

# 鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食との 相関性に関する研究

藤原 博<sup>1</sup>・菅野照造<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 (〒194 東京都町田市忠生1丁目4番1号)  
<sup>2</sup> 工博 株式会社防蝕エンジニアリング (〒270 千葉県松戸市小金原7丁目32番17号)

一般に、鋼橋塗装の塗り替えは、塗膜の劣化度(発錆度)の評価によって行われるが、発錆度と塗膜下の腐食度との関係は必ずしも明らかではない。本研究は、この種の問題を明らかにすることにより、塗り替え時期を適切に判断することが可能と考え、環境の異なる6橋について塗膜劣化度を画像処理システムを用いて測定し、その塗膜下腐食をレプリカ法で測定した。その結果、塗膜表面のさびの大きさ及びその面積率と鋼材の腐食度との間には、重相関係数 0.7~0.9 という関係にあることが分かり、この重回帰式から塗膜下腐食度を推定し、塗り替え時期を的確に判断できる可能性を示した。

**Key Words:** steel bridge, painting, paint films, survey, deterioration, under film corrosion, multiple correlation, image processing system, recoating

## 1. まえがき

日本道路公団(以下「JH」という)の管理している鋼橋は、全国で約2500橋(鋼橋延長約370km, 塗装面積約2千万㎡)に及んでおり、このうち年間約8%強について塗り替えを行っている。

このための塗り替え費用は、道路の維持管理費全体の約6.6%を占めており、今後、鋼橋の塗り替えは塗装資産(塗装面積)の増大に伴って、量、費用ともに大幅に増加していくことが予想されており、この塗り替え費用の低減がJHの研究課題の一つとなっている。

我々は、この研究課題の一環として「塗膜劣化度診断システム」<sup>1)・2)</sup>の開発を行っている。本研究は、このシステムに組み込まれる「塗り替え時期の判定」に必要な塗膜劣化と塗膜下腐食の相関性について報告するものである。

塗膜は、大気中に暴露されると、太陽光中の紫外線及び大気中の酸素、水分などの影響を受けて、高分子膜が低分子化合物へと変化することが知られており<sup>3)・4)</sup>、この現象を一般に塗膜劣化と称している。

塗膜の劣化現象を評価するには、大別して次の方法が一般に用いられる。

- ① 各種の機器分析法により、塗膜の分子レベルの変化を検討する室内測定法。
- ② 主として目視観察により、総体的な塗膜の変状を調査する現場調査法。

①の室内測定法は、主として研究調査又は事故調査のような場合に用いられるが、鋼橋塗膜のように塗り替えが必要かどうかという、巨視的な評価のために用いられる調査には、専ら②の現場調査法が適用されている。

この現場調査法は、一般に塗膜劣化度の標準図(例えば、ASTM・D610/SSPC-Vis-2-68Tなど)<sup>5)</sup>が用意されていて、この図と対比して劣化率何%又はレイティングナンバー等で表示する目視観察法である。しかし、この方法は容易である反面、熟練者であっても経験の差や主観による個人差は免れないことを神谷ら<sup>6)</sup>は指摘している。

一方、塗膜調査の専門家によって、これらの目視調査の結果を統計的手法により解析すると、ロジックチェック曲線やゴンベルツ曲線のようなS字曲線になることを吉田は多くの文献を整理して詳しく述べている<sup>7)・8)・9)</sup>。また、片脇らは全国254橋の塗膜調査の結果を同様の手法で検討し、塗膜劣化の傾向はS字曲線的に示されることを述べ、このことから塗り替え時期の予測ができることを報告している<sup>10)・11)</sup>。これと同様なことを栗山<sup>12)</sup>、西村<sup>13)</sup>も述べている。

しかしながら、これらの基礎データはすべて目視調査によるものであるため、前述のように個人差は認めない。したがってS字曲線を実際に適用する場合には、理想曲線に対し実証値による修正が必要となる。

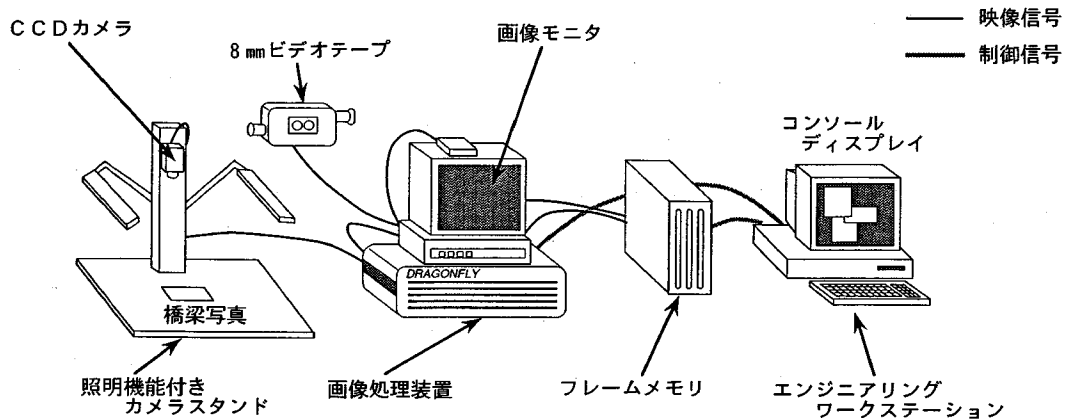


図-1 塗膜劣化度診断システム機器構成図

西村<sup>13)</sup>は、塗膜劣化の実証的データと共に鋼材腐食に伴う断面減少のデータを収集することが必要であることを述べている。また、松本らは<sup>14)</sup>これを実証するような形で道路橋152橋、鉄道橋33橋の塗膜劣化と数橋の板厚測定を行って、部材別及び部分別の塗膜劣化と塗膜下腐食との関係について報告し、腐食劣化評価法について提案している。

以上、これらの研究結果に共通していえることは、前述したように、塗膜劣化の評価がいずれも標準図と対比する目視観察結果がベースになっているということである。

我々は、鋼橋塗膜の塗り替えを前提とした、塗膜劣化と塗膜下腐食の関係を検討するに当たり、目視による個人誤差を避けるため、塗膜面の画像情報から塗膜の劣化診断を行うシステムを開発することから本研究を始め、主観の入らない客観的データをベースとすることにより、実用性の高い塗膜劣化の評価と塗り替え時期の判定が得られるものと考え、本研究を実施した。

## 2. 塗膜劣化度診断システムの概要

### (1) システムの概要

塗膜劣化度診断システムの詳細については、既に報告<sup>1), 2)</sup>しているので、ここでは本システムの概要<sup>15)</sup>について述べる。

本システムは、図-1に示したような構成となっており、大別してエンジニアリングワークステーション(以下「EWS」という)と画像処理装置からなっている。

EWSは、本システムのホストコンピュータであり、システムの操作はEWSのコンソールディスプレイを見ながら行われる。EWSの主な役割は、①操作入力誘導用テキスト/画面表示、数量化結果表示、②マウス若しくはタッチパネルからの操作コマンド/設定データの受け付け、③諸特徴量/統計量算出、④画像処理装置、画像モニタ等の周辺機器の制御、等である。

画像処理装置は、カメラやVTRから取り込んだ塗膜面の画像から塗膜劣化部を抽出する。

### (2) システムの構成

本システムが持つ機能及び一般的な処理手順は、以下のとおりである。

- ① CCDカメラ若しくは8mmビデオから画像を入力する(画像入力)。
- ② 劣化部として画像の濃淡値が急変する部位を抽出する(劣化部抽出)。
- ③ 劣化部の画像上での寸法を実寸法へ変換する(実寸法算出)。
- ④ 不要部材等を除去し、処理の対象とする塗膜面のみに限定する(領域設定)。
- ⑤ 抽出した劣化部毎に面積、周囲長、円形度等の特徴量と各種統計量を算出する(特徴量算出)。
- ⑥ 各種の処理結果及びパラメータをファイルへ保存する(ファイル保存)。

