸素や水分は塗膜に侵入できるが塩化物イオンなどの比較的大きなイオンは塗膜内にほとんど侵入できないことが挙げられる。このため、塗膜下の塩化物イオンは一定量となり、鋼が腐食する反応系はほとんど変化しないために S_a は一定の値となることが推定される。

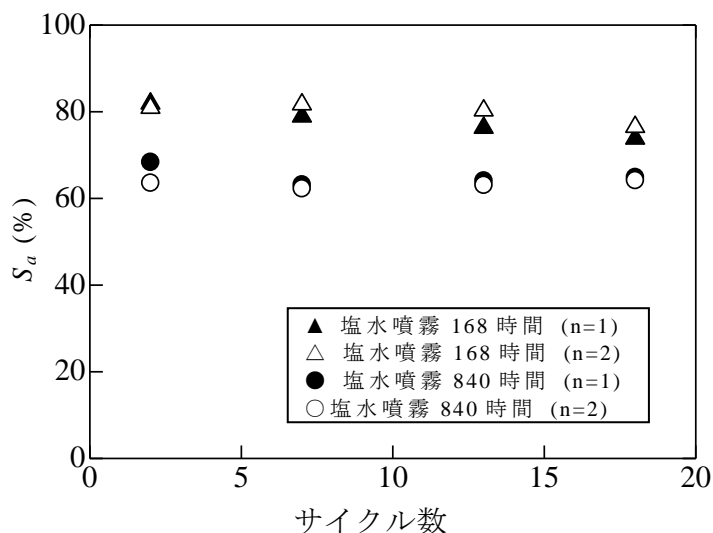


図 4-9 ワイヤブラシ処理した試験片のサイクル数に対する S_a の推移

続いて、明色域における腐食挙動について考察する。文献[6]の考え方に基づく
と、塗膜下で腐食が進行する際に、塩化物イオンが検出されなかった明色域はカ
ソード領域となり、アノード領域としての腐食反応は生じないと考えられる。こ
のため、明色域では局所的な腐食が進行せず、塗膜膨れといった顕著な塗膜変状
を生じなかったものと推定される。

なお、塩水噴霧 840 時間の腐食鋼板に塗装した試験片では、ワイヤブラシ処理
した試験片の S_a およびカップワイヤ処理した試験片の S_b のいずれも、塩水噴霧
168 時間の場合と比較して低下した。この要因の一つに、明色域において比較的
小さな塗膜膨れが発生したことが挙げられる。すなわち、塩水噴霧時間の経過と
ともに明色域の性状が変化し、明色域であった箇所に暗色域が点在した可能性が
挙げられる。ただし、本試験では腐食生成物の各領域を目視で区分する以外の方
法がなく、このような明色域の挙動を定量的に明らかにすることはできなかった。
今後の課題として、塩水噴霧時間に対する腐食生成物の分布に関する挙動を詳細
に評価可能な手法について、検討する必要がある。

b) クリヤー塗料を適用した塗装腐食鋼板

クリヤー塗料を適用した試験片では、端部からの著しい腐食がサイクル初期から
確認された。このため 5 サイクルで試験を終了した。試験片外観を図 4-10 に
示す。ワイヤブラシ処理もしくはカップワイヤ処理した試験片の場合、明色域に
該当する箇所では鋼板側の色相に大きな変化は見られない。それ以外の部分につ
いては塗膜変状が著しく、外観で鋼板側の変化を評価し難い。具体的には、ワイ
ヤブラシ処理した試験片では塗膜膨れが暗色域に発生したほか、鋼の露出箇所で

は微細な塗膜膨れが発生し，これに伴って塗膜が白濁化している．カップワイヤ処理した試験片では，暗色域および鋼の露出箇所だった部分で微細な塗膜膨れが発生し，これに伴い塗膜が白濁化している．したがって，外観上の塗膜変状程度は異なるものの，塗膜膨れの発生傾向は塗装系 B 相当を適用した試験片と概ね一致している．

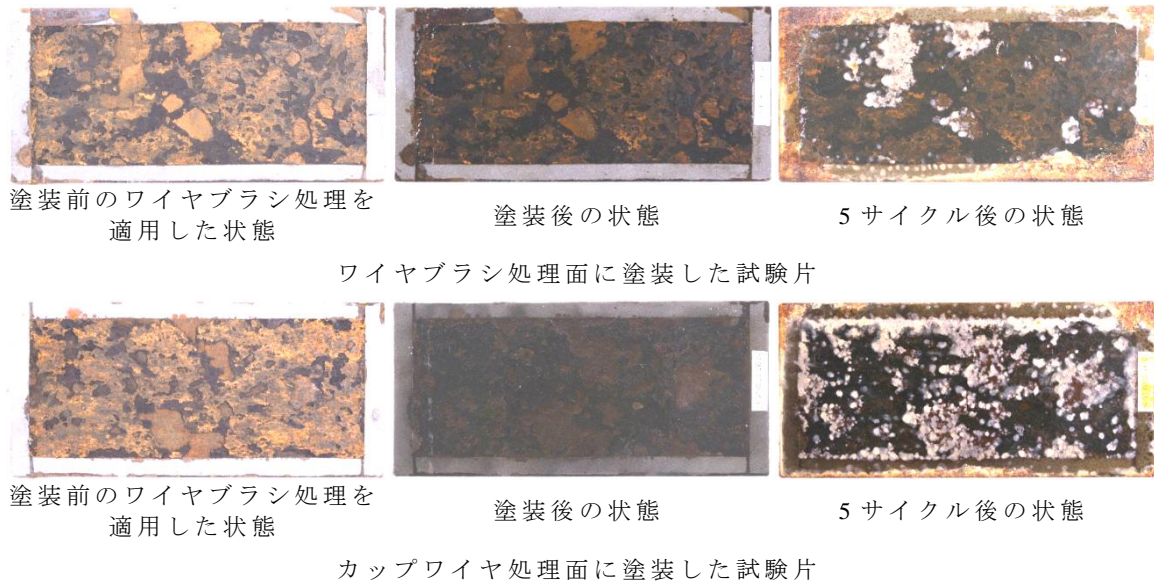


図 4-10 ワイヤブラシ処理面またはカップワイヤ処理面にクリア塗料を適用した試験片の外観

その一方でブラスト処理した試験片では，塗膜の変状は見られないものの，鋼素地表面に腐食による変色が点状に分布している．また，この変色の発生箇所に規則性はなく，明色域や鋼の露出域でも発生している．腐食の発生が点在した要因の一つに，ブラスト時の除錆度を $D Sa 2$ としたことでわずかに残置された腐食生成物が塗膜／鋼板間の付着性を阻害し，極小さい範囲での塗膜下腐食の起点となったことが挙げられる．

ただし，ワイヤブラシ処理やカップワイヤ処理した試験片のように，塗膜の白濁化といった変状はみられず，現段階では腐食の発生が塗膜の防食性能におよぼす影響は小さいと考えられる．また，塩化物イオンを含む腐食生成物が残置されていたと推定される鋼の露出域や暗色域において，当該の腐食の発生数や進行程度が増加するなどの傾向は見られなかった．このことから，塩化物イオンを含む腐食生成物が鋼表面に存在していても，塗膜の防食性能を早期に低下させるためには腐食生成物が一定量必要であり， $D Sa 2$ 程度のブラスト処理を行なえば，塗膜の防食性能に影響を及ぼさないことが推定される．

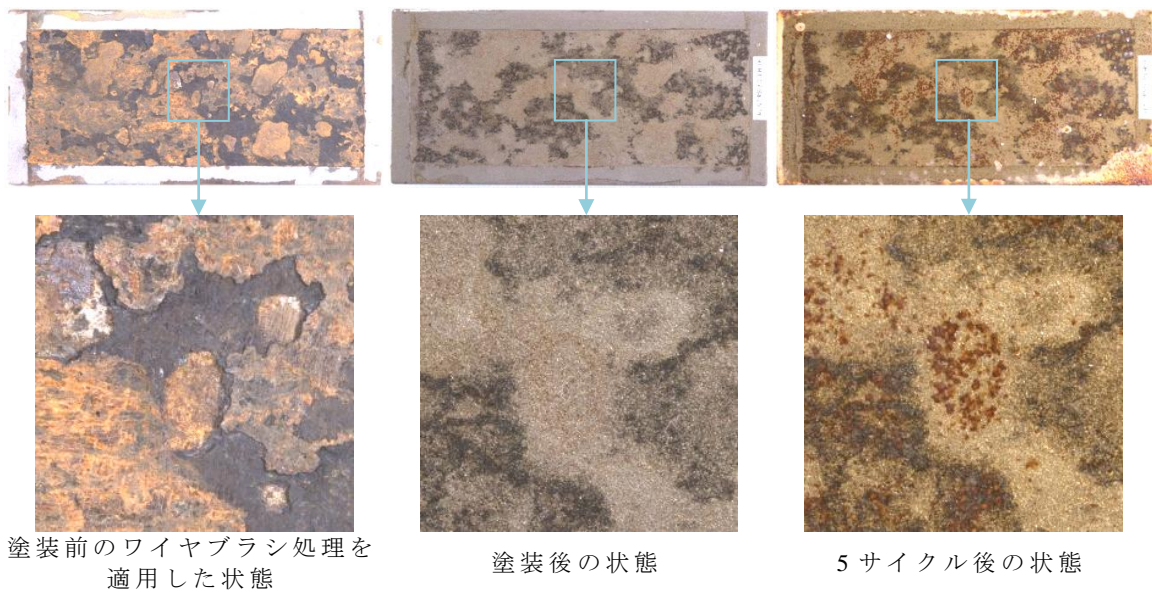


図 4-11 クリヤー塗料を適用した試験片の外観
(ブラスト処理面に塗装した場合)

4.2 鋼素地の残留塩が塗膜の防食性に及ぼす影響

前節より，残地された腐食生成物の中に含まれる塩化物イオンが塗膜の防食性能へ影響を与える可能性があることが示唆された．このことを検証する場合，腐食生成物の性状を変えずに腐食生成物中の塩化物イオン量のみを変化させる必要がある．しかしながら，なんらかのエネルギーを与えずに腐食生成物／鋼素地界面に存在する塩化物イオンを除去することは困難である．例として，前節で用いた 0.01wt% の塩水を 168 時間噴霧した腐食鋼板を蒸留水 200ml に浸漬した場合の溶液中の塩化物イオン濃度を図 4-12 に示す．腐食鋼板には約 $0.5\text{g}/\text{m}^2$ の塩化物イオンが含まれており，全ての塩化物イオンが溶出した場合の溶液中の塩化物イオン濃度は約 25ppm となる．しかしながら，腐食鋼板を数時間浸漬させた場合の溶液中の塩化物イオン濃度は約 0.7ppm であり，全ての塩化物イオンが溶出した場合の濃度の 3% 未満である．したがって，腐食鋼板を単純に浸漬しただけでは塩化物イオンはほとんど溶出しないと言える．これは，蒸留水へ浸漬すると鋼の腐食反応が生じて鋼表面がアノードとカソードに分極し，その際にアノード部には塩化物イオンが電気化学的に補足されるためと考えられる．

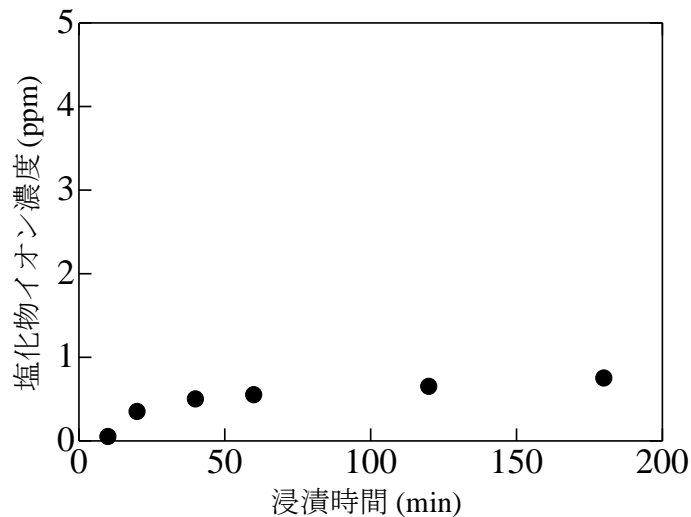


図 4-12 腐食鋼板を蒸留水に浸漬した場合の溶液中の塩化物イオン濃度

そこで本節では、腐食生成物の性状が変化する可能性があるものの、第 4.1 節で用いた電気化学的手法により腐食鋼板から塩化物イオンを除去し、塗装した場合の塗膜の防食性能を評価した。

4.2.1 試験方法

腐食鋼板の作製には、前節と同様に室内での連続塩水噴霧を適用した。具体的には、JIS G 3101 に規定される冷間圧延鋼板 (SS400, 両面サンドブラスト処理, 寸法 $150 \times 70 \times 3.2\text{mm}$) の片面をエポキシ樹脂塗料で裏面を塗り包んだ後に、JIS K 5600-7-1 に準拠した連続中性塩水噴霧試験によって鋼の露出面を腐食させた。塩化ナトリウム水溶液の濃度は $0.01\text{wt}\%$ とし、噴霧時間は 168 時間もしくは 840 時間とした。腐食鋼板の素地調整はワイヤブラシ処理とし、ゆるく付着する腐食生成物が脱落しなくなるまで素地調整を行なった。

腐食生成物中の塩化物イオンの除去方法についても、前節で用いた電気化学的手法を採用した。具体的には、ワイヤブラシ処理した腐食鋼板を 0.1mol/l の硝酸カリウム (KNO_3) 水溶液 1000ml に浸漬し、白金電極を正極、腐食鋼板を負極として定電流電源により 1.0A の電流を 60 分印加した。このとき、通電時間に対する塩化物イオンの溶出量を把握するため、浸漬液を 5~10 分間隔で約 20ml 採取し、吸光光度法を用いて溶出した塩化物イオン量を測定した。

