

塗装鋼橋の塗替え時における赤外線による
膜厚計測手法の基礎評価

坂本 達朗* 山中 翔*

A Study of Infrared Coating Thickness Measurement Method when Repainting of Coated Steel Bridge

Tatsuro SAKAMOTO Sho YAMANAKA

Repainting of coated steel bridges is performed manually, and construction management is required to prevent variations in film thickness. However, the coating thickness measurement equipment used on site measures film thickness locally, which makes it difficult to measure a large number of points over a wide area. The purpose of this paper is to determine the applicability of a film thickness measurement method using an infrared camera. To this end, we report the results of the evaluation of the optical properties of coatings applied to steel plates with various surface profiles and the results of a study on the material composition of coatings suitable for this film thickness measurement.

キーワード：橋りょう，塗替え，塗膜，膜厚，防食，計測，赤外線

1. はじめに

長期的な使用を想定する鋼橋（以下、塗装鋼橋とする）では、防食を目的として塗装が施されている。塗装の防食性には膜厚が大きく影響することが知られている¹⁾。その一方、経年劣化した塗装の性能回復のために実施される塗替え工事において、塗装は手作業で行われている。このため、塗装の品質は塗装作業者の技能に左右されることになり、膜厚にばらつきが生じないような施工管理が求められる。

塗替え時の膜厚に関する施工管理には、一般的にウェット膜厚ゲージを用いた乾燥前での膜厚計測や、硬化した膜厚に対する電磁式膜厚計での膜厚計測が挙げられる（図1）²⁾。ただし、これらの器具はピンポイントで膜厚を測定するため、広範囲に精度よく膜厚を把握することが難しい。このため現状の施工管理としては、ウェット膜厚ゲージを部分的に使用するほか、塗装面積に対する塗料の使用量から膜厚を大まかに管理するに留まっている。近年、塗装分野における人的資材の減少などに伴い施工品質の低下が懸念されることから、膜厚不足による塗替え後の早期の腐食発生に伴う再塗替えのための労力やコストの発生を避けるため、塗替え時の膜厚を広範かつ定量的に計測する手法の構築が望まれている。



図1 電磁式膜厚計での膜厚計測例

* 材料技術研究部 防振材料研究室

こうした状況に鑑み、筆者らは赤外線による膜厚計測手法に着目した。これは、塗膜表面から放射される赤外線の強度が膜厚によって異なることを利用して、赤外線カメラの撮影画像から広範囲に膜厚を推定する方法である。過去には、塗装された鋼道路橋の最表層の塗膜を対象とした、近赤外線の波長域（約 700～2500nm）での測定事例が報告されている³⁾⁴⁾。ただし、これは紫外線による塗膜の減耗程度の把握を目的としたものであり、塗替え時の施工管理を目的としたものではない。

本論文では、これまでに実施した、赤外線カメラを用いた膜厚計測手法の適用可能性を把握することを目的とした各種の検討にあたり、種々の表面形状の鋼板に対して塗装した場合の塗料の光学特性を評価した結果と、赤外線カメラによる膜厚計測に適した塗料の材料配合について検討した結果⁵⁾について報告する。

2. 赤外線による膜厚計測対象の設定

2.1 対象とする塗料の設定

鋼橋の塗替え時に主に防食性を担うのは鋼板近傍に配置される塗料であり、一般には下塗り塗料と呼ばれる。特に、鋼板に対して塗布する 1 層目の塗料には、長期間の防食性を確保するため、鋼板との長期密着性や材料としての長期耐久性が要求される。また、塗装鋼橋の塗替えでは同一の作業者が最終層まで塗装するのが一般的であることから、施工上の不具合を早期に発見するため、1 層目の塗料の膜厚を把握することが望ましい。以上より、本論文では塗替え時の 1 層目の塗料を膜厚計測対象とした。

膜厚計測の対象塗料として、本論文ではエポキシ樹脂塗料を計測対象とした。この理由として、エポキシ樹脂塗料が塗装鋼橋を含む鋼構造物の防食用塗料として一般的であることや、鉄道鋼橋のみならず道路鋼橋の塗装仕様にもエポキシ樹脂塗料が 1 層目の塗料として使用されていることが挙げられる。