なお、これらの一連の処理は対話形式で行われ、処理結果は、EWSのディスプレイ上にそれぞれ画像、表、グラフの形式で表示される。また、実橋の原画像及び塗膜劣化部の画像処理結果等は、画像モニタに逐次表示されるようになっている。

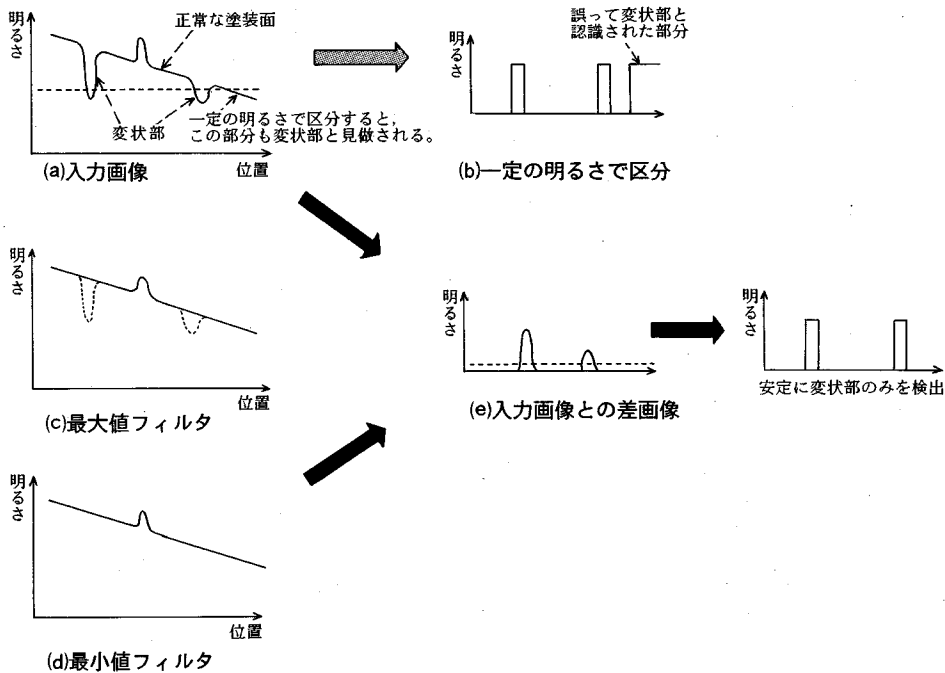


図-2 濃淡モフォロジ処理による変状部抽出原理

### (3)塗膜劣化部抽出の原理

現場において塗膜劣化面を撮影する場合、橋梁の構造や撮影環境等から、本来同じ明るさである塗膜表面全体が日光、あるいは撮影用のライトやストロボ等の影響によって連続的に変化しているように撮影される。

通常、さびや割れなどの塗膜劣化部分（変状部）は周囲の正常な塗膜面と比較して相対的に暗くなっており、この様子を様式的に表現する図-2(a)のようになる。

このような画像から変状部を抽出するのに、一定の明るさで区分する手法（指定した明るさよりも暗い部分は変状部、明るい部分は正常な塗膜面と判定する手法）を適用しても人間の視覚のように良い結果は得られない。変状部でなくても指定した明るさ（しきい値）が低いと正常部と見なされたり、逆にしきい値が高い変状部を抽出できない場合がある（図-2(b)）。

このように画像に照度変化がある場合の領域抽出法として、画像中の各位置において周囲の明るさに比べて相対的に暗い領域を抽出し、これを変状部として認識する手法、すなわち「濃淡モフォロジ処理」を用いているのが、本システムの特徴となっている。濃淡モフォロジ処理の簡単な手順は次のとおりである。

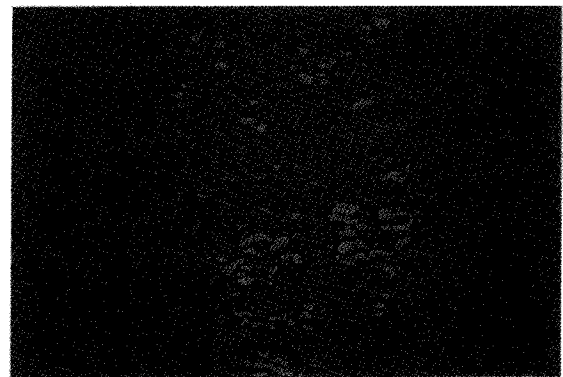
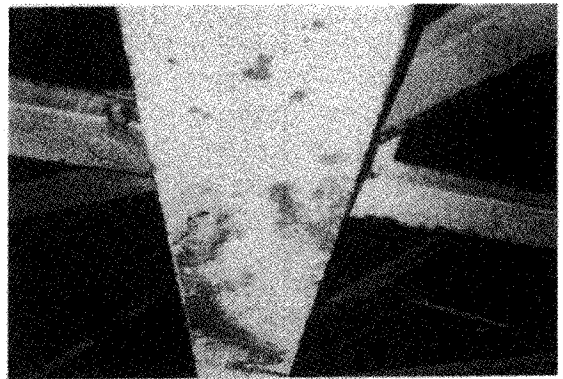


写真-1 橋桁塗膜劣化原画像（上）と画像処理により劣化部を抽出した結果（下）

表-1 調査橋梁名

架設環境	道路名	橋梁名	竣工年	塗装系
田園	東北道	思川橋	昭47	鉛系さび止め+フタル酸系 (昭60年塗り替え)
	中央道	甲府南IC第6ランプ橋	昭47	” + ”
都市 (交通量大)	第三京浜	市境高架橋	昭40	” + ” (昭51年塗り替え)
	横浜横須賀	日野IC第二橋	昭54	” + ”
海岸	東関東道	二俣高架橋	昭56	ジंकリッチプライマー+塩化ゴム系
	西湘バイパス	萬丈橋	昭60	鉛系さび止め+MIO+塩化ゴム系

① 画像中の各点において、その明るさを、その点からある距離範囲（抽出したい変状部のサイズをカバーできる範囲）での最も明るい点の値に置き換える処理（最大値フィルタ処理）を行う。これによって、周囲よりも相対的に暗い変状部も正常な塗膜面の明るさに置き換えられる。但し、この状態では全体的に明るい方向に引きつけられている（図-2(c)）。

② 明るい方向に引きつけられている状態を元に戻すため、逆に画像中の各点の明るさを前記①で指定した距離範囲と同じ範囲で最も暗い値に置き換える処理（最小値フィルタ処理）を行う。この処理によって全体的な明るさは元に戻るが、変状部の明るさは前記①で正常な塗膜面の明るさに置き換えられているので、結果的には元の状態に対して、ちょうど変状部だけがその周囲の正常部の明るさに置き換えられた画像が得られる（図-2(d)）。

③ 上記②で得られた画像と原画像との差をとる。その結果、正常な塗膜面は相殺され、相対的に暗い領域に部分のみが抽出される（図-2(e)）。

この差画像から、一定レベルよりも変化の大きい部分を取り出すことによって変状部が安定的に抽出できる。

原画像とそれについて濃淡モフォロジー処理で変状部の抽出を行った結果を写真-1に示す。

### 3. 実橋の塗膜調査

#### (1) 調査対象橋梁の選択

橋梁塗膜の劣化形態は、橋梁の架設環境によって異なることが既に明らかにされているが<sup>2)</sup>、これらの変化を確認することも兼ねて、代表的な環境として田園地域、交通量の多い都市地域、海岸地域を指定し、この中から当年度に塗り替えが予定されている橋梁を表-1のように各環境毎に2橋選定した。

#### (2) 調査項目及び方法

##### a) サンプルの抽出

調査対象橋梁の塗膜は、前記(1)で述べたように、既に塗り替えが予定されている塗膜であるから、いずれの橋梁塗膜とも、総体的にそれなりの劣化度を示している。しかし、部分的には、大小様々の劣化状態が散在している状況なので、本調査ではその中から、さびを対象とし、次に示す4グレードの部分抽出してサンプルとした。

