

# 新しい塗膜診断システムの開発

塗膜診断研究会

山崎 曜

## 1. はじめに

近年、あらゆる社会資本に対してコストの低減が求められており、鋼橋塗装工事業においても、初期（架設）・維持管理（塗替え）・架け替えにかかる全コストを考慮したライフサイクルコスト（LCC）の低減が求められている。鋼橋のLCCで重要視しなければならないのは架け替えのコストである。架け替えに要するコストは大きいため、適切な維持管理（塗替えによる防食性の維持が中心となる）を行うことにより長寿命化が図れば、LCCの低減は可能である。

更に、維持管理の中心となる鋼橋塗装においても、架設から塗替えまでの期間が長いほど維持管理にかかるコストは低減できる。しかし、塗膜劣化が進行し過ぎてしまうと塗膜前処理の費用が大きくなると共に、塗替え塗膜の寿命を短くしてしまう場合もあり、かえって維持管理コストを増大させることにもなるので、適切な塗替え時期の決定が維持管理上重要となる。

従来より、適切な塗替え時期の決定のために様々な手法が試みられているので、これらの紹介と併せて、本研究会で検討を行っている新しい塗膜診断システムについて紹介する。

## 2. 塗膜診断の現状

現在実施されている塗替え周期の実態と、代表的な塗膜診断手法を紹介する。

### 2.1. 環境別塗替え周期

塗膜は種々の手法で劣化状態を診断し、必要に応じて塗替え塗装が行われている。

表-1は鋼道路橋に対する塗替え周期の平成10年度の調査実績を、環境別にまとめたものである。

表－１ 環境別の塗替え周期（平成１０年度調査実績）

環 境	塗替え周期
市 街 地	１２年４ヶ月
工 業 地 帯	１２年６ヶ月
海 岸 地 帯	１１年９ヶ月
田 園 地 帯	１１年６ヶ月
山 間 部	１６年６ヶ月
海 上	－

## 2. 2. 代表的な塗膜診断手法

現状の塗膜診断手法は次に示す３つに大きく分けられる。

### 2. 2. 1. 塗膜の電気化学的特性の測定による診断

塗膜の直流抵抗値、交流インピーダンス値、分極抵抗値などにより判定する。一箇所当たりの測定面積が小さいため、全体を評価するためには測定点を多くする必要がある。測定・診断には専門家が必要。

### 2. 2. 2. 塗膜の物理変状の測定による診断

塗膜の衰耗速度（チョーキングによる膜厚減少速度）や腐食性イオンの塗膜内への拡散速度の測定などにより判定する。

定点測定を行い、その劣化速度から塗替え時期を決定する試みが、実橋で行われている。測定・診断には専門家が必要。

### 2. 2. 3. 塗膜の外観評価による診断

標準劣化写真と複数の調査項目との照合で評価点をつけ、劣化評価の総合点を算出して診断する。

実際の塗替え判断で最も多用されている手法で、判定基準が適切であれば調査・診断は専門家である必要はなく、適切な塗替え判定が行える。診断にコンピューターを利用している例が多く、塗替えの判定だけでなく塗膜の寿命予測、塗替え塗装仕様の選定まで行えるシステムとなっているものもある。

表－２に公的機関等の塗膜調査項目を示す。

表-2 公的機関等の塗膜調査項目

調査項目 公的機関等	目 視 調 査										
	さ び	は が れ	白 亜 化	わ れ	ふ く れ	変 退 色	汚 れ	き ず	漏 水	色 む ら	腐 食
鋼道路橋塗装便覧	○	○		○	○	○	○		○		
日本道路公団	○	○	○	○							
首都高速道路公団	○	○		○	○	○			○		
阪神高速道路公団	○	○		○	○	○		○			
本州四国連絡橋公団	○	○		○	○	○	○		○	○	○
J R 総合技術研究所	○	○	○	○	○						

### 3. コンピューターを利用した塗膜診断

コンピューターを利用した塗膜診断システムとしては、平成2年に土木研究所が官民共同研究により開発した「コンピューターを利用する塗膜診断システム（COMS）」がある。

本システムは、鋼橋塗装の維持管理を合理的かつ効率的に行うために、塗料や塗装に関する知識や経験があまりない管理者でも、標準劣化写真と対比させることによって調査が容易に行え、得られた調査データをコンピューターに入力することによって、塗膜劣化の診断と塗替え時期の判定を行うと共に、塗膜の余寿命・塗替え塗装仕様の選定も可能となっている。なお、現在のシステムはパーソナルコンピューターの汎用OSであるWINDOWS（95，98，Me，NT，2000）で作動可能となっている。

#### 3.1. システムの構成

システムは次の3システムで構成されている。

COMS-I：塗膜劣化診断システム

COMS-II：寿命予測システム

COMS-III：塗替え塗装仕様選定システム

### 3. 2. システムの概要

#### 3. 2. 1. システムのフロー

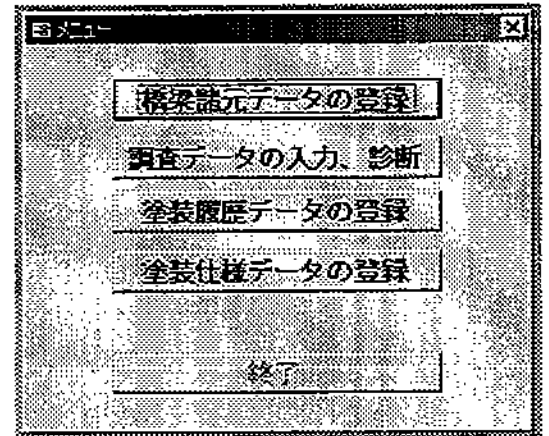
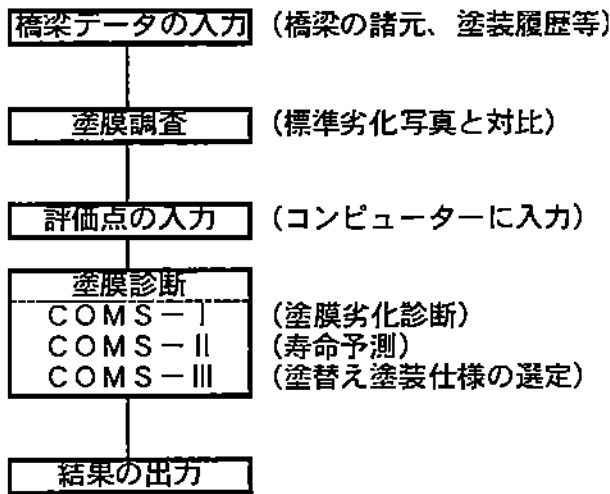