また、比較用として、腐食生成物中の塩化物イオンを除去しない腐食鋼板については、通電せずに KNO_3 水溶液に 60 分浸漬した。

なお、本手法を適用した際の腐食鋼板に残存する塩化物量については、硝酸を用いて腐食鋼板を溶解し、その溶液中の塩化物イオンをイオンクロマトグラフィーによって測定している。この結果、塩化物イオンの測定値は検出下限以下であ

り，塩化物イオンは腐食鋼板中にほとんど残留していないことを確認している。

(3) 塗装腐食鋼板の製作および室内促進劣化試験

上述した塩化物イオンの除去作業を行なった腐食鋼板を蒸留水に浸漬し，表面に残留する KNO_3 を除去した後に約 1 週間室内に養生した．その後，塗装系 B 相当および塗装系 T を適用した．各塗装系の概要を表 4-8 に示す．

表 4-8 各塗装系の塗装工程

工程	塗装系 B 相当		塗装系 T	
	塗料名	塗布量 (g/m^2)	塗料名	塗布量 (g/m^2)
1 層目	鉛・クロムフリーさび止めペイント	140	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
2 層目	鉛・クロムフリーさび止めペイント	140	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
3 層目	長油性フタル酸樹脂塗料中塗	110	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
4 層目	長油性フタル酸樹脂塗料上塗	105	厚膜型ポリウレタン樹脂塗料	150

促進劣化試験方法および試験片の評価方法は，前節と同様とした．すなわち，促進劣化試験には表 4-4 に示す鉄道総研式複合サイクル試験を適用し，塗膜の耐久性評価は，塗膜表面に観察される塗膜膨れや点さびから塗膜膨れ面積率を算出して行なった．さらに，式 (4-3) ～式 (4-5) を用いて，算出した塗膜膨れ面積率を基にしたロジスティック回帰を行ない，一定の塗膜膨れ面積率となるのに要するサイクル数を推定した．

4.2.2 試験結果と考察

(1) 腐食生成物に含まれる塩化物イオンの除去程度の検討

通電時間と溶液中の塩化物イオン濃度の関係を図 4-13 に示す．塩水噴霧条件によって塩化物イオンの溶出傾向は異なるが，両条件とも通電開始から 50 分経過した段階で塩化物イオン濃度は一定値となっている．したがって，腐食生成物に含まれる塩化物イオンは通電から 1 時間以内にほとんど除去されたと言える．

通電前後の腐食鋼板の外観を図 4-14 に示す．通電後には腐食生成物が全体的に黒色に変化している．これは，通電にともなう電気化学反応によって含水水酸化鉄が還元され，マグネタイトに変化したためと推定される．

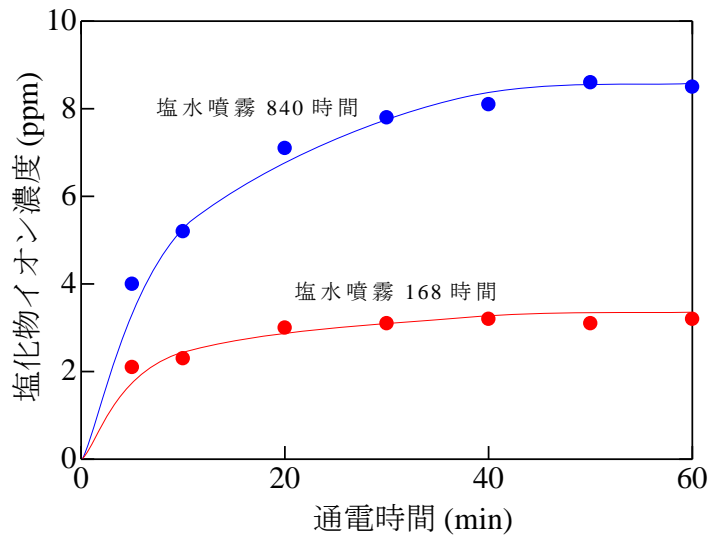


図 4-13 通电時間に対する溶液中の塩化物イオン濃度

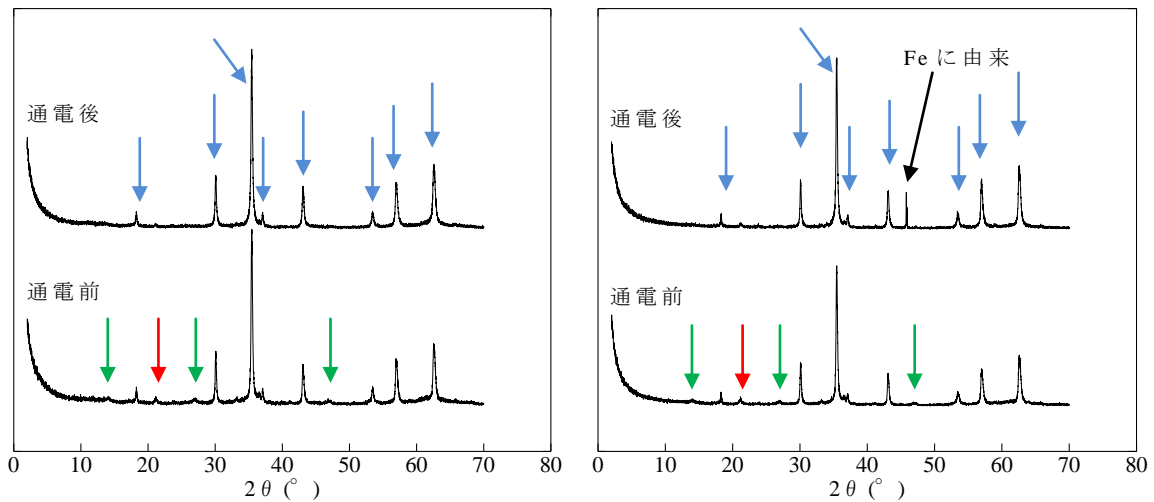


通电前の外観
 (塩水噴霧 840 時間により作製した腐食鋼板)
 通电後の外観

図 4-14 通电前後の腐食鋼板の外観

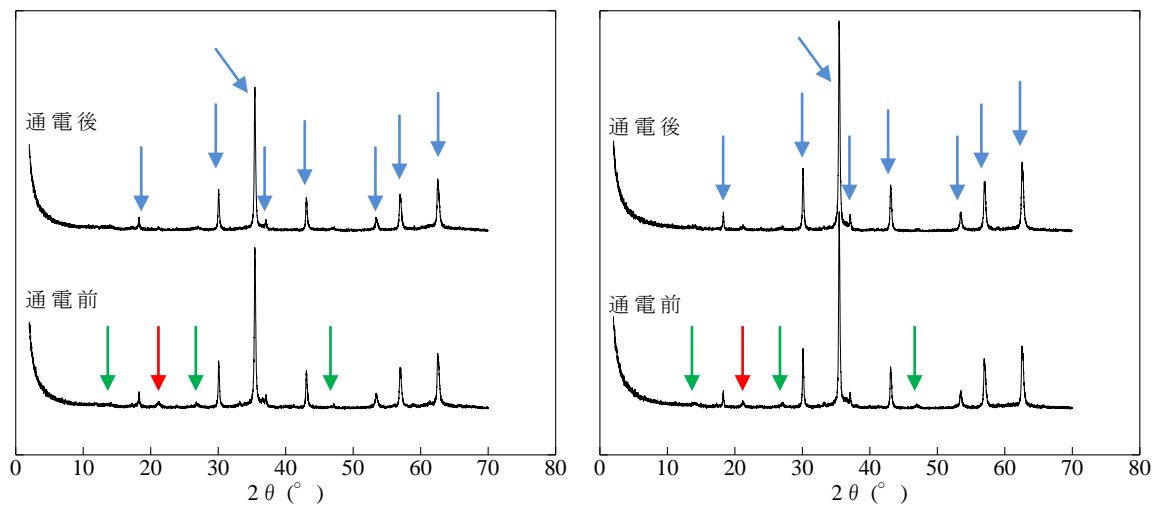
腐食生成物の性状が変化したことを検証するため、塩水噴霧 168 時間または 840 時間によって腐食させた鋼板に対して、通电前後における明色域および暗色域の腐食生成物を採取し、X 線回折による結晶成分の定性分析を行なった。このとき、採取した腐食生成物は乳鉢を用いて粒径が約 $100\mu\text{m}$ 以下になるように調整した。分析には縦型ゴニオメータの X 線回折装置を用い、管電流および電圧は、 200mA および 50kV とした。対陰極には Cu を用い、発散スリットおよび散乱スリットは 0.5 度、受光スリットは 0.15mm とした。

分析結果を図 4-15 に示す。これより、腐食生成物の採取領域や腐食時の塩水噴霧時間に関わらず、ゲーサイトやレピドクロサイトなどの含水水酸化鉄に由来するピークが通电後に減少していることが確認された。これより、腐食鋼板に存在する含水水酸化鉄は通电時の電気化学的反応によってマグネタイトに変化したことが示唆された。



(a) 塩水噴霧 168 時間 暗色域

(b) 塩水噴霧 168 時間 明色域



(c) 塩水噴霧 840 時間 暗色域

(d) 塩水噴霧 840 時間 明色域

赤矢印…ゲーサイトを示すピーク，緑矢印…レピドクロサイトを示すピーク

青矢印…マグネタイトを示すピーク

図 4-15 腐食生成物の X 線回折結果

(2) 室内促進劣化試験

サイクル数と塗膜膨れ面積率の関係を図 4-16 に示す。また，塗膜膨れ面積率が 10% または 50% に達するまでに要するサイクル数をロジスティック回帰によって算出した結果を表 4-9 に示す。塗装系および塩水噴霧条件に関わらず，電気化学的に腐食生成物に含まれる塩化物イオンを除去した塗装腐食鋼板の方が塗膜変状を生じにくい傾向にある。ロジスティック回帰による 10% または 50% の塗膜膨れ面積率に達するまでに必要なサイクル数を比較すると，塗装系 B 相当の場合には 1.5～2 倍に増加している。塗装系 T の場合には塩水噴霧条件によって大きく異なり，塩水噴霧 168 時間では約 1.5 倍，塩水噴霧 840 時間の場合には数～数十倍

に増加している。

このような挙動を示した要因の一つとして、塗膜下に塩化物イオンを含む腐食生成物が存在しないため、第 4.1 節で述べた暗色域におけるマクロセル腐食挙動が抑制されたことが挙げられる。また、塗膜下にイオン性物質が存在しないために浸透圧の作用が低減し、塗膜内へ水分が浸入しにくくなることにより腐食の進行程度が抑制されたことが挙げられる。特に、塗装系 T は塗装系 B 相当と比較して高い水蒸気透過性を有するため、腐食生成物に含まれる塩化物イオンを除去することによって塗膜内への水分の浸入が大幅に抑制され、その結果、塗膜膨れ面積率の増加割合が大きく低減したと推定される。

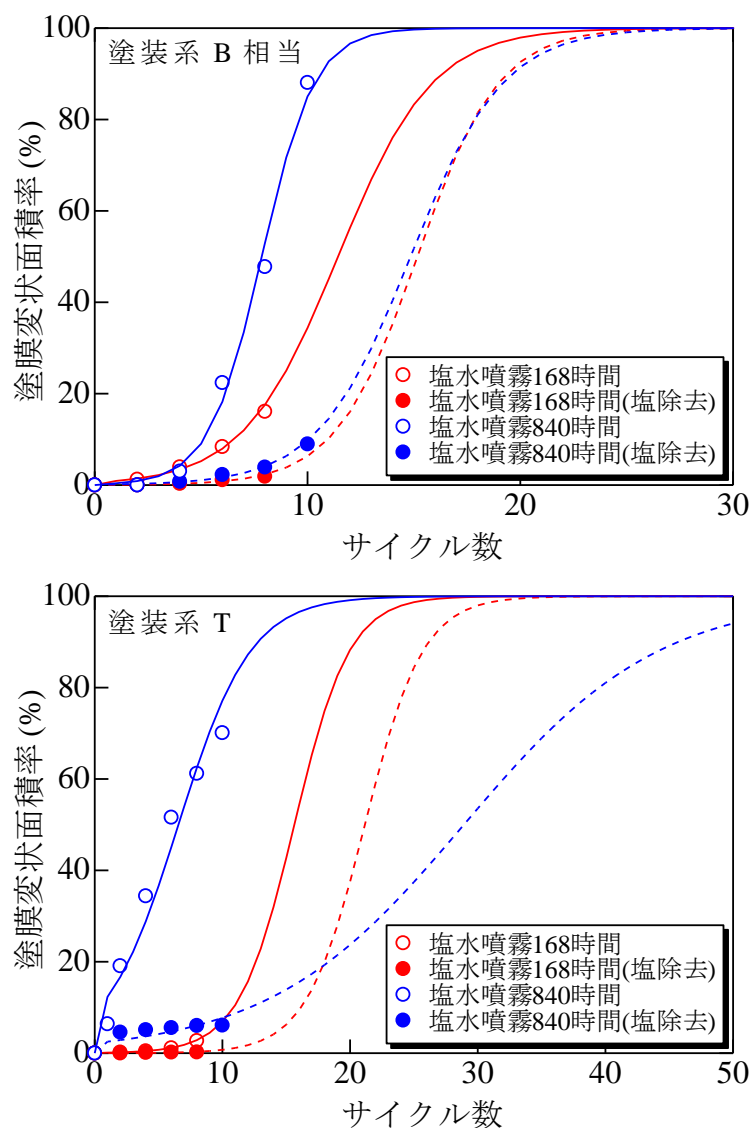


図 4-16 塗膜膨れ面積率の推移

表 4-9 ロジスティック回帰の結果

塗装系	塩除去の有無	塩水噴霧 168 時間		塩水噴霧 840 時間	
		10%となる時の サイクル数	50%となる時の サイクル数	10%となる時の サイクル数	50%となる時の サイクル数
B 相当	未除去	6.6	11.4	5.1	7.9
	除去	11	15.2	10.1	14.8
T	未除去	10.9	15.6	0.3	6.6
	除去	16.2	21.2	12.1	28.9

4.3 塩の除去程度と塗膜防食性の関係

第 4.2 節において、塩の除去により塗膜の防食性能が大きな変化した条件、すなわち塩水噴霧を 840 時間行なうことで作製した腐食鋼板に塗装系 T を適用した場合について、塩の除去程度を替えた場合の塗膜の防食性を評価した。