① ごく軽微な部分…1~2mmφ程度の点さびが100×100mmの中に1~2個存在している箇所。

② さびが中程度に発生している部分…前記①の中に数点の点さびが存在している箇所。

③ かなりの点さびが発生している部分…前記②以上の発錆がある箇所。

④ さび膨れが発生している部分…さび膨れが前記②以上に発生している箇所。

サンプルは、一橋当たり10箇所とし、①~④のグレードのものが2個以上の複数になるように抽出した。

##### b) 調査項目と測定方法

各橋梁毎に抽出したサンプル箇所について、次の3項目を表-2に示した測定手順に従って測定した。

① 塗膜劣化度の数量化測定：塗膜の劣化状態を撮像し、画像処理装置にて数量化測定を行う。

② 塗膜下腐食の数量化測定：前記①の撮像部塗膜を剝離し、塗膜下腐食の状況を撮影して画像処理装置にて数量化測定を行う。

③ 塗膜下腐食度（深さ）の測定：前記②の剝離部にシリコン樹脂系型剤を流し込んで、腐食状況の凸部を作製し、これに石膏を流し込んで腐食部の状態を複製する。この複製の腐食断面部を光学顕微鏡（50倍）で測定し、塗膜下腐食度として腐食深さを測定した。

表-2 実橋における塗膜劣化及び塗膜下腐食の測定方法

測定項目	内 容
① 発錆部分の写真撮影	スケールを入れて実寸法の大きさになるように撮影する。
② 塗膜剝離	溶剤型剝離剤を対象部分に塗り付け、浮き上がった塗膜をスクレパーとワイヤーブラシで除去。この操作を素地が露出するまで繰り返す。
③ 塗膜剝離後の写真撮影	塗膜下腐食の状態を実寸法の大きさになるように撮影する。
④ 腐食面のレプリカ作製	シリコン樹脂系型剤を用いて素地面の凸型を作製。（現地作業はここ迄）
⑤ 石膏による凹型作製	凸型に石膏を流し込んで実橋の腐食部と同じものを複製。
⑥ 腐食深さの測定	石膏の平均腐食部を切断し、その断面を光学顕微鏡にて撮影し、その写真から粗さの測定要領に準じて、腐食深さの測定を行う。
⑦ 腐食面積率の測定	複製した石膏の腐食面を画像処理測定装置にて測定。
⑧ 塗膜表面の劣化率測定	上記①で撮影した写真を画像処理測定装置にて測定。

橋梁名：東北道・思川橋	画像番号：001	部材名：鉋桁の腹板
明部閾値：設定	濃淡しきい値：	フィルタサイズ：
暗部閾値：設定	濃淡しきい値：4	フィルタサイズ：0
閾値算出法：回帰直線使用	平均：1.9000	分散：15.81000
倍率：1.000	距離補正：0.022051 (cm/画素)	
対象面積：53.103470 (cm <sup>2</sup> )	画像評価値：B	
劣化部個数：115	劣化部面積率：0.73894 %	

粒径分布 (mm)	0.05以下	0.05~1.0	1.0~3.0	3.0~5.0	5.0~10	10以上
粒径別評価	A	B	B	A	A	A
粒径別面積率 (%)	0.00000	0.34429	0.39465	0.00000	0.00000	0.00000

備考：塗膜を剥がす前の劣化状態

図-3 画像処理測定システムによるアウトプットの例

#### 4. 測定結果

##### (1) 塗膜表面と塗膜下のさび発生個数と面積率

表-2に示した測定手順に従って撮影した塗膜表面のさび発生状態（以下「顕在劣化」という）と、その部分の塗膜を剝離して撮影した鋼表面の発錆状態（以下「潜在劣化」という）について前記2節で述べた画像処理装置を用いて測定した。

この装置でアウトプットされる様式は、図-3の思川橋の例のとおりである。この測定結果の中から、さびの個数（劣化部個数）と、このさびが占める面積率（劣化部面積率%）を各橋梁毎にまとめて示したのが表-3(1)~(3)である。

この測定結果の中に“画像評価値”（表-3では

評価）とあるのは、画像処理装置の中に組み込まれている塗膜劣化の評価基準と照合して得られた評価値であって、その内容は表-4のとおりである。

この評価基準の特徴は、一般に使用されている評価値が、さびの占有面積率で表されているのに対し、表-4の内容は、さび粒子の大きさに重み付けした面積率になっている点である。

このような内容にした理由は、塗膜表面に発生しているさび粒子の大きさとその塗膜下で生じている鋼材の腐食度との間には、強度の相関性がある塗膜表面のさび粒子の大きさが大きくなればなる程、塗膜下の腐食度は大きくなることの実橋調査の結果明らかとなり、さびの粒径が約5mm以下の状態で塗り替えを行えば、鋼材の腐食度は最小限に抑制する

表-3(1) 各橋梁の塗膜劣化及び塗膜下腐食の画像処理結果(1)

橋梁名	試験 記号	劣化 個数	劣化面 積(%)	さびの粒径分布 (%)						評価	
				0.05mm<	~1.0mm	~3.0mm	~5.0mm	~10mm	10mm<		
思 川 橋	1	前	115	0.739	0	0.344	0.395	0	0	0	B
		後	571	1.888	0	1.761	0.117	0	0	0	B
	2	前	414	1.092	0	0.628	0.464	0	0	0	B
		後	628	2.218	0	2.049	0.170	0	0	0	B
	3	前	762	5.888	0	2.938	3.494	0	0	0	D
		後	841	3.657	0	2.991	0.666	0	0	0	B
	4	前	319	0.559	0	0.467	0.092	0	0	0	B
		後	401	1.079	0	1.079	0	0	0	0	B
	5	前	468	1.076	0	0.921	0.155	0	0	0	B
		後	629	2.222	0	1.978	0.244	0	0	0	B
	6	前	12	0.254	0	0.022	0.232	0	0	0	B
		後	357	0.895	0	0.895	0	0	0	0	B
	7	前	44	0.570	0	0.132	0.137	0.300	0	0	C
		後	478	2.094	0	1.433	0.195	0.466	0	0	C
	8	前	29	0.357	0	0.053	0.304	0	0	0	B
		後	227	0.746	0	0.679	0.067	0	0	0	B
	9	前	22	0.353	0	0.036	0.077	0.240	0	0	C
		後	186	0.519	0	0.494	0.024	0	0	0	B
	10	前	19	0.195	0	0.047	0.148	0	0	0	B
		後	239	0.821	0	0.700	0.121	0	0	0	B
甲 府 南 IC 第 6 ラ ン プ 橋	1	前	69	0.314	0	0.142	0.172	0	0	0	B
		後	45	0.223	0	0.175	0.052	0	0	0	B
	2	前	16	0.128	0	0.058	0.070	0	0	0	B
		後	115	0.640	0	0.501	0.138	0	0	0	B
	3	前	135	0.674	0	0.321	0.353	0	0	0	B
		後	71	0.350	0	0.265	0.085	0	0	0	B
	4	前	237	1.089	0	0.478	0.432	0.180	0	0	C
		後	115	0.643	0	0.485	0.159	0	0	0	B
	5	前	118	0.523	0	0.278	0.245	0	0	0	B
		後	71	0.352	0	0.267	0.085	0	0	0	B
	6	前	57	0.836	0	0.146	0.040	0	0.649	0	C
		後	51	0.284	0	0.201	0.083	0	0	0	B
	7	前	75	0.869	0	0.195	0.472	0.202	0	0	C
		後	76	0.437	0	0.319	0.118	0	0	0	B
	8	前	96	1.009	0	0.222	0.624	0.163	0	0	C
		後	76	0.437	0	0.319	0.118	0	0	0	B
	9	前	296	6.711	0	1.382	3.259	1.458	0.612	0	D
		後	162	1.231	0	0.721	0.288	0.223	0	0	C
	10	前	546	8.883	0	1.837	3.767	1.575	1.705	0	D
		後	59	0.334	0	0.247	0.087	0	0	0	B

