

画像処理による鋼橋塗膜の劣化度 判定法に関する研究

藤原博¹・三宅将²・赤井隆晃³・河野幸弘⁴・出川定男⁵

¹フェロー 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生一丁目4番1号)

²日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生一丁目4番1号)

³工修 石川島播磨重工業(株) メカトロ総合開発センター 制御技術部
(〒135-8732 東京都江東区豊洲三丁目1番15号)

⁴工修 石川島播磨重工業(株) メカトロ総合開発センター 制御技術部
(〒135-8732 東京都江東区豊洲三丁目1番15号)

⁵工修 石川島播磨重工業(株) メカトロ総合開発センター 制御技術部
(〒135-8732 東京都江東区豊洲三丁目1番15号)

一般に、鋼橋塗装の塗り替え時期を判断する塗膜調査は目視観察を主体に行われているが、塗装や塗料に関する知識や経験の有無によって評価に個人差が生じている。本研究は、画像処理技術を利用することにより、塗膜劣化を定量的に評価することが可能と考え、既存の画像処理手法の中から濃淡モフォロジー処理を選び、実橋の塗膜写真13620枚を対象に抽出試験を行い実用性の検討を行った。その結果、塗膜劣化を撮影した写真からさび、塗膜われ、塗膜剥離等の欠陥群の占める劣化面積率及び粒径などの特徴量を算出し、劣化度を定量的に評価できることを実証するとともに、特徴量から求めた塗膜劣化度評価基準を用いて塗膜の塗り替え時期を推定する可能性を示した。

Key Words : steel bridge, painting, paint film deterioration, image processing system, grayscale morphology, maintenance percentage of surface rusted,

1. まえがき

鋼橋の塗膜劣化を定量的に評価する方法として一般に用いられているのは、塗膜劣化度の標準図(例えば、ASTM-D610/SSPC-Vis-2-68T など)¹⁾と対比して劣化率何%又はレーティングナンバ等に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²⁾ことから、最近では、各種の表面変化状態を画像データとして取り出し、画像処理技術を応用して変化量を定量的に評価する試みが行われている。

産業用の画像処理技術は工業製品の自動検査及び選別工程等で既に採用されているが、画像として取り扱うデータが膨大であるため、処理速度や容量等の問題からスーパーコンピュータや専用の画像解析装置を使用していた。しかし、近年の小型汎用コンピュータの高性能化・低価格化に伴い、処理能力の高いパソコンレベルの画像解析装置が一般化しつつ

あり、これに伴って画像処理技術の腐食分野への適用が多くなってきている。

例えば、中田^{3), 4), 5)}、武藤^{6), 7), 8)}らは、ステンレス鋼の耐候性を評価する方法として、さびの幾何学的特徴を画像処理により解析している。

西村^{9), 10)}らは、ステンレス鋼表面のさびを自動的に画像解析する装置を開発している。島¹¹⁾らは画像処理ソフトを開発し、ステンレス鋼さびの定量化を行っている。また、佐藤¹²⁾らはめっき材のさび解析法に、近藤¹³⁾はパイプラインの腐食損傷解析へ、それぞれ画像処理を応用している。さらに、山本^{14), 15)}は屋根建材の損傷評価を航空撮影した映像を用いて3次元的に腐食形態を解析している。

中田、武藤及び西村らの方法は、画像処理の対象となる被写体は小型の試験片に限られ、画像入力には固定式の CCD カメラを用い、照明むらを防いだり色調を一定にするために間接照明を使用し、さらには劣化部を定量化するためのスケールを同時に撮影しなければならない。同様に、島らの方法も、被写

体表面の反射を防ぐために間接照明を用いている。

しかし、屋外の構造物である鋼橋では、固定レンズによる撮影は困難であり、また、塗膜表面自体に日光あるいは撮影時のライトやストロボ等の人工的照明によって照明むらが生じたり、鋼橋の各部材の陰影や塗膜表面の汚れなどが撮り込まれ、これらを防ぐことは困難である。

佐藤の方法は、塩水噴霧試験機などで腐食させた試験片を、適当な照明下でカラービデオカメラで撮影し、モニタを見ながら色調の指定を繰り返し、実際の腐食状況と一致させる。一致したときの画像を2値化処理し、さびの発生面積(%)を求める方法である。しかし、この方法では画像一枚一枚についてモニタを見ながら色調を一致させるため、多くの時間と経験を必要とする。

山本は、フルカラー画像処理によって色彩の違いによる劣化部の抽出を行っているが、これは少なくとも画像内の各色の発色の違いが均一であることを前提としなければ劣化部の抽出は困難である。また、実用面からは、画像処理の対象となる撮像は現場で撮影した画像を使用しなければならないが、撮影時期が異なると色相が変化する色の発色を、現場で一定に管理した状態で撮影することは困難である。

なお、近藤の方法は、超音波検査装置を取り付けた検査ロボットが、パイプライン内部を走行しながら得たデータを、画像処理によって解析するものであり、劣化部の写真やビデオ撮影によって得られた画像を対象とした本研究の場合とでは、画像処理の考え方が異なる。

以上のように、既存の研究はいずれも屋外の塗膜調査に用いるには、撮影方法や画像処理方法が実用的ではないと考えられる。

このような現状を鑑みて、我々は塗膜面の画像情報から塗膜の劣化診断を行う「塗膜劣化度診断システム」^{16), 17)}を開発し報告してきたが、本論文は、画像処理による塗膜劣化の抽出と数量化に必要な劣化部抽出手法の詳細について、主として濃淡モフォロジ処理を中心に検討したので、その内容について報告するものである。

2. 2値化処理と濃淡モフォロジ処理による塗膜劣化部抽出方法の違い

本研究では、鋼橋の実用的な塗膜調査を考慮して、特別な器具や手法を用いずに塗膜劣化度を評価することを前提としているため、汎用的なカメラや家庭

用ビデオの撮像を用いて塗膜劣化度を抽出し評価する検討を行った。

塗膜劣化部を撮影した画像において、正常部と劣化部を区別する場合、すなわち塗膜劣化部を抽出する場合のように、画像から対象物を切り出し、図形と背景を分離するためには、画像処理では通常、次のしきい値処理によって2値化を行う。

- ① p-タイル法によるしきい値選択法
- ② モード法によるしきい値選択法
- ③ 判別分析法によるしきい値選択法
- ④ 微分ヒストグラムによるしきい値選択法
- ⑤ 可変しきい値によるしきい値選択法

