

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

伊藤義人¹・金 仁泰²・貝沼重信³・門田佳久⁴

¹フェロー会員 工博 名古屋大学大学院教授 附属図書館長 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603名古屋市千種区不老町)

E-mail:itoh@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

³正会員 博(工) 岐阜大学助教授 総合情報メディアセンター(〒501-1193岐阜市柳戸1-1)

⁴正会員 工修 戸田建設株式会社(〒104-8388東京都中央区京橋1-7-1, 当時名古屋大学大学院生)

本研究では、4種類の素地調整が異なる塗装鋼板を用いて251日間の促進腐食実験を行った。この実験では、裸鋼板の表面に層状さびを発生させた鋼板を用いて、さびを1)完全に除去、2)中程度除去、3)無除去の処理後、塗装を施した3種類の供試体を用いた。また、プラスト処理の無腐食鋼板に塗装した新規塗装の供試体も比較のため用いた。塗装一般部、クロスカット部、および塗装と素地露出部との境界部などに生じた塗膜のふくれ面積および板厚減少量などを用いて素地調整の程度が塗装鋼板の腐食劣化特性に及ぼす影響を明らかにし、橋梁メンテナンスのライフサイクルアナリシスの基礎データを提供した。

Key Words : painted steel, corrosion, accelerated exposure test, surface preparation

1. はじめに

鋼橋のライフサイクルコスト評価には、塗装や塗替え塗装の寿命や耐久性を精度よく算定することが必要である。そのため、これまで種々の塗装系の鋼板を用いた多数の大気暴露実験や促進実験が行われ、劣化特性や耐久性などの評価について検討が行われてきた^{1)~7)}。

現在使用されている橋梁塗装の寿命は、重防食塗装系でも長くて30年程度と言われている。また、その塗替え塗装の寿命はさらに短くなると推定される。2002年に改訂された道路橋示方書⁸⁾では、橋梁の寿命を100年と設定し、その間の維持管理を含めたライフサイクルコストを設計時に考慮することとしている。したがって、100年の目標供用期間を考えると少なくとも3回以上の塗替えが必要となる。そのため、鋼橋のライフサイクルコスト評価において塗替え塗装の寿命を精度よく把握することが重要と言える。

塗装により防食された鋼構造物の防食性能に影響を与える要因として、表-1に示すような素地調整、塗回数、塗料の種類、塗装技術、気候などの周辺環境が挙げられている⁹⁾。この中で、素地調整が防食性能に与える影響が最も大きいと言われている⁹⁾。したがって、塗替え塗

装時には、素地調整の程度を可能な限り高める必要がある。しかしながら、現場の塗替え塗装は、環境対策としての粉塵の飛散防止の困難さや経済的理由などにより、素地調整(ケレン)に最も信頼できるプラスト処理方法は採用できない場合が多い。そこで、この場合は動力工具と手工具を使用して、さび落しを行うのが普通であるが、この方法では完全にさびを除去することは困難であり、さびが残存している表面に塗装することになる¹⁰⁾。そのため、実鋼構造物の塗替え塗装の寿命を精度よく把握するためには、残存さびの有無および素地調整程度による塗装鋼板の腐食劣化特性やその耐久性の違いを明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、長期間(251日間)の複合サイクル促進腐食実験を行い、素地調整程度が塗装鋼板の腐食劣化に及ぼす影響を明らかにした。この実験には、促進腐

表-1 各種の要因が塗膜の寿命に及ぼす影響⁹⁾
(油性さび止め塗装系)

要因	寄与率 (%)
素地調整(1種と2種ケレンの差)	49.5
塗回数(1回と2回塗の差)	19.1
塗料の種類(塗料系の違い)	4.9
その他(塗装技術, 気候など)	26.5

食実験により裸鋼板の表面に層状さびを発生させた後、さびを1)完全に除去、2)中程度除去、3)無除去の後、塗装を施した3種類の供試体を用いた。1)のさびを完全に除去は、鋼道路橋塗装便覧¹²⁾に規定されている素地調整程度2種に該当し、2)のさびを中程度除去は、鋼道路橋塗装便覧に該当する素地調整程度はないが、素地調整程度2種のさび除去程度を考えたものと言える。3)のさびを無除去も、該当するものはないが、比較のため用いた。なお、比較のため無腐食鋼板にブラスト処理して塗装した新規塗装鋼板供試体も用いた。

2. 実験方法

(1) 供試体の製作

4種類の塗装供試体は、図-1に示す工程で製作した。製作完了後の塗装供試体の形状および寸法を図-2に示す。また、供試体数およびその詳細を表-2に示す。塗装供試体の製作工程の各段階における具体的な内容を以

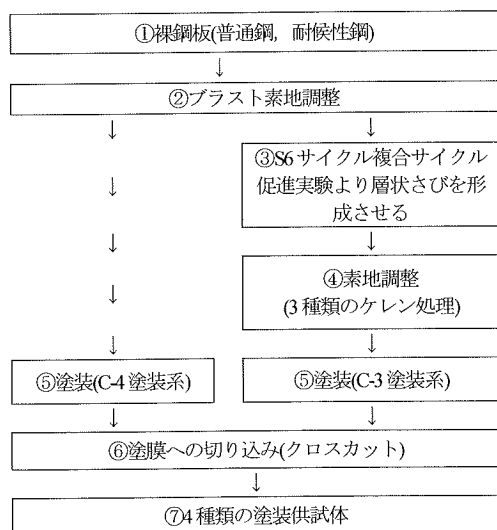


図-1 塗装供試体製作の流れ

下に示す。

- ① JIS規格¹¹⁾の普通鋼板(SM490A)および耐候性鋼板(SMA490AW)から縦150×横70×板厚9mmの鋼板を各12体製作した。
- ② ①の鋼板をグリットブラスト処理(JIS G5903 S-G50)することで素地調整を行った。
- ③ 各シリーズ12体中の9体の鋼板について複合サイクル促進腐食実験を1ヶ月間行うことで、裸鋼板に層状さびを生成させた。促進腐食実験条件の腐食サイクルは後記するS6サイクル⁹⁾を用いた。
- ④ 腐食させた鋼板は、グラインダーにより、さびを1)完全除去(3体、完全ケレン)、2)中程度除去(3体、途中ケレン)、3)無除去(3体、無ケレン)の3種類の素地調整(ケレン)を行った。素地調整後の表面状況を図-3に示す。ここでは、腐食させずにブラスト処理したままの新規鋼板についても図-3(a)に示してある。中程度のさび除去では、さび層を除去して鋼材の表面を露出させたが、腐食ピット内にさびが残っていることがわかる。

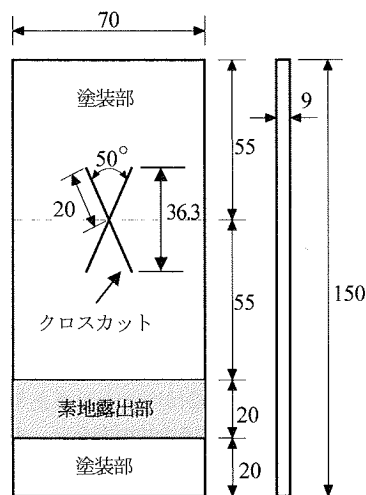


図-2 供試体の形状および寸法(単位: mm)

表-2 実験供試体の詳細

供試体名	鋼種	記号	供試体数	下地鋼板の素地調整	塗装仕様
新規塗装	普通鋼	NL4	3	無腐食鋼板表面のブラスト処理	C-4 塗装系
	耐候性鋼	WL4	3		
完全ケレン 塗装	普通鋼	NL3	3	1ヶ月間腐食させた鋼板表面のさびをグラインダーで完全に除去する。	C-3 塗装系
	耐候性鋼	WL3	3		
途中ケレン 塗装	普通鋼	NL2	3	1ヶ月間腐食させた鋼板表面のさび層をグラインダーで中程度に除去する。	
	耐候性鋼	WL2	3		
無ケレン 塗装	普通鋼	NL1	3	1ヶ月間腐食させた鋼板表面のさび層を除去しない。	
	耐候性鋼	WL1	3		

表-3 塗装仕様

工程		塗料	色相	標準使用量 (g/m ² /回)	目標膜厚 (μm/回)
新規塗装 (C-4 塗装仕様)	素地調整	プラスト処理する。			
	下塗第1層	無機ジンクリッチペイント	ライトグレー	700	75
	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	赤さび色	160	—
	下塗第2層	エポキシ樹脂塗料下塗	さび色	300	60
	下塗第3層	エポキシ樹脂塗料下塗	赤さび色	300	60
	中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	指定色淡	170	30
	上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	指定色	140	25
完全ケレン塗装 (C-3 塗装仕様)	素地調整	さびを完全に除去する。			
	下塗 第1層	有機ジンクリッチペイント	グレー	300	30
	下塗 第2層	変性エポキシ樹脂塗料下塗	ブラウン	240	60
	下塗 第3層	変性エポキシ樹脂塗料下塗	グレー	240	60
	中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	指定色淡	140	30
	上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	指定色	120	25
途中ケレン塗装 (C-3 塗装仕様)	素地調整	完全ケレンと無ケレンの中間程度のさびを除去する。			
	下塗 第1層	変性エポキシ樹脂塗料下塗	グレー	240	60
	下塗 第2層	変性エポキシ樹脂塗料下塗	ブラウン	240	60
	下塗 第3層	変性エポキシ樹脂塗料下塗	グレー	240	60
	中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	指定色淡	140	30
	上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	指定色	120	25
無ケレン塗装 (C-3 塗装仕様)	素地調整	さびを全く除去しない。			
	下塗 第1層	変性エポキシ樹脂塗料下塗	グレー	240	60
	中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	指定色淡	140	30
	上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	指定色	120	25