2.2 赤外線による膜厚計測の測定原理

鋼板に塗布された塗料の膜厚を赤外線によって計測する場合、塗膜表面における赤外線の反射および塗膜中の赤外線吸収を考慮する必要がある。鋼板上に塗装された塗膜に照射した光のエネルギー挙動について、簡略化した模式図を図 2 に示す。図 2 より、塗膜表面から放射されるエネルギーは、以下の式(1)、(2)で示すように、塗膜内部に侵入せず表面で反射した成分 E_1 と、塗膜内部に侵入後、鋼板表面で反射して再び塗膜表面から放射された成分 E_2 の和として与えられる。

$$E_1 = \rho_p E \tag{1}$$

$$E_2 = \tau_p \{ \rho_m (\tau_p E) \} \tag{2}$$

ここで、外部から塗膜表面に照射された光エネルギーは E 、塗膜の反射率と透過率は ρ_p 、 τ_p 、また鋼板の反射率は ρ_m である。

E_1 に着目すると、塗膜の表面状態は一般的に膜厚に依存しないものの、局所的に極端に膜厚が薄い箇所が存在し、かつ顔料が均一に分散していない場合には、表面粗度の変化による塗膜表面での散乱や、局所的に光を透過することなどにより、 E_1 の挙動が変化する可能性がある。また塗膜中を通過する E_2 に着目すると、ランベルト・ベールの法則（所定濃度の溶液中を通過する光エネルギーの吸収量は光路長に依存する）に従い、固体の樹脂内部を通過する光エネルギーの透過率は光路長の関数で与えられる⁶⁾。したがって、異なる膜厚の塗膜に対して赤外線を照射すると、光路長によって塗膜の表面から放射される成分

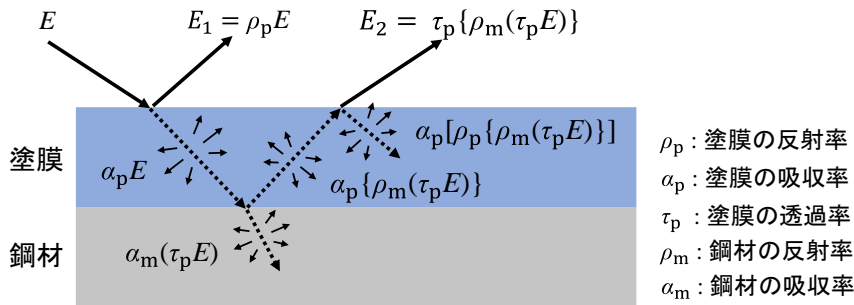


図2 塗膜に入射する赤外線の挙動を簡略化したイメージ

E_2 に差が生じる可能性が考えられる。さらに鋼板表面における反射率も影響し、鋼板表面の状態により E_2 の強度が変化する可能性がある。

以上から、実際の測定ではこれらの影響を総合的に考慮した上で E_1, E_2 の強度と膜厚の相関を把握し、測定条件を構築する必要がある。

3. 分光光度計を用いた材料の光学特性評価

本章では、エポキシ樹脂塗料の光学特性を詳細に把握するため、膜厚をパラメータとした場合の光学特性を分光光度計によって評価した。また、被塗物である鋼板の表面状態の光学特性についても評価した。

3.1 エポキシ樹脂塗料の光学特性評価

3.1.1 試験方法

エポキシ樹脂塗料は、鋼構造物塗装設計施工指針²⁾（以下、塗装指針とする）に規定される鋼構造物用厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料下塗（以下、基準塗料とする）と、塗料製造会社3社から市販されているエポキシ樹脂塗料（以下、汎用塗料A～汎用塗料Cとする）とした。基準塗料とは、塗装指針において塗膜の防食性を評価する際の基準として設計されたもので、塗装鋼橋に用いられるエポキシ樹脂塗料と同等の防食性を有するほか、塗料の配合が開示されている（表1）。汎用塗料はいずれもJIS K 5551に規定されるC種1号に該当するものであり、基準塗料と同程度の防食性を有する。なお、塗料の色相については基準塗料がさび色であるため、これに合わせて全ての塗料をさび色とした。

