

画像解析による塗装膜厚測定を検討

藤本 修平*

A Feasibility Study of Estimating Method for Thickness of the Self-indicating Coatings by Color Image Analysis

by

FUJIMOTO Shuhei

Abstract

The quality of anticorrosion coatings of offshore structures influences its lifetime. To obtain high quality coating, SI (Self-indicating) coatings technology was developed. The SI paint changes its color depend on the increase of the film thickness and indicates the thickness is enough. However, the film thickness of the SI paint is evaluated qualitatively by visual observation. The author developed quantitative measuring method for the film thickness of the SI paint by color image analysis. The saturation value of the SI paint is approximated by logarithmic function of the film thickness, and the value of the film thickness is estimated by the approximation and comparison with three reference plates. The method enables measure the film thickness with same accuracy as ordinary digital thickness gauge by setting appropriate size for the color analysis.

* 産業システム系

原稿受付 令和 2 年 1 月 21 日

審査日 令和 2 年 3 月 9 日

目 次

1. はじめに	38
2. 乾燥塗膜の膜厚計測	38
2.1 実験方法	38
2.2 実験結果	39
3. 湿潤塗膜の膜厚計測	44
3.1 実験方法	44
3.2 実験結果	44
4. まとめ	45
参考文献	46

記 号

S : 画像の彩度 (Saturation) [-]

T : 塗装の膜厚 [μm]

1. はじめに

造船塗装では、所定の塗装膜厚が確実に塗布されることが特に重要である。そのため、塗装の作業現場で作業者自身が所定膜厚の塗装が達成できたか否かを目視により確認するひとつの方策として、「Self-indicating (SI) 機能」を有する塗料が開発されている¹⁾。SI 塗料は、塗料中の顔料成分の調整により所定膜厚に達するまで段階的に塗膜の色味が変化していく塗料であり、下地の色が見えなくなるまで塗料を塗り重ねれば所定膜厚が確実に確保できる。SI 塗料は膜厚の定性的な評価（所定膜厚の塗装が達成できたかの目視判断）に用いられてきたが、画像解析によって塗膜の色情報を分析すれば定量的な膜厚測定を行える可能性がある。従来は、現場での塗装膜厚測定法は電磁式あるいは超音波式膜厚計（乾燥状態の塗膜用）やウェットゲージ（湿潤状態の塗膜用）によって行われてきた。これらは基本的に点計測であり、塗装膜厚の面的評価（塗装膜厚の分布計測）は困難であった。塗装作業直後に塗装膜厚分布が計測できれば、その場での塗装作業良否判断等ができるため作業者の技能向上等に有用である。そこで、塗装膜厚分布を面的に計測できる可能性のある手法として、本研究では SI 塗料を塗布した試験片を対象に、色情報分析による膜厚測定を試みた。面的計測に向けた基礎検討として、試験片の一定面積についての平均値として膜厚を算出した。

2. 乾燥塗膜の膜厚計測

まず、塗膜が乾燥した状態の試験片を対象に、膜厚計測を試みた。

2.1 実験方法

バフ色（黄土色に似た色）の SI 塗料を塗布した試験片を製作した。試験片の寸法は 150mm×70mm とし、SI 塗料を塗装し膜厚を変えて 11 種を作成した。エアレス塗装機を用い、塗料の仕様に基づき試験片への塗装を行った。膜厚は、デジタル膜厚計 (Elcometer Elcometer456) を用いて計測した。1 枚の試験片についてランダムに 30 ヶ所を測定し、その平均値を膜厚の測定値とした。表 1 に測定の結果（平均値、標準偏差）を示す。図 1(a)に示す様に、各試験片をデジタルカメラ (CASIO HIGH SPEED EXILIM EX-FC150) で撮影し、図の「解析対象領域」を抽出して解析の対象画像とした。解析対象画像のサイズは幅 1000 pixel、高さ 500 pixel である。図 1 (b)に各試験片の解析対象画像を示す。膜厚の増加に伴い、塗膜の色味が変化していくことが判る。