ここでは、電流の印加方法は第 4.2 節と同様とし、印加時間を 0 分、1 分、4 分、60 分とした。このときに腐食鋼板に残留する塩化物イオン量は、図 4-13 から概略で 0.85, 0.75, 0.55, 0g/m² となる。その後の塗装条件、促進試験条件などは全て第 4.2 節と同様に行なった。

作製した試験片について、サイクル数と塗膜膨れ面積率の関係を図 4-17 に示す。塩の除去程度が大きいほど、塗膜膨れ面積率は低下する傾向にある。続いて、塗装前の腐食面に残留する塩化物イオン量と 9 サイクルの段階における塗膜膨れ面積率の関係を図 4-18 に示す。塩化物イオン量が増加するほど塗膜変状面積率は指数関数的に増大する傾向にある。

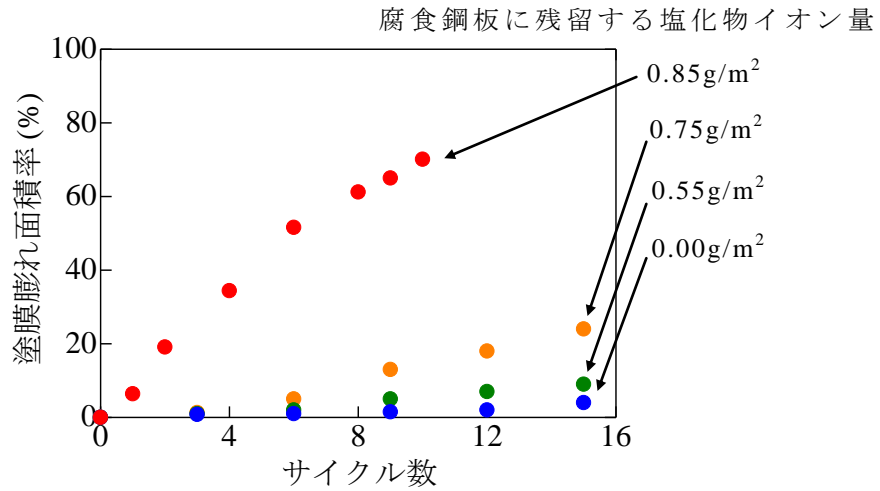


図 4-17 サイクル数と塗膜膨れ面積率の関係

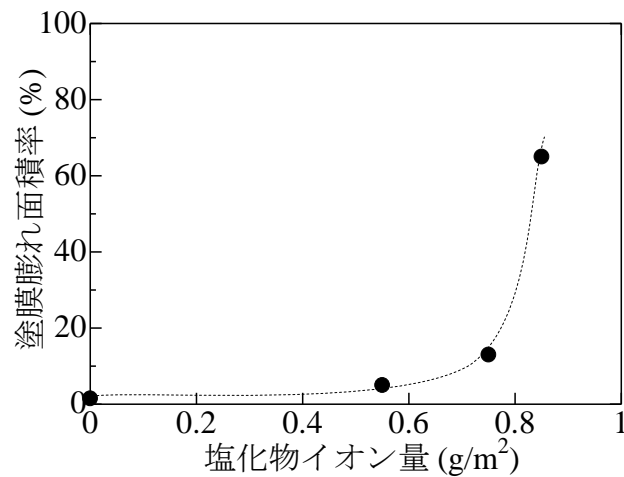


図 4-18 塗装前の残留塩化物イオン量と9サイクル時点の塗膜膨れ面積率の関係

電気化学的手法により塗膜の防食性能が向上した要因について、塩以外の因子が塗膜の防食性能へ与えた影響についても考察する。図 4-11 で示したように、電気化学的手法により腐食鋼板に含まれる塩化物イオンを除去すると、鋼表面の含水水酸化鉄は還元されてマグネタイトに変化すると考えられる。このとき、文献 [4] で述べられているように、含水水酸化鉄は塗膜下で腐食が進行する際に必要な物質であるとされている。したがって、電気化学的手法により腐食生成物中の含水水酸化鉄が減少したため、塗膜下での腐食反応が抑制された可能性がある。ただし、この点については、電気化学的手法の適用に伴う腐食生成物の性状の変化を把握する必要があると考えられる。

4.4 まとめ

第4章では、早期に塗膜下腐食が発生する鋼構造物に対して、塗替え時の適切な素地調整手法を提案することを目的として、塩水噴霧試験によって作製した腐食鋼板の腐食生成物を分析するとともに、腐食生成物が残置された状態に塗装した場合の塗膜耐久性を室内促進劣化試験によって評価した。また、腐食生成物に含まれる塩が塗膜の防食性能に与える影響を把握するため、電気化学的手法によって腐食生成物中の塩分を除去した後に塗装した場合の塗膜の耐久性評価試験を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 塩水噴霧によって形成した腐食生成物のうち、明色域における腐食生成物は基材に強く固着する傾向にある。また、暗色域では腐食による減肉程度が大きい傾向にある。
- (2) 塗膜の防食性能は腐食生成物の残存程度だけでなく腐食生成物の性状に影響を受ける。塩を含む腐食生成物が存在する暗色域や鋼の露出域では、塗膜下での腐食速度が明色域よりも大きい傾向にある。
- (3) その一方で、塩水噴霧時間の長い腐食鋼板の場合、明色域でも小さな塗膜膨れを多数生じる傾向にある。塩水噴霧時間の経過とともに明色域の性状が変化し、明色域であった箇所に暗色域が点在した可能性が挙げられる。
- (4) ブラスト処理した試験片では、塗膜下で点状に腐食が進行する傾向にある。ただし、塗膜自体に大きな変状はみられず、塗膜の防食性能を早期に低下させるためには一定量の腐食生成物が残存している必要があると推定される。
- (5) 電気化学的手法の適用によって腐食生成物中の塩化物イオンが除去されるとともに腐食生成物の性状が変化し、塗膜の防食性能は向上する。この傾向は、環境遮断性の高い塗装系において顕著である。

これらの知見から、機械的あるいは化学的な手法を用いて腐食生成物およびそれに含まれる塩分を除去することによって塗膜の防食性能が向上できると言える。特に、電気化学的手法による手法は、従来の素地調整方法である機械的手法の適用困難な部位に対して有効な手段となりうる可能性がある。

しかしながら、現段階では、実構造物への適用を想定した実用的な電気化学的手法が構築されていない。したがって、素地調整が困難とされる狭隘部や、面方向の異なる腐食部位などを本手法の対象とした検討が今後の課題になると考えられる。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，2013.
- 2) 田中誠：鉄道総研式複合サイクル試験による塗膜性能評価，防錆管理，Vol.47，No.6，pp.205-214，2003.
- 3) 栗山寛：防錆塗膜の寿命予測に関する一つの試み，防錆管理，Vol.34，No.5，pp.182-186，1990.
- 4) 鈴木一広，村松利光，飯田真司，藤原秀幸：水力発電関連設備の塗膜診断における塗膜寿命の推定のための試み，防錆管理，Vol.38，No.7，pp.243-252，1994.
- 5) 堀川浩之，吉川正樹，橋本光行，玉田明宏：RBM を用いた港湾鋼構造物の防食機能の維持管理手法-信頼性解析と極値統計法の併用，プラントエンジニア，Vol.40，No.8，pp.13-19，2008.
- 6) 田中誠：塗装さび鋼板のさび層構造と塗膜耐久性，防錆管理，Vol.34，No.11，pp.479-485，1990.

第5章 鋼構造物の維持管理費用低減のための防食性能向上法

第3章および第4章から、塗装前に残置される腐食生成物およびそれに含まれる塩分を除去することによって塗膜の防食性能を向上できることを示し、電気化学的手法の適用は、従来の素地調整方法以上の効果を得る可能性を得た。

しかし、現段階では実構造物に対する実用的な手法は構築されておらず、その費用対効果についても検討する必要がある。また、一般的な素地調整手法についても、それらの費用対効果を明確にする必要もある。

現在の塗替え施工において採用される素地調整方法は、手工具・動力工具を用いた方法とブラスト工法であり、第3章および第4章の結果からも、ブラスト工法の方がより防食性能を向上できると言える。ただし、ブラスト工法は電源や種々の設備の搬入を必要とするほか、研削材の費用を考慮しなければならないなど、対象とする鋼構造物の構造・形式や架設環境によっては、他の素地調整方法と比較して施工費用が高額になると言われている。このため、これまでに広く普及されるに至っていない。また、著しく腐食した塗装鋼構造物に対してブラストを適用する場合の作業性や、除錆度と塗膜の防食性能の関係について定量的に検討された事例が少ない。例えば、黒皮鋼板ではグリット形状を有するフェロニッケルスラグの研削材が効率的だが、ブラストの作業効率は、使用する研削材の種類や投射条件によって異なり、対象とする材質に応じて最適な条件を選定する必要があると報告されている¹⁾。このように、ブラスト工法において適切な施工費用を算出することが困難な状況にあり、場合によっては過剰な素地調整を行なっている可能性がある。

そこで本章では、塗装鋼構造物の塗替えに要する維持管理費用に着目し、作業性や付着性、防食性などの観点からブラストを適用する場合の適正な施工条件を見出すとともに、維持管理費用を低減可能な防食性能向上法について提案した。

5.1 ブラストの性能評価

5.1.1 試験方法

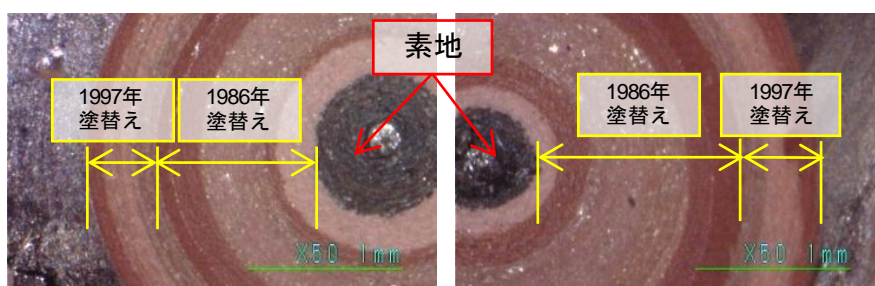
(1) 試験体

試験体は、第2章で調査した旧余部橋梁の橋脚部位から切り出した塗装鋼材を用いた。試験体は、最も沿岸に近い橋脚である起点側から3つ目の橋脚の主構部から切り出すこととし、外観上明らかに腐食が生じている箇所を選定して、約350×350mmの寸法で切り出した。なお、試験体の総塗膜厚は約450 μ mであり、塗装系G-7（厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料4回塗）と塗装系T-7（厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料3回塗+厚膜型ポリウレタン樹脂塗料1回塗）がそれぞれ1986

年と 1997 年に塗装されている．試験体の外観および塗膜断面観察写真を図 5-1 に示す．



試験体の外観



塗膜断面の状態（カット式膜厚計による円錐状切削部の拡大写真）

図 5-1 試験体の外観および塗膜断面観察写真

なお，一部の試験項目（素地調整面の付着力評価試験，防食性評価試験）については，上述の試験体では腐食による鋼材表面の凹凸が激しいことや，部材の形状が比較的大きいことなどから試験を行なうのが困難と考えられた．そこで，JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」に規定される冷間圧延鋼板（SS400，両面サンドブラスト処理，寸法 150×70×3.2mm）を用いて，JIS K 5600-7-1 に準拠した連続中性塩水噴霧試験による腐食鋼板を別途作製した．このとき噴霧液として使用した塩化ナトリウム水溶液の濃度および塩水噴霧時間を表 5-1 に示す．なお，素地調整面の付着力評価試験に使用する腐食鋼板については表面の凹凸を大きくするため，第 3 章～第 4 章で使用した腐食鋼板よりも塩水噴霧時間を長く設定して 1500 時間とした．作製した腐食鋼板を図 5-2 に示す．

表 5-1 塩化ナトリウム水溶液の濃度および塩水噴霧時間

試験項目	塩水濃度 (wt%)	塩水噴霧時間 (hour)
付着力評価	0.05	1500
防食性評価	0.05	840



塩水濃度…0.05wt%，塩水噴霧時間…1500 時間

図 5-2 腐食鋼板の外観

(2) ブラスト方法

ブラスト機器には直圧式のエアブラストマシンを用い、最も一般的なブラスト処理方法であるオーブンブラスト方式を採用した。ブラストは室内（幅 3.5×奥行き 5.0×高さ 4.0m，入り口のみ全面開放）で行なった。投射圧力は 0.7MPa とし、ブラストノズル（口径 $\phi 10\text{mm}$ ）から試験体までの距離は約 90cm とした。作業状況を図 5-3 に示す。



図 5-3 ブラスト時の作業状況

使用する研削材は、現場施工で一般的に使用されているフェロニッケルスラグ研削材とし、粒径、形状の異なる 4 種類を用いた。なお、かつて主流であった研削材であるけい砂については、2007 年に改訂された JIS Z 0312「ブラスト処理用非金属系研削材」で削除されているため、本試験の適用対象外とした。使用した研削材の概要および外観を表 5-2 および図 5-4 に示す。ここで示す 50% 粒径とは、格子径の異なる各ふるいを通過する質量の百分率が 50% となるときの値である。

なお、防食性評価のための試験片については、表 5-2 に示す研削材 A を用いて腐食鋼板をブラストし、除錆度を Sa 2 または Sa 3 とした。

表 5-2 試験に使用した研削材の概要

記号	材質	形状	みかけ密度 (kg/dm ³)	モー ス 硬さ	50%粒径 (mm)
A		グリット			0.77
B	フェロニッケル スラグ	グリット	3.1	7.5	0.52
C		ショット			1.22
D		ショット			0.73