図-1 COMSのシステムフローとメニュー画面

#### 3. 2. 2. 橋梁データの入力

調査対象橋梁の諸元、塗装履歴等の塗膜診断に必要なデータをコンピューターに入力する。入力されたデータはコンピューター内に保存され、次回点検時には付記されたコード番号を入力することにより、橋梁諸元、塗装履歴、塗膜状態が確認できる。

#### 3. 2. 3. 塗膜調査

塗膜調査は目視（双眼鏡併用）により、部位（部材）ごとにさび、はがれ、汚れ、変退色について評価し、結果を塗膜調査票に記入する。

さび、はがれの評価は「塗膜劣化度標準写真帳」（図-3参照）との対比によって行うが、表-3に示す5段階評価で行う。また、汚れ、変退色は4段階の評価基準に従って官能的に評価する。

表-3 さび、はがれの評価基準

評価点	劣化度基準	劣化状態
1	評価1	健全である
2	評価2	ほぼ健全である
3	評価3	劣化がある
4	評価4	劣化が大きい
5	評価5	劣化が著しい

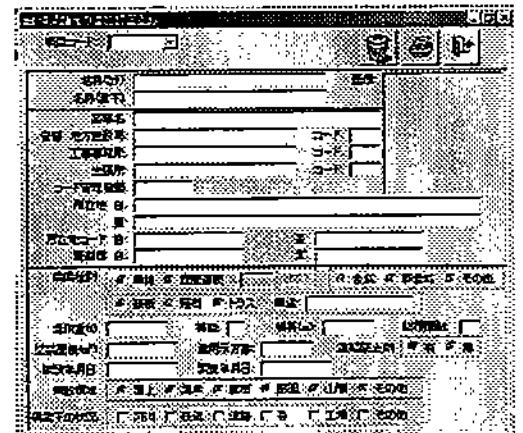


図-2 橋梁データの入力画面

### —塗膜劣化度標準写真—

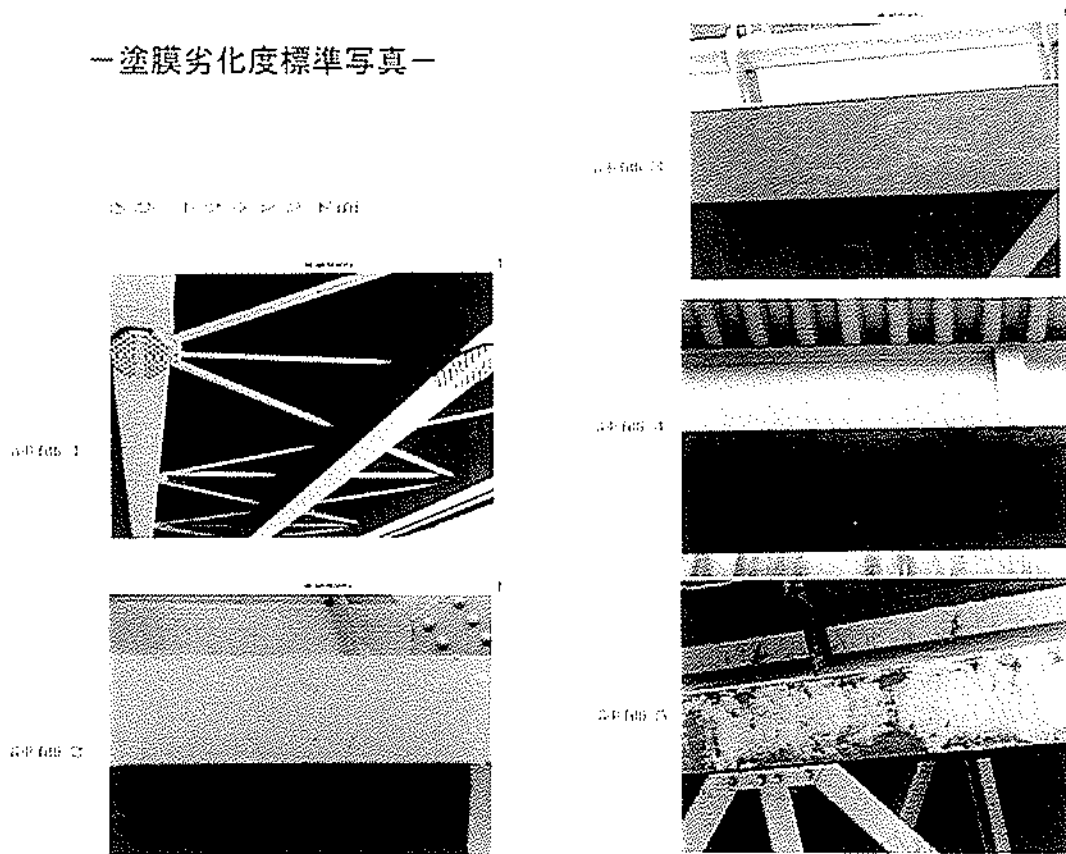


図-3 塗膜劣化度標準写真帳(例)

#### 3.2.4. 評価点の入力

塗膜調査票に記入したデータをコンピューターへ入力し診断する。なお、入力されたデータはコンピューター内に蓄積される。

#### 3.2.5. 塗膜診断

##### (1) COMS-I (塗膜劣化診断)

調査データを入力すると、防錆視点からの診断、美観視点からの診断、総合診断、部分補修に関する診断、水洗いに関する診断を行うシステムである。

防錆視点から診断した調査データの処理は、調査データのうち防錆上必要である項目「さび」と「はがれ」の評価点を使用し、防錆視点の診断ロジックにより評価する。美観視点から診断した調査データの処理は、例えば鋼桁の場合、美観に影響を及ぼす腹板と下フランジの「はがれ」、「変退色」及び「汚れ」の評価点を使用して美観視点の診断ロジックで評価する。(図-4、5参照)