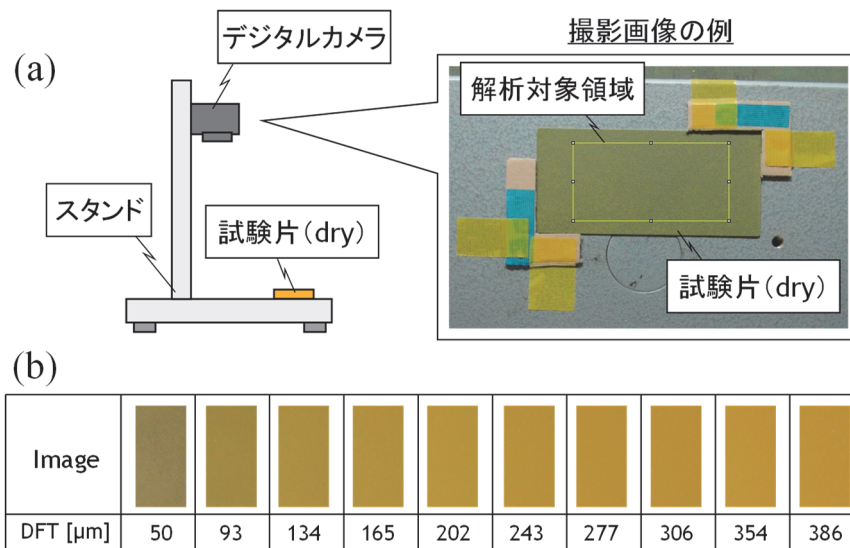


図1 乾燥塗膜計測実験の方法. (a) 画像撮影方法, (b) 膜厚による色の変化

表1 デジタル膜厚計の計測結果（単位： μm ）

平均	49.64	93.46	133.85	165.37	201.54	243.01	277.19	305.67	354.48	385.88	416.72
標準偏差	6.98	8.10	9.64	9.83	7.54	8.41	10.30	11.00	7.90	10.20	13.60

2.2 実験結果

塗膜厚さの変化による色味の変化を定量評価する指標として、画像の RGB 値および HSL 値を検討した。図 2 (a)に示す様に、 R , G , B はそれぞれ色の赤 (Red), 緑 (Green), 青 (Blue) の成分であり、0~255 の値をとる (8 bit カラー画像の場合)。 H は色相 (Hue) で、色の違い (赤, 黄, 緑, 青, ...) を表す量であり、0~ 2π の値をとる。 S は彩度 (Saturation) で、色の鮮やかさを表す量であり、0~1 の値をとる。 L は明度 (Lightness) で、明るさを表す量であり、 S と同様に 0~1 の値をとる。HSL の表現法はいくつかあるが、本研究では図 2 (b)に示す双六角錐モデル²⁾を用いた。

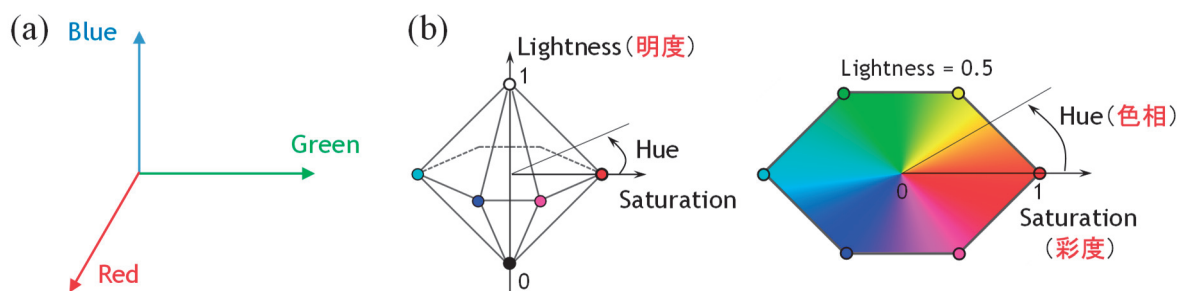


図2 色評価のパラメータ. (a) RGB, (b) HSL (双六角錐モデル)

前記の解析対象画像について以上の 6 パラメータを算出した (図 3)。各膜厚の画像について、すべてのピクセルについてパラメータを算出し、その平均値をとった結果である。図 3 から、 R , G , B , H , S , L のうち、膜厚変化に対する値の変化が最も大きいのは S であることが判る。また、「塗料を塗り重ねるほど塗装色が鮮やかになっていく (彩度 S が大きくなっていく)」と物理的な解釈も容易なことから、本研究では膜厚推定のパラメータとして S を採用した。 S は、 R , G , B の値を用いて以下の式で表現される²⁾。

$$L_{max} = \text{MAX}(R, G, B) \quad (1)$$

$$L_{min} = \text{MIN}(R, G, B) \quad (2)$$

$$L = (L_{max} + L_{min})/2 \quad (3)$$

(1)式の $\text{MAX}(R, G, B)$ は, R, G, B の値のうち最も大きい値を示す. 同様に, (2)式の $\text{MIN}(R, G, B)$ は, R, G, B の値のうち最も小さい値を示す. (3)式の L によって, S は以下の式で算出される.