*塗装は工場スプレーで行った。

表-4 測定膜厚

	供試体							
	新規塗装		完全ケレン		途中ケレン		無ケレン	
	普通鋼	耐候性鋼	普通鋼	耐候性鋼	普通鋼	耐候性鋼	普通鋼	耐候性鋼
平均膜厚(μm)	385(18)	385(22)	250(22)	245(24)	279(28)	277(24)	310(38)	365(53)

* ()内の数値は標準偏差である。

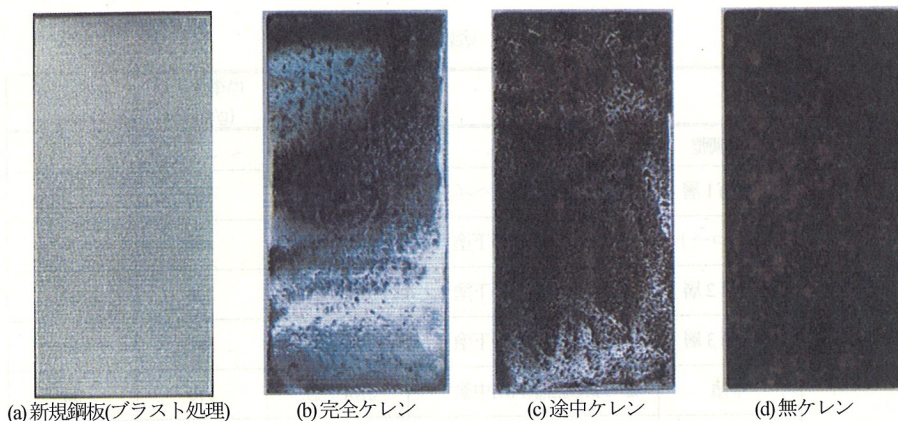


図-3 素地調整後の表面状況

表-5 塗膜の劣化程度と素地調整の種別¹²⁾

塗膜の劣化程度	素地調整の種別
発錆がはなはだしく塗膜のわれ、ふくれ、はがれについてもほぼ全面に発生している状態。	1種, 2種
部分的に点さびおよび塗膜のわれ、ふくれ、はがれが発生しているが活膜も多くある状態。	3種
さびの発生がほとんどなく塗膜が変色、白亜化した状態。	4種

表-6 素地調整の種別¹²⁾

種別	作業内容	作業方法
1種	さび、塗膜を除去し、精浄な鋼材面とする。	ブラスト法
2種	さび、塗膜を除去し鋼材面を露出させる。ただし、くぼみ部分や狭あい部分にはさびや塗膜が残存する。	ディスクサンダー、ワイヤホイールなどの動力工具と手工具の併用
3種	さび、劣化塗膜を除去し鋼材面を露出させる。ただし、劣化していない塗膜(活膜)は残す。	
4種	粉化物および付着物を落とし、活膜を残す。	

⑤ 鋼道路橋塗装便覧¹²⁾に従い、ブラスト処理および3種類のケレン供試体(完全、途中、無ケレン)に表-3に示すC-4あるいはC-3の重防食系塗装を行った。塗膜の塗り重ねの間隔(養成期間)は、下塗り無機ジंकの場合は約3日、その他の場合は約1日であった。供試体下部の70×20mmの地下鋼板の表面は図-2に示すように塗装せず、素地露出部を残した。塗装後、塗膜の表面からの膜厚計による塗膜の測定結果を表-4に示す。このうち、途中および完全ケレン供試体の測定膜厚には、塗膜下の残存さびの厚さも含まれているため、実塗装の膜厚は測定結果より小さくなると思われる。

⑥ 塗膜に下地素材に達するようにクロスカットした。クロスカットの幅は、約0.3mmである。

鋼橋の塗替え塗装は、表-5に示すように既存の塗膜の劣化程度により、4種類の素地調整(表-6)が行われている¹²⁾。本研究では、素地調整方法あるいはさびの残存程度が異なる4種類の素地調整を行った。これらを鋼道路橋塗装便覧に規定されている素地調整に照らし合わせると、新規塗装供試体(ブラスト処理)は表面調整程度1種、完全および途中ケレン(さびを完全および中程度除去)は表面調整程度2種に該当する。無ケレン(さびを無除去)は、鋼橋の場合には現実的ではないと思われるが、完全、途中、無ケレンとさびの残存程度による影響を検

討するためのものである。

本研究では、通常の塗装鋼板の腐食実験で用いられるクロスカットに加えて、図-2に示すように20mm幅の素地露出部を供試体の下部に設定した。これは、塗装の不連続部からの腐食劣化特性を検討するためである。このような塗装の不連続部とは、鋼構造部材とコンクリートとの接触部、ボルトなどの接合部や桁端部に部分的に塗装した耐候性鋼材を用いた鋼橋などを想定している。

(2) 複合サイクル促進腐食実験の条件

藤原・田原⁹⁾は、促進腐食実験と大気暴露実験との関連性を確認するために、クロスカットを有する塗装鋼板を用いた実験を行った。この実験で得られた大気暴露実験3年間と促進実験2ヶ月間の相関関係を表-7に示す。この結果から、藤原らは大気暴露実験と促進腐食実験の相関性が高いとしてS6サイクルを実用的な促進腐食実験条件として提案した。そこで、本研究では、複合サイクル試験機(スガ試験機社製)を用いて促進腐食実験条件としてS6サイクルを用いることにした。図-4に示すように、このサイクルでは5%濃度の塩化ナトリウム水溶液の噴霧、95%の湿潤および温度が異なる2種類の乾

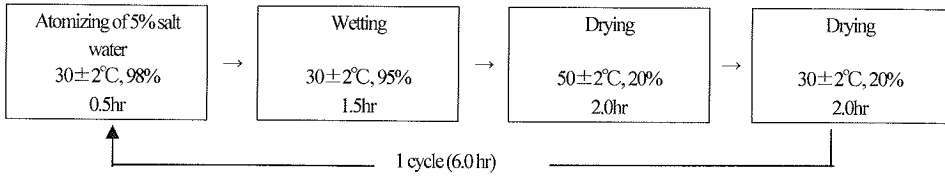


図-4 促進腐食実験の条件(S6サイクル)

表-7 大気暴露3年間と促進腐食実験2ヶ月間の相関係数⁹⁾

促進腐食 試験法名	屋外暴露試験				
	東京	沖縄内陸	沖縄海岸	北陸	藤沢
SS	0.122	0.578	0.505	0.275	0.444
S6	0.688	0.714	0.787	0.819	0.846
DS	0.629	0.602	0.504	0.648	0.552
NS	0.613	0.676	0.671	0.793	0.831
JASO	0.414	0.780	0.664	0.701	0.793
海水NS	0.650	0.737	0.907	0.837	0.862
ASTM	0.559	0.891	0.823	0.771	0.804

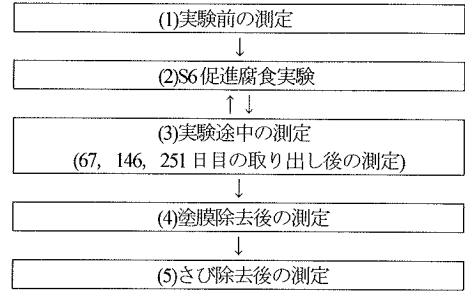


図-5 測定の流れ

燥サイクルで構成されている。

供試体は、JISで規格化されている「鉛直線に対し $20 \pm 5^\circ$ (JIS Z 2371)」に従って、鉛直方向から保持角15度で複合サイクル試験機の中に配置した。