図 5-4 使用した研削材の外観

(3) 各評価試験の方法

a) 作業性評価

試験体片面をブラストし，所定の除錆度になるまで塗膜および腐食生成物を除去するまでの時間を計測した．このとき全く腐食していない面についてもブラストし，健全な塗膜の除去速度を算出したうえで腐食生成物の除去速度を以下の式により算出した．

$$v_1 = \frac{A \times x}{t - \frac{A(1-0.01x)}{v_2}} \quad (5-1)$$

ここで， v_1 は腐食生成物の除去速度 (m²/h)， v_2 は塗膜の除去速度 (m²/h)， A は試験片の表面積 (m²)， x は腐食箇所の面積率 (%)， t はブラストに要した時間 (sec) である．

腐食箇所の面積率は，ブラスト終了後の素地調整面を観察し，凹みの生じている部分を腐食箇所として，その合計面積を試験片の全面積で除したものをを用いた．腐食箇所の一例として，ブラスト前後の試験体の外観を図 5-5 に示す．

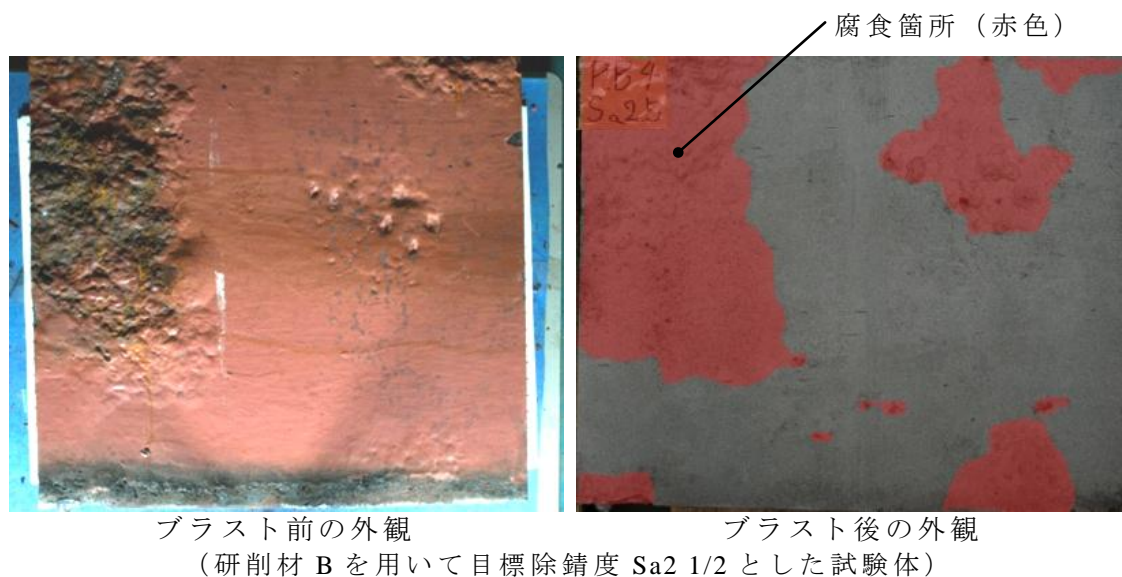


図 5-5 ブラスト前後の試験体外観

ブラストの品質は除錆度と素地調整面の表面あらさから決定した。除錆度については、ISO 8501-1 -Rust grades and preparation of uncoated steel substrates and steel substrates after overall removal of previous coatings -に準拠した Sa 2 (十分なブラスト処理), Sa 2 1/2 (さらに十分なブラスト処理), Sa 3 (目視上正常な鋼材を得るためのブラスト処理) の 3 水準を目安とした。素地調整面の表面あらさについては、接触式の表面あらさ計を用いて、JIS B 0601:1982「製品の幾何特性仕様 (GPS) -表面性状：輪郭曲線方式- 用語、定義及び表面性状パラメータ」の十点平均あらさ (Rz_{JIS82}) を測定した。また、ブラスト後の研削材の状態を評価するため、使用後の 50% 粒径を計測して使用前の値と比較した。

b) 付着塩分測定

本試験の測定対象面はブラストされて微細な凹凸を生じており、脱脂綿を用いた一般の拭取り法では脱脂綿が引っかかるなどの理由により適用できない。また、試験体の腐食箇所には大きな凹凸が形成されており、すき間が生じるために吸着型の付着塩分測定器も使用することができない。そこで、ブレスル法による付着塩分測定を行なった。具体的には、パッチを素地調整面に貼付け、純水 2ml を注射・攪拌した後、バイアル瓶に採取し、イオンクロマトグラフィーを用いて溶液中の塩化物イオン濃度を測定した。測定状況を図 5-6 に示す。



パッチの裏面

パッチ貼付け後の外観

図 5-6 ブレスル法による測定状況

c) 付着力測定

ブラストした試験体表面に塗装した場合の塗膜の付着力を評価するため、塗膜の一般的な付着性評価手法であるアドヒジョン試験と碁盤目試験を行なった。なお、アドヒジョン試験については試験鋼板（腐食鋼板）枚数が不足したため、ショット形状の場合のみ評価した。

アドヒジョン試験では、JIS K 5600-5-7「塗料一般試験方法 -第 5 部：塗膜の機械的性質- 第 6 節：付着性（プルオフ法）」に準じて、アルミニウム合金製ジグを 2 液エポキシ系接着剤で接着し、垂直方向に引張って破断したときの応力測定および破断箇所の観察を行なった。なお、塗膜／鋼材間の付着力は塗膜の凝集破壊時の応力よりも強いことが多い。これは、塗膜を構成する顔料／樹脂間の付着力が比較的小さいことに起因すると考えられる。このため、本試験では塗料を用いず、ブラスト後の鋼表面に 2 液エポキシ系接着剤を直接塗布した。

碁盤目試験は、JIS K 5600-5-6「塗料一般試験方法 -第 5 部：塗膜の機械的性質 - 第 6 節：付着性（クロスカット法）」に準じて行なった。具体的には、ブラスト後に厚膜型変性エポキシ樹脂塗料を約 60 μm の乾燥膜厚となるように 1 回塗布し、約 1 週間室内で養生した。養生後、カッターを用いて幅 1mm の碁盤目を 5×5 マス導入し、セロハンテープで引張った後の塗膜残存程度と破断箇所の観察を行なった。

d) 防食性評価

腐食鋼板をブラストした後、前章の表 4-8 に示す塗装系 B 相当および塗装系 T を塗装した。乾燥および養生した後、前章の表 4-4 に示す鉄道総研式複合サイクル試験に供した。試験経過によって塗膜変状が発生した場合には、その状態をサイクル毎に観察するとともに、塗膜変状を生じた箇所の面積率を算出した。

5.1.2 試験結果

a) 作業性の評価

各研削材における健全な塗膜の除去速度の算出結果を表 5-3 に示す。この結果から、グリット形状の研削材を用いた場合の塗膜の除去速度は $8\sim 10\text{m}^2/\text{h}$ であり、粒径による大きな影響は見られない。一方、ショット形状の研削材を用いた場合、研削材 D の塗膜の除去速度は研削材 C を用いる場合と比較して約半分である。粒径の異なる研削材を投射する場合には粒径の小さい方が被投射面への衝撃力が小さいことが報告されている²⁾が、本試験においては研削材の形状も影響していると考えられる。すなわち、グリット形状の場合には粒径の影響を受けにくく、塗膜の除去速度は一定となる傾向にあると言える。

表 5-3 各研削材を用いた場合の塗膜の除去速度

研削材記号	A	B	C	D
形状	グリット		ショット	
50%粒径 (mm)	0.77	0.52	1.22	0.73
ブラスト時間 (sec)	55	45	50	95
塗膜の除去速度 (m^2/h)	8.0	9.8	8.8	4.6

各研削材におけるブラスト時間と素地調整面の表面あらさ、使用した研削材の 50%粒径変化率を表 5-4 に示す。これより、各素地調整面の表面あらさは 5 点平均値で $60\sim 80\mu\text{mRz}_{\text{JIS82}}$ となり、標準偏差を考慮すると大きな違いはみられない。鉄道鋼構造物では、塗替え時の表面あらさは特に規定されていないが、新設時塗装の二次素地調整（塗装前のブラスト処理を示す用語）で要求される表面あらさを $80\mu\text{mRz}_{\text{JIS82}}$ 以下と規定している³⁾。本試験結果ではいずれの研削材を用いた場合においても新設時の規定値をほぼ満足しており、表面あらさにおいて特に問題を生じる条件は見当たらないことが確認された。

50%粒径変化率については、研削材の形状で比較すると一様な傾向が認められない一方で、粒径で比較すると小さい粒径の方が低い変化率を示し、被投射面へ衝突した際の破碎程度が小さい。これは、上述したように粒径の小さい方が被投射面への衝撃力が小さいことに関係していると考えられる。

表 5-4 研削材を用いた場合のブラスト時間，表面あらさ，50%粒径変化率

使用 研削材	試験体の 腐食面積率 (%)	目標の 除錆度	ブラスト 時間 (sec)	表面あらさ ($\mu\text{mRzJIS82}$)		50%粒径 変化率
				5点平均値	標準偏差	
A	40.4	Sa 3	98	67	17	30.7%
	45.6	Sa 2 1/2	67	79	9	
	52.1	Sa 2	42	82	10	
B	28.5	Sa 3	88	60	7	24.8%
	17.6	Sa 2 1/2	51	61	5	
	42.5	Sa 2	39	74	12	
C	28.2	Sa 3	69	71	8	34.3%
	41.8	Sa 2 1/2	49	71	10	
	58.6	Sa 2	39	80	14	
D	37.0	Sa 3	88	78	7	13.2%
	35.4	Sa 2 1/2	69	72	14	
	30.4	Sa 2	49	58	8	

各研削材を使用した場合の腐食生成物の除去速度について，式(5-1)を用いて算出した結果を図5-7に示す。除錆度のグレードが高くなるほど腐食生成物の除去速度は低下する傾向にある。除錆度 Sa 3 の場合には，いずれの研削材を用いた場合においても除去速度は約 $2.5\text{m}^2/\text{h}$ である。その一方で，除錆度 Sa 2 を目標とした場合には，グリット形状の研削材 A, B を用いたときの除去速度は研削材 C の除去速度を上回っている。これより，グリット形状の研削材は腐食生成物をある程度除去するのに優れる性質を有し，高いグレードの除錆度を要求されるとその性能差は小さくなることが推定される。ショット形状の研削材について粒径による性能差を比較すると，研削材 D の除去速度の方が小さい。これより，塗膜の除去速度を比較した場合と同様，ショット形状では粒度分布が小さくなると腐食生成物の除去効率が低下すると考えられる。

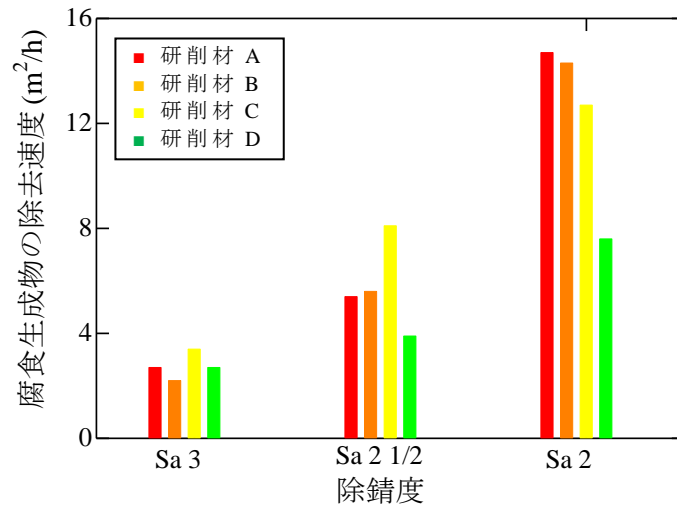


図 5-7 各研削材の腐食生成物の除去速度

b) 付着塩分の測定

各試験体の凹部における付着塩分量を表 5-5 に示す。比較のため、これまでに腐食していないと想定される平坦な面での測定結果も併せて示す。同一の研削材を用いた場合における除錆度と付着塩分量との関係を比較すると、除錆度のグレードが高くなるほど付着塩分は小さくなる傾向にある。ただし、これまでに腐食していないと想定される箇所では付着塩分がほとんど検出されなかったのに対して、凹部においてはいずれの試験体でも塩分が検出されている。

本試験に用いた試験体の腐食生成物中の塩分量は、第 2 章での測定により $1 \sim 4\text{g/m}^2$ であることが確認されている。本試験結果はこの値以上とはならないが、塗替え時の素地調整でブラストする場合に一般的な目安とされることの多い除錆度 Sa2 1/2 においても、付着塩分の測定値は 200mg/m^2 以上である。また、研削材の粒径の影響については、いずれの形状の研削材でも粒径の大きい方が概して小さい付着塩分量を示す傾向にある。

以上の結果から、一般的な乾式ブラスト工法では、塗膜下腐食を生じた箇所の塩分は除去困難であり、一定量の塩分が残存すると言える。

表 5-5 各素地調整面の付着塩分量 (単位: mg/m²)

使用研削材	A	B	C	D	
材質	フェロニッケルスラグ				
形状	グリット		ショット		
	-注	10 未満	10 未満	10 未満	
目標の 除錆度	Sa 3	10	130	20	50
	Sa 2 1/2	320	190	260	500
	Sa 2	320	630	710	790

注: これまでに腐食していないと想定される平坦な面において, 除錆度 Sa 3 で仕上げた状態の測定値を示す.

c) 付着力の測定

ブラストした試験体表面に塗装した場合の付着性評価として, アドヒジョン試験および碁盤目試験を行なった結果を表 5-6, 図 5-8 および図 5-9 に示す. これより, 碁盤目試験では有意差は見られないものの, いずれの条件においても塗膜のはがれが確認されず, 良好な付着性を有していると言える.

アドヒジョン試験では, 粒径の違いによる影響はみられず, いずれの条件においても引張強さは 10MPa 以上である. また, 除錆度のグレードが高いほど付着力が高くなる傾向にある. 破断箇所の外観から, 除錆度のグレードが低いものほど多くの黒色状の異物が存在しており, 異物の介在によって塗膜の付着性が低下したことが推定される. なお, この異物は除錆度 Sa 3 の場合にも確認されている. そこで, 破断箇所の元素マッピングから異物の組成分析を行なった.