($L \leq 0.5$ の場合)

$$S = (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min}) \quad (4)$$

($L > 0.5$ の場合)

$$S = (L_{max} - L_{min}) / (2 - (L_{max} + L_{min})) \quad (5)$$

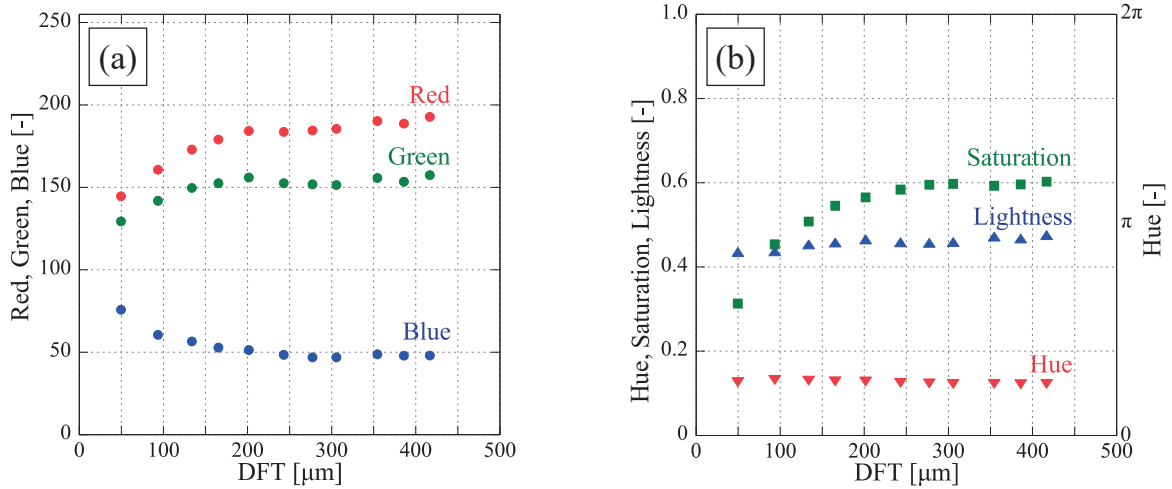


図3 各パラメータの変化 : (a) RGB, (b) HSL

彩度 S を用い, 以下の手順による膜厚推定法を検討した. ① 膜厚が既知の, 複数の試験片の S 値を参照値とする (具体的には, 膜厚が既知の色見本を計測対象と同様の条件で撮影しておく). ② 参照値について, 最小二乗法で近似関数を求める. ③ 膜厚を算出したい箇所の S 値を近似関数に代入し, 膜厚値を推定する.

本研究では, 近似関数として3次関数を採用し, 彩度 S と膜厚 T の関係を以下の式で近似した.

$$S = AT^3 + BT^2 + CT + D \quad (6)$$

図4, 図5に近似関数の算出結果の例を示す. 図4はデジタル膜厚計 (Thickness gauge) による測定値が $134 \mu\text{m}$ の試験片の膜厚を推定するため, 参照値として $134 \mu\text{m}$ 以外の4点, 6点, 8点および10点を採用した各場合の近似関数の算出結果である. 図中の点線が近似関数を表しており, 青色の点が参照値, 橙色の点が値を推定する点である. 最小二乗法で求めた近似関数の係数 A, B, C, D を表2に示す. 同様に, 膜厚値 $202 \mu\text{m}$ (デジタル膜厚計での計測結果) を推定するため, それ以外の4点, 6点, 8点および10点を採用した各場合の近似関数の算出結果を図5に示す. また, 図5の近似関数の係数 A, B, C, D を表3に示す.