(3) 測定の流れ

本実験の測定の流れを図-5に示し、各段階における具体的な測定内容を以下に示す。測定はクロスカット部と素地露出部を有する面を対象とした。

a) 実験前の測定

実験前の供試体に対しては、重量、光沢度、膜厚の測定、写真撮影およびレーザ深度計(レーザ変位計)による表面性状の測定を行った。光沢度の測定には、GM-60の光沢計(ミノルタ社製)を用い同じ位置で3回ずつ測定した。また、膜厚測定には、LZ-300C(株)ケツト製、分解度: $100 \mu\text{m}$ 未満 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 以上 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ を用いてクロスカットおよび素地露出部から離れた9箇所を測定した。

b) 実験途中の測定

促進腐食実験は、クロスカット部と素地露出部からのふくれがつながるまでの251日間(約S6-1000サイクル)行った。実験開始後、67日目、146日目に供試体を一時的に取り出し、塗装表面の付着塩分を水で湿らせた線布で拭き取り、実験前と同様の測定を行った。

c) 塗膜除去後の測定

実験後(251日)には、塗膜下での腐食進行状況を調べるために、軟化剥離剤(日本ペイント製のニッペリセットエコ)を用いて塗膜を剥離した。その後、写真撮影、重量測定やレーザ深度測定を行った。

d) さび除去後の測定

鋼材表面に発生したさびはチオ尿素($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$)とクエン酸二アンモニウム($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_7$)を用いて煮沸除去した。水895g、チオ尿素5g、クエン酸二アンモニウム100gの割合で溶液を作成し、溶液の中に供試体を入れて2~3時間程度煮沸した。この作業を2~3回繰り返すことで、完全にさびを除去した。その後、写真撮影、重量測定およびレーザ深度測定を行った。

レーザ深度測定では、デジタル式ステージの上に供試体を載せてステージを設定間隔で移動させながら固定設置されたレーザ変位計(測定範囲 $\pm 5\text{mm}$ 、レーザスポット径 $30 \mu\text{m}$ 、分解能力 $0.1 \mu\text{m}$)の設定基準値からの距離を測定した。本研究で対象にした供試体のクロスカット部および素地露出部を有する表面($70 \times 150\text{mm}$)について $1.0 \times 1.0\text{mm}$ (実験前、67日目)あるいは $0.5 \times 0.5\text{mm}$ (146日目、実験後)の間隔で測定した。さらに、この測定範囲内の $10 \times 10\text{mm}$ の表面に対しては、 $0.1 \times 0.1\text{mm}$ の間隔で小さい塗膜のふくれを検知できるように細かく測定した。

3. 実験結果

(1) 塗膜の劣化

塗膜が劣化すると、塗膜表面からの水や酸素の遮断能力が低下し、時間の経過とともに塗膜下の鋼材はさび発生に至ると考えられている。つまり、塗膜表面から水や酸素が塗膜を透過すると浸透圧による塗膜のふくれが生成される(図-6(a)の①、②)⁹⁾。そのふくれ内の鋼材の表面にはマイクロセルが形成され、塗膜下で鋼材が発錆しているが、明確な塗膜の外観変化は認められない(図-6(a)の③)。この段階の期間の長短は塗膜が水と接して

いる時間に依存する。濡れ時間が長く、しかも塩分がある場合が最短になると言われている。この塗膜下のさびは、次の段階で水、酸素の供給を受けて成長し塗膜を破り貫通する(図-6(a)の④)。塗膜を貫通したさびは、外気に接して急速に大きくなり、目視でその発生さび面積を評価できるまでになる⁷⁾。

以上のように初期に塗膜が健全である場合に対して、塗膜に不連続部(クロスカット部、素地と塗装の境界部)がある場合には、塗膜の不連続部から水と酸素の供給を受けて露出された鋼材表面にさび層が形成される(図-6(b)の①、②)。また、マクロセルが形成され、塗膜下にさび層が生成され、塗膜のふくれが生じる(図-6(b)の③)。さらに、水と酸素の供給を受けて塗膜下およびさび層下への腐食が進行し、塗膜のふくれの拡張および板厚の減少が生じる(図-6(b)の④)と考えられる。

(2) 塗膜の不連続部からの腐食

本研究の塗装供試体において、腐食は主にクロスカット部および素地露出部からはじまり、塗膜下の平面方向および板厚方向に進行した。腐食の進行とともに塗膜のふくれが生じ、促進実験時間の増加にしたがってクロスカット部および素地露出部の上下の塗膜のふくれ面積も大きくなった。その例として、普通鋼の塗装供試体の経時的な表面性状の変化を図-7に示す。また、実験後(251日)の塗装およびさび除去した鋼材の表面性状も図-7に示す。これらは、レーザ深度計の測定結果を用いてコンピュータ処理して表面性状を色の違いで示したものである。測定値と色との相関関係をカラースケールで図中に示した。ただし、塗膜除去後については、写真で表面形状を示した。なお、新規、途中、無ケレンの塗装供試体の表面には、塗膜が完全に除去できず下塗り塗料が残っている。

図-7(a)に示すように新規塗装供試体の場合(NL4-1)、促進腐食実験開始後146日目までは、クロスカット部からのふくれはほとんどなく、251日目にクロスカットの交点にふくれが生じていた。なお、素地露出部からは、実験開始後67日以後に素地露出部の上下の塗膜にふくれが生じ、促進実験時間とともに広がった。図-7(b)、(c)、(d)に示すケレン3種類の塗装供試体では、67日あるいは146日になるとクロスカット周辺にふくれが生じ、徐々に周辺に広がっている。また、素地露出部からも、実験開始後67日あるいは146日以後に素地露出部の上下の塗膜にふくれが生じ、促進実験時間とともに広がった。

図-7に示す各供試体の251日目に塗膜除去後の表面性状を比較すると、クロスカット部の周辺と素地露出の上下部の塗膜に生じた塗膜のふくれの下には、ふくれ面積より若干大きい面積のさび層が存在していることが確認

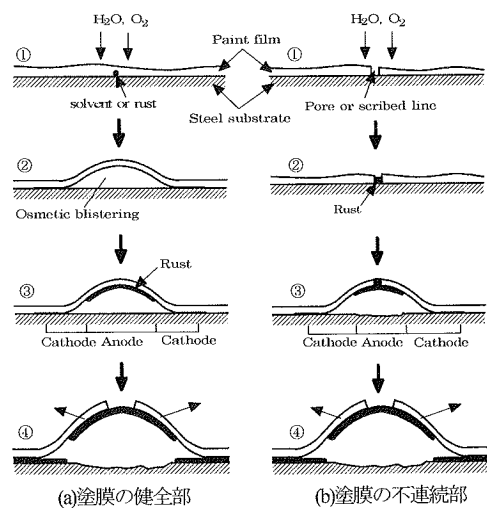


図-6 塗膜の経年劣化⁷⁾

できた。さらに、塗膜除去後とさび除去後の表面性状の比較からは、塗膜下のさびの生成による板厚減少が生じていた。これらは、塗膜に不連続部(クロスカット部、素地と塗装の境界部)がある場合には、塗膜下のさび層の生成により塗膜のふくれが形成され、塗膜下に板厚の減少につながるということが明確に確認できたことを示す。

図-7(b)に示した完全ケレン供試体(NL3-1)のさび除去後の立体的表面性状を図-8に示す。この図からは、クロスカットおよび素地露出部の周辺の腐食による板厚減少の分布が明確に分かる。特に、素地露出の上下部と塗装との境界部の板厚減少が顕著であることが分かった。

本研究では、これらの塗膜のふくれおよび板厚減少量について、図-9に示すように塗膜の状態(クロスカットおよび素地露出部の有無)により、供試体の長手方向に、塗装一般部(0 ≤ X ≤ 20mm)、クロスカット部(20 ≤ X ≤ 90mm)および素地露出部(90 ≤ X ≤ 150mm)と分類して検討する。いずれも、供試体の幅方向の対象範囲は70mmである。

(3) 塗装一般部

a) 外観観察

塗装一般部に対する目視観察および写真撮影による塗膜の表面性状の変化は得られなかった。また、膜厚の測定結果からも塗膜の変化は得られなかった

b) 塗膜のふくれ

ここでは、塗装一般部(縦20×横70mm)におけるレーザ深度計の測定結果を用いて表面性状の変化について検討する。測定間隔は、塗装一般部の全面に対しては0.5×0.5mmあるいは1.0×1.0mm、図-9のA(10×10mm)に対しては0.1×0.1mmであった。