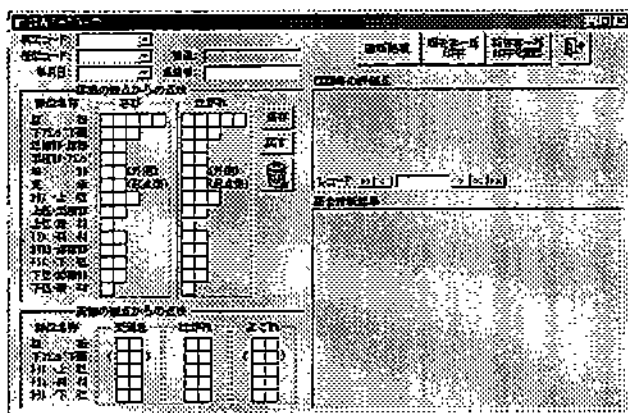


図-4 調査データ入力画面

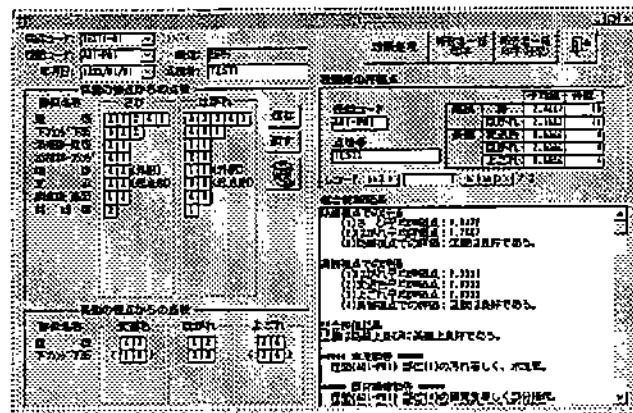


図-5 診断結果表示画面

## (2) COMS-II (寿命予測)

COMS-Iで得られた診断結果より、塗膜寿命（効率的に塗替えを行う時期）を予測するシステムである。

塗膜の寿命は、塗膜の劣化機構を検討した上で、全国254橋の塗膜調査データを統計的に処理して求めた塗膜寿命予測式をベースにしたロジックを利用して、コンピュータ内で処理して求められる。

詳細については第3回技術発表大会で発表された「コンピューターによる塗膜診断」を参照されたい。

## (3) COMS-III (塗替え塗装仕様の選定)

COMS-IIIは、上記の診断で塗替えが必要であると診断された橋梁の塗替え塗装仕様を選定するシステムである。

このシステムでは次のような条件を入力することにより、鋼道路橋塗装便覧の塗替え塗装基準に準拠した、最も適切な塗替え塗装仕様が出力される。

- 1) 塗膜の劣化形態（比較的均一又は局部的）
- 2) 塗膜の劣化期待（計画より短い又は長い）
- 3) 塗替えの間隔（現行より長くする又はしない）
- 4) 塗替え後の景観（配慮する又はしない）
- 5) 塗替え間隔が短い場合の劣化原因の排除（可能又は不可能）

### 3.2.6. 結果の出力

調査対象橋梁の諸元、塗装履歴、調査結果の明細、総合評価結果等が橋梁全体又は径間ごとにプリンターより出力される。

#### 4. デジタル画像処理による塗膜診断

外観評価による塗膜診断システムにおいて、標準劣化写真との対比による評価では調査者の主観が入ることが避けられない（調査者間の評価のばらつきの原因となる）。

デジタル画像処理による塗膜診断では、これらを極力排除するため、定めた撮影方法によって、デジタルカメラで撮影されたデジタル画像をコンピューターに直接取り込み、画像処理ソフトによって塗膜評価を行うもので、調査者が目視で判定する部分をコンピュータ処理に置き換えたものである。

従来の診断方法との違いを図-6に示す。

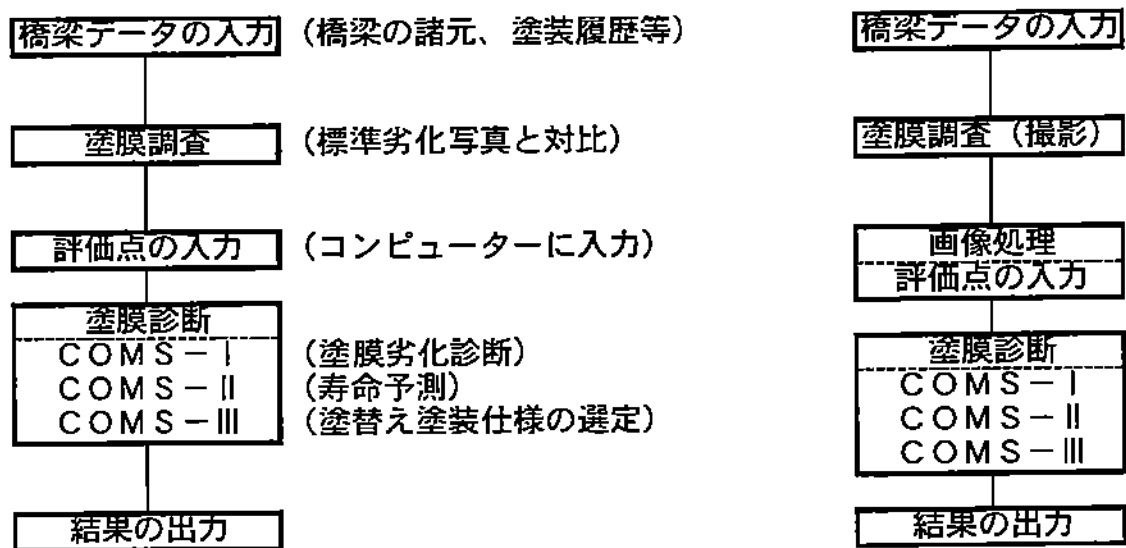


図-6 従来法の塗膜診断フローとデジタル画像処理法による塗膜診断フロー

##### 4.1. デジタル画像処理に必要な機器

デジタル画像処理には、撮影のためのデジタルカメラ、画像を取り込み画像処理するためのパーソナルコンピューター（塗膜診断と兼用となる）、画像処理用のソフトが必要であるが、近年のデジタルカメラ及びパーソナルコンピューターのハード面での急速な進歩により、市販の汎用機器で画像処理が可能となってきている。

##### 4.1.1. デジタルカメラ

現時点で汎用機としては400万の画素数までがラインナップされている。

(1) 画素数：画像処理の精度及び容易さから、画素数は大きい方が望ましい。

200万の画素数で処理できないことはないが、撮影距離が離れると鮮鋭度が落ちる。従って少なくとも300万、できれば400万の画素数の機種が望ましい。

(2) ズーム：デジタルズーム式と光学ズーム式があるが、画質の面から光学ズーム式が望ましく、かつ撮影距離との関係から倍率は高いほど良い。

#### 4.1.2. パーソナルコンピューター

(1) 本体：画像処理速度及びデジタルカメラからの画像取り込みの容易さ等を考慮すると、USB接続機能が利用できるWINDOWS 98の動作環境以上のハード環境のものが望ましい。