以上の様に求めた近似関数 (A, B, C, D) を用いて, 彩度 S から膜厚 T を推定する. いま撮影画像から求めた彩度が S_i である箇所の膜厚値を推定したいとすると, (6)式を変形し,

$$AT^3 + BT^2 + CT + (D - S_i) = 0 \quad (7)$$

として、(7)式の解を求めれば良い。

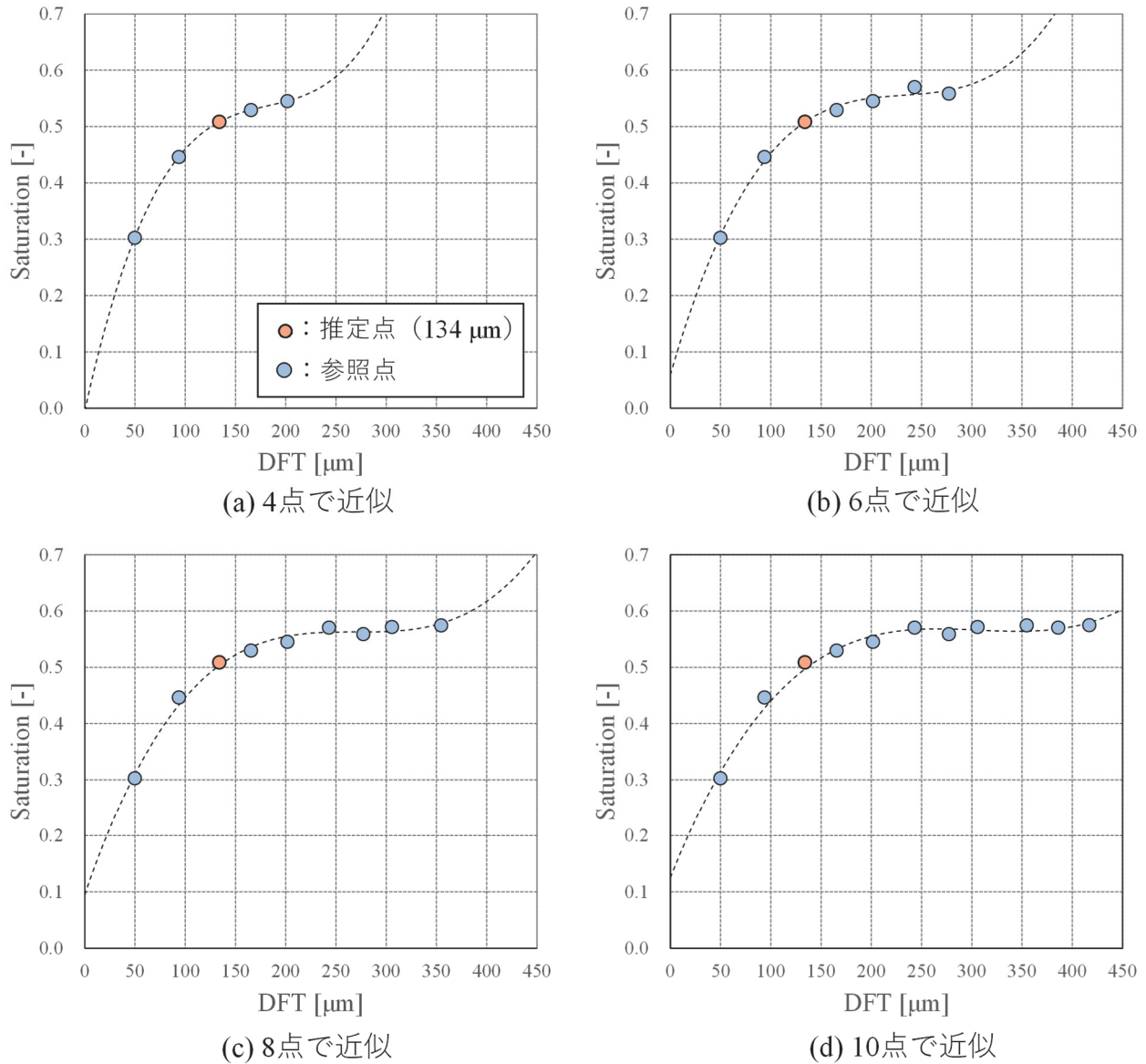


図 4 近似関数の算出結果（推定点：134 μm）

表 2 図 4 の近似関数の係数

	A	B	C	D
図 4(a) (4 点近似)	0.000000077088	-0.000042142073	0.008090375628	-0.004401078393
図 4(b) (6 点近似)	0.000000037206	-0.000025950899	0.006156226817	0.059727815519
図 4(c) (8 点近似)	0.000000023994	-0.000019360024	0.005209275056	0.095334746956
図 4(d) (10 点近似)	0.000000016198	-0.00001487325	0.004473775379	0.125673912986