促進実験時間の経過ともなう塗膜表面性状の変化は、

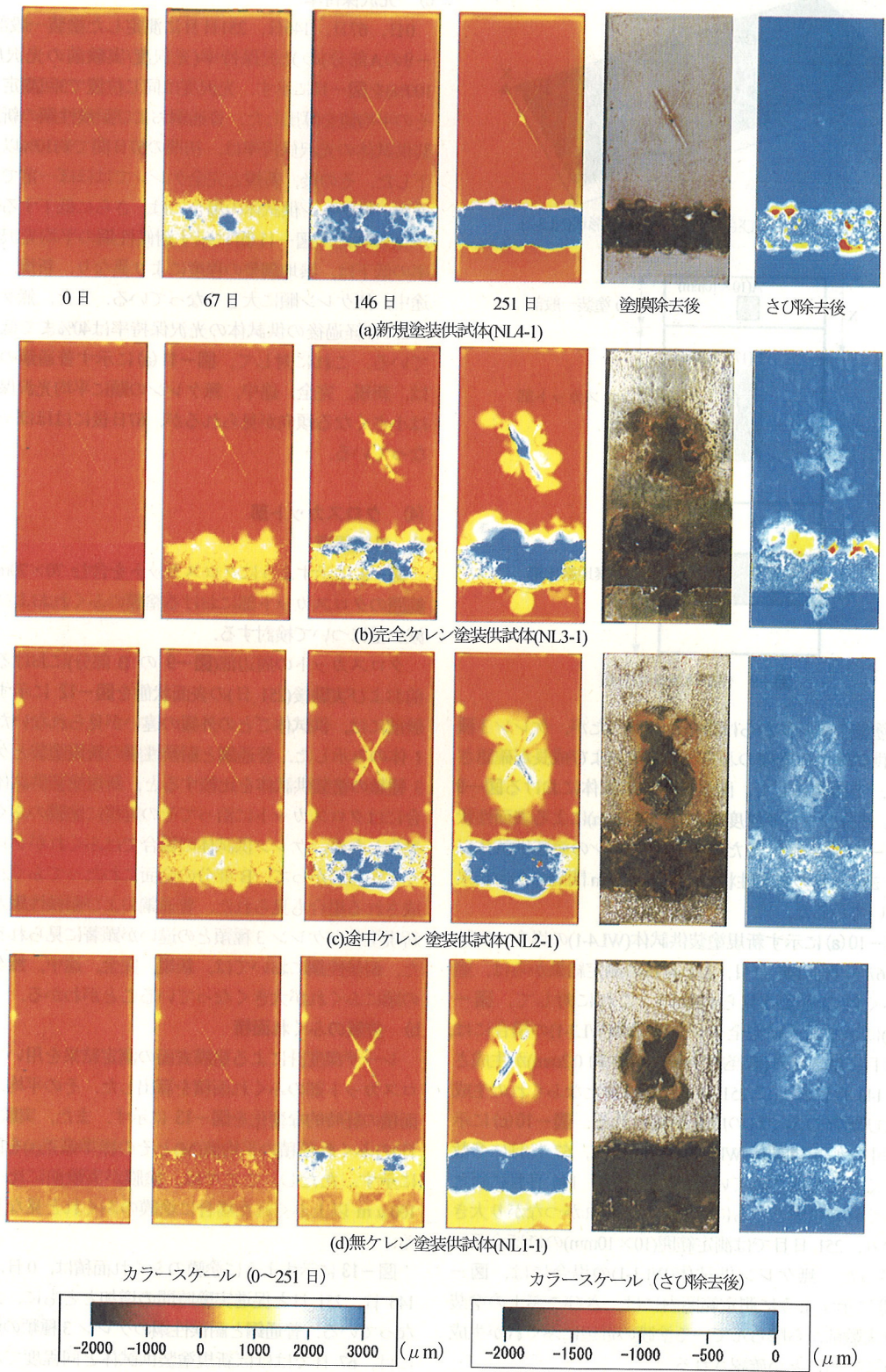


図-7 表面形状の経年変化(普通鋼)

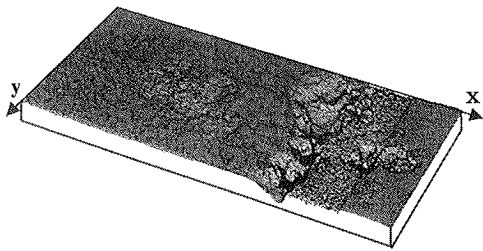


図-8 塗装およびさび除去後の表面形状(NL3-1)

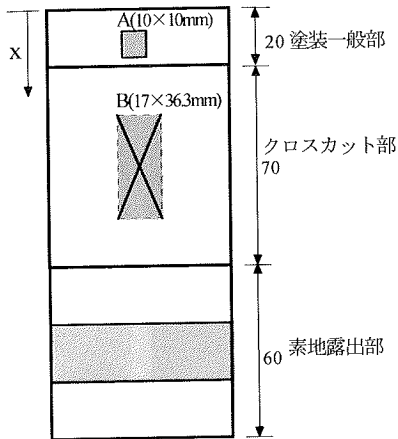


図-9 供試体表面の分類

新規塗装の供試体からは得られなかったが、ケレン3種類の供試体では塗膜のふくれの生成および成長が確認された。その例として、耐候性鋼の供試体における図-9のA部分のレーザ深度測定(0.1×0.1mm)による表面性状を図-10に示す。ただし、完全ケレンの塗装供試体以外の251日目の表面性状は、0.5×0.5mm間隔の測定結果を用いて示した。

図-10(a)に示す新規塗装供試体(WL4-1)の場合、実験前、67日目、146日目、251日目の測定結果からは、塗膜ふくれの生成は見られない。これに対して、図-10(b)に示すように完全ケレン供試体(WL3-1)の場合には、67日目にはふくれ(直径約1mm、高さ約0.2mm)が生成され、146日目および251日目からは新たなふくれの生成および既存のふくれの成長が見られる。図-10(c)に示す途中ケレン供試体(WL2-1)の場合では、67日目に多数のふくれが生成されている。これらは、146日目に新たなふくれの生成とともに隣り合うふくれがつながり大きくなり、251日目では測定範囲(10×10mm)のほぼ全面に広がった。無ケレン供試体(WL1-1)の場合には、図-10(d)に示すように測定範囲内には、さびこぶ上の塗装より実験前から膨らんでいる塗膜の近辺にふくれが生成されていることが確認される。

普通鋼についても耐候性鋼と同様に3種類のケレン供試体のみ、ふくれの生成および成長が確認された。

c) 光沢保持率

0日、67日、146日、251日目に測定した塗装一般部(図-9のA部分)の光沢保持率(光沢度/実験前の光沢度×100%)を図-11に示す。光沢度は同じ位置で3回測定し、その平均値を算出した。普通鋼および耐候性鋼の新規塗装供試体の光沢保持率は、初期の67日間で約10%以上低下した。その後、新規と完全ケレンではほぼ一定であり、途中、無ケレン供試体の場合には、さらに低下する傾向が見られた。図-11(b)に示す耐候性鋼の平均光沢保持率の低下は、素地調整の程度により異なり、新規、完全、途中、無ケレン順に大きくなっている。また、無ケレンの251日経過後の供試体の光沢保持率は40%まで低下している。これに対して、図-11(a)に示す普通鋼の場合は、新規、完全、途中、無ケレンの順に平均光沢保持率は小さくなる傾向が見られるが、67日後にはほぼ一定となっている。

(4) クロスカット部

a) 外観観察

図-9に示すようにクロスカットを含む70×70mmの範囲のクロスカット部における塗膜のふくれおよび板厚減少量について検討する。

クロスカットの周辺部(図-9のB部分)における実験前および実験後(251日)の表面状態を図-12に示す。実験前には、供試体ごとの外観の違いは見られないため、1体のみ示した。普通鋼と耐候性鋼の新規塗装とケレン3種類の塗装供試体を比較すると、新規塗装供試体の場合にはクロスカットに沿ってその近傍に塗膜のふくれが発生したが、ケレン供試体の場合ではふくれがクロスカットから広がって、B部分の全面にわたってふくれが形成される場合も見られた。普通鋼および耐候性鋼ともに新規塗装とケレン3種類との違いが顕著に見られる。また、耐候性鋼においては、新規、完全、途中、無ケレンの順にふくれが大きくなっていることがわかる。

b) 塗膜のふくれ面積

レーザ深度計による塗膜表面の測定結果を用いて、クロスカット部のふくれ面積を算出した。その平均ふくれ面積の経時的な変化を図-13に示す。また、実験後(251日)のふくれ面積の平均値(M)とその標準偏差(s)を図-14に示す。ただし、ここでは、塗膜が実験前に比べて、100μm以上ふくれた場合に塗膜のふくれと見なしている。

図-13に示すように塗膜のふくれ面積は、0日、67日、146日、251日と促進実験時間の増加とともに、大きくなっている。普通鋼と耐候性鋼のケレン3種類の供試体には、67日ではほぼ新規塗装供試体と同程度であるが、その後は急激に増加する傾向が見られる。これに対して、新規塗装の増加量は小さい。素地調整の違いによるふく