研削材 C を用いてブラストした試験体の試験箇所 (ジグ側) の分析結果を図 5-10 および図 5-11 に示す. これより, 異物は酸素および鉄から構成されるものとケイ素を主体とするものの 2 種類に大別できる. また, ケイ素から成る異物の割合は除錆度 Sa 3 の場合に多くなる傾向にある. ケイ素は天然鉱物に多く含まれており, 本試験のブラストに使用した研削材にも含まれている. これより, 異物は鋼素地に残留する腐食生成物および研削材と考えられる.

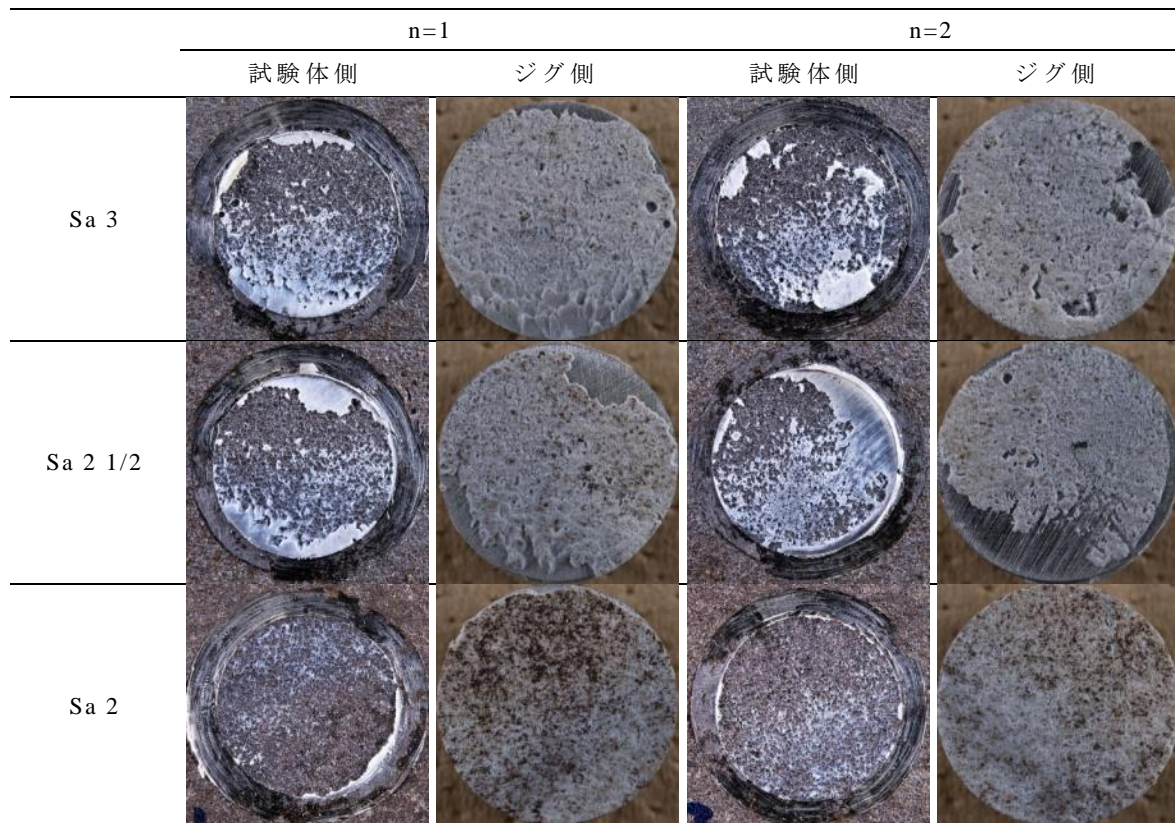


図 5-8 研削材 C を使用した場合のアドヒジョン試験結果

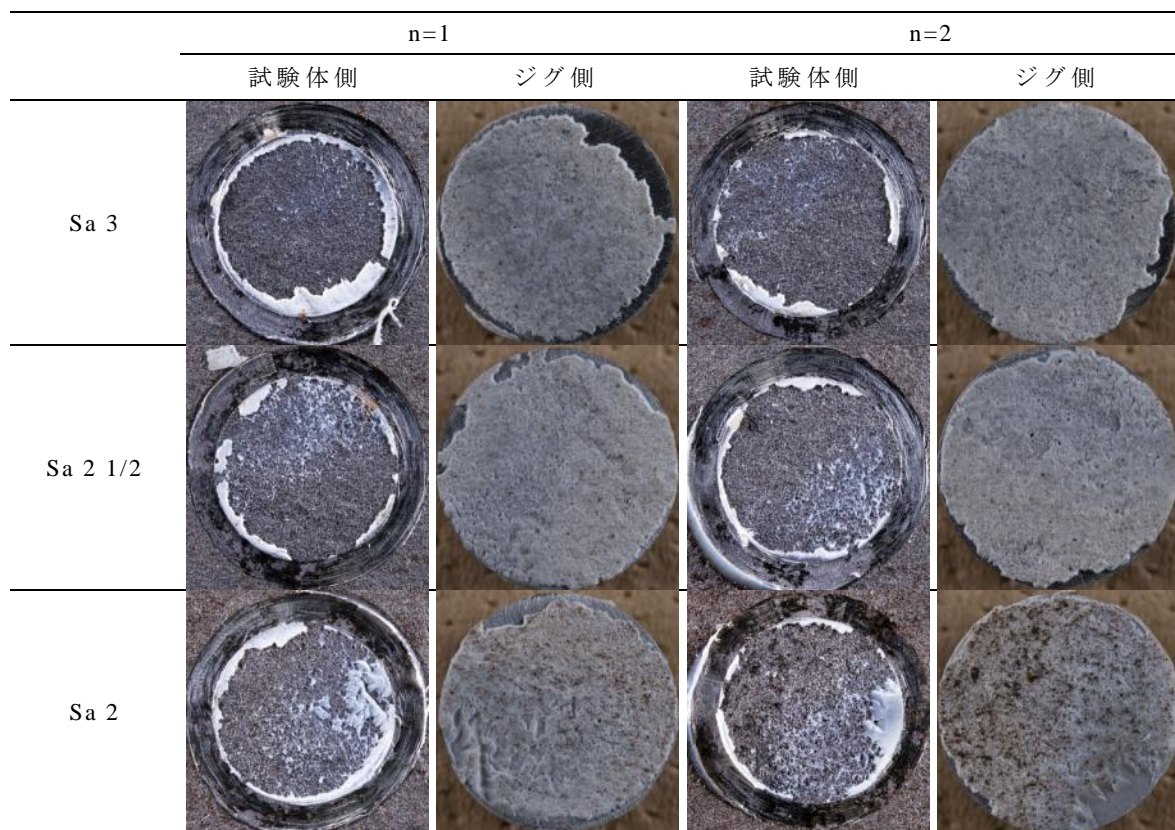


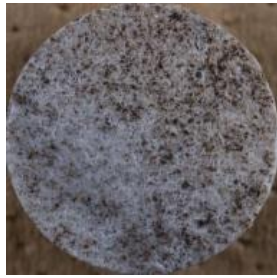
図 5-9 研削材 D を使用した場合のアドヒジョン試験結果

表 5-6 付着性評価試験結果

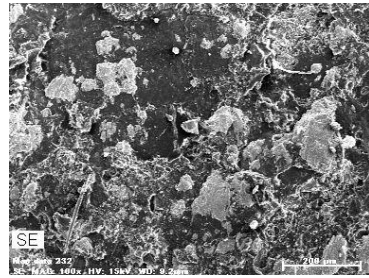
使用 研削 材	目標の 除錆度	アドヒジョン試験				碁盤目試験			
		n=1		n=2		n=1		n=2	
		引張強さ (MPa)	破断箇所 の 黒色分布 ^注	引張強さ (MPa)	破断箇所 の 黒色分布 ^注	塗膜 残存程度	破断 箇所	塗膜 残存程度	破断 箇所
A	Sa 3					100%	-	100%	-
	Sa 2 1/2					100%	-	100%	-
	Sa 2					100%	-	100%	-
未実施									
B	Sa 3					100%	-	100%	-
	Sa 2 1/2					100%	-	100%	-
	Sa2					100%	-	100%	-
C	Sa 3	13.7	△	17.5	△	100%	-	100%	-
	Sa 2 1/2	13.7	▲	14.6	△	100%	-	100%	-
	Sa 2	10.8	×	13.1	▲	100%	-	100%	-
D	Sa 3	16.2	△	14.3	△	100%	-	100%	-
	Sa 2 1/2	15.9	△	15.0	△	100%	-	100%	-
	Sa 2	15.0	×	12.7	▲	100%	-	100%	-

注：表中の記号は、破断面で見られた黒色箇所の分布程度を定性的に示したものである。

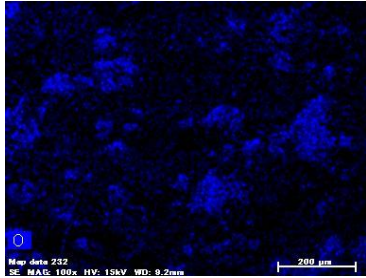
×...数%分布している，▲...わずかに分布している，△...ほとんど分布していない



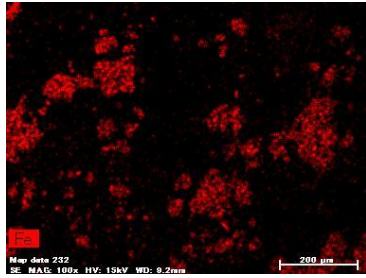
対象ジグの外観



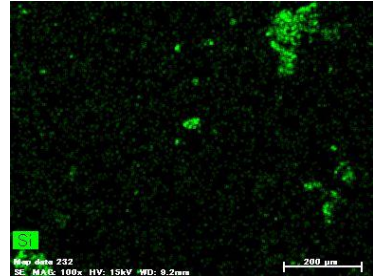
分析箇所の反射電子像



O (酸素)



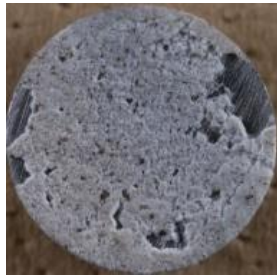
Fe (鉄)



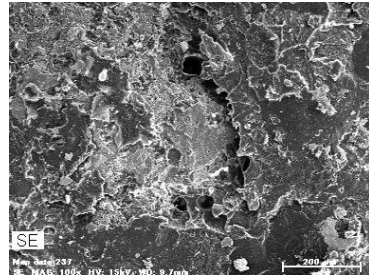
Si (ケイ素)

分析箇所の元素マッピング

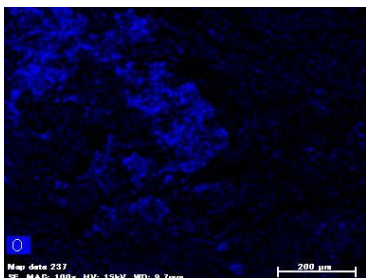
図 5-10 除錆度 Sa 2 とした場合のアドヒジョン試験箇所の分析結果



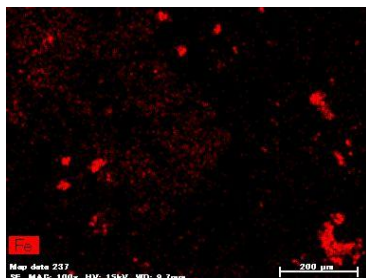
対象ジグの外観



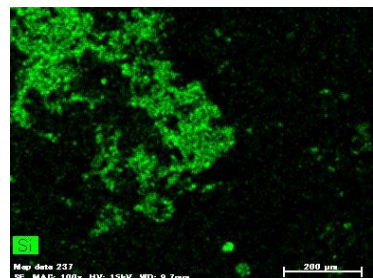
分析箇所の反射電子像



O (酸素)



Fe (鉄)



Si (ケイ素)

分析箇所の元素マッピング

図 5-11 除錆度 Sa 3 とした場合のアドヒジョン試験箇所の分析結果

d) 防食性評価

複合サイクル試験は7サイクルまで実施した。各試験片の塗膜膨れの変状面積率の推移を図 5-12 に示す。また、7サイクル経過時点の試験片の変状発生箇所を拡大した写真を図 5-13 に示す。

塗装系 T-7 を適用した試験片では、どちらの除錆度においても塗膜変状は生じていない。その一方で、塗装系 B 相当を適用した試験片では除錆度に係らず直径 1mm 以下の微細な塗膜膨れが発生した。塗膜膨れは 2 サイクル目から確認され、その数は試験経過とともに増加した。除錆度 Sa 2 とした試験片の方が大きな面積率を示す傾向にあり、7 サイクルの時点において、除錆度 Sa 2 の場合には約 5%、除錆度 Sa 3 の場合には約 3%の塗膜膨れ面積率となった。