一方、本研究で対象とした濃淡モフォロジ処理とは、濃淡画像に対して数理形態学に基づいた集合演算を行うことにより画像処理を行う手法である。従来、画像処理の記述は画素の変換として行われることが多かったのに対して、数理形態学では画像の領域を画素の集合として考え、この集合に対して種々の集合演算を施すことにより画像処理を行う。そのため、鋼橋の塗膜劣化のように、形状や領域を対象とした処理アルゴリズムに向いている。濃淡モフォロジ処理による塗膜劣化部抽出の原理を図-1に示す。

通常、さびや塗膜われなどの塗膜劣化部(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、この様子を模式的に表現すると図-1(a)のようになる。

このような画像から劣化部を抽出するために、一定の明るさで分けする手法(すなわち指定した明るさよりも暗い部分は劣化部、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。劣化部でなくても、指定した明るさ(しきい値)が低いと劣化部と見なされたり、逆に、劣化部であっても、しきい値が高いと劣化部と見なされない場合がある(図-1(b))。

具体的には、まず図-1(a)の入力画像に対して最大値フィルタ処理を行う。最大値フィルタ処理とは、画像中のある点Pの明るさを、その近傍の中でもっとも明るい点の明るさに変換する処理である。この結果、近傍の範囲(フィルタサイズ)より小さくて、近傍と比較して暗い点は、近傍と同様の明るさに変換され劣化部として埋められる(劣化部として認識される)ことになる(図-1(c))。

さらに、図-1(c)の画像に対して最小値フィルタ処理を行う。最小値フィルタ処理とは、最大値フィルタ処理とは逆に、画像中のある点Pの明るさを、その近傍の中でもっとも暗い点の明るさに変換する処理である。この結果、最大値フィルタ処理によ

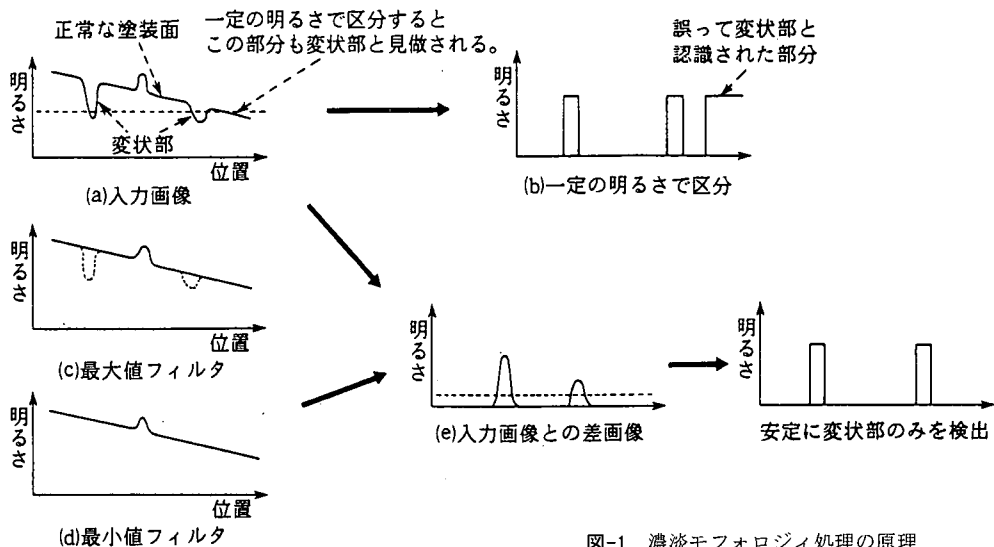


図-1 濃淡モフォロジ処理の原理

て、全体的に明るくなった画像を元の明るさに戻すことができる。しかし、一度最大値フィルタ処理によって劣化部として認められた部分は元に戻らないため、図-1(a)の入力画像の中で、劣化部(近傍と比較して暗い点)だけを抽出した画像が得られる(図-1(d))。

したがって、図-1(a)と(d)の差画像を求めると、照度変化に影響されない劣化部だけの画像となる。

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、これを劣化部として認識する手法が濃淡モフォロジ処理である。

前述の①～④に示したしきい値選択法では、画像全体についてしきい値が一定であるため、部分的に濃度平均値が変化するような画像に対して2値化した結果、対象図形の一部が検出できない場合や背景を一部誤抽出してしまう場合などがあり、有効な結果が得られない。また、前述の⑤に示したしきい値選択法は、しきい値が画像の位置毎に異なっているため、濃度平均値が変化する画像にも対応することが可能であるが、以下のような問題がある。

- ① 局所領域内における濃度むらには対応できない。
- ② 複数の領域に対象がまたがっている場合は、隣接する小領域の接する箇所で、抽出形状が不連続となる。
- ③ 処理が煩雑であるため、処理時間がかかる。

一方、濃淡モフォロジ処理では、濃度平均値が変化する画像にも対応できると同時に、フィルタ処理による周囲との相対的な濃淡差の比較を連続的に

行うために、抽出結果が不連続になることもない。さらに、処理が単純であるために短時間で抽出することが可能である。

以上により、本研究では、濃淡モフォロジ処理を用いて、鋼橋の塗膜劣化部の抽出を試みることにした。実橋の画像(原画像)に対して、濃淡モフォロジ処理と単純2値化処理を用いて塗膜劣化部の抽出を行った例を写真-1に示す。

3. 濃淡モフォロジ処理による塗膜劣化部抽出試験

(1) 評価の対象とする塗膜の劣化現象の選択

塗膜劣化の種類としてさび、塗膜剥離、塗膜われ、白亜化、変色、光沢減少及びプリスタリング等があるが、画像処理によってこれら全ての劣化現象を抽出することは、処理量と処理時間に多くを要し実用的ではない。そこで、画像処理によって抽出した劣化現象が、的確に鋼橋の塗膜劣化度を評価することができるかを既存の文献から検討した。

塗膜の劣化現象は、分子結合の切断に起因して生じるものである^{18)・19)・20)}という化学的視野からの考え方にたって検討すると、光酸化現象によって塗膜上層部の劣化現象は高分子化合物の分解反応から始まるとされている。分解反応が進むと光沢減少、変色、塗膜消耗等が見られるようになるが、塩素、窒素酸化物及び硫黄酸化物等の腐食要因を塗膜内部