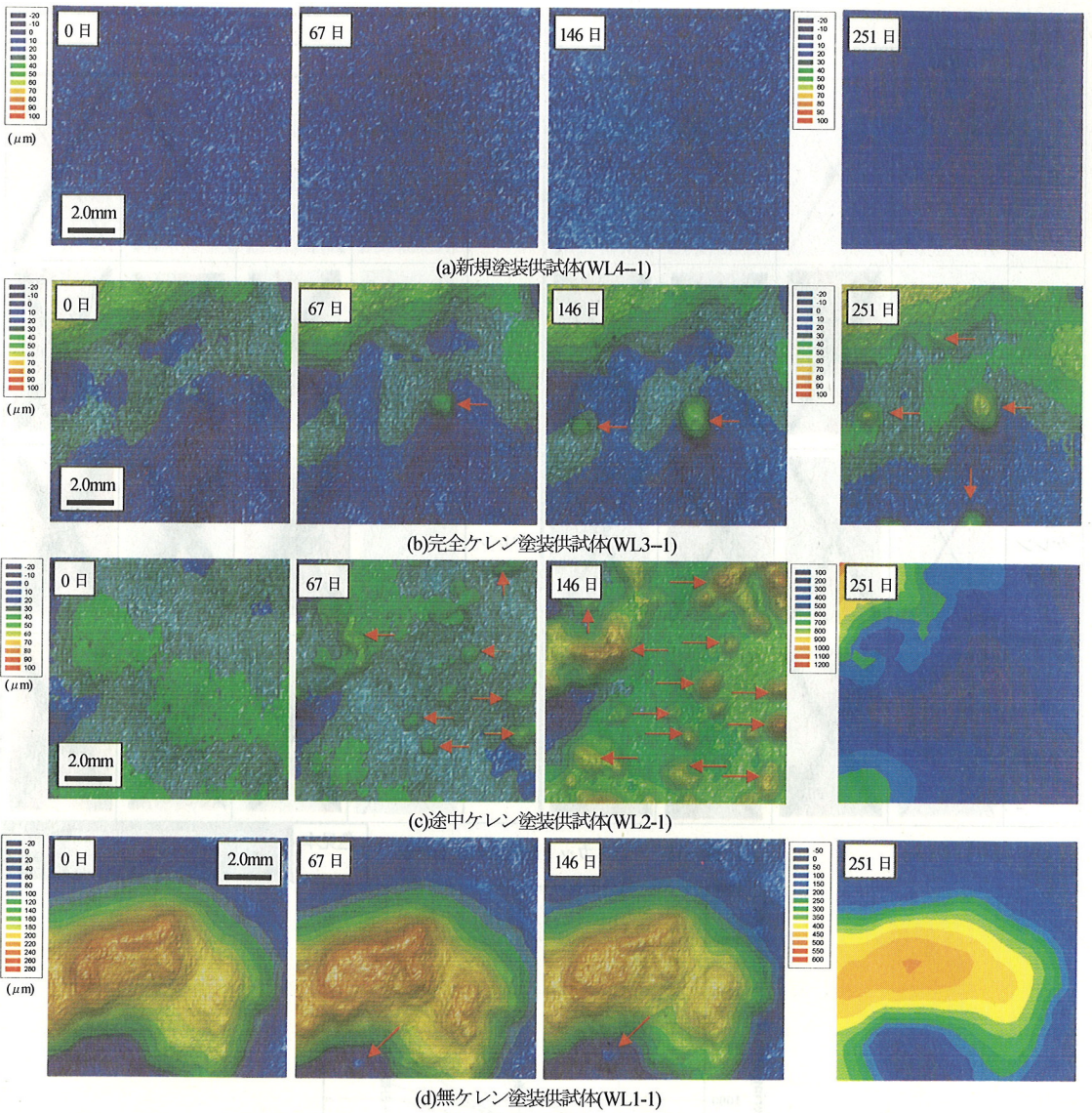


図-10 塗装一般部におけるふくれの生成および成長 (← : ふくれの位置を示す)

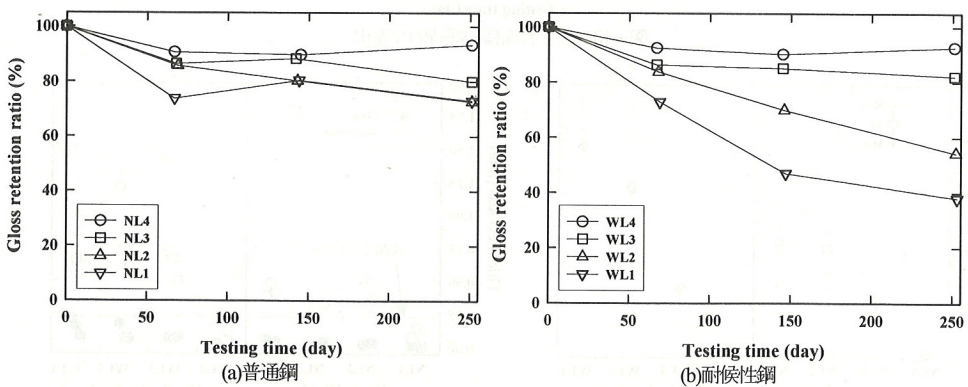


図-11 光沢保持率

素地調整	普通鋼			素地調整	耐候性鋼		
	実験前	実験後(251日)			実験前	実験後(251日)	
新規塗装				新規塗装			
完全ケレン塗装				完全ケレン塗装			
途中ケレン塗装				途中ケレン塗装			
無ケレン塗装				無ケレン塗装			

図-12 クロスカット部周辺の表面状況

色見本

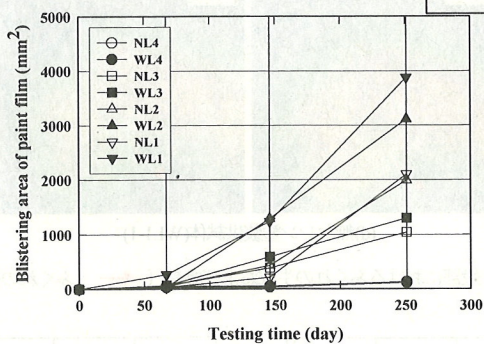


図-13 ふくれ面積の経時的な変化

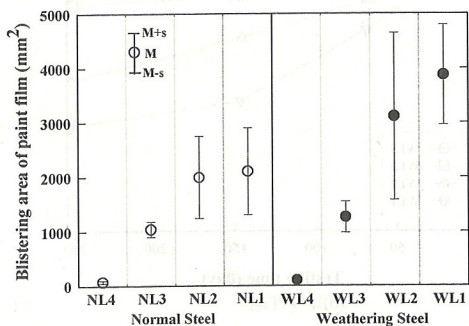


図-14 実験後のふくれ面積

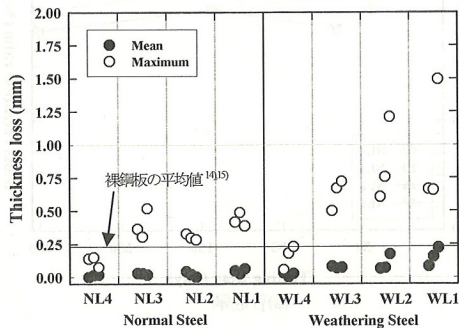
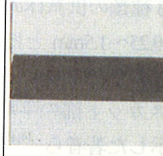
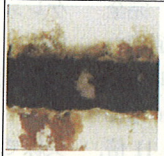

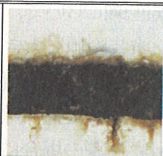
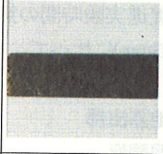
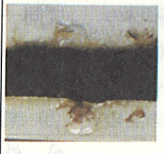
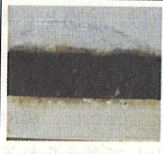
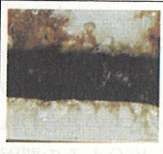
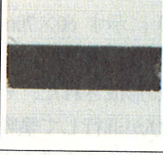

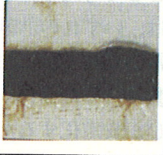
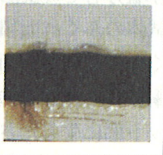

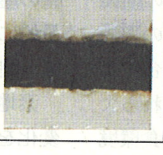


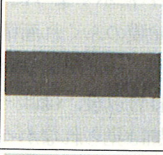

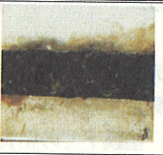

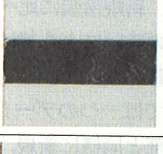



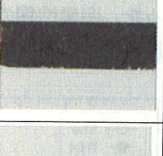
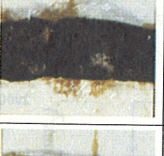


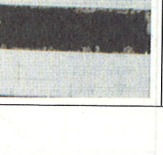





図-15 実験後の板厚減少量

供試体	普通鋼			
	実験前	実験後(251日)		
新規塗装				
完全ケレン塗装				
途中ケレン塗装				
無ケレン塗装				

供試体	耐候性鋼			
	実験前	実験後(251日)		
新規塗装				
完全ケレン塗装				
途中ケレン塗装				
無ケレン塗装				


色見本 

図-16 ふくれ面積の経時的な変化

れ面積の差は、促進実験時間とともに大きくなっている。

図-14 に示す実験後(251日)の平均ふくれ面積は、普通鋼および耐候性鋼において、いずれも新規塗装、完全途中、無ケレン塗装の順に大きくなっている。普通鋼の場合は、新規塗装のふくれ面積に比べて、完全ケレンでは約8倍、途中ケレンで約15倍、無ケレンで約16倍である。また、耐候性鋼の場合には、それぞれ、約11倍、約26倍、約33倍となった。これは、塗膜と下素鋼材の表面との接着力が新規、完全、途中、無ケレンの順に小さくなり、それにより塗膜下のさびが広がりやすくなったことに起因するものと思われる。さらに、膜厚の品質や塗膜下の残存塩分もその要因として考えられる。