(2) ディスプレー：画像処理の容易さから1024×768ピクセル以上の解像度のものが望ましい。

#### 4.1.3. 画像処理ソフト

(1) ファイル形式：デジタルカメラ画像の処理が基本となるので、少なくともデジタルカメラ画像のファイル形式であるJPEGに対応している必要がある。

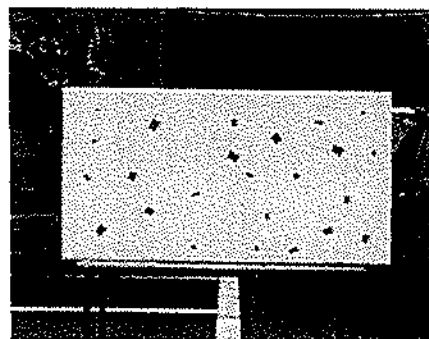
(2) 範囲指定：画像の範囲指定機能に多角形の範囲指定があるものが良い。

(3) 二値化：劣化部を抽出することを、画像処理では二値化処理という。通常、明度差で抽出して二値化するソフトが殆どであるが、色相・彩度を加えた色抽出の機能があると、明るさにむらがある画像でもある程度まで二値化が可能となる。

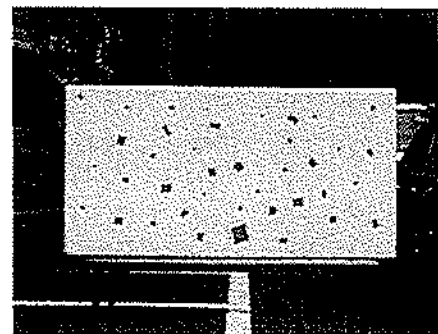
(4) 面積計算：画像処理では劣化部の面積率を出力する必要があるので、二値化後の範囲指定内の面積率が算出できる機能を有している必要がある。

#### 4.2. 撮影条件を決定するための検証試験

画像処理による塗膜診断の精度を上げるためには、画像処理に支障のない撮影条件を定める必要があり、図-7に示すような面積率が既知な撮影モデルを作成し、検証試験を行った。



さび面積: 2%



さび面積: 3%

図-7 検証試験用撮影モデル例



#### 4.2.1. デジタルカメラの画素数の検証

画像解析に及ぼすカメラの画素数の影響について検証するため、画素数が200万、300万、400万のカメラを用いて図-7の撮影モデルを利用して10mの距離より撮影した画像の処理結果を表-4に示す。

表-4 カメラの画素数による検証

使用カメラ: 200万画素、300万画素、400万画素のデジタルカメラ(光学3倍ズーム使用)

デジタルカメラの画素数	さび面積(%) モデル	撮影位置		画像解析結果		
		角度	距離	画像処理劣化%	理論値との差	誤差率
400万画素	2%	0°	10m	2.10	0.10	1.05
	3%	0°	10m	2.82	-0.18	0.94
	4%	0°	10m	3.93	-0.07	0.98
	5%	0°	10m	5.02	0.02	1.00
	6%	0°	10m	5.95	-0.05	0.99
	5%均等	0°	10m	4.87	-0.13	0.97
300万画素	2%	0°	10m	2.03	0.02	1.01
	3%	0°	10m	3.07	0.07	1.02
	4%	0°	10m	4.13	0.13	1.03
	5%	0°	10m	5.01	0.01	1.00
	6%	0°	10m	5.84	-0.16	0.97
	5%均等	0°	10m	4.99	-0.01	1.00
200万画素	2%	0°	10m	2.01	0.01	1.00
	3%	0°	10m	2.98	-0.02	0.99
	4%	0°	10m	4.04	0.04	1.01
	5%	0°	10m	5.12	0.12	1.02
	6%	0°	10m	5.69	-0.31	0.95
	5%均等	0°	10m	5.17	0.17	1.03

注1) 撮影角度は、撮影対象面に正対で撮影した場合を0°とする。

注2) 画像処理方法

200万及び300万画素カメラの画像: 前処理→明るさ・コントラスト→抽出→色抽出

400万画素カメラの画像: 前処理→抽出→色抽出

注3) 誤差率=画像処理劣化%/さび面積(%)モデル(理論値)

表-4の結果より画素数の差は顕著には認められなかったが、画像処理の際200万、300万の画素数のデジタルカメラの画像は、画像処理を行うために「明るさ、コントラスト」の調整が必要であったが、400万の画素数のデジタルカメラの画像では調整が不要で、容易に画像処理が行えた。

#### 4.2.2. 撮影角度と撮影距離の検証

カメラの画素数の差は画像解析結果の数値の差としては表れないが、画像処理の容易さでは高画素数のカメラで得た画像の方が優れていることが判明したので、以下の検証試験では400万の画素数のカメラに固定して行った。

撮影角度と撮影距離の検証においても図-7に示す撮影モデルを利用し、撮影角度の検証では、撮影距離を4.3m、10mに固定して行った。また、撮影距離の検証では撮影距離を4.3、20、30、50mとし、角度も加味して行った。

結果を表-5~7に示す。

表-5 距離4.3mでの撮影角度の検証

使用カメラ:400万画素のデジタルカメラ(ズーム未使用)

さび面積(%) モデル	撮影位置		画像解析結果		
	角度	距離	画像処理劣化%	理論値との差	誤差率
2%	0°	4.3m	2.06	0.06	1.03
3%	0°	4.3m	3.01	0.01	1.00
4%	0°	4.3m	4.09	0.09	1.02
5%	0°	4.3m	5.05	0.05	1.01
6%	0°	4.3m	6.12	0.12	1.02
5%均等	0°	4.3m	5.05	0.05	1.01
2%	30°	4.3m	2.01	0.01	1.01
3%	30°	4.3m	3.05	0.05	1.02
4%	30°	4.3m	4.06	0.06	1.02
5%	30°	4.3m	5.09	0.09	1.02
6%	30°	4.3m	6.00	0.00	1.00
5%均等	30°	4.3m	5.05	0.05	1.01
2%	45°	4.3m	2.06	0.06	1.03
3%	45°	4.3m	3.06	0.06	1.02
4%	45°	4.3m	4.04	0.04	1.01
5%	45°	4.3m	5.19	0.19	1.04
6%	45°	4.3m	6.20	0.20	1.03
5%均等	45°	4.3m	5.08	0.08	1.02
2%	60°	4.3m	2.01	0.01	1.01
3%	60°	4.3m	3.38	0.38	1.13
4%	60°	4.3m	4.47	0.47	1.12
5%	60°	4.3m	5.41	0.41	1.08
6%	60°	4.3m	6.01	0.01	1.00
5%均等	60°	4.3m	4.95	-0.05	0.99