上述の各塗料を用いて、単膜状の試験体（以下、フィルム状試験体とする）と鋼板に塗装した試験体（以下、塗装試験体とする）の2種類の試験体を作製した。フィルム状試験体は、ポリエチレン板に各塗料をエアスプレーで塗装し、乾燥後に約10mm角で塗膜を剥離して作製した。エアスプレー塗装の際に適切な粘度とするため、基準塗料の希釈率を30%、各汎用塗料の希釈率を15%とした。塗装試験体は、寸法70×75×3.2mm、表面粗さがJIS B 0601に規定される10点平均粗さ（ Rz_{JIS} ）で約30 μ mとなるようにアルミナ研削材でブラスト処理した鋼板（以下、ブラスト鋼板とする）に対して、フィルム状試験体と同じ条件で塗装したものとした（図3）。各塗料の一般的な目標膜厚は60 μ mであることから、本試験では20, 40, 60, 80 μ mを目標として塗装した。

光学特性の評価に使用した機器は分散型の分光光度計（日本分光株製、V770）であり、各試験体へ照射した光の透過率および反射率を測定した。ここで、透過率は物質に照射した光の強度に対する透過光の強度の割合であり、反射率は物質に照射した光の強度に対する反射光の強度の割合である。測定する波長域は200～2500nmとした。

表 1 基準塗料の配合²⁾

材料名		重量割合	
主剤	樹脂	エポキシ樹脂	30.0
		変性樹脂	5.0
	顔料	防錆顔料	5.0
		体質顔料	30.0
		着色顔料	10.0
	添加剤	分散剤	1.0
		消泡剤	0.1
		シランカップリング剤	1.0
	溶剤	キシレン	9.9
		メチルイソブチルケトン	9.0
硬化剤	ポリアミドアミン	32.0	

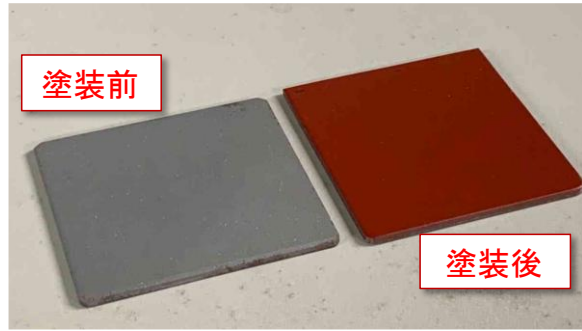


図 3 塗装試験体の外観

3.1.2 試験結果と考察

各塗料の光学特性を評価した結果、基準塗料と3種類の汎用塗料には類似の傾向が確認された。ここでは基準塗料を用いたフィルム状試験体の透過率と反射率、塗装試験体の反射率を図4に示す。フィルム状試験体の透過率は、測定した全波長域において膜厚が大きくなるほど減少する傾向にあった。これは、塗膜は顔料によって着色されており、膜厚の増加とともに光が透過しにくくなるためと考えられる。一方、反射率は約1000nm以上の波長域において膜厚が小さくなるほど減少する傾向にあった。この原因の一つに、顔料の分散状態が挙げられる。フィルム状試験体の裏側からLEDライトを照射した場合の外観を図5に示す。膜厚が20μmの場合には赤い色相がまだらに分布し、膜厚が40μmの場合でも色相がわずかにばらつくなど、膜厚が小さいと不均一な色相に見える。これにより、基準塗料中の着色顔料の粒子は塗膜中で均一に分散しておらず、膜厚が小さい場合には光が通過しやすくなり、その分反射率が減少したと推定される。

塗装試験体の反射率は、フィルム状試験体の反射率と類似した結果となった。この要因の一つに、ブラスト鋼板の表面粗さは約30μmRz_{JIS}であり、塗膜を透過した光が鋼板表面での散乱によってほとんど反射せず、測定結果に大きく影響しなかったことが挙げられる。このように、膜厚によって反射率が異なる波長域が存在したことから、反射光の特定の波長域の強度を測定することにより、膜厚を計測できる可能性が得られた。