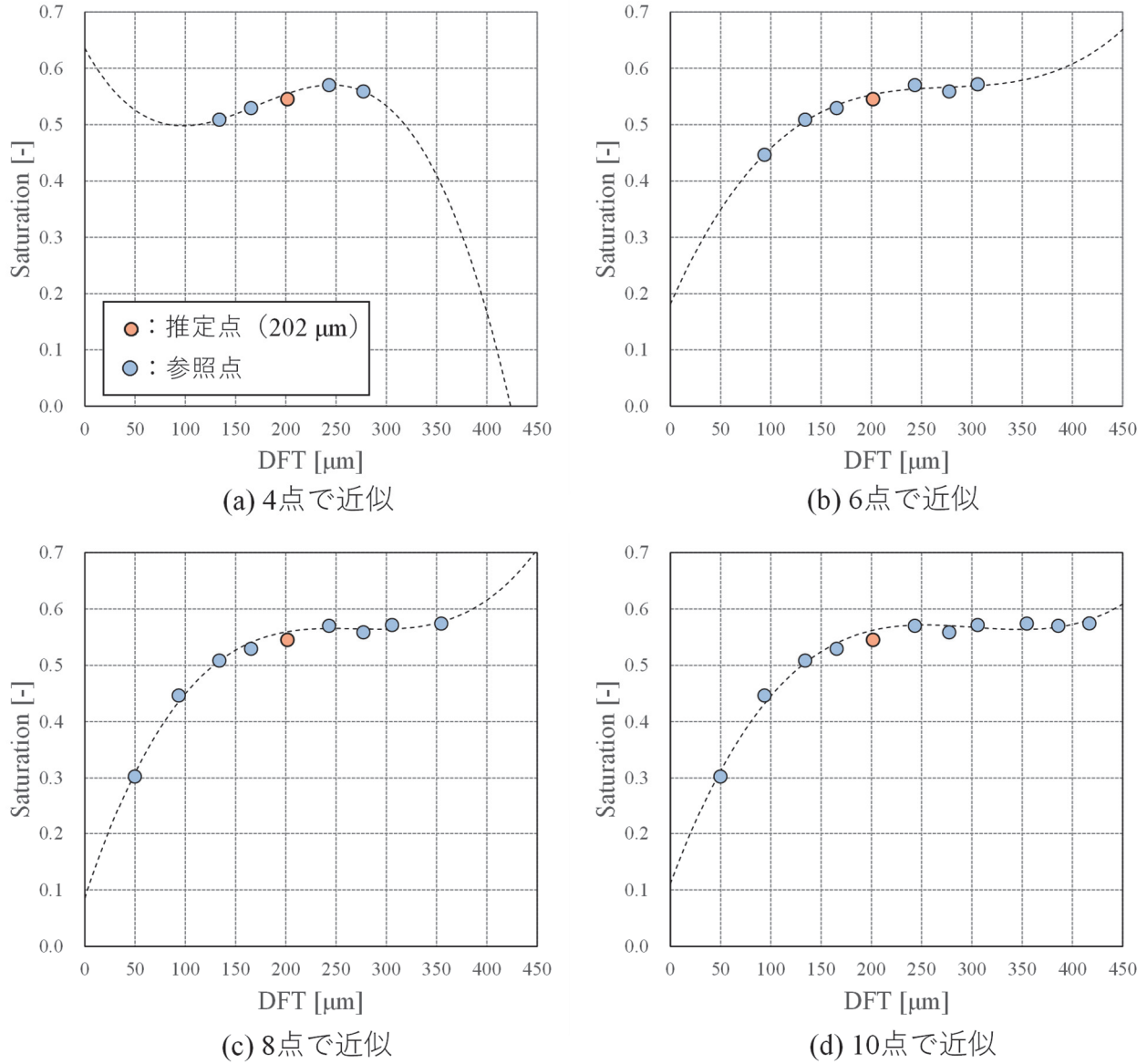


図5 近似関数の算出結果（推定点：202 μm ）

表3 図5の近似関数の係数

	A	B	C	D
図5(a) (4点近似)	-0.000000044968	0.00002315427	-0.00323858253	0.635380414432
図5(b) (6点近似)	0.000000017176	-0.000014262126	0.004022339959	0.181646068425
図5(c) (8点近似)	0.000000025071	-0.000020257399	0.005416536914	0.085665114561
図5(d) (10点近似)	0.000000018101	-0.000016352311	0.004798305828	0.111327631236

図4, 図5の各結果から推定した膜厚値を図6に示す. 参照値から算出した係数 A, B, C, D と膜厚が $134\mu\text{m}$, $202\mu\text{m}$ (デジタル膜厚計での計測結果)の試験片の彩度の計測結果 $S=0.5089$ ($134\mu\text{m}$), 0.5455 ($202\mu\text{m}$)を用いてカルダノの方法により3次方程式(7)を解いた. 図6の膜厚推定値を表4に示す. 表4の(参照範囲)は, 使用した参照点の範囲を示す.