注1)撮影角度は、撮影対象面に正対で撮影した場合を0°とする。

注2)画像処理方法:前処理→抽出→色抽出

注3)誤差率=画像処理劣化%/さび面積(%)モデル(理論値)

表-6 距離10mでの撮影角度の検証

使用カメラ:400万画素のデジタルカメラ(光学3倍ズーム使用)

さび面積(%) モデル	撮影位置		画像解析結果		
	角度	距離	画像処理劣化%	理論値との差	誤差率
2%	0°	10m	2.10	0.10	1.05
3%	0°	10m	2.82	-0.18	0.94
4%	0°	10m	3.93	-0.07	0.98
5%	0°	10m	5.02	0.02	1.00
6%	0°	10m	5.95	-0.05	0.99
5%均等	0°	10m	4.87	-0.13	0.97
2%	30°	10m	2.06	0.06	1.03
3%	30°	10m	2.78	-0.22	0.93
4%	30°	10m	3.94	-0.06	0.99
5%	30°	10m	4.85	-0.15	0.97
6%	30°	10m	5.79	-0.21	0.97
5%均等	30°	10m	4.95	-0.05	0.99
2%	45°	10m	1.97	-0.03	0.99
3%	45°	10m	2.76	-0.24	0.92
4%	45°	10m	3.78	-0.22	0.95
5%	45°	10m	4.74	-0.26	0.95
6%	45°	10m	5.64	-0.36	0.94
5%均等	45°	10m	4.75	-0.25	0.95
2%	60°	10m	1.96	-0.04	0.98
3%	60°	10m	2.48	-0.52	0.83
4%	60°	10m	3.44	-0.56	0.86
5%	60°	10m	4.38	-0.62	0.88
6%	60°	10m	5.15	-0.85	0.86
5%均等	60°	10m	4.76	-0.24	0.95

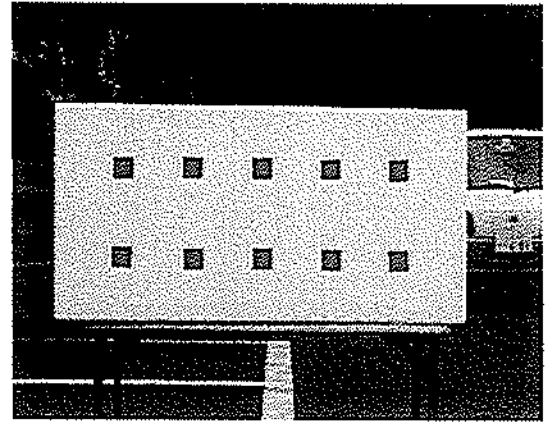
注1)撮影角度は、撮影対象面に正対で撮影した場合を0°とする。

注2)画像処理方法:前処理→抽出→色抽出

注3)誤差率=画像処理劣化%/さび面積(%)モデル(理論値)

表-5、6の結果、被写体が図-7の撮影モデル程度のサイズ(1×2m)であれば、0~45°までは殆ど理論値に近い精度で画像解析が可能なが確認できた。また、光学ズームの使用により、10m程度では近距離と同様の結果が得られることも確認できた。

表中、60°の角度でもばらつきの少ない5%均等劣化モデルは、図-8に示すように均一サイズの劣化部が均等に分布しているため角度によって面積率が変動しにくいいためである。図-7に示すモデルは、実際に近い不均一サイズの劣化部がアットランダムに点在しており、撮影角度によっては面積率が変動することを認識しておく必要がある。



さび面積:5%均一

図-8 5%劣化均等モデル

表-7 10m以上の撮影距離での検証

使用カメラ:400万画素のデジタルカメラ(最大光学12倍ズーム使用)

さび面積(%) モデル	撮影位置		画像解析結果		
	角度	距離	画像処理劣化%	理論値との差	誤差率
5%均等	0°	4.3m	5.05	0.05	1.01
5%均等	0°	20m	4.86	-0.14	0.97
5%均等	0°	30m	4.74	-0.26	0.95
5%均等	0°	40m	4.59	-0.41	0.92
5%均等	0°	50m	4.34	-0.66	0.87
5%均等	30°	30m	4.78	-0.22	0.96
5%均等	30°	50m	4.66	-0.34	0.93
5%均等	45°	30m	4.78	-0.22	0.96
5%均等	45°	50m	4.86	-0.14	0.97
5%均等	60°	30m	4.73	-0.27	0.95
5%均等	60°	50m	4.46	-0.54	0.89

注1)撮影角度は、撮影対象面に正対で撮影した場合を0°とする。

注2)画像処理方法:前処理→抽出→色抽出

注3)誤差率=画像処理劣化%/さび面積(%)モデル(理論値)

表-7の結果より、視界が良い条件では高倍率のズームと併用すれば、50mでもかなりの精度の画像が得られることが確認できた。ただし、この結果は視認性の良い図-8のモデルを使用したことによるものかもしれないので、今後図-7モデルでの検証も必要となろう。

#### 4.2.3. 被写体の検証

明るさが不十分な被写体に対してはストロボを補助光源として撮影することが多い。画像処理においてもストロボ撮影が有効か検証した。

画像処理は明度、色相、彩度の差で画像を分離し二値化を行う。従って明るさにむらがあったり、対象劣化部に色むらが著しいと画像解析が困難になる。

図-9は明るさが不十分で、かつ不均一な鉄桁内側の腹板の例を示す。このような被写体をストロボ撮影すると、明るさの不均一性がかえって強調されることになり画像処理が不可能となる。

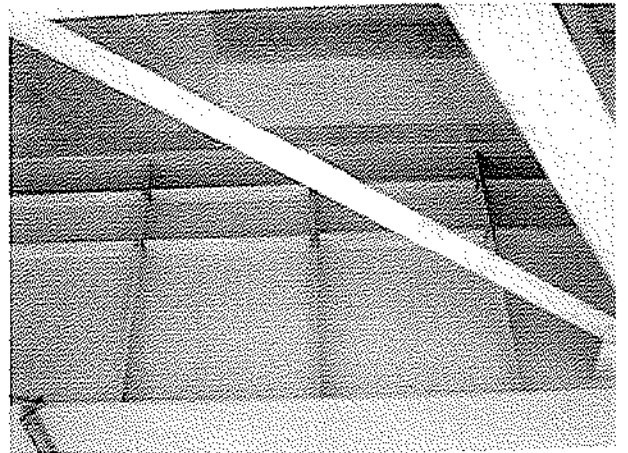


図-9 鉄桁内側の腹板

これはストロボの明るさが均一でない（中心部が最も明るい）ことに起因する。明るさの均一な光源が適用できれば、補助光源による撮影は有効であるが、携帯できるような光源は現在まだ市販されていない。