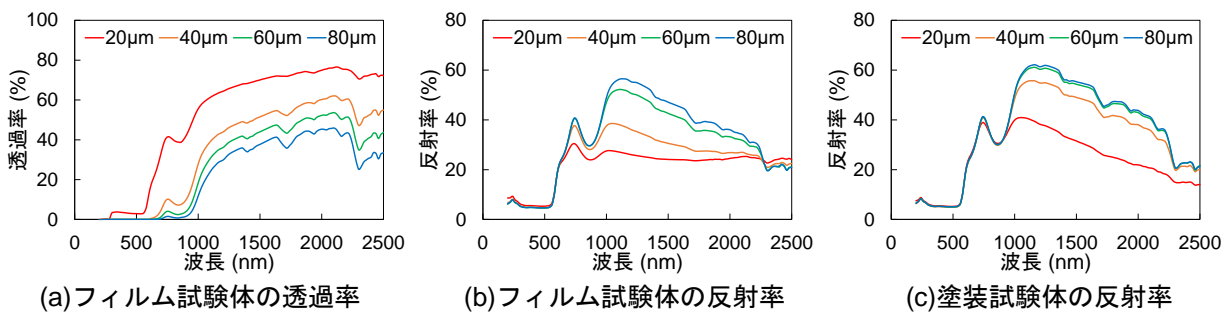


図 4 基準塗料の膜厚における透過率または反射率

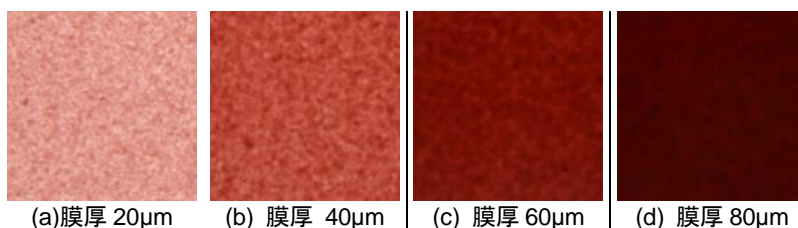
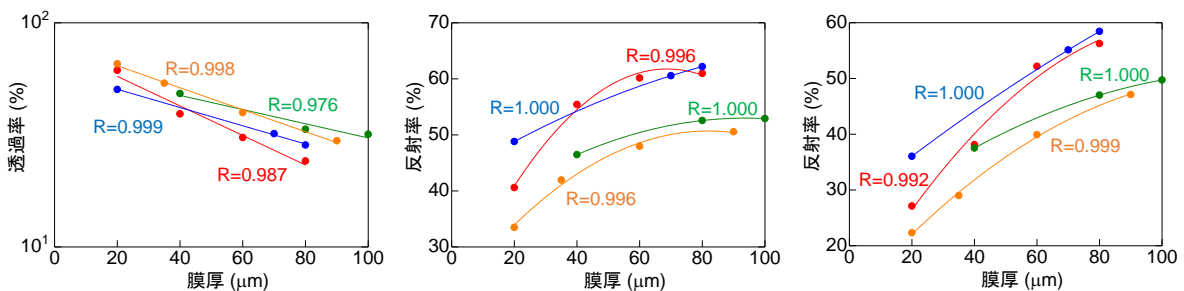


図 5 塗膜の裏側からLEDライトを照射した場合の外観

ここで、特定の波長に着目した場合の膜厚と光学特性の関係として、膜厚の影響が他の波長と比較して大きい1100nmの波長について、各種塗料の膜厚と光学特性の関係を図6に示す。また、測定値から回帰分析を行った際の相関係数を併せて示す。なお、膜厚と光学特性に関する詳細なメカニズムは現時点では明らかではないため、各測定結果に対して最も相関の強い分析結果を選定し、透過率においては縦軸を対数とした場合の線形回帰、反射率においては2次関数による回帰とした。これらの結果から、いずれの場合も強い相関を示し、膜厚の増加に伴って透過率は減少、反射率は増加する傾向があることがわかった。この結果より、測定した膜厚の範囲においては反射率または透過率から膜厚を定量的に計算できることが確認された。文献3によると、反射光の強度に応じて赤外線カメラの撮影画像の輝度が変化する。このため、膜厚に対する反射率や透過率の変化量が大きな塗料配合を検討することにより、赤外線カメラの撮影画像から膜厚を高精度に把握できると考えられる。