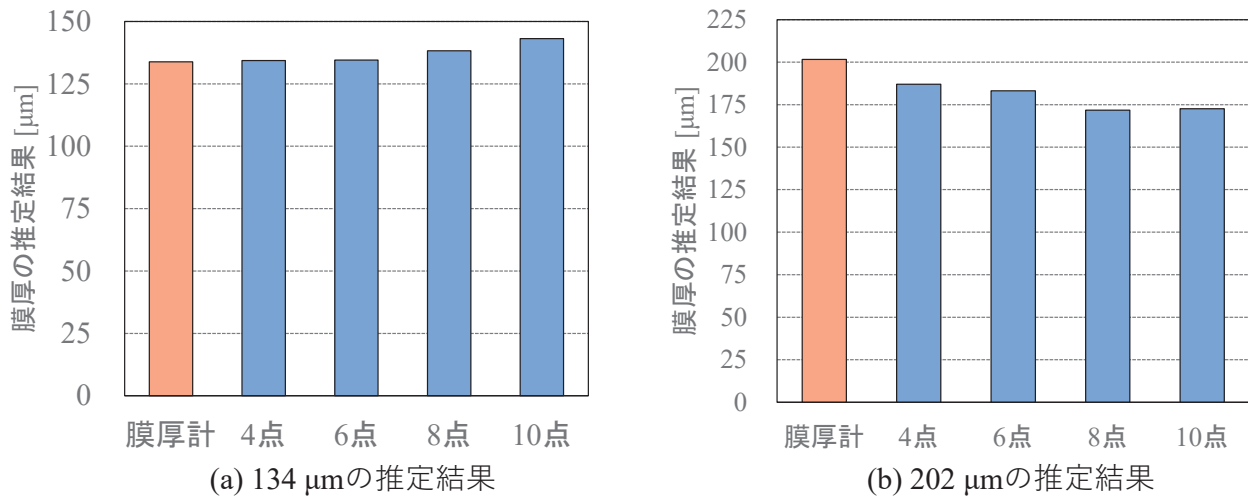


図6 膜厚の推定結果

表4 推定された膜厚値

膜厚計 [μm]	4点近似 [μm]	6点近似 [μm]	8点近似 [μm]	10点近似 [μm]
134	134	135	138	143
(参照範囲)	50 - 202	50 - 277	50 - 354	50 - 417
202	187	183	172	173
(参照範囲)	134 - 277	93 - 306	50 - 354	50 - 417

図6, 表4から, 膜厚の推定値は近似に用いる点数(参照点)が少ない方がデジタル膜厚計による実測値に近いことが判る. これは, 推定したい点の近傍に参照値をとって近似関数を求めた方が, 局所的に(推定したい点の近傍で)は推定精度が高くなるためと考える.

また, $134\mu\text{m}$ と $202\mu\text{m}$ の結果を比較すると, $202\mu\text{m}$ の方がデジタル膜厚計による測定値と推定膜厚値の差が大きくなっている. これは, 図3(b)の様に, 膜厚が厚い領域では彩度 S の変化が小さくなっているためと考える. このことから, 本手法では彩度 S の変化が明確な領域を対象とした方が良いことが判る. 実際の計測の際には, あらかじめ計測する塗膜厚の範囲を決めておき, その範囲内で膜厚が既知の色見本を準備する. 図4(a)の結果を例にとると, 塗膜厚の測定範囲は $50\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ とし, 参照点(色見本)を $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ と等間隔に4点程度とれば, 良い精度で膜厚推定ができると考える.

なお, 彩度 S の値やその他の R, G, B, H, L の各値は使用するカメラや照明機器あるいはカメラ撮影時の設定等によって変化する. そのため, 計測対象の塗装面と膜厚が既知の色見本を同時に(または同一の撮影条件で)撮影しておく必要がある.