次の図-10、図-11に示すような画像も画像解析が困難である。撮影時に下図のような失敗が生じないように注意する必要がある。

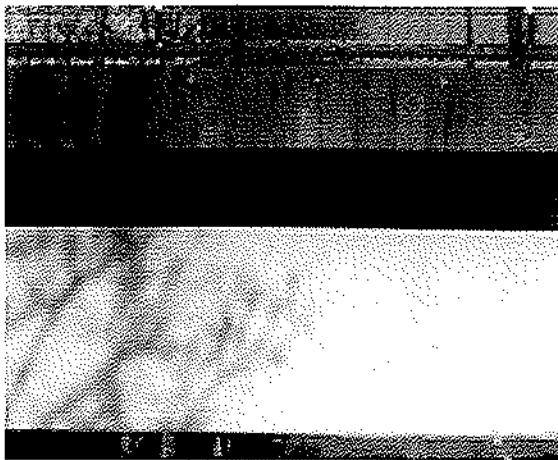


図-10 木の陰の入った被写体

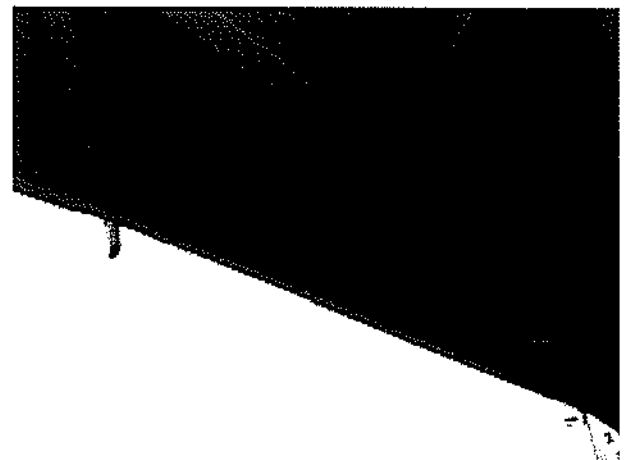


図-11 空を写し込んだため暗くなった被写体

#### 4.3. 画像処理に適した撮影条件

- ・デジタルカメラの画素数は高いほど良い。画像処理の容易さからは現時点の汎用機の最高レベルである400万画素級が適切である。

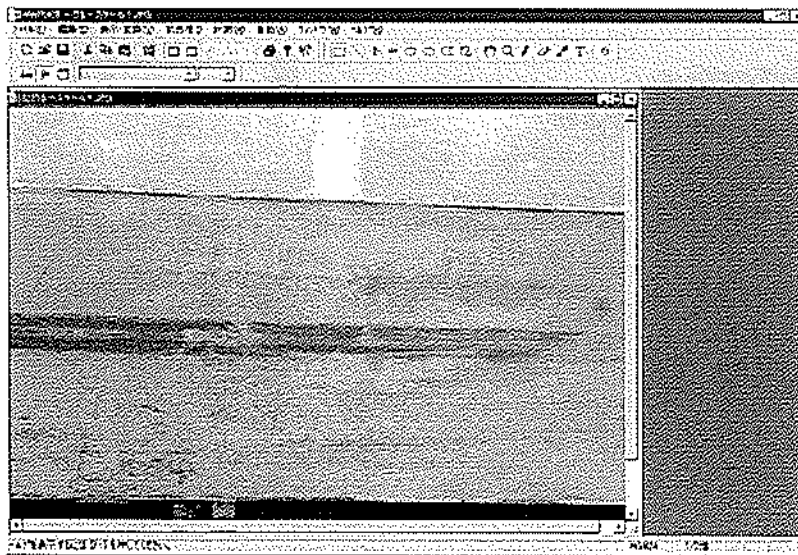
- ・ズームはデジタル式でなく光学式を使用する場合は有効である。
- ・同一被写体でも撮影距離、角度により画像解析結果が異なるので、誤差限界内の距離、角度で撮影する必要がある。300万画素で光学3倍ズームのデジタルカメラでは、撮影距離は10m以内、角度は45°以内で撮影する必要がある。400万画素のデジタルカメラも角度は45°が限界と考えているが、ズームの能力次第で撮影距離は10m以上が期待できるので、今後も検証を継続し距離限界を明らかにしたい。また、高倍率のズームを使用する場合は三脚の併用が必要である。
- ・ストロボ撮影は明るさの不均一性をかえって強調するので使用しない。均一な明るさの光源であれば、補助光源としては有効である。
- ・明るさが不均一でコントラストのはっきりしない画像は、画像処理時に誤差を生じやすいので注意を要する。