(a)フィルム試験体の透過率 (b)フィルム試験体の反射率 (c)塗装試験体の反射率

注1: 各色は次の通り. 赤...基準塗料, 橙...汎用塗料A, 緑...汎用塗料B, 青...汎用塗料C

図6 1100nmにおける膜厚と透過率または反射率の関係

3.2 鋼板表面の光学特性評価

3.2.1 試験方法

鋼板表面の光学特性の評価には、前節のブラスト鋼板に加えて黒皮鋼板と磨き鋼板に対して基準塗料を塗装した塗装試験体を用いた。これは、鉄道の架設年代の古い塗装鋼橋では黒皮鋼板に塗装されたものが存在することや、塗替えの際の素地調整時に金属光沢を有する鋼板面が部分的に形成されるためである。黒皮鋼板はJIS G 3101に規定される熱間圧延鋼板のうち、熱間圧延時に形成される酸化皮膜（黒皮）が残存したものであり、磨き鋼板はJIS G 3141に規定されるブライト鋼板である。塗装方法は前節の方法と同様とした。また、光学特性については分光光度計を用いて反射率を測定した。このとき、塗装していない鋼板表面についても測定を行った。

3.1.2 試験結果と考察

塗装試験体を用いた各種鋼板の反射率測定結果を図7に示す。反射率の序列は測定した全波長域において概ね同一となり、大きい順に磨き鋼板、ブラスト鋼板、黒皮鋼板となった。ブラスト鋼板の表面には微細な粗さが付与されており、黒皮鋼板の表面には製造工程の熱間圧延時に生じた酸化皮膜が存在し、磨き鋼板と比較して平滑ではない上に組成が異なる。このため、各鋼板の反射率が異なる原因として、ブラスト鋼板においては表面粗さに起因する散乱、黒皮鋼板においては表面の酸化皮膜での散乱や吸収が生じたことが挙げられる。

次に、各塗装試験体の反射率測定結果を図8に示す。磨き鋼板の塗装試験体では、約1700nm以上の波長域で膜厚の増加とともに反射率が低下するなど、前節のフィルム状試験体の透過率測定結果（図4(a)）と類似する傾向にあった（図8(a)）。しかしながら、1000~1700nmの波長域では膜厚の増加とともに反射率が高くなっており、前節のフィルム状試験体の反射率測定結果（図4(c)）と類似する傾向にあること

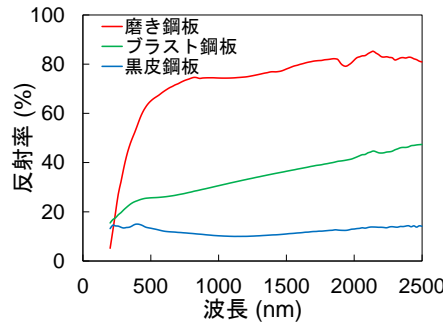


図7 各種鋼板の反射率

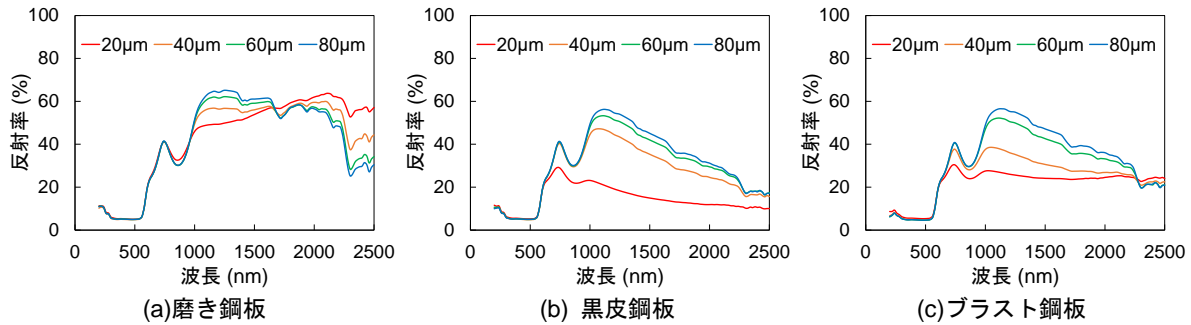


図8 各種鋼板に塗装した塗装試験体の反射率

が分かった。このように、塗装試験体の反射率が波長域によって異なる傾向を示す要因の一つに、樹脂の吸収特性が挙げられる。約 1700nm 以上の波長域では、エポキシ樹脂や塗料中の顔料種に由来すると考えられる吸収ピークが多く存在している。このため図 2 に基づき考察すると、塗膜中に侵入した光はエネルギーを失いながら進行し、塗膜に侵入した光の光路差すなわち膜厚に依存する E_2 の影響が大きくなると推定される。さらに、図 7 に示すように、磨き鋼板表面の反射率は他の鋼板と比較して大きいことから、反射率は前節のフィルム状試験体の透過率と類似すると考えられる。このため、膜厚の増加とともに反射率が低下した可能性がある。