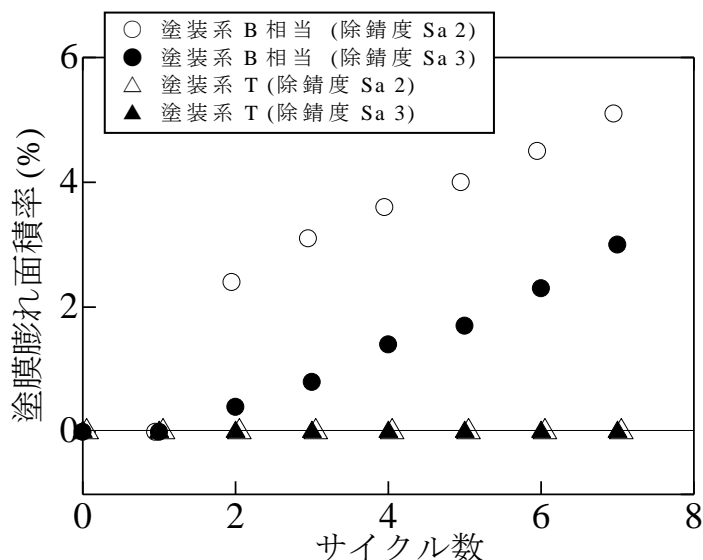


図 5-12 各試験片の塗膜膨れの変状面積率の推移

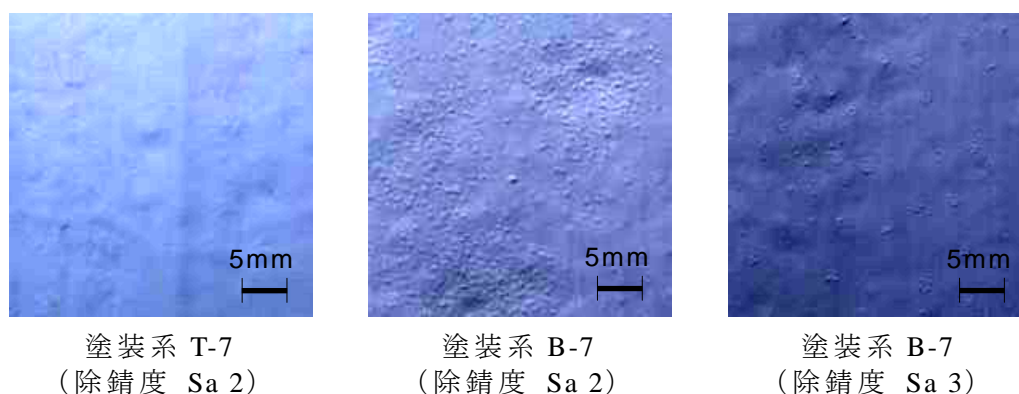


図 5-13 7サイクル時点の試験片外観 (一部を拡大)

ここで、第3章および第4章においてブラストした塗装鋼板の防食性能を評価した結果を併せて表5-7に示す。実際の塗装仕様には存在しないクリアー塗料の試験結果を除くと、複合サイクル試験および屋外暴露試験を通じて1%以上の塗膜膨れを生じたのは、鋼板を腐食させる塩水噴霧条件を噴霧時間840時間として塗装系B相当を適用した試験片のみである。この結果から、塩の影響の強い環境で長期間腐食した部材ほど、ブラストを適用しても早期に塗膜変状を生じる可能性があること、この傾向は油性系塗料を用いた塗装仕様を適用する場合に発生する可能性が高いことなどが推定される。

ただし、第4章で述べたように、早期に塗膜下腐食が発生することで維持管理に苦慮している構造物では、塗装系Tなどの長期耐久性の期待できる塗装仕様が用いられることが多い。この場合、本試験においては、除錆度による塗膜変状の違いは見られなかった。したがって、暴露期間または促進劣化時間が短いために長期間の防食性については未解明な点を有するものの、ブラストの除錆度のグレードが低い場合においても、防食性能に大きな違いはない可能性があると考えられる。

表 5-7 各章においてブラストした塗装鋼板の防食性能評価結果

塗装仕様	鋼板の腐食条件		除錆度	塗膜膨れ（1%以上の面積率）の有無		実施章
	塩水濃度 (wt%)	噴霧時間 (hour)		複合サイクル試験	屋外暴露試験	
塗装系 B 相当	0.01	168	Sa 2	—	○	3 章
	0.05			—	○	
	0.01	840		× (5cyc.~)	○	4 章
	0.05			× (2cyc.~)	—	5 章
	0.05			× (2cyc.~)	—	
クリアー塗料	0.01	840	Sa 2	× (1cyc.~)	—	4 章
塗装系 T	0.01	168	Sa 2	—	○	3 章
	0.05			—	○	
	0.05	840		○	—	5 章
	0.05			Sa 3	○	

注：ハイフンは試験を実施していないことを示し、○は塗膜膨れが生じなかったことを示す。

5.2 塗替え費用のライフサイクルコスト（LCC）評価

塗替えに関する鋼構造物の LCC を算出するにあたって考慮する必要があるパラメータは、塗替え施工費用と塗替え周期である。このとき、塗替え周期は適用する塗装仕様の耐久性に影響し、その塗膜の耐久性は塗替え時の素地調整程度に影響することはこれまでに述べたとおりである。

そこで本節では、素地調整方法に着目して塗替え施工費用と塗替え周期を設定した LCC 評価法について考察し、モデル橋梁に対して LCC 評価法を適用した場合の試算を試みた。

5.2.1 塗替え施工費用の算出方法

塗替え施工費用には、塗料費用、素地調整費用、塗装費用、足場架設費用、保安費用、諸経費などが挙げられる。以下に、素地調整手法との関連する諸費用として、塗料費用、素地調整費用、塗装費用、足場架設費用について述べる。なお、諸費用の算出については、実橋での施工実績や、塗装工（塗替）積算要領（案）（日本国有鉄道、1987年1月）に記載される各作業の歩掛等を参考にした。一例として、歩掛を基にした費用の算出方法を以下に示す。表 5-8 に動力工具処理による素地調整費用および塗装費用の歩掛を示す。歩掛と塗装対象面積を乗じることで作業人工を算出し、さらに別途定められている基準単価（1 人工あたりの費用）を乗じることで各費用を算出した。なお、素地調整および塗装の作業量は腐食生成物や劣化した塗膜の除去程度によって異なるため、作業量を替ケレン種別と称して、鋼の露出面積率によって区分している。

表 5-8 動力工具処理における素地調整費用および塗装費用の歩掛（1m²あたり）

鋼材露出面積率	替ケレン種	素地調整費用の歩掛	塗装費用の歩掛
70%以上	替ケレン-1	0.09	0.055
30～50%	替ケレン-2	0.05	0.055
15～25%	替ケレン-3	0.03	0.055
5%以下	替ケレン-4	0.02	0.04

(1) 塗料費用

塗装系は、各分野の仕方書や標準基準などで規定されており、それぞれ異なる仕様から成る、ただし、屋外鋼構造物に適用する塗装系の仕様については、各分野で大きな違いはない。また、適用する部位・形状などによって塗装系が異なる場合があるが、塗装面積の大部分に対しては、一般外面用の塗装系と呼ばれる塗

装系が適用される。そこで本節で対象とする塗装系は、鋼鉄道橋に適用される一般外面用の長期耐久型塗装系から選定することとした。

選定対象となる塗装系は、塗装系 G、塗装系 T、塗装系 L、塗装系 J である³⁾。各塗装系の工程を表 5-9 に示す。なお、表中で赤字にしている工程は、鋼の露出箇所のみ適用する場合を示す。このため、替ケレン種別によって塗装する面積率が異なることになる。

表 5-9 各塗装系の工程

工程	塗装系 G		塗装系 T	
	塗料名	塗布量 (g/m ²)	塗料名	塗布量 (g/m ²)
1 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
2 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
3 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
4 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料上塗	200	厚膜型ホリウレタン樹脂系塗料上塗	150

工程	塗装系 L		塗装系 J	
	塗料名	塗布量 (g/m ²)	塗料名	塗布量 (g/m ²)
1 層目	厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチヘイント	300	厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチヘイント	300
2 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチヘイント	300
3 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
4 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200
5 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料上塗	200	厚膜型ホリウレタン樹脂系塗料中塗	130
6 層目	—		厚膜型ホリウレタン樹脂系塗料上塗	110

注：赤字にしている工程は、鋼の露出箇所のみ適用する場合を示す。

塗装系 L と塗装系 J の 1 層目にはジンクリッチ系塗料が用いられる。ジンクリッチ系塗料は、鋼素地に接することでの犠牲防食作用により防食する塗料であるため、素地調整方法にはブラスト工法の適用が望ましい。手工具および動力工具を用いて素地調整する場合には、確実に腐食生成物を除去する必要があることから、塗装系 G または塗装系 T を適用するのが一般的である。なお、塗装系 G と塗装系 T、および塗装系 L と塗装系 J の違いは景観性であり、塗膜の耐久性に大きな違いはない。

以上から、本検討で対象とする塗装系は、素地調整方法の違いにより 2 種類選定することとし、使用実績の多い塗装系 T および、塗装系 T と類似した仕様である塗装系 J を選定した。

(2) 素地調整費用および塗装費用

素地調整費用および塗装費用は、各作業による人工や、工具および設備の損料などから計上される。

ブラスト工法の場合、塗装費用は変わらないが、機器の取扱いによる作業難易度や防護性等の観点から、単位面積当たりの費用はブラストの方が高額となることが一般的である。しかしながら、これまでの施工実績が少ないこともあり、鋼鉄道橋においてはブラスト工法に関する公的な歩掛が公開されていない。そこで、本検討では後述するモデル橋梁に類似した構造形式の橋梁にて実施された全面ブラストでの塗替え施工作業実績を参考にした。なお、この塗替え施工時のブラストによる除錆度は ISO 8501-1 に規定される Sa 2 1/2 である。前節の結果より、除錆度の違いによる塗膜耐久性への影響は小さいと考え、ここでは施工実績の単価をそのまま設定した。

手工具・動力工具による素地調整方法を適用する場合には、上述したように、表 5-8 に示す各作業の歩掛と塗装対象面積を乗じることで作業人工を算出し、基準単価を乗じることで算出した。ただし、著しく腐食した鋼構造物においては、手工具・動力工具の適用では腐食生成物が残置されることが多い。そこで、腐食生成物を手工具および動力工具により完全に除去する場合の作業性について考察した。

対象部材は図 3-11 に示す A 橋のガセット部とした。手工具および動力工具を用いて目視上完全に腐食生成物を除去した状態、すなわち ISO8501-1 に規定される St 3 に至るまでの時間を測定し、一般的な素地調整時間と比較した。作業前後の対象部材の外観を図 5-14 に示す。作業の結果、素地調整に要した時間は表 5-10 に示す通りとなり、一般的な素地調整作業よりも約 20 倍以上の時間を要したにも関わらず、腐食に伴う凹部に若干の腐食生成物が残存した。

黒色部…腐食生成物が残存する箇所



作業前の状態

固着した腐食生成物以外を
除去した際の状態

固着した腐食生成物を
概ね除去した状態

図 5-14 対象部材の素地調整前後の外観

表 5-10 素地調整作業に要した時間

素地調整後の 腐食生成物の状態	腐食生成物の除去程度	
	除去時間 (min)	除去速度 (m ² /h)
相当量が残る (一般的な作業量)	約 2	約 3
概ね除去	45	0.1

(3) 足場架設費用

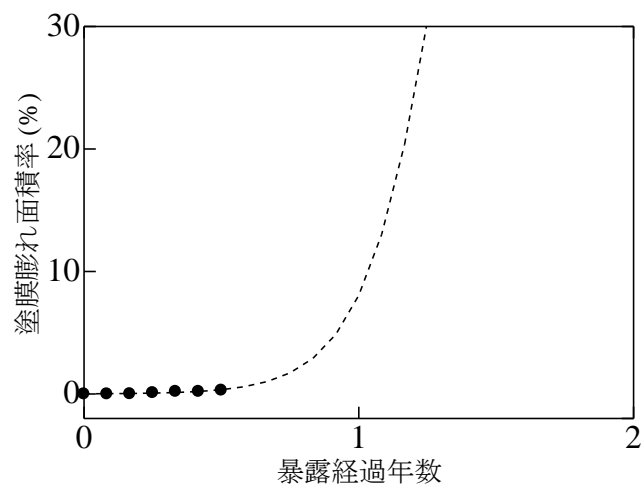
足場架設は、対象とする鋼構造物の形式や架設環境などに関連する他、素地調整方法によっても養生方法を変更する必要がある。このため、足場架設費用は対象とする鋼構造物に応じて使用する材料の種類・数量などを考慮して算出した。特に、ブラスト工法を適用する場合には研削材や粉化した塗膜および腐食生成物の飛散を抑制するため、作業範囲を密閉状態にするための養生が必要となる。このため、ブラスト工法を適用するする場合の足場架設費用は、動力工具を主体とする場合と比較して割高になるのが一般的である。ただし、素地調整費用と同様、現段階ではブラストを適用する場合の足場架設費用に関する公的な歩掛が公開されていない。そこで、過去に実施された塗替え施工作業実績を参考にして足場架設費用の単価を設定した。

5.2.2 塗替え周期の算出方法

塗替え周期の算出には、塗替え時の素地調整程度および、適用する塗装系を考慮した。「鋼構造物塗装設計施工指針」では、腐食環境下における長期耐久型塗装系の耐久年数を 18 年未満と推定している³⁾。一方、新設時塗装系を適用した鋼鉄道橋を高腐食性環境下に架設した場合、架設から 35 年以上が経過しているが、各

種調査結果から，大部分の塗膜は健全であることが確認されている⁴⁾。しかしながら，飛石等の外力の作用による塗膜損傷箇所や，ピンホール等の塗膜欠陥や狭隘部における塗装不良箇所等を起点に成長したと推定される鋼腐食が施工後 10 年程度で顕在化し，架設から 15 年後に塗替え施工が実施されている。このように，素地状態や塗膜の耐久性以外の要因によって塗膜劣化を生じることを考慮し，本検討では，腐食生成物を残置させない場合の塗替え周期を 15 年と仮定した。

続いて，腐食生成物が残置された状態で塗装した場合の耐用年数について考察した。腐食生成物が残置された状態では，数年程度で塗膜下腐食に伴う塗膜膨れを発生することが経験的に知られている。また，第 3 章で実施したカップワイヤ処理を適用した塗装腐食鋼板の暴露試験結果に対して，第 4 章で示したロジスティック回帰を適用すると，測定点数が少ないために精度の点で問題を有するものの，図 5-15 に示すように約 1 年程度で変状面積率が 10% 程度になることが推定される。そこで，塗装した部材の腐食の有無によって塗膜の耐久性を決定することとし，著しく腐食した部材に塗装した場合の塗膜の耐用年数は 1 年，そうでない場合には 15 年と仮定した。



注：当該試験片は，第 3.2 節で述べた塗装腐食鋼板の暴露試験結果である。
 (塩水噴霧 840 時間，カップワイヤ処理，塗装系 T を適用)