これらを踏まえた「撮影マニュアル」を本年度中に取りまとめる予定である。

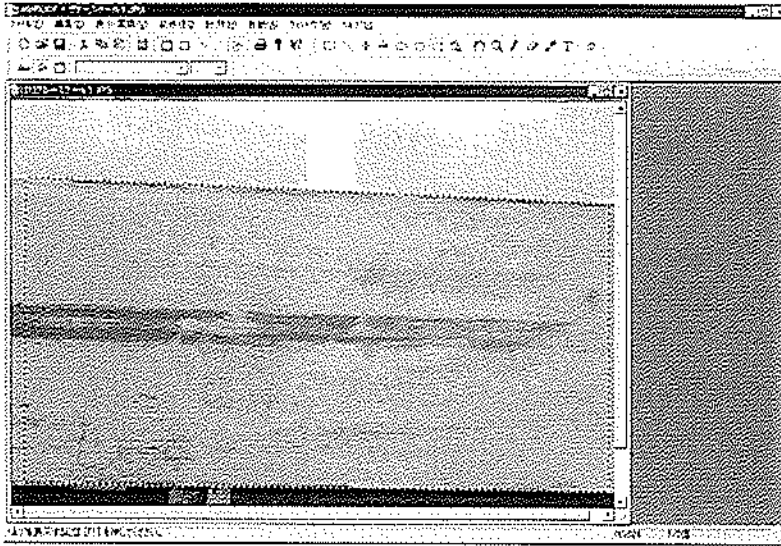
#### 4.4. 画像処理の実際

画像処理の代表的な例として、グレースケールからの二値化及び色抽出による二値化処理の実際を、市販の画像処理ソフト「WinRoof」で示す。

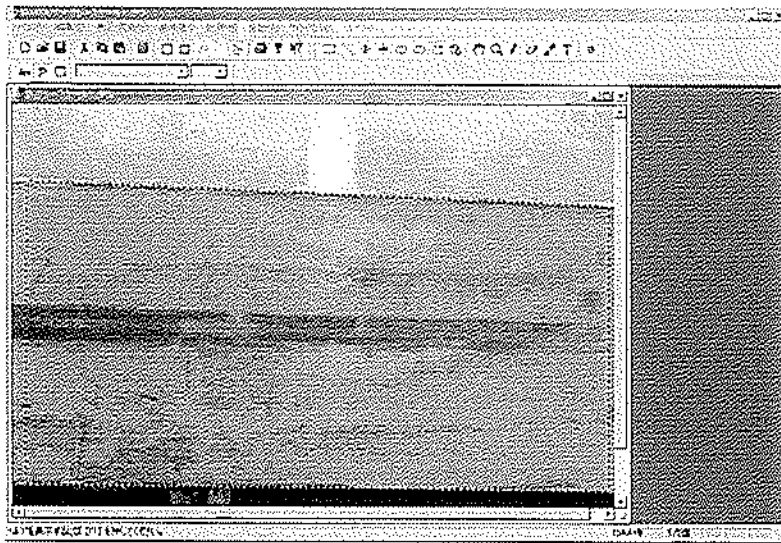
##### 4.4.1. グレースケールからの二値化例



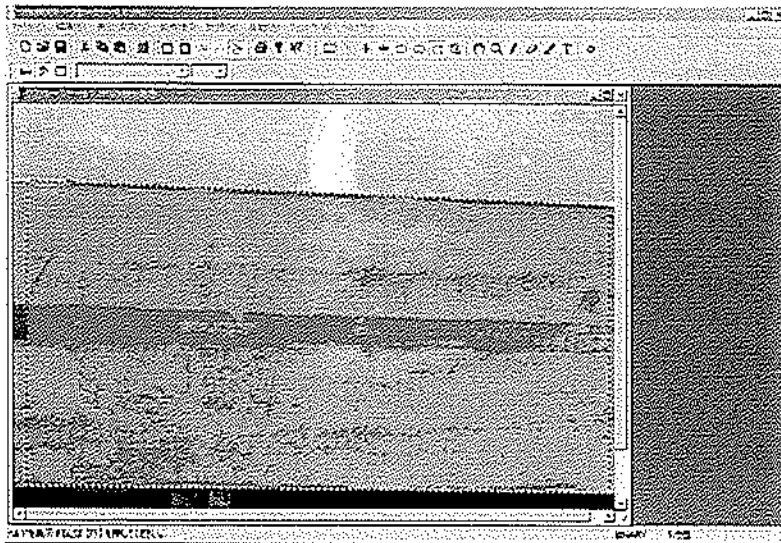
(1) 画像の取り込み



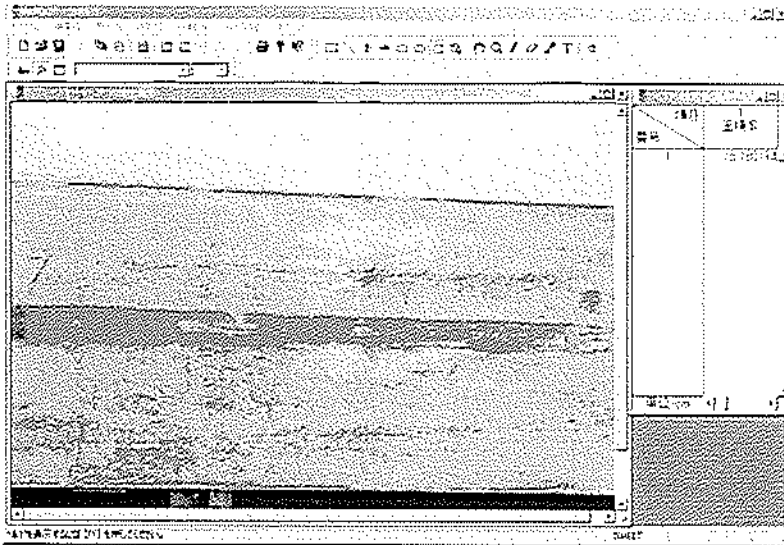
(2) 多角形範囲指定  
ツールで画像処  
対象部を指定



(3) グレースケール  
に変換

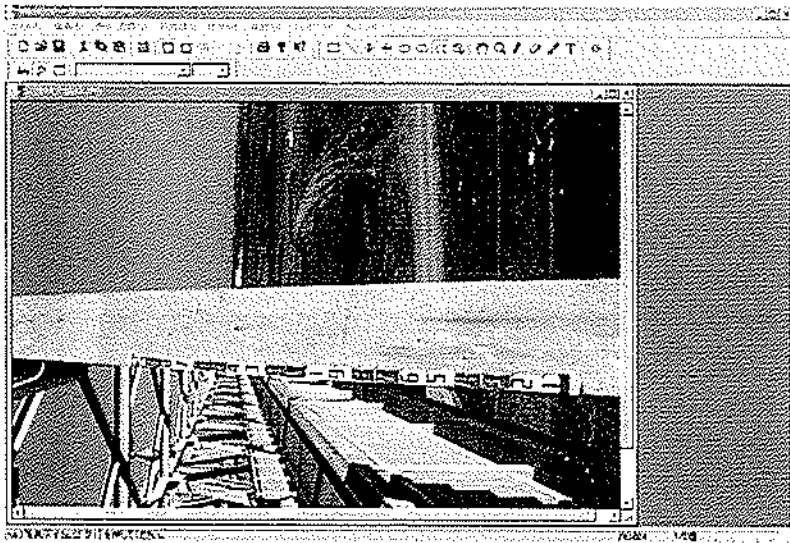


(4) 明度差による劣化  
部の二値化

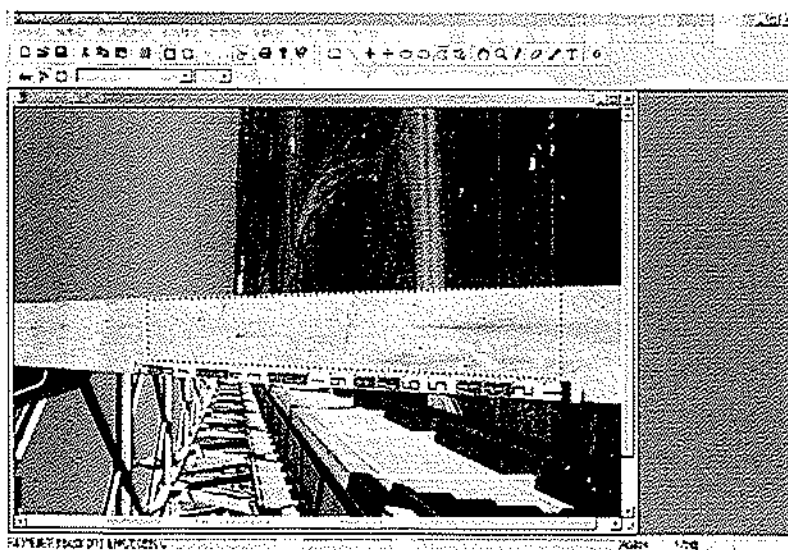


- (5) 二値化部の面積率の解析  
劣化面積率は  
18.2%