(注) 試験記号の「前」は顕在劣化、「後」は塗膜剝離後の潜在劣化率を示す。

表-3(2) 各橋梁の塗膜劣化及び塗膜下腐食の画像処理結果(2)

橋梁名	試験 記号	劣化 個数	劣化面 積(%)	さびの粒径分布 (%)						評価	
				0.05mm<	~1.0mm	~3.0mm	~5.0mm	~10mm	10mm<		
市境 高架橋	1	前	36	0.557	0	0.121	0.264	0.172	0	0	C
		後	289	1.260	0	1.064	0.196	0	0	0	B
	2	前	48	1.934	0	0.131	0.629	0.599	0.575	0	C
		後	347	1.681	0	1.412	0.268	0	0	0	B
	3	前	69	2.069	0	0.216	0.669	0.491	0.693	0	C
		後	402	2.114	0	1.604	0.510	0	0	0	B
	4	前	59	2.221	0	0.169	1.372	0.680	0	0	C
		後	400	2.115	0	1.576	0.540	0	0	0	B
	5	前	72	4.789	0	0.249	0.686	0.791	3.063	0	E
		後	400	2.120	0	1.605	0.515	0	0	0	B
	6	前	25	2.164	0	0.094	0.128	0.562	1.379	0	D
		後	288	1.250	0	1.084	0.166	0	0	0	B
	7	前	19	1.143	0	0.074	0	0	1.069	0	D
		後	288	1.248	0	1.082	0.166	0	0	0	B
	8	前	24	1.436	0	0.091	0	0.792	0.553	0	C
		後	401	2.124	0	1.555	0.569	0	0	0	B
	9	前	42	2.758	0	0.170	0.142	0	0	2.446	D
		後	288	1.260	0	1.061	0.199	0	0	0	B
10	前	13	1.503	0	0.036	0	0	1.467	0	D	
	後	192	0.742	0	0.621	0.122	0	0	0	B	
日野 高架橋	1	前	12	0.466	0	0.051	0.153	0.263	0	0	C
		後	31	0.104	0	0.103	0	0	0	0	B
	2	前	78	1.352	0	0.411	0.414	0.527	0	0	C
		後	152	1.141	0	0.589	0.136	0.417	0	0	C
	3	前	376	15.07	0	1.659	3.146	0.609	0.553	9.107	E
		後	32	0.102	0	0.102	0	0	0	0	B
	4	前	258	3.354	0	1.246	2.108	0	0	0	C
		後	204	1.647	0	0.672	0.337	0	0.638	0	C
	5	前	600	8.934	0	2.747	4.374	0.196	1.617	0	D
		後	338	4.754	0	1.434	0.865	0	0	2.454	D
	6	前	421	14.87	0	1.656	3.913	1.366	1.719	6.212	E
		後	205	1.646	0	0.671	0.337	0	0.638	0	C
	7	前	252	1.365	0	1.023	0.342	0	0	0	B
		後	145	0.982	0	0.517	0.197	0.267	0	0	C
	8	前	300	3.007	0	1.163	0.897	0	0.947	0	C
		後	113	0.759	0	0.417	0.343	0	0	0	B
	9	前	577	3.361	0	2.228	1.133	0	0	0	C
		後	507	19.78	0	1.820	1.299	0.247	0	16.411	E
	10	前	987	9.443	0	3.949	4.483	1.012	0	0	D
		後	233	1.313	0	0.888	0.425	0	0	0	B

(注) 試験記号の「前」は顕在劣化, 「後」は塗膜剝離後の潜在劣化率を示す。

表-3(3) 各橋梁の塗膜劣化及び塗膜下腐食の画像処理結果(3)

橋梁名	試験 記号	劣化 個数	劣化面 積(%)	さびの粒径分布 (%)						評価	
				0.05mm<	~1.0mm	~3.0mm	~5.0mm	~10mm	10mm<		
二俣 高架橋	1	前	7	0.110	0	0.032	0.078	0	0	0	B
		後	120	0.401	0	0.355	0.046	0	0	0	B
	2	前	32	0.483	0	0.136	0.346	0	0	0	B
		後	308	1.517	0	1.037	0.243	0.236	0	0	C
	3	前	31	0.771	0	0.155	0.322	0	0	0	B
		後	255	1.195	0	0.762	0.433	0	0	0	B
	4	前	38	1.040	0	0.144	0.403	0.493	0	0	C
		後	377	1.995	0	1.328	0.394	0.273	0	0	C
	5	前	51	0.747	0	0.289	0.240	0.219	0	0	C
		後	255	1.967	0	0.763	0.433	0	0	0	B
	6	前	11	0.535	0	0.020	0.514	0	0	0	B
		後	289	1.238	0	1.077	0.162	0	0	0	B
	7	前	97	2.917	0	0.365	0.870	1.112	0.570	0	C
		後	400	2.117	0	1.605	0.512	0	0	0	B
	8	前	187	6.414	0	0.724	2.602	1.006	2.001	0	D
		後	808	8.080	0	3.596	2.886	1.598	0	0	C
	9	前	412	6.936	0	1.666	3.329	1.246	0.695	0	D
		後	863	14.11	0	3.800	3.132	0.494	6.686	0	E
	10	前	239	8.292	0	1.081	2.346	1.694	3.171	0	E
		後	836	14.37	0	3.880	3.030	0.812	3.362	3.288	E
萬丈橋	1	前	33	0.468	0	0.097	0.033	0	0.338	0	C
		後	720	3.427	0	2.487	0.656	0.248	0	0	C
	2	前	42	0.513	0	0.126	0.195	0.191	0	0	C
		後	496	1.974	0	1.605	0.369	0	0	0	B
	3	前	67	0.812	0	0.146	0.129	0.246	0.290	0	C
		後	533	2.083	0	1.717	0.366	0	0	0	B
	4	前	239	1.986	0	0.648	1.203	0.135	0	0	C
		後	241	1.355	0	1.046	0.309	0	0	0	B
	5	前	35	1.479	0	0.092	0.206	0.381	0.800	0	C
		後	243	1.356	0	1.051	0.305	0	0	0	B
	6	前	285	11.95	0	0.568	3.624	3.252	4.502	0	E
		後	778	7.167	0	2.849	2.377	0.340	1.601	0	D
	7	前	103	1.719	0	0.256	1.056	0.407	0	0	C
		後	783	7.162	0	2.884	2.364	0.337	1.577	0	D
	8	前	696	15.646	0	1.988	6.970	4.148	2.539	0	D
		後	911	13.448	0	3.597	3.933	2.396	3.522	0	E
	9	前	12	2.708	0	0.031	0.147	0	0	2.529	D
		後	243	1.355	0	1.050	0.305	0	0	0	B
	10	前	246	3.286	0	4.292	0.606	0	0	2.251	D
		後	178	0.853	0	0.698	0.155	0	0	0	B

(注) 試験記号の「前」は顕在劣化, 「後」は塗膜剝離後の潜在劣化率を示す。



環境	橋梁名	腐食深さの測定値 (mm)	0.2mm
田園	思川橋	0.002 0.022 0.044 0.040 0.022 0.022 0.022 0.022 0.007 0.013 0.022 0.016 0.044 0.078 0.004 0.000 0.000 0.000 0.011 0.053 0.046	最高:0.078 最低:0.000 平均:0.026 $\sigma^*$ :0.019
都市	市境高架橋	0.000 0.000 0.047 0.067 0.046 0.113 0.111 0.111 0.156 0.133 0.144 0.189 0.218 0.167 0.111 0.111 0.135 0.071 0.022 0.000 0.000 0.007 0.011	最高:0.218 最低:0.000 平均:0.104 $\sigma^*$ :0.058
海岸	萬丈橋	0.022 0.044 0.111 0.189 0.233 0.311 0.311 0.333 0.333 0.318 0.267 0.233 0.222 0.200 0.178 0.200 0.156 0.109 0.071 0.044 0.044 0.022 0.000	最高:0.333 最低:0.000 平均:0.180 $\sigma^*$ :0.105