へ侵入しやすくするのは、上塗り塗膜に生じる塗膜われである。

腐食要因が侵入できる塗膜われは、目視で見えるようなマクロ的なものではなく、ミクロ的な微細なわれが生じた時点から侵入が可能である。また、最近の測定技術の進歩によって、下塗り塗膜が健全であれば上塗り塗膜にわれが生じていても問題はないという考え方は誤りであることが指摘されており、このことは、理論的考察及び各種の促進試験結果等からも証明されている^{21), 22), 23)}。

塗膜の劣化現象をこのように考えると、塗膜の維持管理に必要な重点的要素としては、さびの発生現象は当然のこととして、塗膜表面のひびわれを含むわれと剥離に注目する必要があると考えられる。そして、上塗り塗膜に、さび、われ、剥離の劣化現象が発生してきた時点で、その塗膜の劣化速度は加速度的に進行するであろうことが推測される。

したがって、本研究の画像処理による塗膜劣化の抽出は、さび、塗膜われ、塗膜剥離を中心に検討を進めた。

(2) サンプル写真による劣化部の抽出試験

本章では、濃淡モフォロジ処理による塗膜劣化部の抽出及び定量化の可能性を調べるために、実橋塗膜を撮影したサンプル写真を用いて抽出試験を行い、その結果を検討した。

a) サンプル写真の選択

抽出試験に用いたサンプル写真は、日本道路公団が1989年から1990年にかけて実施した533橋の塗膜調査報告書に掲載されていた13620枚の写真を、先ず部材別画像に区分けし、更に類似性のある画像を集約し、その中から以下に示す分類A～Dに従って平均的な画像を代表サンプルとして抽出した。その結果44枚の画像に絞り込むことができたので、以下これらをサンプル写真として用いた。

分類A：人間の目で見て、塗膜劣化が鮮明なもの、すなわち比較的容易に画像処理が可能と思われる画像

分類B：汚れと塗膜劣化が混在しており、識別が難しいと考えられる画像。

分類C：各種の部材が混在しており、部材画像のコントラストと塗膜劣化のそれとが識別できるか否か疑問に思われる画像。

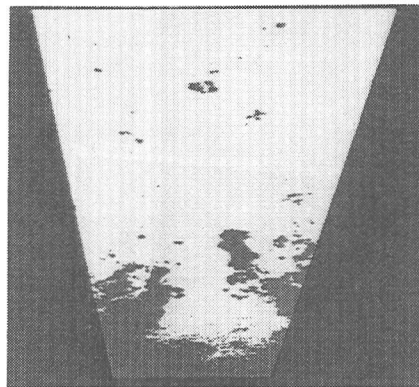
分類D：ハレーションの著しい画像、全体に露出不足で暗い画像、焦点がぼけていて画像自体が判然としない画像。

b) 塗膜劣化部の抽出手順

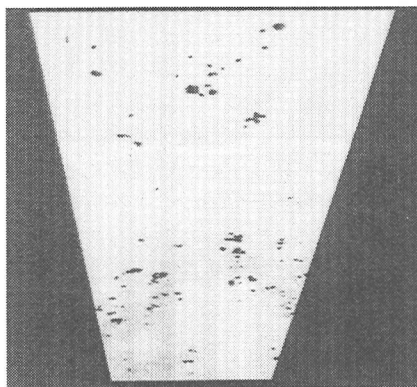
抽出試験の手順は次のとおりである。なお、本試



(a) 原画像



(b) 濃淡モフォロジ処理による抽出例



(c) 単純2値化処理による抽出例

写真-1 実橋の塗膜劣化部抽出例 (下フランジ下面)

表-1(1) 濃淡モフォロジ処理を用いた実橋の塗膜劣化部抽出試験結果

分類	No.	劣化の種類	画像処理結果					
			画像処理の適否	劣化 個数	評価面積① (画素数)	劣化面積② (画素数)	占有面積率 (%) ②/①	
A	1	下フランジ下面及び端部のさび	◎	—	106	1.04448E+05	6.30300E+03	6.0346
	2	ウェブ面全面の発錆 (点さび)	◎	—	281	2.28646E+05	3.51100E+03	1.5356
	3	下フランジ下面の発錆 (点さび)	◎	—	98	1.79588E+05	1.36500E+03	0.7601
	4	垂直補剛材の塗膜剥離とさび	◎	—	55	1.15375E+05	3.67600E+03	3.1861
	5	トラス部材の塗膜剥離	◎	—	79	1.11520E+05	5.43800E+03	4.8763
	6	対傾構の塗膜剥離 (層間剥離)	◎	—	92	5.85800E+04	4.57100E+03	7.8030
	7	ウェブ面の塗膜剥離	◎	—	28	2.06640E+05	5.15700E+03	2.4956
	8	ウェブ面の塗膜割れ	◎	—	859	2.43780E+05	2.61770E+04	10.7380
	9	塗装試験板の塗膜割れ	△	全ての抽出が困難	—	—	—	—
B	1	下フランジ下面に白亜化と点さびが混在	▲	白亜化と点さびの区別が困難	—	—	—	—
	2	同上 (但し、さび量が多い)	▲	同上	—	—	—	—
	3	ウェブ面に白亜化、さび、剥離が混在	△	剥離は抽出可、他の区別は困難	—	—	—	—
	4	下フランジ下面に白亜化、さび、汚れが混在	▲	さびと汚れの識別困難	—	—	—	—
	5	ウェブ面にさび、もらいさび、汚れが混在	▲	さびともらいさびの区別困難	—	—	—	—
	6	同上	◎	—	312	1.25339E+05	1.01630E+03	8.1084
	7	踏み板鋼板の模様と、ウェブ面のさび、塗膜割れ、剥離が混在	◎	—	27	1.32080E+05	2.86000E+02	0.2165
	8	ウェブ面への塗料ミスの付着と各種部材の陰影の混在	◎	—	206	1.50968E+05	9.92300E+03	6.5729
	9	ウェブ面のもらいさび	▲	識別困難	—	—	—	—
	10	下フランジ下面にさびと汚れが混在	○	さび・汚れの区別困難	331	1.73740E+05	1.28570E+04	7.4001
	11	ウェブ面に割れさび・汚れがあり、さらに桁の陰影が混在	◎	—	21	1.52180E+05	9.83000E+02	0.6459
	12	下フランジ下面に白亜化とふくれさびが混在	◎	—	29	1.65648E+05	1.40100E+03	0.8458
C	1	塗膜剥離のあるウェブ面及び下フランジが複数桁混在	◎	—	37	3.84920E+04	8.76300E+03	22.7657
	2	ウェブ面の塗膜剥離と補剛材及び対傾構の陰影が混在	◎	—	15	2.57600E+04	1.87000E+04	72.5932
	3	下フランジ下面のさびと内桁ウェブ面の塗膜剥離が混在	◎	—	121	7.05600E+05	2.81800E+03	3.9938
	4	内桁ウェブ面の塗膜割れと水平・垂直補剛材の陰影が混在	◎	—	4	7.72500E+04	1.41000E+02	0.1825
	5	対傾構取合部のさびとガセットのさび・塗膜剥離が混在	◎	—	46	4.19840E+04	3.50400E+03	8.3460
	6	下フランジ下面のさびと鋼製支承のさびが混在	△	ボルト及びリベット頭部の陰影を抽出	—	—	—	—
	7	横桁及び対傾構取合部のさびが混在	◎	—	90	1.49583E+05	4.02600E+03	2.6915
	8	下フランジ下面及びボルト添接部のさびが混在	◎	—	191	7.32160E+04	2.96600E+03	4.0510
	9	下フランジ下面及び対傾構のさびが混在	◎	—	135	1.21890E+05	4.63700E+03	3.8042
	10	下フランジ下面添接部のさびとボルトの陰影が混在	△	ボルト頭部の影も抽出	—	—	—	—