耐候性鋼供試体のふくれ面積は、いずれの供試体も普通鋼より大きくなっている。通常の暴露実験において耐候性鋼と普通鋼に同じ仕様で塗装を行った場合、耐候性鋼のクロスカット部に生じたさびが安定化するため、さびの拡がりや抑制され、普通鋼に比べて耐候性鋼の塗膜のふくれが少ないと予想される⁹⁾。しかし、塩分の影響を強く受けるところでは腐食速度は低下せず、場合によっては普通鋼より腐食量が多いこともある¹⁰⁾。これらより、促進腐食実験のS6サイクル条件は厳しい腐食環境であり、耐候性鋼に安定さびができないことが、本研究において耐候性鋼のふくれ面積が普通鋼に比べて大きかった要因の一つとして考えられる。

c) 板厚減少量

実験終了後、2.(3)に述べた方法により塗膜とさびを除去して下地鋼板の表面形状を測定し、クロスカット部における板厚減少量を算出した。塗膜下での腐食がなく、板厚減少がないと推定される塗装一般部の平均板厚に基づいて、すべての供試体における個々の板厚減少量の平均値および最大値を図-15に示す。

普通鋼の場合、各条件の供試体の平均板厚減少量の平均値はほぼ同じである。これに対して、耐候性鋼の場合には、新規、完全、途中、無ケレンの順に大きくなる傾向が見られる。最大板厚減少量の場合、普通鋼のケレン

3種類の供試体は0.25~0.5mm内であり、新規に比べて大きい。耐候性鋼の場合には、新規塗装供試体に比べてケレン3種類の供試体の方が大きく、ケレン3種類の供試体は0.25~1.5mmとほぼ同程度か完全、途中、無ケレン順に大きくなる傾向にある。

クロスカット部の平均板厚減少量は、図-15の中に実線で示した著者ら¹⁴⁾¹⁵⁾の促進腐食実験より得られたほぼ同一促進実験時間の無塗装鋼板(普通鋼)の平均板厚減少量(0.23mm)に比べて、小さい。

(5) 素地露出部

a) 外観観察

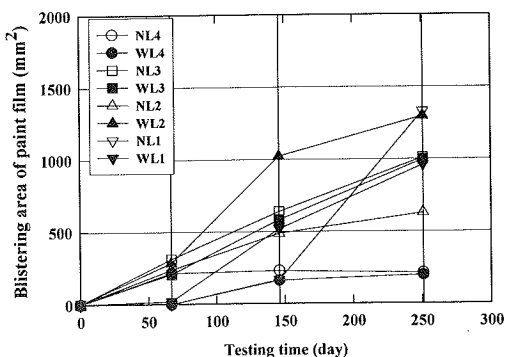
図-9に示す60×70mmの範囲の素地露出部の表面性状を図-16に示す。最初に、素地露出部にさびが生じ、さび層が形成された。その後、素地露出上下部の塗膜の下にさびが進行して塗膜のふくれが形成された。素地調整の違いによる塗膜のふくれおよび板厚減少について定量的に検討する。

b) 塗膜のふくれ面積

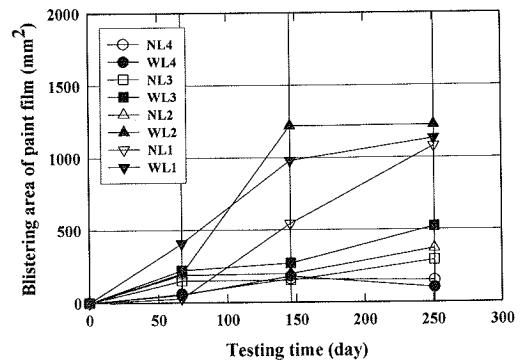
素地露出部の上下部の塗膜の平均ふくれ面積の経時変化を図-17(a)、(b)に示す。また、実験後(251日)の素地露出部の上下部の塗膜ふくれ面積の平均値(M)とその標準偏差(s)をそれぞれ図-18に示す。

図-17に示すようにケレン3種類の素地露出部の上下部の塗膜のふくれ面積は、促進実験時間とともに大きくなるが、新規塗装供試体のふくれ面積は67日あるいは146日目以後、ほぼ一定となり、その以上のふくれ面積の増加は見られなかった。ただし、ケレン3種類の場合には、新規塗装に比べて、ふくれ面積は大きい。素地調整の違いによる差は明確ではない。

図-18に示すように実験後(251日)のふくれ面積は、普通鋼では一つのデータ(NL3の上部)を除いて、クロスカット部と同様に新規、完全、途中、無ケレンの順に大きくなった。耐候性鋼の場合にも、普通鋼と同様な傾向が見られるが、素地露出部の上部に対しては無ケレンの



(a)素地露出の上部塗装のふくれ



(b)素地露出の下部塗装のふくれ

図-17 ふくれ面積の経時的な変化

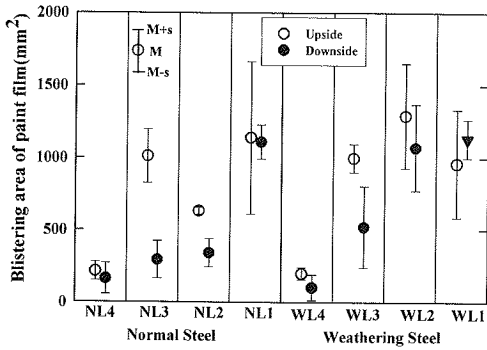


図-18 素地露出部のふくれ面積

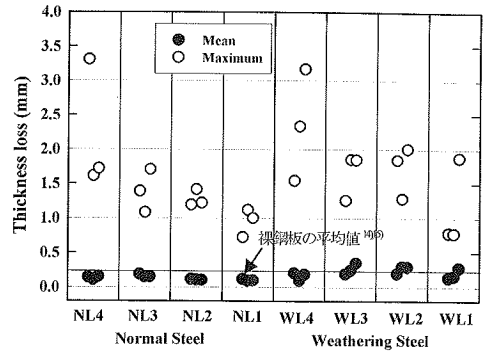


図-19 素地露出部の板厚減少量

方が途中ケレンより小さい場合もある。

c) 板厚減少量

クロスカット部と同様に境界部における板厚減少量を算出し、その平均値と最大値を図-19に示す。また、文献 14), 15)で求めたほぼ同一促進実験時間の裸鋼板の平均板厚減少量(0.23mm)も実線で示した。

普通鋼の平均板厚減少量は、素地調整の違いによらずほぼ同じであり、裸鋼板より小さい。これに対して、耐候性鋼の場合、ケレン3種類の供試体はほぼ同じであり、新規塗装供試体に比べて大きい。また、ケレン3種類の平均板厚減少量は、裸鋼板とほぼ同程度である。

最大板厚減少量は、普通鋼および耐候性鋼ともに、新規、完全、途中、無ケレンの順に小さくなる傾向が見られる。また、最大板厚減少量は、新規塗装で約 3.5mm まで達する場合もあった。

最大板厚減少量は、前述したように新規、完全、途中、無ケレンの順に大きくなるふくれ面積とは逆順である。これは、素地調整程度によらず腐食量が同じであると仮定すると、腐食の進行は塗膜と素地との間か板厚方向かであり、無、途中、完全ケレン、新規の順に塗膜と素地との間へのさびの拡がりや抑制されて主に板厚方向に進行することに起因したものである。

4. 塗膜の劣化曲線および塗装不連続部の板厚減少

(1) Gompertz 曲線

塗膜寿命予測の数式モデルには、Gompertz 曲線、ロジスティック曲線、ポアソン分布、Zubov の式などが用いられる^{16), 17)}。本研究では、西村・島田¹⁶⁾により鋼構造物塗膜の長期間経年劣化挙動の評価への適用性について理論的に検証され、初期段階の塗膜劣化面積率から長期間の劣化を推定することが可能である Gompertz 曲線を用いることにした。Gompertz 曲線は次式のように表される。

$$y_t = K \cdot a^{b^t} \quad (1)$$

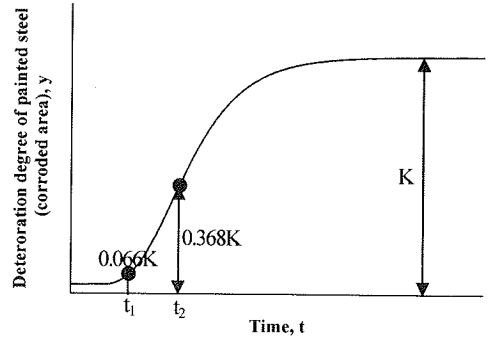


図-20 Gompertz 曲線

ここで、 y_t は劣化面積、 t は経年数、 K は全面劣化時の面積であり、定数 a, b は $0 < (a, b) < 1$ とする。この曲線は、図-20に示すように、 $y=0$ から徐々に増加して、極限值 $y=K$ に漸近する曲線となる。

西村らは、初期劣化面積率を 0.5% とし、Gompertz 曲線の急増点($t_1=0.066K$)～変曲点($t_2=0.368K$)を実用的塗替え時期としてよいと提案した。また、 t_2 は $2.5t_1$ であることも示した。