(注)  $\sigma^*$  : 標準偏差

図-4 塗膜下腐食深さの測定結果 (各環境別代表例)

ことが出来るという考え方に立脚したものである。

(2)塗膜下腐食度の測定

ここでいう塗膜下腐食度とは、顕在劣化部の塗膜下で鋼材側に生じている腐食深さを指したものであり、この腐食深さの測定は、各橋梁からサンプリングしてきたレプリカ (1橋当り10個×6橋=60個) から、各サンプルの代表的な腐食箇所の断面を50倍の光学顕微鏡で撮影し、その映像から腐食深さを0.12mm間隔で、23点を図-4のように求め、この結果から最高、最低、平均腐食深さ及び標準偏差を求めた。その結果を一覧表として表-5に示した。

この結果のみから、各サンプルの腐食形態を論じることが難しいが、各サンプルの腐食断面を橋梁別に全試料について比較してみると、図-4に示したように、環境によってほぼ共通性のある腐食形態を示していることが分かった。すなわち、田園地域では浅い腐食が点々と存在しているのに対し、交通量の多い都市地域では、やや深い腐食群が連続的に繋がっており、海岸地域ではすり鉢状の深い孔食を示しているのが特徴となっている。

表-5の総平均のうち、最高値と平均値について、各橋梁ごとに示すと図-5の様になり、平均的な塗膜下腐食の傾向は、交通量の多い都市地域が最も大きくなっているのが注目され、次いで海岸地域、田園地域の順になっていて、前述した腐食形態との関連性がうかがえる。

表-4 さびの粒径と発生面積率による塗膜評価基準

さびの粒径 mm	さびの粒径					
	e	d	c	b	a	a
発錆 面積率 %	10 以上	10 ~5	5 ~3	3 ~1	1~ 0.05	0.05 以下
10以上 l	E	E	E	E	D	C
3~10 未満 m	E	E	D	D	C	C
1~3 未満 n	D	D	C	C	B	B
0.1~1 未満 o	D	C	C	B	B	B
0.1以下 p	D	C	B	B	B	A

(注) 表中の評価グレードは次のとおり  
 A : 良好な塗膜, B : やや良好な塗膜, C : 要観察,  
 D : 塗り替えを前提とした観察を続ける, E : 塗り替えを必要とする

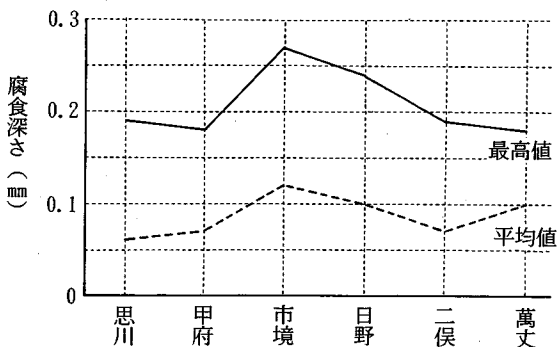


図-5 各橋梁の塗膜下腐食深さ総平均

表-5 塗膜下腐食測定結果

測定項目	環境 橋梁名	田園地域		都市部		海岸地域	
		思川橋	甲府南 注1)	市境高架橋	日野IC 注2)	二俣高架橋	萬丈橋
1	最高値 (mm)	0.078	0.089	0.218	0.251	0.178	0.160
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022
	平均値 (mm)	0.026	0.054	0.104	0.110	0.058	0.071
	標準偏差	0.019	0.027	0.058	0.050	0.047	0.045
2	最高値 (mm)	0.133	0.178	0.140	0.178	0.200	0.144
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000
	平均値 (mm)	0.042	0.062	0.059	0.088	0.077	0.115
	標準偏差	0.039	0.057	0.043	0.049	0.063	0.181
3	最高値 (mm)	0.156	0.289	0.356	0.211	0.133	0.133
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011
	平均値 (mm)	0.041	0.076	0.120	0.082	0.052	0.065
	標準偏差	0.041	0.080	0.114	0.073	0.043	0.035
4	最高値 (mm)	0.356	0.133	0.233	0.267	0.338	0.264
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000
	平均値 (mm)	0.112	0.054	0.130	0.072	0.177	0.146
	標準偏差	0.106	0.042	0.072	0.071	0.114	0.087
5	最高値 (mm)	0.156	0.133	0.467	0.156	0.178	0.100
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.004
	平均値 (mm)	0.132	0.047	0.167	0.081	0.079	0.047
	標準偏差	0.160	0.038	0.167	0.049	0.053	0.035
6	最高値 (mm)	0.133	0.091	0.356	0.467	0.224	0.333
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
	平均値 (mm)	0.043	0.037	0.112	0.153	0.108	0.180
	標準偏差	0.041	0.027	0.098	0.168	0.072	0.105
7	最高値 (mm)	0.062	0.144	0.111	0.267	0.100	0.133
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	平均値 (mm)	0.021	0.041	0.064	0.065	0.037	0.083
	標準偏差	0.014	0.036	0.033	0.077	0.024	0.036
8	最高値 (mm)	0.467	0.078	0.356	0.197	0.294	0.189
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	平均値 (mm)	0.116	0.029	0.250	0.059	0.059	0.082
	標準偏差	0.156	0.017	0.093	0.542	0.075	0.064
9	最高値 (mm)	0.111	0.200	0.200	0.189	0.204	0.200
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	平均値 (mm)	0.029	0.110	0.062	0.111	0.047	0.093
	標準偏差	0.026	0.069	0.062	0.140	0.060	0.062
10	最高値 (mm)	0.289	0.556	0.244	0.256	0.131	0.156
	最低値 (mm)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	平均値 (mm)	0.059	0.193	0.099	0.134	0.033	0.069
	標準偏差	0.086	0.212	0.076	0.094	0.038	0.047
総平均	最高値 (mm)	0.1941	0.1891	0.2681	0.2439	0.1935	0.1812
	最低値 (mm)	0.0000	0.0000	0.0011	0.0011	0.0017	0.0037
	平均値 (mm)	0.0621	0.0703	0.1167	0.0955	0.0727	0.0951

注 1) 甲府南→甲府南IC第6ランプ橋の略 注 2) 日野IC→日野IC第二橋の略

## 5. 考察

### (1) 顕在劣化と潜在劣化との関係について

塗膜表面に発生しているさびを「顕在劣化」といい、その塗膜下で鋼材が腐食（さび）している状態を「潜在劣化」といい、以下に考察をのべる。

表-3に示した画像処理測定結果から、顕在劣化と潜在劣化のサンプル平均を示すと図-6のように

なる。

この結果から、甲府南IC第6ランプ橋と日野IC第二橋を除く他の橋梁は、いずれも潜在劣化個数の方が多くなっていることがわかる。このことは、架設後約10年以上を経過している塗膜は、塗膜表面に見られる欠陥（さび）だけではなく、塗膜下にも多くの欠陥が存在していることを示唆しているといえる。しかし、さびの占有面積率で比較すると、さびの個

数ほどの差はなく、図-7の平均値で見ると、むしろ、顕在劣化率の方が大きくなっているか、又は同等の面積率となっている。

すなわち、潜在劣化率として存在しているさびの個数は、塗膜表面に見られる顕在劣化率のさびの粒径より小さいことを意味しており、塗膜下には、このような小さいさびが存在していて、条件さえ整えばこれらのさびが一斉に塗膜表面に現れることになるため、塗り替え時の塗膜劣化度診断には、このような潜在劣化（塗膜下腐食）の観察を注意深く行うことの必要性を示唆しているものといえる。