表-1(2) 濃淡モフォロジ処理を用いた実橋の塗膜劣化部抽出試験結果

分類	No.	劣化の種類	画像処理結果					
			画像処理の適否	劣化個数	評価面積① (画素数)	劣化面積② (画素数)	占有面積率 (%) ②/①	
D	1	外桁ウェブ面に張出し床版の影が映り、ウェブ面のさびに明暗	▲	影部分のさびの抽出が困難	-	-	-	-
	2	画像の焦点が合わず、下フランジ下面の点さびが不明瞭	◎	-	81	1.51852E+05	1.62000E+03	1.0668
	3	暗い画像の汚れと点さびの混在	▲	暗い部分の抽出困難	-	-	-	-
	4	暗い画像のウェブ面の塗膜割れ	▲	暗い部分の抽出困難	-	-	-	-
	5	暗い画像のウェブ面の塗膜割れと膨れ	▲	同上	-	-	-	-
	6	外桁ウェブ面に張出し床版の影が映り、ウェブ面の塗膜割れとさびに明暗	△	小さい変状の抽出困難	-	-	-	-
	7	ハレーション画像の塗膜膨れ	△	同上	-	-	-	-
	8	著しい白亜化の中の塗膜膨れ	△	同上	-	-	-	-
	9	ハレーション画像で奥行きのあるL型鋼の層間剥離	◎	-	78	5.98400E+05	4.04800E+03	6.7647
	10	コントラストが判然としない上フランジ下面の塗膜剥離	▲	濃淡が不明瞭な部分の抽出困難	-	-	-	-
	11	焦点があっていないウェブ面の汚れ	△	暗い部分の抽出困難	-	-	-	-
	12	下フランジ下面の縞模様汚れの中の判然としない点さび	▲	汚れを優先して抽出・点さび抽出困難	-	-	-	-
	13	刷毛目の中の発錆	◎	-	1	1.60457E+05	1.51400E+03	0.9436

注) ◎：画像処理が可能，○：塗膜劣化は抽出できるが種類を区別することは困難
 △：塗膜劣化の一部が抽出できない，▲：撮影方法と画像処理方法ともに要検討

験では、濃淡モフォロジ処理を組み込んだ画像処理システムを用いた。システムの構成を図-2に示す。

- ① 選定したサンプル写真を、簡易型画像入力装置から画像処理装置にデジタル画像として取り込む。
- ② 濃淡モフォロジ処理によって塗膜劣化部の抽出を行う。
- ③ 評価対象となる塗膜が占める面積（評価面積）の画素数と、劣化部全体が占める面積（劣化面積）の画素数とを算出し、劣化面積の評価面積に対する面積占有率（劣化面積率）を求める。

4. 抽出試験結果

44枚のサンプル写真に対して行った抽出試験の結果を、画像の各分類毎にまとめて表-1に示すとともに、次に試験結果を述べる。

- ① 分類Aのように、周囲とのコントラストが比較的鮮明な塗膜劣化は非常に良く識別することができ、劣化面積率を定量化することが可能で

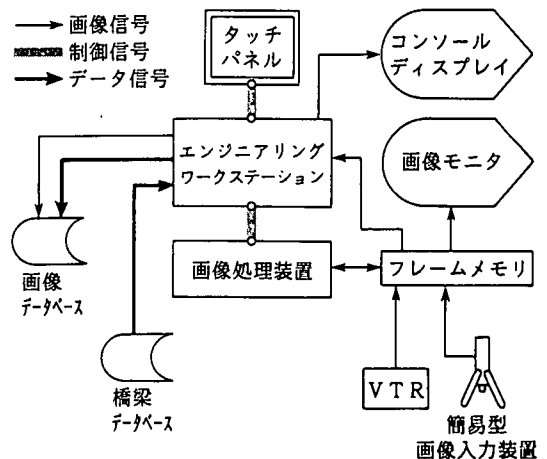


図-2 画像処理システムの構成

あった。

- ② 分類B及びDのように、画像の鮮明度が低下しているような場合には、画像の条件によっては劣化部のみを抽出することが困難であった。特に、焦点のぼけた判然としない画像では、白亜化や汚れのようにコントラストの弱い部分と劣化とが共存している場合には、劣化部を抽出することが困難なことがあり得た。現在これらを考慮した撮影マニュアルを作成し、これに従って、露出・ピントの調整、フラッシュの使用を行い、画像処理に適した画像を撮影することによって対処している。しかし、このような悪条件の画像でも、塗膜われのようにコントラストが判然としている劣化の場合には、周囲との濃淡差が存在するために抽出は可能であった。
- ③ 分類Cのように、各部材が複雑に組み合わされている画像の場合には、目標とする塗膜劣化部が判然と鮮明に映し出されている画像であれば、評価対象外の部材を指定することによって、劣化面積率を定量化することが可能であった。
- ④ 塗膜の変状部はかなり正確に抽出することができるが、さびと塗膜われ及び塗膜剥離の区別はできなかった。