黒皮鋼板およびプラスト鋼板の塗装試験体では、全波長域でフィルム状試験体の反射率測定結果（図 4(b)）に類似した傾向が確認された（図 8(b), 図 8(c)）。この要因として、黒皮鋼板とプラスト鋼板の反射特性が挙げられる。図 8 で示したように、両鋼板の反射率は磨き鋼板と比較して小さい。このため E_2 よりも E_1 の影響が大きくなり、フィルム状試験体の反射率測定結果に類似した測定結果が得られたと推定される。

以上の結果から、鋼板に塗装された通常塗料の膜厚を計測する場合、黒皮鋼板とプラスト鋼板については反射率から膜厚を計測できる可能性が得られた。なお、磨き鋼板については、膜厚と反射率の相関が逆転する 2 つの波長域が存在するため、本試験からは膜厚の計測可能性を判断できず、今後の検討項目としたい。

4. 塗料中の着色顔料の塗膜特性への影響評価

前章の結果から、フィルム状試験体と塗装試験体の双方とも反射率が膜厚と相関することが見出されたことから、赤外線カメラによる赤外線領域の反射エネルギーを可視化することで、膜厚を広域にかつ定量的に測定できる可能性が得られた。また、上記結果が得られた要因の一つに塗料中の着色顔料の存在が挙げられ、塗膜の光学特性は着色顔料の配合量や分散程度に大きく影響することが推定された。

本章では着色顔料の配合量と塗膜の光学特性との関係把握を目的として、着色顔料の配合割合の異なるエポキシ樹脂塗料の光学特性を評価した。また、着色顔料の配合割合を変えた場合の塗膜の長期耐久性について、塗膜の環境遮断性能や室内での促進劣化試験から評価した。

4.1 赤外分光法による塗膜の光学特性評価

4.1.1 試験方法

塗料には、着色顔料の配合割合を 0~40 の範囲で調整した 7 種類の基準塗料（以下、基準塗料 A~G とする）を用いた。このとき、塗装作業性が大きく変化しないように、体質顔料と着色顔料の重量の合計が同一になるようにした。各基準塗料の配合を表 2 に示す。なお、通常の配合は基準塗料 D に該当する。これらを用いて、前章と同様の手順で塗装試験体を作製した。膜厚は 20, 40, 60, 80 μm を目標とし、分光光度計を用いて塗装試験体の反射率を測定するとともに赤外線カメラ撮影を行った。使用した赤外線カメラ（浜松ホトニクス製、C12741-03）は光電素子にインジウム、ガリウム、ヒ素を用いた InGaAs カメラであり、計測可能な波長域は約 950~1700nm である。この赤外線カメラでは、出力した撮影画像において、当該波長域で計測可能な範囲でのエネルギー強度を 256 階調の輝度で表現することができる。このため前章の試験結果を考慮すると、試験体から放射される赤外領域のエネルギーを適切な強度に調整することで、当該カメラで膜厚の計測は可能と考えられる。撮影にあたり、光源には赤外線領域での発光強度を有するハロゲンランプを使用した（図 9）。

表 2 基準塗料の配合²⁾

材料			重量部						
			A	B	C	D	E	F	G
主剤	樹脂	エポキシ樹脂	30						
		変性樹脂	5.0						
	顔料	防錆顔料	5.0						
		体質顔料	40	37	34	30	20	10	0
		着色顔料	0	3	6	10	20	30	40
	添加剤	分散剤	1.0						
	消泡剤	0.1							
	シランカップリング剤	1.0							
	溶剤	キシレン	9.9						
		メチルイソブチルケトン	9.0						
硬化剤	溶剤型ポリアミドアミン	32.0							