潜在劣化が顕著に見られたのは、交通量の多い市場高架橋と海岸地域の2橋であるが、腐食環境の厳しい地域にこのような傾向が見られたということは、これらの地域の塗膜管理の重要性が強調される所以でもあるといえよう。

## (2) 顕在劣化と潜在劣化との相関性の検討

顕在劣化と潜在劣化との関係を、表-3の実測値をもとに単純回帰分析<sup>16), 17)</sup>を用い、両者の相関関係について検討を行った。

まず単純回帰のモデルとして(1)式を仮定し、 $\alpha$ 、 $\beta$ のパラメータを最小2乗法により求めた。

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + u_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$H_0: \beta = 0, \quad H_1: \beta > 0$$

$\alpha$ 、 $\beta$ の最小2乗推定値をそれぞれ $a$ 、 $b$ とする。

ここで $Y$ は、塗膜下腐食の潜在劣化（さびの個数又は面積率%）を示し、 $X$ は塗膜表面の顕在劣化（さびの個数又は面積率%）を示すものとする。

(1)式は、 $Y$ に決定的な影響を与える要因は $X$ のみであることを示しており、 $X$ 以外に $Y$ に与える要因は多数あるが、それはどれもシステマテックに $Y$ に影響を与えず、偶然変動（誤差項）するものと見なし、一括して $u$ で処理することにする。

$a$ 、 $b$ のパラメータは、次のようにして求めた。

$$S^2_x = \Sigma(X_i - \bar{X})^2 = \Sigma X^2 - n\bar{X}^2 \quad (2)$$

$$S^2_y = \Sigma(Y_i - \bar{Y})^2 = \Sigma Y^2 - n\bar{Y}^2 \quad (3)$$

$$S_{XY} = \Sigma(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = \Sigma XY - n\bar{X}\bar{Y} \quad (4)$$

$$\therefore b = S_{XY} / S^2_x, \quad a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (5)$$

以上から推定回帰線は、

$$\hat{Y}_i = a + b X_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

となる。

また、このパラメータの説明力の尺度として、決定係数 $R^2$ を求めた。

$$R^2 = S^2_{\hat{Y}} / S^2_Y \quad \therefore \text{相関係数 } r = \sqrt{R^2}$$

すなわち、 $R^2 = 1$ のときは $S^2_{\hat{Y}} = S^2_Y$ あるから、 $\Sigma e^2_i = 0$ となる。

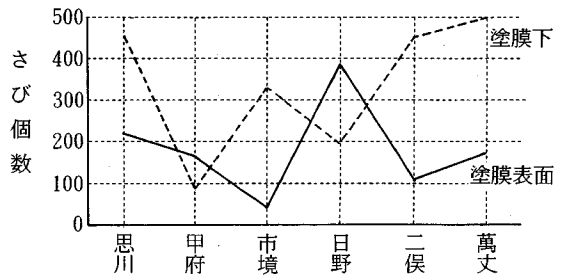


図-6 各橋梁のさび発生個数の平均

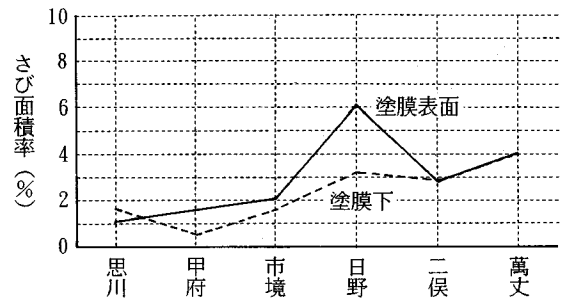


図-7 各橋梁の平均さび発生面積率

$$\Sigma e^2_i = e^2_1 + e^2_2 \dots e^2_n = 0$$

である。

すべて $e_i$ が0のとき、すなわち $e_1 = e_2 = \dots = e_n = 0$ のときに限られる。

従って、 $Y_i = \hat{Y}_i + e_i$ の関係から $\hat{Y}_1 = Y_1$ 、 $\hat{Y}_2 = Y_2$ 、 $\dots$ 、 $\hat{Y}_n = Y_n$ となる。

これは、単純回帰モデルで $Y$ の変動が完全に説明できることを意味する。逆に $R^2 = 0$ のときは、 $X$ は $Y$ の系統的要因ではないことを意味することになる。すなわち、 $R^2$ 又は $r$ の大小は、回帰モデルの説明力の尺度になることになる。

以上の手順にしたがって、表-3の実測値から顕在劣化と潜在劣化との単純回帰とその相関性について電算機を用いて計算した結果、表-6のような結果が得られた。

この結果からも分かるように、回帰分析には次の3項目について検討を試みた。

- ① 顕在劣化個数と潜在劣化個数との関係について。
- ② 顕在劣化個数と潜在劣化面積率との関係について。
- ③ 顕在劣化面積率と潜在劣化面積率との関係について。

すなわち、塗膜下腐食を予測するには、さびの個

表-6 顕在劣化と潜在劣化の単回帰分析結果

統計値 環境橋梁名		顕在劣化個数と潜在劣化個数			顕在劣化個数と潜在劣化面積率			顕在劣化面積率と潜在劣化面積率		
		回帰式	決定係数 R <sup>2</sup>	相関係数 r	回帰式	決定係数 R <sup>2</sup>	相関係数 r	回帰式	決定係数 R <sup>2</sup>	相関係数 r
田園	思川橋	Y=300.7 +0.704 X	0.735	0.857 ※	Y=0.921 +0.003 X	0.697	0.834 ※	Y=1.087 +0.475 X	0.690	0.831 ※
	甲府南IC橋	Y=78.37 +0.035 X	0.023	0.153	Y=0.425 +0.0004 X	0.047	0.218	Y=0.414 +0.038 X	0.155	0.394
都市	市境高架橋	Y=224.2 +2.513 X	0.503	0.709 ※	Y=0.868 +0.018 X	0.543	0.737 ※	Y=0.206 +0.187 X	0.180	0.425
	日野IC橋	Y=87.77 +0.280 X	0.308	0.555 ※	Y=0.632 +0.007 X	0.101	0.319	Y=4.09 -0.14 X	-0.017	-0.13
海岸	二俣高架橋	Y=240.6 +1.905 X	0.821	0.906 ※※	Y=0.399 +0.039 X	0.880	0.938 ※※	Y=0.022 +1.656 X	0.916	0.957 ※※
	萬丈橋	Y=410.6 +0.580 X	0.195	0.442	Y=1.334 +0.015 X	0.619	0.787 ※	Y=1.422 +0.640 X	0.694	0.833 ※

(注) 相関係数 r 値に無印のものは相関性なし、0.5 以上を相関性ありとして※印を付した。0.9 以上は強度に相関性ありとして※※印を付した。潜在劣化面積率と顕在劣化面積率はともに%で示す。

数をパラメータとした方がよいか、又は、さびの面積占有率をパラメータとした方がよいかを検討したものである。

表-6の結果から、①のさびの個数の関係については、甲府南IC第6ランプ橋と萬丈橋を除いた他の橋梁については、いずれも塗膜の上と下との間に相関性が見られ、思川橋と二俣高架橋の場合には相関係数が約 0.9とかなり説明力のある結果が得られた。

このことは、顕在劣化個数の数が多ければ多いほど塗膜下の劣化個数も多くなるということであるが、Xの係数が橋梁によってかなり違いがあることから、塗膜下の潜在劣化個数はそれぞれの橋梁の塗装履歴及び設置環境の影響を受けているものと推測される。

②の顕在劣化個数とその膜下の潜在劣化面積率との関係においては、甲府南IC第6ランプ橋と日野IC橋を除いてはいずれも相関性が見られる。そこでこの回帰式を用いて、塗り替え時期の是非について一径間の部材に1000個のさびが観察されたと仮定して試算してみると、潜在劣化面積率は約3~20%となり、JHが塗り替えの目安としている3%以上の劣化率に該当し、塗り替え判定の手引きとなることが分かった。