以上の結果から、濃淡モフォロジ処理を適用することによって、特別な場合を除けば、実際に現場で撮影したシェーディングのある画像でも塗膜劣化部分を良好に抽出できることが分かった。また、画像処理による塗膜劣化部の抽出が困難と思われる場合に対しても、画像処理に適した画像を撮影できるように定めた「撮影マニュアル」に従って撮影し、本システムの処理領域設定機能及び濃淡モフォロジ処理を用いることによって、塗膜劣化部を良好に抽出できる。

5. 考察

(1) 撮影角度が塗膜劣化部抽出に及ぼす影響

画像処理では、ひずみの大きい映像では劣化面積率の抽出精度に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、既知面積の矩形に対して撮影角度を90度(矩形に対して正対)から10度に変化させて、劣化面積率の抽出精度に及ぼす撮影角度の検討を行った。なお、撮影レンズの違いによる影響の差も合わせて検討するために35mm、50mm、180mmの3種類のレンズを用いた。撮影角度とひずみ率との関係を図-3に示す。なお、ひずみ率は式(1)によ

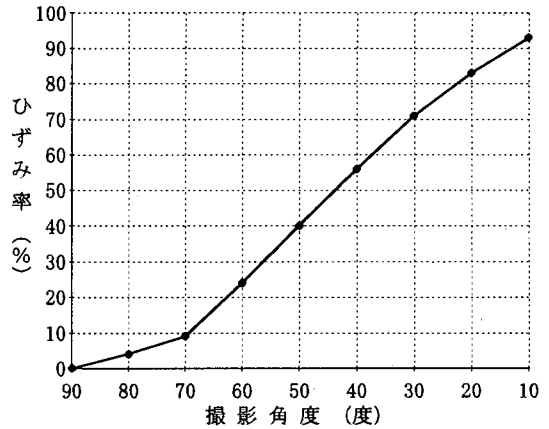


図-3 撮影角度とひずみとの関係

撮影角度 (度)	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ひずみ率 (%)	0	4	9	24	40	56	71	83	93

表-2 塗膜劣化度評価基準²⁴⁾

劣化面積率 %	劣化の粒径 mm	e	d	c	b	a	a
		10以上	10~5	5~3	3~1	1~0.05	0.05以下
1	10以上	E	E	E	E	D	C
m	3~10未満	E	E	D	D	C	C
n	1~3未満	D	D	C	C	B	B
o	0.1~1未満	D	C	C	B	B	B
p	0.1以下	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

って求めた。

$$dx = (1 - Ax/Ao) \times 100 \quad (1)$$

dx: ひずみ率 (%)

Ax: 撮影角度を変化させて撮影した写真から画像処理システムによって求めた面積 (m²)

Ao: 撮影角度90度(正対)の時の面積 (m²)

図-3によると、撮影角度が70度以下になると急激に映像ひずみが大きくなることが判明した。撮影角度70度の場合のひずみ率は9%であり、このことは撮影角度90度(正対)の時の劣化面積率に対して9%過小に評価することを意味する。

これを、別途行った研究²⁴⁾によって求めた評価

基準 (表-2参照. 以下「評価基準」という) に示した劣化面積率に当てはめて考えてみると、撮影角度 70 度ではひずみ率 9% を考慮しても評価の変動はないが、ひずみ率 24% の撮影角度 60 度では評価の変動が生じる。特に、塗り替えの可否に影響を与える劣化面積率 3% 付近では、評価 C あるいは D が B に変更になる場合もあり得た。

以上の結果から、本システムを用いて塗膜劣化部を定量化するための映像は、評価対象となる塗膜に対して左右及び上下 20 度以内の角度で撮影する必要があるとの考察が得られた。なお、レンズフレーム枠内一杯に被写体を撮り込むことによって、レンズ種類の違いによるひずみの影響は見られなかった。

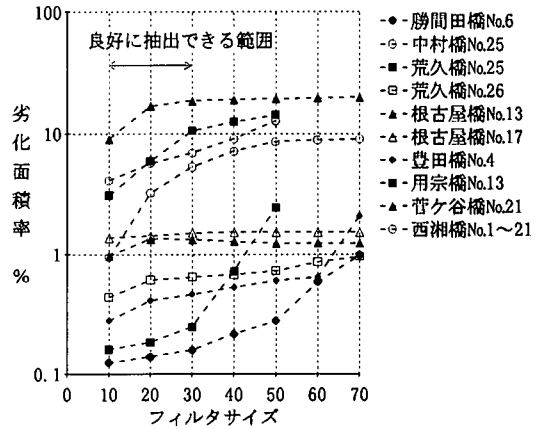
(2) パラメータが劣化部抽出に与える影響

表-1 に示した抽出試験結果から、濃淡モフォロジ処理を適用することによって、特別な場合を除けば、実際に現場で撮影したシェーディングのある画像でも塗膜劣化部分を良好に抽出できることが分かった。しかし、塗膜劣化の一部が抽出できないとされた画像 (△印) と、撮影方法と画像処理方法ともに要検討と思われた画像 (▲印) は、劣化部とその周辺のコントラストとの間に差がないために、劣化部が抽出できなかったと考えられた。

濃淡モフォロジ処理では最大値フィルタや最小値フィルタのサイズや、劣化部と正常部との濃淡差を示す濃淡しきい値などのパラメータを設定する必要がある。濃淡モフォロジ処理を適用する際に基本となるのは、出力画素値を、入力画像に対して構成要素と呼ばれるある定められた領域 (近傍) 内の最大画素値にしたり (max 演算)、最小画素値にしたり (min 演算) する演算であり、それぞれ 2 値画像の場合における論理和 (OR) と論理積 (AND) に相当する。フィルタサイズとは、max 演算あるいは min 演算を行う際に対象となる近傍の大きさを表す。

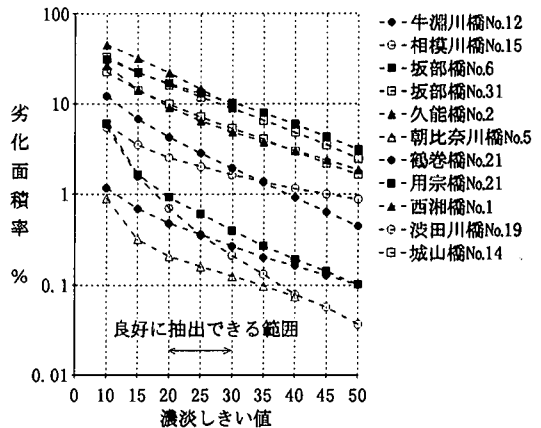
濃淡モフォロジ処理では、このフィルタサイズよりも小さい劣化部を劣化部と見なす。したがって、濃淡値が著しく大きくてもフィルタサイズより大きな劣化部は抽出することはできない。すなわち、フィルタサイズより大きなサイズの濃淡変化は、max 演算、min 演算を行ってもそのまま残るため原画像と差をとったときに検出することはできない。