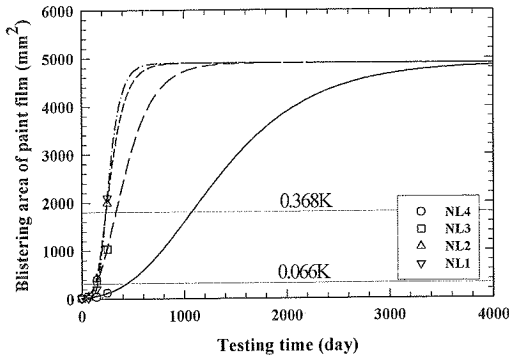
(2) 塗膜の劣化曲線

本研究では、クロスカット部のふくれ面積を塗膜の劣化面積として新規塗装、完全、途中、および無ケレン塗装の劣化曲線を求める。図-21にそれぞれのクロスカット部のふくれ面積を示す。また、これらのデータから Gompertz 曲線により求めたふくれ面積と促進実験時間との非線形回帰曲線を示す。回帰曲線の相関係数が 0.93 以上と高いことから、ふくれ面積と促進暴露時間との関係は、Gompertz 曲線で近似することができるといえる。また、クロスカット部の全面積 $K(4900\text{mm}^2)$ に対する初期クロスカット(幅 0.3mm, 全長 80mm)の面積率は、0.49% であり、西村らが想定した初期劣化面積率 0.5% とほぼ一致する。

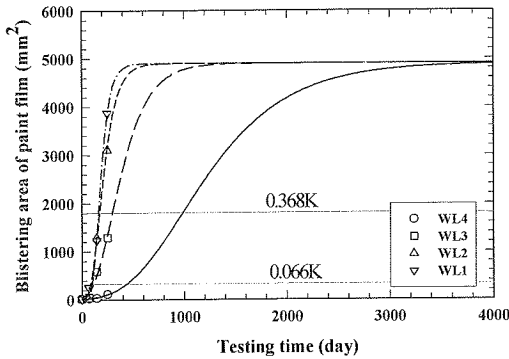
図-21の回帰曲線の急増点($t_1=0.066K$)と変曲点($t_2=0.368K$)に相当する促進暴露時間を表-8に示す。また、表の()内には、新規塗装の促進実験時間を 1 としたそ

表-8 塗膜の寿命

供試体記号	促進暴露期間(日)	
	$t_1=0.066K$	$t_2=0.368K$
NL4	435(1.00)	1060(1.00)
NL3	139(0.32)	339(0.32)
NL2	133(0.31)	239(0.23)
NL1	157(0.36)	237(0.22)
WL4	435(1.00)	990(1.00)
WL3	113(0.26)	305(0.31)
WL2	86(0.20)	176(0.18)
WL1	102(0.23)	164(0.17)



(a)普通鋼



(b)耐候性鋼

図-21 塗膜の劣化曲線

それぞれの比率を示す。

t_1 では、新規塗装の1に対して、ケレン供試体は0.31~0.36(普通鋼), 0.20~0.26(耐候性鋼)と、それぞれ新規塗装の約36%以下および26%以下と非常に短い寿命となる。また、 t_2 でも、0.22~0.32(普通鋼), 0.31~0.17(耐候性鋼)と短い寿命を示す。完全、途中、無ケレンの違いによる結果を比較すると、 t_1 ではケレンによる差は明確ではないが、 t_2 では完全、途中、無ケレンの順に短くなることがわかる。この場合、新規とケレン3種類の差が大きく、その差に比べるとケレンの3種類の違いによる差は小さく、ほぼ同じであるとも言える。特に、途中と無ケレンの回帰曲線はほぼ同じである。普通鋼と耐候性鋼を比較すると、新規ではほぼ同じであり、ケレン3種類の場合は耐候性鋼の方がより短い。

以上の結果から、表面調整後さびが残存しない場合にも、素面調整手法(1種表面調整(ブラスト処理), 2種(グラインダー処理))により塗膜の耐久性は大きく異なることが予測される。また、さびが残存する場合は、その残存程度(途中、無ケレン)によらず、その耐久性はほぼ同じであるという結果が得られた。

本研究では、クロスカット部からの塗膜下への腐食に基づいて、初期欠陥がある塗膜の劣化曲線を求めた。塗

装系において劣化面積あるいは全面腐食劣化までの期間を劣化曲線によって推定するためには、塗膜下のさびが初期の潜在期間を経て外部に出てくるまでの期間を考慮する必要がある。本研究で行った251日間の促進腐食実験からは、完全、途中、無ケレンの塗装供試体の塗装一般部における塗膜ふくれの生成および成長が確認され、塗膜を破り貫通するまでの寿命も新規塗装の供試体に比べてケレン塗装供試体の方が短いことが予測される。したがって、塗膜を破り貫通するまでの寿命の差を考慮すると、表-8に示した新規塗装とケレン3種類塗装との寿命の差は、さらに大きくなると推定される。この結果からは、動力工具および手工具を用いる現場の塗替え塗装の寿命は、ブラスト素地調整を行う新規塗装に比べて約36%以下であるともいえる。

(3) 塗装と素地との境界部の腐食特性

本研究で用いた供試体の製作において、素地露出部を設定したのは、塗装の不連続部の腐食劣化特性に関する基本的なデータを得るためであった。前述したように、塗装の不連続部とは、鋼構造部材とコンクリートとの接触部、鋼構造部材の連結部、無塗装耐候性鋼橋の桁端部に行われる部分的な塗装部などを想定している。

素地露出部全面における平均板厚減少量については3.(5)で検討した。ここでは、素地露出部と塗装との境界部に着目し、その境界線に近傍の板厚減少量について供試体の板幅方向の腐食ピットの平均深さをを用いて検討する。耐候性鋼の新規、完全、途中、無ケレン供試体の平均深さを図-22に示す。腐食ピットの平均深さは、新規塗装では素地露出部内で最大になるが、ケレン3種類の場合では、素地露出部の上下部と周辺の塗膜下で最大になる傾向である。普通鋼の場合にも同様な結果が得られた。

また、各供試体のそれぞれに対する平均腐食ピット深さの最大値を図-23に示す。その最大深さは、普通鋼で完全ケレン、新規、途中/無ケレン、耐候性鋼で完全ケレン、途中ケレン、新規、無ケレンの順に小さくなる傾向が見られる。いずれも、全面腐食が生じる裸鋼板(0.23mm)よりも大きく、新規塗装では約0.5mmと裸鋼板

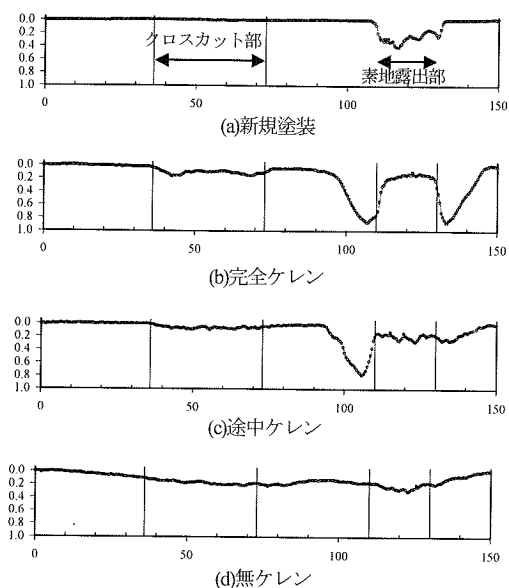


図-22 耐候性鋼の腐食ピット深さ(単位: mm)

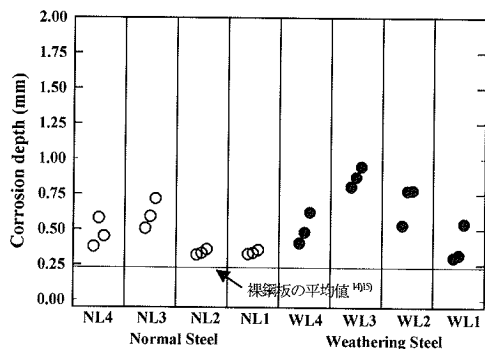
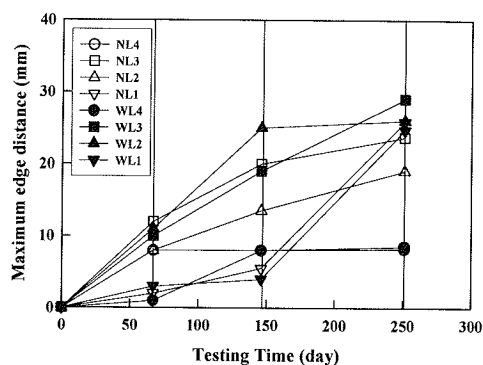