③の顕在劣化面積率と潜在劣化面積率との関係については、両者の相関関係が判然と見られるものと見られないものとに大別され、環境によって劣化形態の違いがあっても一律には論じ難いことを示している。しかし、相関係数の大きい思川橋、二俣高架橋、萬丈橋の場合は、顕在劣化面積率の約0.5倍から1.6倍が塗膜下腐食に相当することを示していて、塗り

替え時期を判断する尺度として、塗膜下腐食の程度を考慮に入れることの必要性を示唆しているものと考えられる。

以上の結果から、単回帰式にて塗膜下腐食を推定する場合は、塗膜表面に見られるさびの個数又はその面積率のいずれをパラメータとして用いてもよいが、環境条件を一律とした場合は、さびの個数を以て潜在劣化面積率を推定した方が実状に即した結果が得られるものと考えられる。しかし、海岸地域のような厳しい腐食環境においては、顕在劣化面積率を以て塗膜下腐食を推定した方が現実的であることなどを実証することができたと考えている。

### (3)塗膜下腐食度(腐食深さ)について

本研究の特徴の一つとして、塗膜下の腐食度(腐食深さ)を測定し、その腐食度と塗膜表面のさび粒子の大きさとの関係について検討した点が挙げられる。

このような測定を実施した理由は、前述したように、画像処理装置に組み込まれている塗膜劣化の評価基準が、さびの粒径に重み付けを行っているため、この裏には、さびの粒径が大きくなればなるほど、その塗膜下の腐食度は大きくなるという考え方があからである。この考え方の妥当性を裏付けるため、4(2)節で得られた腐食深さの実測値と、4(1)節で得られた画像処理による各粒径別面積率の測定結果との関連性について、重回帰分析により解析を試みた。

この解析では、塗膜下腐食度Yを説明するXの説明要因が、さびの粒径であるため、実測された粒径

表-7 塗膜下腐食（腐食深さ）と塗膜表面のさび粒径別面積率との重回帰分析結果

環境・橋梁名	重回帰式	R <sup>2</sup>	相関係数(R)
田 思川橋	$Y = 0.0672 + 0.046X_1 - 0.047X_2 - 0.152X_3$	0.53 ※	0.73 ※
園 甲府南IC橋	$Y = 0.025 + 0.082X_1 + 0.044X_2 - 0.122X_3 + 0.022X_4$	0.90 ※※	0.95 ※
都 市境高架橋	$Y = 0.072 + 0.11X_1 - 0.073X_2 + 0.157X_3 - 0.007X_4 - 0.008X_5$	0.61 ※	0.79 ※
市 日野IC橋	$Y = 0.071 + 0.009X_1 - 0.007X_2 + 0.065X_3 + 0.001X_4 - 0.002X_5$	0.72 ※	0.85 ※※
海 二俣高架橋	$Y = 0.087 - 0.009X_1 - 0.009X_2 + 0.017X_3 - 0.01X_4$	0.15	0.39
岸 萬丈橋	$Y = 0.077 - 0.013X_1 + 0.064X_2 - 0.14X_3 + 0.07X_4 + 0.003X_5$	0.55 ※	0.74 ※

(注) ※印は相関性あり, ※※印は強度に相関性ありを示す。

のみを選んで、次の5個のパラメータを設定した。

- X1 : 0.05~1.0 mmのさびの粒径面積率 (%)
- X2 : 1.1 ~3.0 mm            "
- X3 : 3.1 ~5.0 mm           "
- X4 : 5.1 ~10 mm            "
- X5 : 10.1mm以上            "

Yを鋼材の腐食深さ (mm) とし、このときの重回帰式モデルを次のように仮定する。

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_5 X_{5i} + u \quad (7)$$

未知のパラメータ  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_5$  の最小2乗推定量を  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_5$  とすると、

$$\begin{aligned} b_0 &= \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 - b_3 \bar{X}_3 - b_4 \bar{X}_4 - b_5 \bar{X}_5 \\ b_1 &= 1 / D (S_5^2 S_{1Y} - S_{1,2} \dots S_{5Y}) \\ b_2 &= 1 / D (S_4^2 S_{2Y} - S_{1,2} \dots S_{4Y}) \\ b_3 &= 1 / D (S_3^2 S_{3Y} - S_{1,2} \dots S_{3Y}) \\ b_4 &= 1 / D (S_2^2 S_{4Y} - S_{1,2} \dots S_{2Y}) \\ b_5 &= 1 / D (S_1^2 S_{5Y} - S_{1,2} \dots S_{1Y}) \end{aligned}$$

となる、ここで

$$S_1^2 = \sum_{i=1}^n (X_{1i} - \bar{X}_1)^2 = \Sigma X_1^2 - n \bar{X}_1^2$$

$$S_2^2 = \sum_{i=1}^n (X_{2i} - \bar{X}_2)^2 = \Sigma X_2^2 - n \bar{X}_2^2$$

⋮

$$S_5^2 = \sum_{i=1}^n (X_{5i} - \bar{X}_5)^2 = \Sigma X_5^2 - n \bar{X}_5^2$$

$$\begin{aligned} S_{1,2,\dots,5} &= \sum_{i=1}^n (X_{1i} - \bar{X}_1)(X_{2i} - \bar{X}_2)(X_{3i} - \bar{X}_3) \\ &\quad (X_{4i} - \bar{X}_4)(X_{5i} - \bar{X}_5) \\ &= \Sigma X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 - n \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 \bar{X}_4 \bar{X}_5 \end{aligned}$$

$$S_{1Y} = \sum_{i=1}^n (X_{1i} - \bar{X}_1)(Y_i - \bar{Y}) = \Sigma X_1 Y - n \bar{X}_1 \bar{Y}$$

$$S_{2Y} = \sum_{i=1}^n (X_{2i} - \bar{X}_2)(Y_i - \bar{Y}) = \Sigma X_2 Y - n \bar{X}_2 \bar{Y}$$

⋮

$$S_{5Y} = \sum_{i=1}^n (X_{5i} - \bar{X}_5)(Y_i - \bar{Y}) = \Sigma X_5 Y - n \bar{X}_5 \bar{Y}$$

$$D = S_1^2 S_2^2 \dots S_5^2 - S_{1,2,\dots,5}^2$$

である。

以上の計算はすべて電算機を用いて行ったが、その結果得られた重回帰式は表-7のとおりである。

この結果から次のようなことが考えられる。

例えば、思川橋の場合は、さびの粒径が大きくなる  $X_2, X_3$  の係数がいずれもマイナスの虚数であることから、この面積率は実質的なさびの面積率というよりは、さび汁汚染による広がり面積率と見做すことができるので棄却し、実質的に塗膜下腐食のYに及ぼすさびは  $X_1$  のさびの粒径が0.05~1.0 mmの極く小さい点さびに限られるということである。

しかも、 $\beta_1$  の係数値が0.046と小さいことから、塗膜表面のさび面積率が10%あったとしても、その部分の腐食度は0.5mm程度とかなり小さいので、このような時期に塗り替えを行えば、鋼材の腐食度が無視し得る程度のときに塗膜を更新できるということになる。このような考え方は  $R^2 = 0.53$  ( $R = 0.73$ ) であるから、やや弱いながらもこの説明は信頼できるということになる。

相関係数が最も高い甲府南IC第6ランプ橋 ( $R = 0.95$ ) の場合は、さびの粒径が0.3~5.0 mmの  $\beta_3$  のみにマイナスの係数が与えられているが、その他の粒径については、小さいながら実数の係数が与えられているので、それぞれの粒径に応じた腐食度が予測されるということを示している。