濃淡モフォロジ処理を用いて塗膜の劣化部を抽出する場合、どのような画像に対しても最適なパラメータを設定するために、マニュアル操作を行うのでは、コストや処理時間等の問題が生じ実用的では



(注) 図中、実線部は劣化部を良好に抽出している範囲を、また破線部は抽出部を一部抽出できていない範囲を示す。

図-4 劣化面積率に与えるフィルタサイズの影響



(注) 図中、実線部は劣化部を良好に抽出している範囲を、また破線部は抽出部を一部抽出できていない範囲を示す。

図-5 劣化面積率に与える濃淡しきい値の影響

ない。また、画像処理結果の信頼性からは、これらの設定されたパラメータの値が多少変化しても劣化部抽出結果にほとんど影響のないことが望ましい。そこで、これらのパラメータの値による濃淡モフォロジ処理結果の影響の度合いを、劣化面積率を基に比較検討した。

検討に用いたサンプル写真は、第3章で使用した写真の中から選定し、フィルタサイズの検討では、画像上での劣化部の大きさが異なるものを10枚抽出した。また、本検討では、塗装面の写真は全てモノクロ画像で処理しているため、一般に塗装色によって正常部と劣化部との濃淡差に差が生じると考えられる。そこで、濃淡しきい値の検討では、塗装色の異なるものを11枚抽出した。

フィルタサイズの検討では、選定したサンプル写真に対して10～70の7段階で、濃淡しきい値の検討では10～50の9段階に変化させ、それぞれのパラメータと抽出した劣化面積率との関係を調べた。

フィルタサイズについては、図-4に示すように10～30の値に設定しておくことによって得られる劣化面積率はほぼ一定値を示し、劣化部を安定して抽出できることが分かった。比較的大きな塗膜劣化を含む画像については、フィルタサイズをさらに大きくしなければ劣化部を抽出できないことになるが、30以上のフィルタサイズで抽出しなければならない塗膜劣化は、鋼橋では既に塗り替えが必要と判断される場合であり、塗膜調査の対象外となる。したがって、フィルタサイズは10～30に設定しておくことで実用上は問題がないと考察される。

また、濃淡しきい値については、図-5に示すように若干のばらつきはあるものの、しきい値を20～30程度に設定することにより劣化部を良好に抽出できることが分かった。しかし、本検討では塗装面の画像は全てモノクロ画像として処理しており、塗装色については考慮していない。一般的には塗装色に応じて、最適と思われる濃淡しきい値も変化すると予想される。そこで、劣化部抽出の精度をより向上させるために、濃淡しきい値を各塗装色別に求めることにし、次節5.(3)で検討することにした。

(3) 塗装色が劣化部抽出に与える影響

検討に用いた塗装色は、日本道路公団が鋼橋に用いている代表的な6色(赤, 青, 緑, 黄, アイボリー, グレー)を選び、前節5.(2)と同様に13620枚の写真の中から各色毎5枚ずつ選定し、本システムを用いて、画像の濃度平均値、濃度分散及び濃淡しきい値を求めた。その結果、濃度平均値(m), 濃度分散(σ^2)と最適な濃淡しきい値(t)との間には、

$$40 \times (t - m) / \sigma + 128 = a \times m + b \quad (2)$$

という関係が強いことが明らかとなった。このことは、あらかじめ各塗装色毎に係数a, bについて最適値を求めておけば、画像の濃度平均値及び濃度分

表-3 回帰直線式のパラメータ

塗装色	a	b	塗装色	a	b
赤色	-0.37	154.24	黄色	-5.74	173.30
青色	-3.36	153.07	アイボリー	2.21	155.09
緑色	-0.919	134.76	グレー	-15.05	215.36

$$40 \times (t - m) / \sigma + 128 = a \times m + b$$

表-4 回帰直線式による塗装色別評価結果

塗装色	最適しきい値での評価			自動しきい値での評価		
	濃淡しきい値	劣化面積率%	評価	濃淡しきい値	劣化面積率%	評価
赤色1	22	13.4	E	25	8.94	E
赤色2	13	1.27	D	12	0.72	D
黄色1	5	5.71	C	5	7.54	C
黄色2	7	0.929	C	5	1.61	D
アイボリー1	9	5.29	D	9	4.99	D
アイボリー2	6	0.749	D	5	0.88	D
緑色1	7	0.134	C	6	0.15	C
緑色2	7	0.828	D	6	0.98	D
青色1	9	2.99	D	5	5.84	D
青色2	8	3.35	D	8	1.57	D
グレー1	10	3.15	D	15	1.043	D
グレー2	10	0.058	D	14	0.057	D

(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

散から濃淡しきい値を求めることができることを意味する。そこで、各塗装色毎のパラメータa, bを算出するために、上記サンプル写真を用いてパラメータの検討を行った。

検討では、各サンプル写真毎に、本システムを用いて塗膜調査の専門家が塗膜劣化を精確に抽出し、その時の濃淡しきい値とフィルタサイズを求めた。

求めた濃淡しきい値と濃淡モフォロジ処理後の画像における濃度平均値とから、(2)式によって各塗装色毎に算出したパラメータa, bを表-3に示す。

次に、表-3に示したパラメータを用いた回帰直線式を本システムに組み込み、各塗装色に対して自動的に濃淡しきい値を設定できるようにした上で、自動算出したしきい値が妥当であるかを検討するために抽出試験を行った。その結果を表-4に示す。ここで、自動算出した濃淡しきい値によって行った評価を「自動しきい値での評価」、塗膜調査の専門家が、

抽出結果を見ながらしきい値を調整して行った評価を「最適しきい値での評価」とする。なお、劣化度の評価には表-2に示した評価基準を用いた。

表-4によると、「自動しきい値での評価」結果と、「最適しきい値での評価」とは概ね一致しており、本システムに組み込んだ直線回帰式によって、劣化部抽出に最適な濃淡しきい値が得られることが立証できた。