図 5-15 暴露した塗装腐食鋼板のロジスティック回帰

5.2.3 LCC の算出方法の提案

本検討における LCC は、これまでに述べた塗替え施工費用および塗替え周期の算出方法を考慮して算出する。1 回の塗替え施工に要する費用を式 (5-2) に示す。ここで、 C は塗替え施工の総費用、 C_a は素地調整費用、 C_b は塗装費用、 C_c は塗料費用、 C_e は足場架設費用、 C_d はその他の費用、 d は諸経費率を示す。

$$C = (1+d)(C_a + C_b + C_c + C_d + C_e) \quad (5-2)$$

LCC では将来に渡ってかかる費用を積算することになり、異なる時間軸上の費用を取り扱う必要がある。一般には、将来要する現在価値に置き換える現価法を用いて評価するケースが多い。現価法は式 (5-3) で示される。ここで、 C_t は t 年後における塗替え施工費用であり、 r は割引率である。本検討では、割引率を 4% に設定した⁵⁾。また、 t は塗替え周期であるため、適用する塗装系の耐用年数となる。

$$C_{total} = \sum \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (5-3)$$

5.2.4 LCC 評価による試算

前節の LCC 算出式を用いて、モデル橋梁を設定し、素地調整方法を替えた場合の LCC を試算・比較した。

(1) モデル橋梁の設定

モデル橋梁は、鋼鉄道橋として一般的な形式である上路プレートガーダとした。素地調整時の鋼の露出面積率は、一般的な塗替え時期として推奨される替ケレン-3 の場合として 15% に設定した。このとき、足場架設費用に係わる足場架設の投影面積は、塗装面積の約 1.5 倍となる。本検討では塗装面積を 100m^2 とし、足場架設の投影面積は 148m^2 とした。動力工具を用いて素地調整する場合の足場架設の模式図および使用材料の概要を図 5-16 および表 5-11 に示す。

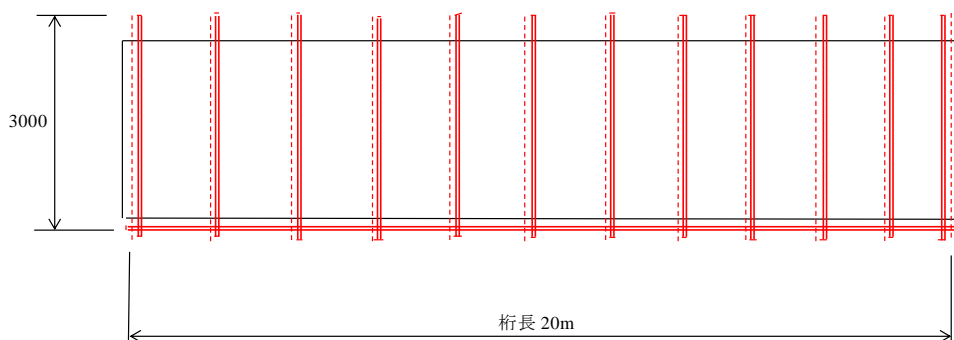
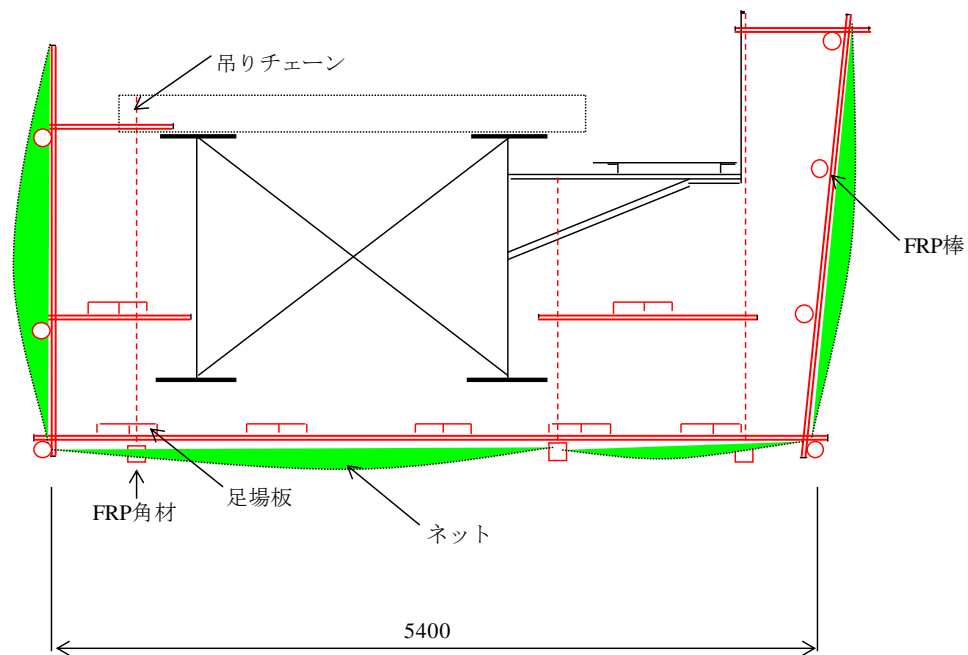


図 5-16 動力工具を用いて素地調整する場合の足場架設の模式図

表 5-11 動力工具を用いて素地調整する場合の使用材料の概要

材料名	形状	数量
FRP 角材	60×60mm, 4m	12 本
FRP 棒	φ 49mm, 4m	56 本
吊りチェーン	4000mm	33 本
足場板	200×4000mm	70 枚
ネット	3.0～5.4×20m	3 枚
クランプ	—	88 個

(2) 素地調整条件の設定

本検討では、塗膜の耐久性が素地調整程度に影響されることを考慮して、(a)動力工具処理を主体とした素地調整、(b)動力工具処理ではあるが腐食生成物をほとんど除去する素地調整、(c)ブラスト処理による素地調整の3種類とした。

(a) 動力工具処理を主体とした素地調整

一般的な施工条件であり、著しく腐食した鋼材では腐食生成物が残存すると仮定した。このため、適用する塗装系は塗装系 T となる。また、約1年程度で過去の腐食箇所の10%程度で塗膜下腐食の発生が予測されたために1~2年程度で塗替えるのが望ましいが、経済的事情を考慮し、塗替え周期を5年と仮定した。したがって、当該条件では鋼の腐食が進行し、補修・補強のための工事が必要となることが懸念される。

(b) 動力工具処理ではあるが腐食生成物をほとんど除去する素地調整

初回の塗替え施工時に動力工具を用いて腐食生成物を完全に除去し、2回目以降の塗替え施工時には一般的な施工条件を適用する条件である。塗膜下腐食の発生を抑制できるため、鋼材の腐食は進行しないと仮定できる。また、ジンクリッチ系塗料を用いた塗装系 J を適用できるため、塗替え周期を15年に設定した。また、ただし、表 5-10 で示したように素地調整に要する時間が一般的な作業の20倍以上となる。そこで、素地調整に要する単価を条件(a)の約20倍に設定した。

(c) ブラスト処理による素地調整

ブラスト工法を用いるため、塗膜下腐食の発生が懸念されない程度まで腐食生成物を除去することが可能であり、鋼材の腐食は進行しないと仮定できる。また、条件(b)と同様に塗装系 J を適用し、塗替え周期を15年に設定した。なお、素地調整の面積率は、ブラスト工法のため替ケレン-1とし、100%に設定した。素地調整費用および足場架設費用の単価は、モデル橋梁に類似した構造形式の橋梁にて実施された塗替え施工作業実績を参考に、9000円/m²および5350円/m²とした。

表 5-12 に、モデル橋梁における塗替え施工の概要を示す。替ケレン種別が条件(a)、条件(b)と条件(c)で異なるため、同一の塗装系を使用していても塗料費用が若干変化している。なお、塗替え施工作業は日中で行えることとし、保安費用については割愛したモデルとした。また、実際の塗替え施工費用には、上記の費用のほかに諸経費が上乘せされるが、基本的には上記費用に比例した金額になる場合が多いため、ここでは割愛した。

表 5-12 モデル橋梁における塗替え施工概要

	条件(a)	条件(b)	条件(c)
素地調整方法	手工具・動力工具		ブラスト工法
腐食生成物の除去程度	残存	概ね除去	
塗装系	塗装系 T	塗装系 J	
塗替え周期 (年)	5	15	
替ケレン種別	替ケレン-3		替ケレン-1
塗料費用 (円/m ²)	1,130	1,810	2,100
塗装費用+素地調整費用 (円/m ²)	2,700	(初回) 50,000 (2回目以降) 2,700	9,000
足場架設費用 (円/m ²)	4,350		5,350

提案した LCC 評価手法をモデル橋梁に適用した場合の塗替え施工費用について、塗料費用、塗装費用、素地調整費用、足場架設費用を積算した結果を図 5-17 に示す。この結果、1 回あたりの塗替え施工費用が最も小さいのは、一般的な施工方法である条件(a)となった。しかしながら、腐食の進行による部材の減肉が懸念されるほか、塗替え周期が短いため、設定初期から 20 年以上経過した場合の総費用はブラスト工法を適用した条件(c)よりも高額となった。条件(b)については、条件(a)と比較して塗替え周期が長く設定されているために年数の経過とともに費用差は減少する傾向にあるものの、初回の塗替え施工費用が高額であるため、設定期間内における LCC は全条件の中で最も高くなった。

以上の結果から、鋼構造物の残りの供用年数を 20 年程度とする場合には、腐食の進行が懸念されるものの動力工具を主体とした塗替え施工を行なうのが最も経済的であるが、供用年数が 20 年を超える場合、ブラスト工法を用いて入念な素地調整を実施することによって鋼材の過度な腐食を生じさせずに LCC を最も低減する、すなわち防食性能を向上できる可能性を得た。

なお、この LCC 評価法を一般的な腐食環境下の鋼構造物の塗替え施工に適用した場合の LCC の試算結果を図 5-18 に示す。このとき、塗替え周期以外のパラメータは上述の条件と同一とし、塗替え周期については文献および過去の調査結果から、条件(a)の場合の塗替え周期は 20 年³⁾、条件(b)および条件(c)の場合は 30 年⁴⁾とした。この結果、いずれの時期においても条件(b)を適用した場合の LCC が最も高額となるのは変わらないが、条件(a)と条件(c)の違いは大きくなり結果となった。

このように、対象とする鋼構造物の架設環境程度に応じて最適な維持管理方法が異なるケースが生じることが明らかとなった。したがって、本検討で提案したLCC評価法を適用する場合には、対象とする鋼構造物の架設環境を詳細に把握することが必要であると考えられる。

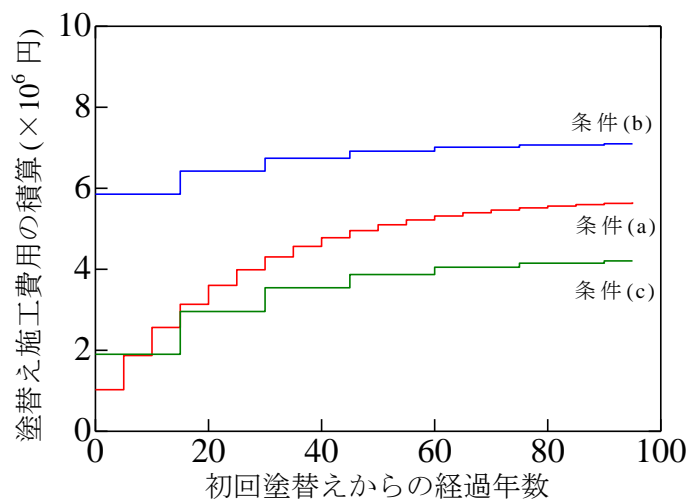


図 5-17 LCC 評価手法による塗替え施工費用

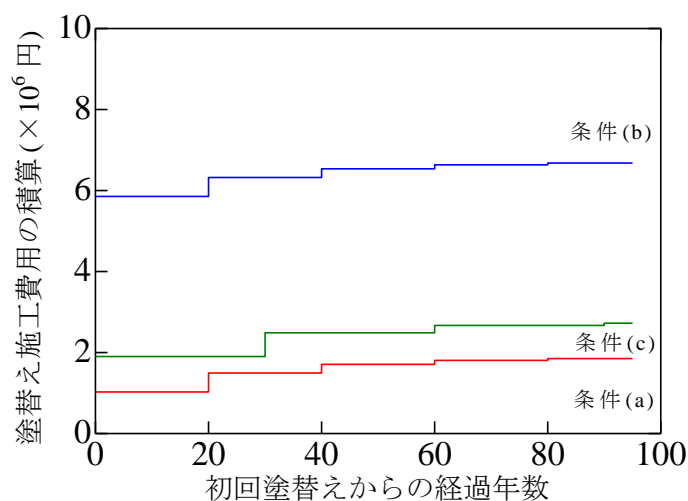


図 5-18 一般環境下に架設された鋼構造物に適用した場合の塗替え施工費用

5.3 まとめ

第 5 章では、塗膜下腐食に対して現状で最も有効な素地調整と考えられるブラスト工法について、塗装鋼構造物の塗替えに要する維持管理費用に着目し、作業性や付着性、防食性などの観点からブラストを適用する場合の適正な施工条件を見出すとともに、維持管理費用を低減可能な防食性能向上法について提案した。

その結果，以下の知見を得た．

- (1) 研削材の形状は腐食生成物の除去程度に影響する．特に，高い除錆度を要求しない場合にはグリット形状の研削材は高い効果を示す傾向にある．
- (2) 塗膜下腐食を生じた箇所では，ブラストを適用しても腐食生成物が残留する傾向にある．ただし，その場合でも動力工具で素地調整する場合よりも高い防食性能を示す．
- (3) 比較的短い期間での複合サイクル試験において，ブラストによる除錆度の違いは塗装系 T の防食性能に対して大きく影響しない．
- (4) 素地調整程度や塗装系，塗替え周期などをパラメータとして提案した LCC 評価法から推定される防食性能の向上方法として，ブラスト工法を用いた塗替え施工方法が挙げられる．
- (5) 対象とする鋼構造物の架設環境程度に応じて最適な維持管理方法が異なることから，本検討で提案した LCC 評価法を適用にあたっては対象構造物の架設環境の把握が重要である．

参考文献

- 1) 濱崎有也，多久和公二，迫田治行，丹波寛夫：ブラスト用非金属系研削材の比較調査，鉄構塗装技術討論会発表予稿集，Vol.34, 2011.
- 2) 窪堀俊文，倉本健司，乾保之，森本純司：ブラスト材の耐久性に関する研究，高温学会誌，Vol.35, No.6, pp.308-313, 2009.
- 3) (公財) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，2013.
- 4) 坂本達朗，園佳寿郎，後藤宏明，江成孝文，橋本康樹，山本基弘，吉田陽一，木村武久，真田祐介：実橋りょうに適用した長期耐久型塗装系の追跡調査（その1）工場塗装から35年経過した塗膜の防食性評価，鉄構塗装技術討論会発表予稿集，Vol.35, pp.1-6, 2012.
- 5) 杉本一郎，杉館政雄，田中誠，町田洋人：鋼鉄道橋のLCC評価に関する基礎的検討，鉄道総研報告，Vol.15, No.8, pp.47-52, 2001.