今回の調査で塗膜劣化が顕著であった都市地域と海岸地域について検討してみると、まず前者の市境高架橋及び日野IC第二橋については、 $R = 0.80$ 以上

あって両者の重回帰式は有意であることが分かる。

しかし、両者とも $\beta_2$ 、 $\beta_3$ の係数がマイナスになっており、市境高架橋では、更に $\beta_4$ もマイナスになっている。マイナスの係数は、前述の思川橋と同様に考えられるので除外することにする。そして $\beta_1$ と $\beta_3$ の係数を両者で比較すると、市境高架橋の方が後者に比して一桁大きい係数になっている。これは、表-5及び図-5の平均値をみても市境高架橋の方が大きいことから、当然の結果であるが、言い換えれば、市境高架橋の方が、さびの粒径に応じて塗膜下腐食（深さ）も大きくなることを示している。

これに対し日野IC第二橋の場合は、表-5の実測値から局部腐食は前者同様に大きい値が測定されているにも関わらず、この分布が小さい（局部的に偏りがある）ため、平均的には小さくなってこの様な結果になったものと思われる。

海岸地域の二俣高架橋と萬丈橋については、前者が、さびの粒径別面積率と塗膜下腐食度（腐食深さ）との重相関性が $R^2 = 0.15$ 、 $R = 0.39$ と小さいのに対し、後者の萬丈橋には弱いながらも重相関性（ $R^2 = 0.55$ 、 $R = 0.74$ ）がみられる。

しかし、萬丈橋の重回帰式では、さびの粒径が0.05~1.0 mmの小さい範囲と、3.1~5.0 mmのやや大きい点さび群の係数がマイナスとなっていて、10mm以上の面積率については、0.003というかなり小さい係数となっていることが注目される。これは、 $i_{11} \sim i_{10}$ の実測値の中で、10mm以上の測定値が2点しかないことによるためであるが、いずれにしても、萬丈橋の場合は、さび粒径が1~3mm間のものが鋼材の腐食度に系統的に関与していることになり、田園地域の思川橋の様に、粒径の小さい点さびが腐食度に影響を及ぼしているのとは異なっていることを示している。

すなわち、塗膜劣化とその塗膜下に生じている鋼材の腐食度との関係は、環境によって差があるので一律に論じることは難しいことを示唆しているものといえよう。

## 6. 結論

本研究は、鋼橋塗膜の塗り替え時期を評価する方法として、従来から行われてきた目視判定によらず、劣化状態を撮影した映像から画像処理システムにより客観的な劣化面積率を求め、予め設定した評価基準に対比して劣化度を評価し、塗り替え時期を判定しようと試みたものである。

この試みに当って、先ず塗膜劣化をどのような尺

度で評価するのが最も妥当であるかを検討することにし、その手順として塗膜表面に存在しているさび粒子群の個数、その大きさ、それらが占める面積率と、その塗膜の下で生じている鋼材の腐食度（ここでは腐食深さ）との関係について、環境のことなる6橋について実測し、そのデータを統計的解析方法により検討を行った。その結果次のような結論が得られた。

- ① 塗膜表面に目視的に見られるさび粒子群の個数と、それが占める面積率は、我々が開発した画像処理システムにより精度よく定量的に測定できることが明らかとなった。
- ② 前記①の測定結果から、各測定項目間の相関関係を、単純回帰分析及び重回帰分析を行って検討した結果、塗膜表面と塗膜下の鋼材腐食度（腐食深さ）の間には、環境によって若干の違いはあるものの、相関性のあることがわかった。相関係数の大きい回帰式を用いて、塗膜表面の劣化個数又はその面積率から塗膜下腐食度を推定することが可能であることから、鋼材の腐食深さが最小限のうちに塗り替え計画を立てれば、合理的な塗り替え時期を選定することができることなどが分かった。
- ③ 画像処理システムに組み込んだ表-4の塗膜劣化評価基準は、さび粒子の大きさとその面積率に重み付した内容のものを立案したが、重回帰分析の結果から、この考え方の妥当性を裏付けることができた。
- ④ 塗膜下腐食を実測したことにより、環境によって腐食形態に違いのあることを実証し、厳しい環境の塗膜下では比較的深い孔食が多く発生しており、田園地域のような穏やかな腐食環境では、粒径が小さく、深さの浅い腐食が塗膜下で多く生じていることなどを明らかにした。
- ⑤ そして、劣化した塗膜の塗り替え時期は、塗膜下腐食が許容される軽度な時期に計画されるべきであることを明らかにし、塗膜下腐食を予測する回帰式を提案したが、この回帰式は、実測例が増えれば増えるほどに信頼性が増加するので、今後とも画像処理システムの測定と共にシステムチックにデータを蓄積する予定にしている。

## 参考文献

- 1) 藤原博, 出川定男, 河野幸弘, 菅野照造: 画像処理技術を応用した鋼橋の塗膜劣化度診断システムに関する研究, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第I部門, I-215, pp.578-579, 1993年9月。
- 2) 三宅将, 藤原博, 赤井隆晃: 鋼橋の塗膜劣化度診断

- システムの開発, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集 第I部門, I-A359, pp.718-719, 1995年9月.
- 3) 例えば, 菅野照造: 塗膜の劣化診断, 電力土木, No. 223, pp.99-111, 1989.
  - 4) 疋田淳, 岡本信吾, 大矢博昭: ESRによるエポキシ樹脂塗膜の光劣化機構の検討, 色材, 57(2), pp.49-55, 1984.
  - 5) ASTM: *Standard Method of Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surface.* D-610-68 (Steel Structures Paint Council. SPCC-Vis-68T).
  - 6) 神谷誠, 藤原博, 三宅将: 鋼橋の塗替え時期判定に関するアンケート調査の集約, (社)日本鋼構造協会第17回鉄構塗装技術討論会発表予稿集, 1994年6月.
  - 7) 吉田豊彦: 塗膜の寿命 [I], 色材, 65(5), pp.308-316, 1992.
  - 8) 吉田豊彦: 塗膜の寿命 [II], 色材, 65(6), pp.364-377, 1992.
  - 9) 吉田豊彦: 塗膜の寿命 [III], 色材, 65(7), pp.435-440, 1992.
  - 10) 片脇清, 守屋進, 他: 鋼橋塗装の新しい診断手法—鋼橋塗装の合理的な維持管理のために—, 土木技術資料, 34-8, pp.66-71, 1992.
  - 11) 片脇清, 守屋進, 他: 塗膜診断に関する共同研究報告書 (II), 1991.
  - 12) 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, No.5, pp.182-186, 1990.
  - 13) 西村昭, 島田喜十郎: 鋼構造物塗膜の長期経年劣化挙動の理論解析, 橋梁と基礎, 15, (5), pp.17-21, 1985.
  - 14) 松本勝, Somkiat Rungthongbaisure, 岡村敬: 鋼橋の腐食劣化に関する研究, 防錆管理, No.7, pp.237-243, 1990.
  - 15) 藤原博: 画像処理による塗膜劣化度診断システムの開発, 防錆管理, No.5, pp.162-168, 1994.
  - 16) 養谷千風彦: 回帰分析のはなし, 東京図書, 1992-4.
  - 17) 小林龍一: 相関・回帰分析法入門, 日科技連, 1983-1.

(1995.8.24 受付)

## STUDY ON CORRELATIVITY FOR PAINT FILM DETERIORATION OF STEEL BRIDGE WITH CORROSION UNDER PAINT FILMS

Hiroshi FUJIWARA and Teruzou SUGANO

As a method to determine the time to re-painting of steel bridges, the relation between the ratio of deterioration area observed on a paint film surface and the corrosion degree (corrosion density) of the steel occurred under its paint film was measured by using the image processing for 6 bridges with the different natural environments.

As a consequence of analyzing these data through a statistical technique, it was found that there was a significant correlation between a ratio of deteriorated area of paint film surface and a deterioration degree under its paint film.

In addition, the corrosion degree under paint film would be presumed from the deterioration degree on the surface of the paint film by the regression formula of our research.