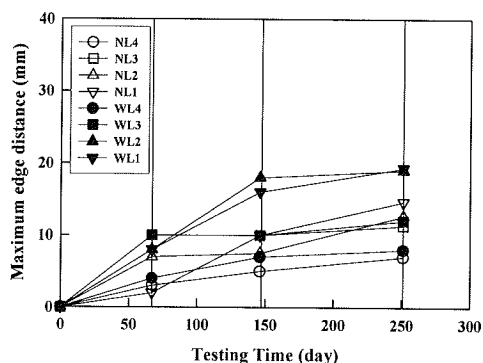
図-23 平均腐食ピットの最大値

の約2倍である。また、耐候性鋼の完全ケレンの場合が一番大きく、0.75~1.0mm内に分布し裸鋼板の3倍以上となる。したがって、塗装不連続部が存在する場合には、無塗装の裸鋼板よりも、板厚減少量が大きくなる場合もあることが予測される。また、3.(5)c)に示したように素地露出部の最大板厚減少量(腐食ピットの深さ)が3.5mmまで達する場合もあり、このような塗膜と素地露出部との境界部における局所的な断面欠損による耐荷力や疲労強度の減少が懸念される。

塗装の不連続部からどこまで塗膜下をさびが進行するかを定量化するために、各供試体の素地露出縁から上下ふくれの最外縁までの距離の最大値の平均値を図-24に示す。ケレン3種類の素地露出部の上下部の最大値は、普通鋼と耐候性鋼ともに促進実験時間の増加にしたがい大きくなるが、新規塗装供試体では67日あるいは146日目以後、ほぼ一定となり、その以上の腐食の進行は見られなかった。実験後(251日)の素地露出縁から上下ふ



(a)素地露出の上部塗膜のふくれ



(b)素地露出の下部塗膜のふくれ

図-24 素地露出縁からふくれの最外縁までの距離の最大値

くれの最外縁までの最大値は、普通鋼と耐候性鋼ともに約8mm(新規塗装供試体)である。これに対して、ケレン3種類の塗装供試体の最大値は、素地露出上部で20~30mm、下部で10~20mmとなり、新規塗装供試体に比べて大きな値となった。

5. まとめ

鋼橋の現場の塗替え塗装は、ブラスト処理方法を採用する新規塗装とは異なり、主に動力工具および手工具を使用するので、完全にさびを除去することは困難であり、ある程度さびが残存している表面に塗装することになる。そこで、本研究では素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化特性を明らかにするために、長期間(251日)の促進腐食実験を行った。

この実験では、ブラスト処理したままの鋼板(新規塗装)、腐食させた鋼板のさび層を完全に除去(完全ケレン)、中程度に除去(途中ケレン)、無除去(無ケレン)の素地調整程度が異なる4種類の塗装供試体を用いた。

塗装一般部、クロスカット、および素地露出部と塗装との境界部における表面性状の変化、ふくれ面積および

板厚減少量に基づいて、素地調整による腐食劣化特性および腐食耐久性の違いについて検討した。

得られた主な結果を以下にまとめる。

- 1) 鋼橋の維持管理において重要な塗替え塗装の耐久性について、新たに工夫した供試体を用いて長期間の促進腐食実験を行い、素地調整程度の違いによる差を明らかにした。今後、鋼橋のライフサイクルアナリシスの高度化に必要な、基礎的データを提供した。
- 2) レーザ深度計を用いて、塗装のふくれ性状、鋼板の腐食性状を明らかにすることができた。特に、クロスカット部や素地露出部と塗装部との境界部におけるふくれ面積の経時的変化を明らかにした。また、促進腐食実験後に塗膜とさびを除去した後の板厚減少量についても明らかにした。
- 3) 塗装一般部において、肉眼では、新規塗装供試体とケレン塗装供試体とも、ほとんど変化がないが、レーザ深度計によって塗膜ふくれの経時的変化を定量的に明らかにした。新規塗装供試体においては、普通鋼と耐候性鋼ともにふくれの生成は見られなかったが、ケレン3種類の供試体においては、ふくれが発生し、成長することが確認できた。
- 4) クロスカットからの腐食劣化面積に基づいて、4種類の塗装鋼板の劣化曲線を求めた。これらより、完全、途中、無ケレンの塗替え塗装鋼板の寿命は、ほぼ同程度であり、新規塗装に比べて、約36%以下と非常に短いという結果が得られた。
- 5) 塗装と素地露出部との境界下部には局部腐食が生じて全面腐食の無塗装裸鋼板に比べて、境界部近辺の平均板厚減少量が約3倍以上になることがあり、最大板厚減少量が3.5mmまで達する場合もあった。そのため、構造物に塗装の不連続部が存在する場合は、板厚減少による局部的な耐力や疲労強度の減少が発生する可能性があると思われる。

謝辞：供試体の製作において、神戸製鋼所の安部研吾氏、トピー工業の酒井吉永氏および長屋五郎氏、日本ペイントの川西弘明氏よりご協力を頂いた。また、本研究に関して、(独)土木研究所の守屋進氏および名古屋大学の山田健太郎教授より有用なご意見を頂いた。なお、本研究の一部は、平成11～13、15～17年度の科学研究費補助金(課題番号11450174、15360237：研究代表者伊藤義人)の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 神谷 誠, 藤原 博, 三宅 将: 鋼橋塗装の長期防食性能

の評価に関する研究, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.31, pp.65-97, 1994.

- 2) 藤原 博, 菅野照造: 鋼橋の塗膜劣化と塗膜下との相関性に関する研究, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.167-181, 1996.
- 3) 藤原 博, 田原芳雄: 新設鋼道路橋に適用する重防食塗装系に関する研究, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.23-34, 1997.
- 4) 藤原 博, 田原芳雄: 鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.129-140, 1997.
- 5) 藤原 博, 三宅 将: 鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究, 土木学会論文集, No.696/I-58, pp.111-123, 2002.
- 6) Cleveland Society for Coatings Technology Technical Committee: Correlation of accelerated exposure testing and exterior exposure site, *Journal of Coatings Technology*, Vol.66, No.837, pp.49-67, 1993.
- 7) Funke, W.: Problems and progress in organic coatings science and technology, *Progress in Organic coatings*, Vol. 31, pp.5-9, 1997.
- 8) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(I 共通編, II 鋼橋編), 2002.
- 9) 関西鋼構造物塗装研究会編: 最新, わかりやすい塗装のはなし, 塗る, pp.115-117, 2001(オリジナル参考文献の出所不明).
- 10) 社団法人 日本鋼構造協会: さび面塗料小委員会最終報告, JSSC テクニカルレポート No.28, pp.137-140, 1994.
- 11) 社団法人 日本規格協会: JIS ハンドブック 鉄鋼 I, pp.259-272, pp.993-995, 1999.
- 12) 社団法人 日本道路協会: 鋼道路橋塗装便覧, 1990.
- 13) 片脇清士: 橋と塗装(橋を美しくまもる), 山海堂, pp.111-113, 1996.
- 14) 伊藤義人, 岩田厚司, 貝沼重信: 鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1021-1029, 2002.
- 15) Kainuma, S., Hoshomi, N., Kim, I.T., and Itoh, Y.: Fatigue behavior of corroded out-of-plane gusset welded joints, *Proceedings of 2nd International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'02)*, CD-ROM, Busan, Korea, 2002.
- 16) 西村 昭, 島田喜十郎: 鋼構造物塗膜の長期劣化挙動の理論解析, 橋梁と基礎, No.5, pp.17-21, 1985.
- 17) 社団法人 日本鋼構造協会: 鋼橋塗膜の評価技術(その2, 塗膜劣化の経時変化モデルと寿命予測の検討), JSSC テクニカルレポート No.45, 1998.
- 18) Funke, W.: Blistering of paint films and filiform corrosion, *Progress in Organic coatings*, Vol. 9, pp.29-46, 1981.
- 19) 社団法人 日本橋梁建設協会: 無塗装橋梁の手引き, p.26, 1991.
- 20) 社団法人 鋼材倶楽部: 土木構造物の腐食・防食 Q&A, p.76, 1992.

- 21) 伊藤義人, 金 仁泰, 太田 洋, 貝沼重信: 鋼材の腐食
耐久性評価のための環境促進実験に関する基礎的研究,
構造工学論文集, Vol.49A, pp.697-706, 2003.

(2003. 12. 8 受付)

CORROSION DETERIORATION OF PAINTED STEELS WITH DIFFERENT SURFACE PREPARATIONS OF STEEL SUBSTRATES

Yoshito ITOH, In-Tae KIM, Shigenobu KAINUMA and Yoshihisa KADOTA

This study examined corrosion characteristics and durability of painted steels with different surface preparations of steel substrates through accelerated exposure tests. Steel plates were fabricated with structural steels for twelve specimens and weathering steel plates for twelve specimens conforming to JIS SM490A and SMA490AW, respectively. Nine of the twelve plates in each group were pre-corroded in the accelerated exposure test equipment for S6-120 cycles (30 days), and then the surface treatment of the pre-corroded specimens was conducted by a grinder in three ways, i.e. complete rust removal, slight rust removal, and no rust removal in each for three corroded specimens. Non-corroded steel plates were grit-blasted before coating. Based on C-3 or C-4 painting systems, the coating of all the plates was performed. The accelerated exposure tests of the painted specimens were continued for S6-1000 cycles (251 days). From the test results, the effect of different surface preparations degree on corrosion deterioration of the painted steels was clarified.