3. 湿潤塗膜の膜厚計測

前章の膜厚推定は、乾燥状態の塗膜を対象とした。実際の現場への適用を考えた場合、塗装直後で湿潤状態の塗膜を計測する必要がある。湿潤状態は乾燥状態よりも塗膜表面での反射光が強く、画像解析上のノイズが増大することが予測される。そうしたノイズ源の存在を踏まえ、湿潤状態塗膜の膜厚計測法を検討した。

3.1 実験方法

塗装直後の試験片（膜厚の異なる5種）を対象に画像を撮影し、湿潤状態塗膜の膜厚推定を試みた。図7に画像撮影の方法を示す。カメラと試験片との間の距離は1.3 mである。小型のCMOSカメラ（IDS UI-3240CP-C-HQ）を用い、レンズはLM12JC1MS（興和光学）を用いた。① 小型で可搬性に優れる、② レンズの絞り値調整や偏光フィルタの調整が可能である、③ PCに接続しての画像取り込みが容易等の理由から、小型のカメラを使用した。湿潤塗膜表面での反射光の影響を低減させるため、偏光フィルタ（EMVL-PL720）を用いた。また、現場での撮影を想定し不均一な照明源（画像のノイズ源のひとつ）として白色LED光源で試験片を片側から照射した。明るさに偏りがある悪条件の場合を想定し、カメラの撮影条件設定でそれをどの程度緩和できるかを検討する目的で実施した。表面反射は偏光フィルタの偏光板の方向の調節により、不均一な照明源はカメラレンズの絞り値の調節により、それぞれの影響低減を図った。

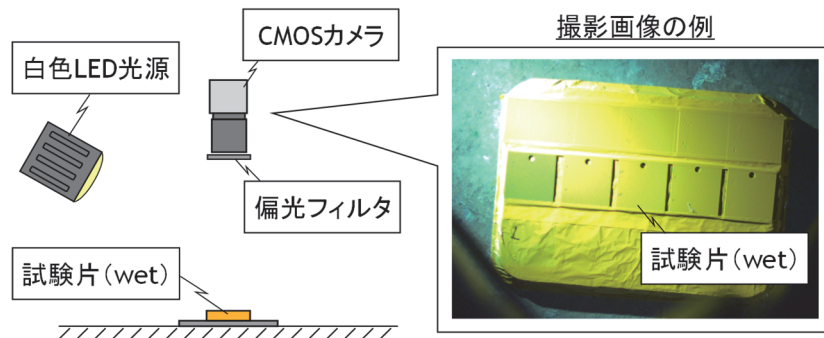


図7 湿潤塗膜計測実験の方法

3.2 実験結果

図8に撮影画像を示す。図中のWFTは、ウェットゲージで計測した塗装直後の各試験片の湿潤膜厚（Wet Film Thickness）である。レンズの絞り値が小さい（レンズを通る光量が多い）「1.4」や「2」では不均一な照明の影響から画像内で明るさの偏り（特に、90 μm の試験片の様に照明が強く当たり明るすぎる箇所）が生じているが、「4」の様に絞り値を大きくして光量を低下させると過剰な明るさが軽減される。

レンズの絞り	1.4					
	2					
	4					
	16					
		40	90	153	210	266
WFT [μm]						

図8 wet 試験片の撮影画像

図9(a)に湿潤状態塗膜について膜厚変化による彩度 S の変化を算出した結果を示す。乾燥塗膜と同様の膜厚推定法の適用を想定し、膜厚 T の増大に対する彩度 S の変化が滑らかな単調増加をする場合を適切な撮影条件と判断した。図9(a)より、レンズ絞り値が「1.4」、「2」の条件では不均一照明の影響により彩度が複雑な変化をしている。これは、照明が強く当たった箇所（90 μm の試験片近傍）では明るさが過剰となり、本来の彩度の変化が捉えられていないためと考える。また、絞り値「16」では光量が少なすぎたため、膜厚の変化に対して彩度がほとんど変化していない。対して、絞り値「4」の条件では滑らかで単調増加の変化をしていることから、本実験の撮影条件の中では「4」が絞り値の最適値であると判断した。絞り値「4」での画像を用いて、乾燥塗膜計測と同様の手法で膜厚推定を試みた。ウェットゲージによる測定結果が153 μm の試験片に対して、近似関数を求める際の基準値として40 μm 、90 μm 、210 μm 、266 μm の4点を用いた。図9(b)、表5が膜厚推定の結果である。ウェットゲージによる計測値とほぼ等しい推定値が得られた。偏光フィルタやレンズ絞り値等の撮影条件を適切な値に設定することで、湿潤塗膜についても画像解析による膜厚推定法が適用できることが判った。