以上のように、鋼橋塗装色の代表的な6色については、今回検討したフィルタサイズと濃淡しきい値をあらかじめ本システムに組み入れておくことで、自動的に精度良く塗膜劣化を抽出することができることが検証できた。なお、塗装色が極端に退色していたり変色している場合には正確な抽出が困難なことも考えられるが、劣化部の抽出結果をモニタで確認しながら、濃淡しきい値を調整することによって抽出できるので評価には問題とならないと考える。

(4) 目視観察と本システムによって求めた劣化面積率の相関性について

目視観察によって求めた劣化面積率と、本システムによって抽出した劣化面積率とを比較し、両者の関係を調べた。

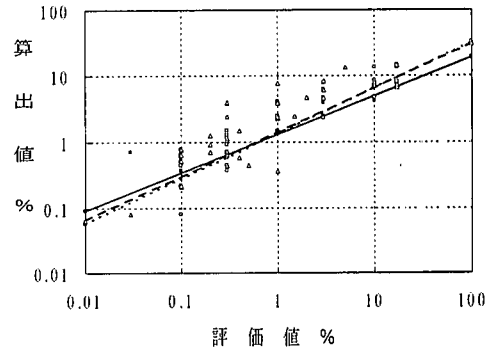
まず、実橋塗膜を撮影した画像 36 枚に対して、塗膜調査の専門家 2 人と特に塗膜調査を専門としない検査員 1 人が、それぞれ SSPC 標準図¹⁾と見比べて劣化面積率を評価し、これを「評価値」とした。次に、同じ画像 36 枚に対して、本システムによって劣化面積率を求め、これを「算出値」とした。評価値とシステム算出値との関係を図-6に示す。

図-6によると、検査員の評価値と算出値とは相関係数 0.831 とやや差のある結果となったが、2人の専門家の評価値と算出値では 0.906 ~ 0.914 とほぼ一致した相関係数が得られた。ちなみに、SSPC の各標準図について、本システムで劣化面積率を抽出したところ、各標準図に表示されている劣化面積率と表示値との間には 0.995 の相関係数が得られている。

以上のように、本システムで抽出した塗膜の劣化面積率は、塗膜調査の専門家の評価と一致するとともに SSPC 標準図の表示値とも一致する結果が得られた。このことは、本システムによって塗膜劣化を定量化することの実用性が実証できたものと考えられる。

(5) エキスパートシステムとしての実用性検討

さびの面積率で評価している SSPC 標準図に対して、我々が別途行っている研究²⁴⁾では、さび粒子の大きさに重み付けした面積率で塗膜の劣化度を評



- 専門家1評価値 (相関係数 0.914)
- 専門家2評価値 (相関係数 0.906)
- 検査員評価値 (相関係数 0.831)
- 専門家1評価の回帰直線 ($\log Y = 0.58 \log X + 0.27$)
- - 専門家2評価の回帰直線 ($\log Y = 0.69 \log X + 0.30$)
- · 検査員評価の回帰直線 ($\log Y = 0.67 \log X + 0.35$)

図-6 塗膜劣化面積率の相関関係

表-5 目視観察と本システムによる評価の比較

評価	目視観察評価		システム評価	
	劣化面積率%	評価	劣化面積率%	評価
橋梁名				
久能高架橋	17	E	9.792	E
鶴巻高架橋①	0.1	B	0.102	B
〃 ②	0.1	B	0.070	B
〃 ③	3.0	E	1.585	D
川崎高架橋	3.0	E	3.220	D
鈴川橋①	0.1	B	0.173	D
〃 ②	0.1	B	0.151	C
相模川橋	1.0	D	2.183	D
片山高架橋	0.3	C	0.345	C
牛淵川橋	0.3	C	0.286	D
坂部高架橋①	3.0	E	0.798	C
〃 ②	3.0	E	1.633	D
用宗高架橋	3.0	E	4.045	D

価するようにしている。この理由としては、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、強い相関性がある程度塗膜表面のさび粒子の大きさが大きくなればなるほど、塗膜下の腐食度は大きくなることとが実橋調査の結果から明らかとなったことによる。

通常、塗膜調査の専門家の評価は、腐食環境や塗

装系などを考慮した上で、塗膜表面の劣化状態から塗膜下腐食を推定し評価しているが、本システムでは劣化面積率やさび粒子の大きさなど塗膜表面の情報しか得ることはできない。そこで、本システムによって求めた劣化面積率やさび粒子の大きさを、別途行った研究²⁴⁾によって求めた表-2に示す評価基準に当てはめ、本システムの実用性を評価した。

実用性の検討では、塗膜調査の専門家が目視によって SSPC 標準図と対比して求めた劣化面積率と塗膜評価に対し、本システムで求めた劣化面積率とそれを表-2に当てはめた結果とを比較した。評価結果を表-5に示す。

表-5によると、塗膜調査の専門家の目視観察による評価結果と本システムによる評価はほぼ一致しており、本システムのエキスパートシステムとしての実用性が検証できた。両者の評価にいくつかの相違点が見られるが、これは目視観察では密集したさびは一つの集合として見掛けの面積率で評価するのに対して、本システムではさび粒子の一つ一つの面積をコンピュータで算出するために生じる差であって、言い換えれば本システムの方が数学的に高い面積率で評価することになり、定量的な信頼性は大きいといえる。しかし、表-1に示した▲印のように、塗膜劣化本来の現象とは別な現象が重複している映像(例：もらいさびや汚れなど)は、画像処理を行う際に濃淡しきい値を調整するか、またはその部分をカットするなどの複雑な処理が必要となるため、操作の簡略化と精度向上を目的として、現在では画像処理用撮影マニュアルを用意し、極力▲印のような映像を撮影しないようにしている。

6. 結論

本研究は、塗膜の劣化状態を撮影した画像から、画像処理システムによって塗膜劣化の特徴量を定量化し、別途行っている研究²⁴⁾によって設定した評価基準に当てはめ塗膜劣化度を評価しようと試みたものである。

この試みに当たって、既存の画像処理手法の中から濃淡モフォロジ処理を選び、実橋の塗膜写真を対象に抽出試験を行い実用性の検討を行った。その結果次のような結論が得られた。

① 濃淡モフォロジ処理を用いることで、屋外における鋼橋塗膜の撮影画像のように、濃度平均値が変化する画像でも塗膜劣化部を精度よく定量的に抽出できることが明らかとなった。