第6章 結言

我が国における鋼構造物の供用年数は増大の一途を辿っている。かつては 50 年程度と言われていた既設橋梁の耐用年数についても、現在では今後 100 年程度の供用を目標とするなど、既設橋梁を供用し続けることを前提とした維持管理が求められている。したがって、既設の鋼構造物を安全かつ経済的に長期間供用するための効果的な長寿命化技術の確立が求められている。

鋼材の腐食は、鋼構造物の耐久性を低下させ、安全性に影響を及ぼす主要な変状の一つである。腐食に寄与する環境因子は多岐に及ぶほか、鋼構造物に適用される防食方法の劣化機構が複雑で未解明な点が多いことなどの理由により、防食に関する設計基準類の整備は現状では十分とは言い難い。

近年、塗装鋼構造物で確認される塗膜下腐食は、局所的であるものの、塗替え後の比較的早い段階において発生し、大きな腐食度を示して部材の板厚減少を伴うなど、問題視されることが多い。このため、入念な素地調整による塗替え施工方法が望ましく、塗替え施工費用の増大につながる。しかしながら、塗膜下腐食の腐食機構は詳細に解明されていないほか、適切な素地調整方法が確立されていない。このため、現状では、塗膜下腐食の進行による鋼構造物の安全性低下を懸念しながらも、従来の塗替え施工方法を採らざるを得ない状況にある。

そこで本研究では、塗装鋼構造物に生じる塗膜下腐食の腐食機構を解明し、高腐食性環境下における塗装鋼構造物の適切な防食手法を構築することを目的とした。まず塗膜下腐食を生じた実構造物の調査を行ない、部位別の塗膜の劣化状態および腐食状態を把握するとともに、腐食生成物の成分分析や侵食度に関する分析を行ない、塗膜下腐食の腐食過程を推定した。次に、塗装鋼構造物における塗膜下腐食の腐食挙動を把握するための手法を提案し、妥当性を検証した。この手法により塗膜下腐食を生じる可能性が高いと判断した塗装鋼構造物に対して、塗替え時の適切な素地調整手法を提案することを目的として、塗装前に残置されている腐食生成物の残存程度や成分などが塗膜の耐久性に及ぼす影響程度を評価した。最後に、これらの結果を踏まえ、塗装鋼構造物の防食性能を向上させることを目的として、防食に関するライフサイクルコストの観点から各種塗替え施工方法の評価を行ない、高腐食性環境における鋼構造物を対象とした防食性能向上法を提案した。以下に各章で検討した概要および結論の要約を示す。

第 1 章では、高腐食性環境における鋼構造物の塗膜下腐食現象と防食性能向上方法に関する研究の背景と目的を述べた。また、関連する既往の研究として、鋼材の腐食現象や、鋼構造物を取りまく環境および鋼構造物の腐食性の評価手法に関する調査・研究結果のほか、構造物用塗装の防食特性や、塗装時の素地調整程

度と塗膜特性に関する調査・研究結果などについて述べた。

第2章では、実構造物に発生する塗膜下腐食の塗膜劣化状況や腐食状況を把握するため、日本海沿岸に架設された鋼鉄道橋を対象に、部位別の塗膜の劣化状態および腐食状態を評価し、環境因子との関連について考察した。また、腐食生成物の成分分析や侵食度に関する分析を行なった。得られた知見を以下に示す。

- (1) 塗膜下腐食は、素地調整時に腐食生成物が残置された箇所で生じ、塗替えから数年～十数年かけて顕著な塗膜膨れを生じるまでに成長する。
- (2) 腐食生成物に含まれる塩分量は塗膜下腐食の腐食度に影響する可能性がある。
- (3) 塗膜下腐食の発生程度は雨洗効果の期待しにくい箇所で大きくなる傾向にあるが、塩の影響だけでは説明できない場合もあり、素地調整程度の影響が大きいことが推定される。

第3章では、塗装腐食鋼板を構造物の各部位に設置して一定期間暴露し、その後回収した塗装腐食鋼板の腐食程度を評価することによって構造物の設置箇所の塗膜腐食挙動を推定する手法を提案した。本手法の妥当性を検証するため、塗装腐食鋼板と裸鋼板の腐食度を評価するとともに、鋼板を設置した部材に対する温度追随性を評価した。また、塗装腐食鋼板を実構造物に設置し、面方向に対する腐食度を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 屋外暴露した塗装腐食鋼板の塗膜下腐食の進行程度は、塗装前の腐食生成物の残存程度に依存する。また、塗装腐食鋼板の腐食度は裸鋼板と異なる傾向を示し、暴露期間が長くなるほど腐食度が大きくなる傾向にある。
- (2) 鋼橋模擬部材に設置した試験片温度は、測定時期や試験片の板厚などによって部材温度と差を生じる。ただし、3.2mm厚の試験片を用いる場合には部材との温度差はほとんど無い。
- (3) 実構造物に設置した裸鋼板の腐食度は、雨洗効果の期待しにくい部材下面において最も大きくなる。その一方で、塗装腐食鋼板では海を向く腹板に設置した場合に大きな腐食度を示す。この要因として、塗膜表面の濡れ時間や、腹板と下フランジの温度差などが推定される。
- (4) 塗装腐食鋼板を用いて塗装構造物の腐食性を評価する場合、塗装腐食鋼板の設置に当たっては、海側を向く部材を主体とするのが適切であると言える。

第4章では、早期に塗膜下腐食が発生する場合の適切な素地調整程度を把握するため、腐食生成物が残置された状態に塗装した場合の塗膜耐久性を室内促進劣化試験によって評価した。また、腐食生成物中に含まれる塩が塗膜の防食性能に与える影響を把握するため、電気化学的手法を用いて塩分を除去した場合の塗膜

の耐久性評価試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 塩水噴霧で形成される腐食生成物の性状は明色域と暗色域で異なり，明色域の腐食生成物は基材との付着性が大きく，暗色域では腐食による減肉程度が大きい傾向にある。
- (2) 塗膜の防食性能は腐食生成物の残存程度以外にも腐食生成物の性状に影響を受け，塗膜の下が暗色域や鋼の露出域の場合には塗膜下腐食を生じやすい。
- (3) 塩水噴霧時間の長い腐食鋼板の場合，明色域と暗色域の境界が曖昧となり，小さな塗膜膨れが試験片全面に生じる傾向にある。
- (4) ブラスト処理した試験片では，塗膜下で点状に腐食が進行する傾向にある。ただし，塗膜自体に大きな変状はみられず，塗膜の防食性能を早期に低下させるためには一定量の腐食生成物が残存している必要があると推定される。
- (5) 電気化学的手法の適用によって腐食生成物中の塩化物イオンが除去されるとともに腐食生成物の性状が変化し，塗膜の防食性能は向上する。この傾向は，環境遮断性の高い塗装系において顕著である。

第5章では，塗膜下腐食に対する素地調整方法として現状で最も有効と考えられるブラスト工法について，作業性や付着性，防食性などの観点からブラストを適用する場合の適正な施工条件を見出した。また，塗装鋼構造物の塗替えに要する維持管理費用に着目し，維持管理費用を低減可能な防食性能向上法について提案した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 研削材の形状は腐食生成物の除去程度に影響する。特に，高い除錆度を要求しない場合にはグリット形状の研削材は高い効果を示す傾向にある。
- (2) 塗膜下腐食を生じた箇所では，ブラストを適用しても腐食生成物が残留する傾向にある。ただし，その場合でも動力工具で素地調整する場合よりも高い防食性能を示す。
- (3) 比較的短い期間での複合サイクル試験において，ブラストによる除錆度の違いは塗装系 T の防食性能に対して大きく影響しない。
- (4) 素地調整程度や塗装系，塗替え周期などをパラメータとして提案した塗替え施工に関する LCC 評価を行なった結果，ブラスト工法は現状よりも維持管理費用を低減しつつ防食性能を向上できる手法であると言える。ただし，対象とする鋼構造物の架設環境程度に応じて最適な維持管理方法が異なることから，本検討で提案した LCC 評価法の適用にあたっては対象構造物の架設環境の把握が重要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、御指導および御教示を賜った貝沼重信 准教授に深く感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

本論文の作成にあたり、適切な御助言を賜りました園田佳巨 教授および濱田秀則 教授には、心より感謝申し上げます。

九州大学工学府 都市環境システム工学専攻 建設設計工学研究室の皆様には、本研究を進める上で様々なサポートをしていただいたほか、懇親会などにも声をかけてもらい、久々の学生時代に戻った気分させていただきました。感謝しております。特に、小林淳二さん、道野正嗣さん、土橋洋平さんには、試験の実施にあたっての御協力をいただくとともに、同じ研究分野を進む者として、率直な意見交換や励ましの言葉を交わせたことに感謝申し上げます。

本研究を進める上で、実構造物を用いた分析・評価は必須であり、東日本旅客鉄道株式会社、西日本旅客鉄道株式会社、東海旅客鉄道株式会社の関係各位には、大変お世話になりました。深く感謝いたします。特に、西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 木村元哉 課長には、旧余部橋梁の部材を提供いただいただけでなく、幾多の試験や調査の実施について常に御快諾いただき、多くの貴重なデータを得ることができました。西日本旅客鉄道株式会社 施設部 中山太士 課長代理には、本研究の着想から現在に至るまで、現場での試験や調査等を通じて多大なる御助言および御指摘をいただきました。ただただ感謝しかありません。ありがとうございました。今後、鉄道業界の発展に向けた研究開発に邁進していく所存ですので、今後ともよろしくお願い申し上げます。

塗料メーカー各位におかれましては、カナエ塗料株式会社 園佳寿郎氏、関西ペイント株式会社 後藤宏明氏、塚平博之氏、神東塗料株式会社 橋本康樹氏、杉田直也氏、大日本塗料株式会社 山本基弘氏、定石圭司氏、山内健一郎氏、中国塗料株式会社 福島耕一郎氏、平澤勇人氏、株式会社トウペ 木村武久氏、岡浩司氏、日本ペイント株式会社 大澤隆英氏、真田祐介氏には、長期防錆対策研究会を通じて、サンプル品の御提供、各種試験への御協力など、様々な部分で御世話になりました。厚く、感謝申し上げます。今後も、塗料・塗装技術の発展に尽力する所存ですので、よろしくお願い申し上げます。

建設塗装株式会社 山本美博氏、江成孝文氏には、塗装施工に関する様々な知見を御教授いただくとともに、数々の御助言を賜りました。特に江成様におかれましては、鉄道総研に在籍されていた頃から数多くの御助言をいただきました。心より感謝いたします。

元鉄道総研 田中誠氏には、私が鉄道総研に入社して腐食・防食について殆ど知識を持たない頃から御指導いただきました。覚えが悪い私に対して、辛抱強款的確な御指導および御鞭撻をいただいた御蔭で、本研究を遂行することができました。心より感謝いたします。

鉄道総研 久保俊一 研究開発推進部長には、材料技術研究部在籍時において博士課程進学への推薦および許可をいただきましたことに加えて、研究の初期段階において多くの御指導をいただいたことを感謝いたします。

曾根康友 材料技術研究部長には、本研究の進捗に関する御指摘に加えて、日々の業務における多大なサポートをいただき、本研究に集中できる環境を構築していただきました。厚く感謝申し上げます。

半坂征則 研究戦略担当部長には、防振材料研究室長在籍時に、研究テーマの遂行にあたってや論文執筆に関して、多くの御指導、御鞭撻を賜り、研究に関するロジックを学ばせていただいたことを感謝いたします。

飯島亨 コンクリート材料研究室主任研究員には、本研究の根幹となる腐食生成物の分析に関して御指導いただいたことを感謝いたします。

伊藤幹彌 防振材料研究室長には、論文の査読などを通じて本研究への御助言をいただいただけでなく、業務の配慮をいただいたことを感謝いたします。

矢口直幸 主任研究員には、試験方法や知的財産に関して多くの御助言を賜り、試験の手際の悪さを僅かながら解消することができました。鈴木実 主任研究員には、数々の現場調査に御同行いただくなど、試験への協力をいただいたことに加えて、貴重な御助言をいただき、多くの気づきを得ることができました。心から感謝いたします。

間々田祥吾 主任研究員には、研究テーマの内容に加えて、博士課程を進めるうえでの多大な御指導および御助言をいただきました。厚く感謝申し上げます。太田達哉 研究員、山中翔 研究員には、本研究を進める上で数々の試験について御協力いただき、感謝いたします。後輩である、佐藤大悟 副主任研究員、栢田吉弘 副主任研究員には、本研究を進める上で負担をかけてしまったことにお詫び申し上げます。しかしながら、研究に疲れたときの雑談で気分を休めることができ、研究を遂行する上で助けていただいた場面が多々ありました。厚く御礼申し上げます。

元防振材料 町田洋人氏には、腐食・防食の研究に関する御助言を賜るだけでなく、本研究を遂行する上での気力をいただく機会を多く設けていただきました。深く感謝いたします。

最後に，私の行動に対していつも暖かく見守りながら御支援くださいました，父，母，姉，妹に感謝するとともに，日常生活において協力を惜しむことなく心身両面から支えてくれた，妻 麻美に深く感謝します．家族の支えがあったおかげで，本論文を完成することができました．心より感謝いたします．