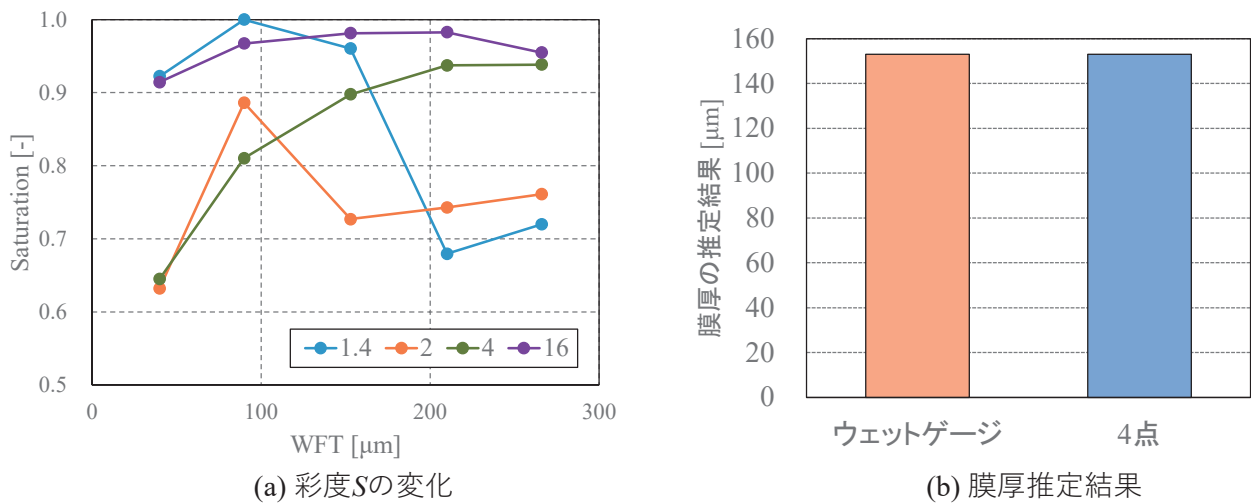


図9 wet 試験片の計測結果

表5 推定された膜厚値

ウェットゲージ $[\mu\text{m}]$	4点近似 $[\mu\text{m}]$
153	153
(参照範囲)	40 - 266

4. まとめ

非接触で塗装後の膜厚分布が計測できる可能性のある手法として、塗料の色情報を分析して膜厚を推定する手法を検討した。本研究では、面的計測に向けた基礎として、試験片の一定面積についての平均値として膜厚を推定した。乾燥状態、湿潤状態のいずれの塗膜についても本手法の適用可能性を示した。図10に塗装膜厚推定の流れを示す。今後は、膜厚分布の面的計測の実現に向けて、平均値をとる領域の大きさをどの程度にすれば良いか（面的計測の空間分解能の設定）を見極めていく必要がある。平均値をとる領域が小さければ空間分解能は向上するが、画像のノイズの影響を受けやすくなるため膜厚推定の精度が落ちると想定される。空間分解能と推定精度の両立を検討する必要がある。

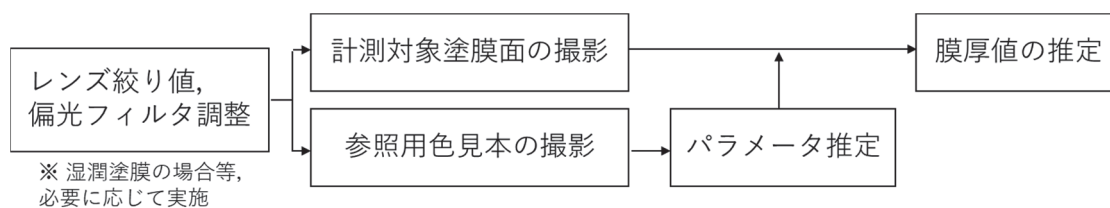


図 10 塗膜厚推定の流れ

謝 辞

本研究は日本ペイントマリン（株）との共同研究として実施した。関係各位に深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) N. Sasaki and M. Takayama: SI Technology and its unique paint property, Proceedings of International Symposium on Shipbuilding Technology (ISST) -Fabrication and Coatings-, (2007), pp. 141-144.
- 2) デジタル画像処理編集委員会：デジタル画像処理, CG-ARTS 協会, (2004), pp. 66-67.