② 本研究で開発した画像処理システム^{16), 17)}を用いて塗膜劣化部を定量化するための画像は、評価対象となる塗膜に対して左右及び上下 20 度以内の角度で撮影する必要があることが分かった。

③ 濃淡モフォロジ処理で塗膜劣化部を抽出する場合、フィルタサイズを 10 ~ 30 程度、また濃淡しきい値を 20 ~ 30 程度に設定しておけば劣化部を良好に抽出できることが分かった。

④ 鋼橋塗装で一般的に用いられる 6 塗装色について、濃淡モフォロジ処理後の画像における濃度平均値から塗装色毎にパラメータを求め、それを用いた回帰直線式によって、自動的に精度良く塗膜劣化を抽出することができた。

⑤ 本システムで抽出した塗膜の劣化面積率は、塗膜調査の専門家の評価と一致するとともに SSPC 標準図の表示値とも一致する結果が得られた。このことは、本システムによって塗膜劣化を定量化することの実用性が実証できたものと考えられる。

⑥ 本システムによって定量化した塗膜劣化の特徴量を、別途行っている研究²⁴⁾で求めた評価基準に当てはめて評価を行った結果、塗膜調査の専門家の目視観察による評価結果と本システムによる評価は良く一致しており、本システムのエキスパートシステムとしての実用性が実証できた。

⑦ 本研究では、鋼橋塗膜の劣化度を判定する手法として、画像処理システムを用いることの有用性を実証したが、我々が行っている鋼橋塗膜の劣化度判定法に関する一連の研究では、塗膜表面に存在している劣化と、その塗膜の下に生じている鋼材の腐食度との関係から塗膜の余寿命を推定する試みも行っており、最終的には塗膜調査結果から塗膜の塗り替え時期を推定するエキスパートシステムの構築を目指している。今回の研究では、塗膜劣化の特徴量を定量化する方法が確立できたため、塗膜劣化の経年データを蓄積することによって、塗膜の余寿命を推定する可能性を示すことができた。

参考文献

- 1) ASTM, Standard Method of Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surface. D-610-68 (Steel Structures Paint Council. SSPC-Vis-68T).
- 2) 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, 1994.6.
- 3) 中田淳二, 柴田俊夫, 坂田勇嗣: 画像解析によるステンレス鋼の耐候性評価, 第 40 回腐食防食討論会講演集, pp.369-372, 1993.

- 4) 中田淳二, 柴田俊夫: 耐候性の発錆点分布モデルパターン画像解析, 第 41 回腐食防食討論会講演集, pp.453-456, 1994.
- 5) 中田淳二, 柴田俊夫: ステンレス鋼の耐候性評価への画像処理技術の適用, 第 110 回腐食防食シンポジウム資料, pp.1-12, 1996.
- 6) 武藤泉, 佐藤英次, 紀平寛: 大気環境におけるステンレス鋼の発錆挙動の画像解析, 第 40 回腐食防食討論会講演集, pp.373-376, 1993.
- 7) 武藤泉, 紀平寛: ステンレス鋼の耐候性評価試験法の現状と課題, 防錆管理, 38, pp.2-7, 1994.7.
- 8) 武藤泉: 画像処理によるステンレス鋼大気腐食挙動の定量解析, 第 110 回腐食防食シンポジウム資料, pp.13-22, 1996.
- 9) 西村俊弥, 清水義明: ステンレス鋼の発錆性に与える乾湿繰り返し腐食試験条件の影響, 材料と環境, 第 44 巻, 第 10 号, pp.550-556, 1995.
- 10) 西村俊弥, 清水義明: ステンレス鋼の発錆性の評価, 第 110 回腐食防食シンポジウム資料, pp.23-35, 1996.
- 11) 島貢, 渡辺勝也: 画像処理によるステンレス鋼の発錆評価, 第 42 回腐食防食討論会講演集, pp.167-170, 1995.
- 12) 佐藤幸弘, 森脇耕介: 画像処理による簡易腐食評価方法の検討, 防錆管理, 35, pp.12-15, 1991.3
- 13) 近藤宗孝: パイプラインの腐食損傷解析への適用, 第 110 回腐食防食シンポジウム資料, pp.72-80, 1996.
- 14) 山本正弘: 画像処理による腐食形態の 3 次元解析, 材料と環境, Vol.45, pp.315-322, 1996.
- 15) 山本正弘: フルカラー画像処理による屋根材の腐食評価法, 材料と環境, Vol.46, pp.90-94, 1997.
- 16) 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, 1993.9.
- 17) 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 -A.359, pp.718-719, 1995.9.
- 18) 田中丈之: コーティング膜の物性と評価法, 株式会社理工出版社, pp.219-220, 1986.
- 19) 菅野照造: 塗膜劣化の診断, 電力土木, No. 223, pp.99-113, 1989.11.
- 20) 竹島鋭機: 塗装鋼板の耐久寿命予測法, 塗装技術, pp.91-99, 1983.3.
- 21) 増子昇: 塗膜下腐食の発生と進行, 防食技術, No. 30, No. 12, pp.699-704, 1981.12.
- 22) 奥田聡: ライニング膜の劣化特性と診断, 日本材料学会腐食防食部会第 154 回例会資料, pp.7-24, 1990.1
- 23) W.Funke: Prog.Org.Coatings, 9, No. 1, pp.29-46, 1981.
- 24) 藤原博, 菅野照造: 鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食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, 1996.4.
- 25) 日本道路公団: 維持修繕要領, 鋼橋塗装, 1988.5.

(1997. 6. 19 受付)

STUDY ON EVALUATION METHOD FOR PAINT FILM DETERIORATION OF STEEL BRIDGE WITH IMAGE PROCESSING TECHNOLOGY

Hiroshi FUJIWARA, Masaru MIYAKE, Takaaki AKAI, Yukihiro KAWANO
and Sadao DEGAWA

In order to evaluate deterioration degree of steel bridge painting quantitatively, image processing technology is applied to this research instead of visual observation method. Especially, "Grayscale Morphology Processing", which can extract deterioration area precisely from various types of pictures, was chosen among a lot kinds of image processing methods. The result of extraction test with some 13620 of actual bridge pictures indicated that deterioration degree of painting can be calculated quantitatively by using image processing technology, and the possibility of measuring accurate estimation of the time for repainting is also indicated.