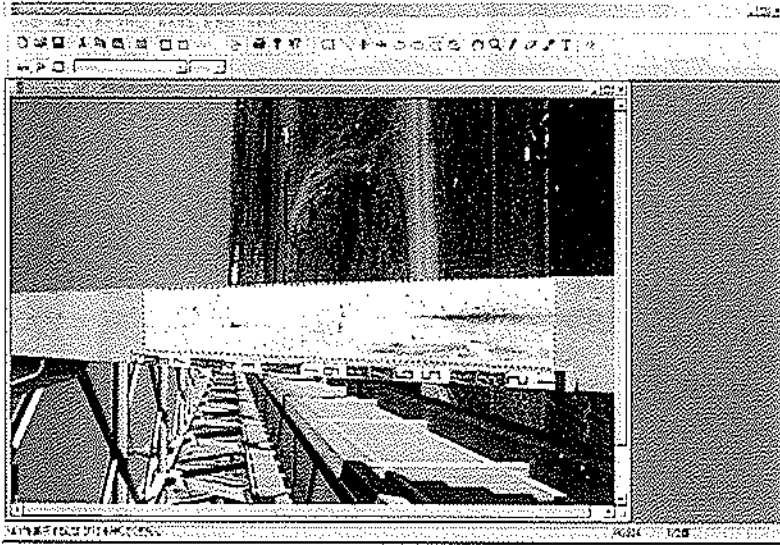
#### 4.4.2. 色抽出からの二値化例



- (1) 画像の取り込み

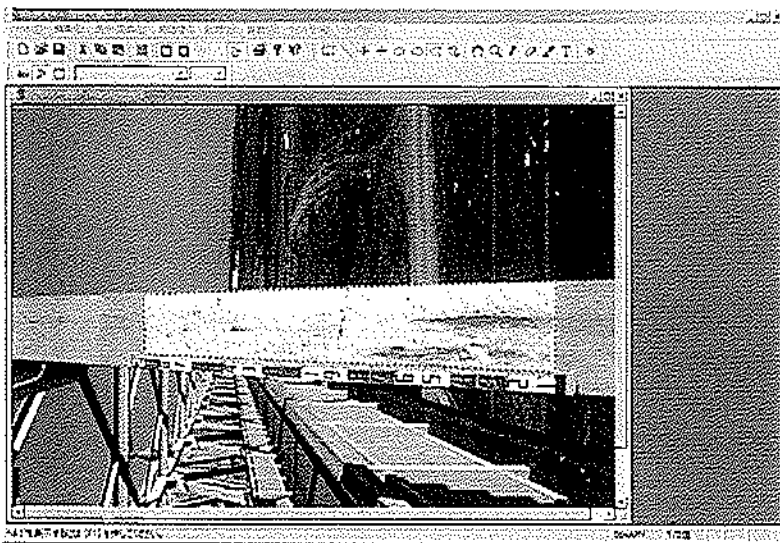


- (2) 多角形範囲指定  
ツールで画像処  
対象部を指定

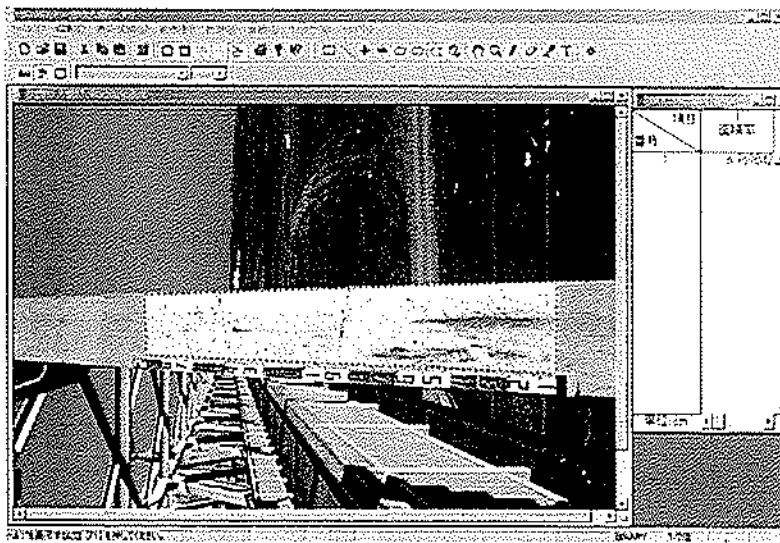


(3) 画像調整

濃度、コントラスト  
の強調



(4) 色抽出による劣化  
部の二値化



(5) 二値化部の面積

率の解析  
劣化面積率は  
7.0%



## 5. おわりに

塗膜の外観評価を、デジタル画像処理による評価に置き換えることは、より客観的な評価を行う手法として実用化可能である。

今後、撮影マニュアル・画像処理マニュアルの整備により、塗膜評価の精度と再現性の向上を図ると共に、塗膜評価が劣化%で得られる利点を塗膜診断システムに反映することも検討するつもりである。

### 塗膜診断研究会

研究委員：守屋 進、斎藤 誠、福島 稔、森 芳徳、金井浩一、安井正広、  
大澤隆英、糟谷 誠、末廣 明、野村繚一、山崎 曜

(順不同、敬称略)