図 9 赤外線カメラの撮影状況

4.1.2 試験結果と考察

前章と同様、膜厚と光学特性の関係を詳細に把握するため、塗装試験体に対して特定の赤外線波長における分析を実施した。ここでは、本試験条件において膜厚に対する反射率の変化幅が大きくなった波長域である 1200nm を選定した。なお、前章で選定した波長域（1100nm）とは異なる要因として、本章で用いた塗料の配合を変更したことが挙げられる。膜厚と反射率の関係を図 10 に示す。図中の曲線は、最も相関の強い分析結果である 2 次回帰分析の曲線である。これらの結果から、いずれの場合も膜厚と反射率には強い相関があり、測定した膜厚の範囲においては反射率から膜厚を定量的に計算できる可能性が示唆された。

なお、エポキシ樹脂塗料の一般的な目標膜厚は 60 μm であり、この値の前後の膜厚をなるべく高精度で測定できることが望ましい。そこで、各基準塗料の膜厚が 80 μm と 40 μm の場合の反射率を図 10 から実測し、これらの差分を算出した結果を表 3 に示す。これより、着色顔料の配合割合が 10 である基準塗料 D が最も大きな差分を示し、目標膜厚±20 μm で形成された塗膜については膜厚を高精度に測定できると

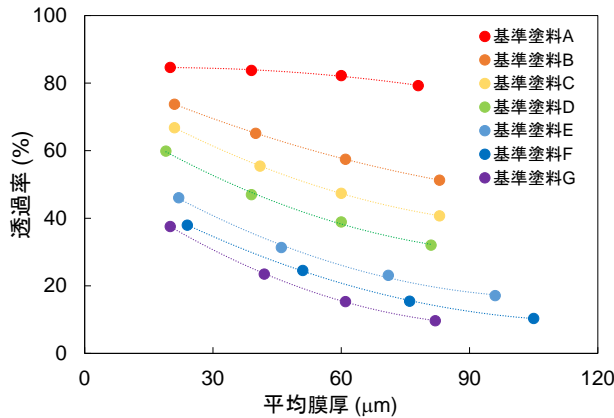


図 10 1200nm における膜厚と反射率の関係

表 3 図 10 における各基準塗料の膜厚 80μm と膜厚 40μm の反射率の差分

塗料名	反射率の差分
基準塗料 A	0.4
基準塗料 B	8.4
基準塗料 C	12.7
基準塗料 D	13.9
基準塗料 E	12.7
基準塗料 F	11.0
基準塗料 G	8.6

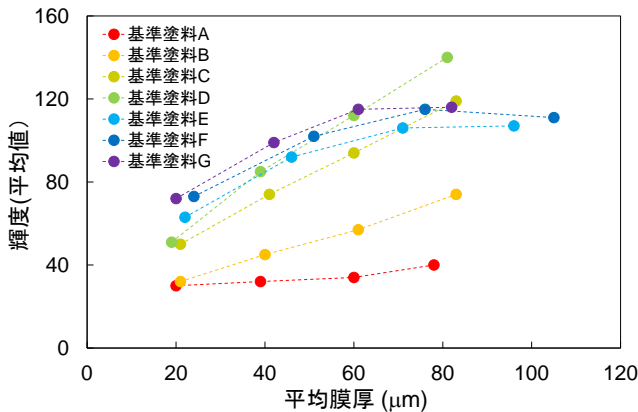


図 11 膜厚と赤外線カメラ写真の輝度の関係

表 4 図 11 における各基準塗料の膜厚 80μm と膜厚 40μm の輝度の差分

塗料名	輝度の差分
基準塗料 A	9.0
基準塗料 B	26.0
基準塗料 C	43.0
基準塗料 D	50.0
基準塗料 E	21.0
基準塗料 F	23.0
基準塗料 G	17.0

考えられる。

各塗装試験体の赤外線カメラ画像の輝度と膜厚の関係を図 11 に示す。なお、輝度については画像の中心を約 40×40mm でトリミングした範囲 (100×100=10000 画素) の輝度を平均化したものである。図 11 に示した結果は、図 10 に示した分光光度計の測定結果と異なり、基準塗料 B, C, D が比較的線形に近い結果となったのに対して、基準塗料 E, F, G が曲線に近い結果となり、後者は大きな膜厚に対して輝度の変化量が小さく膜厚を計測しにくくなる可能性が示唆された。このような違いが生じた要因の一つに、分光光度計で測定した際の光源と、赤外線カメラで撮影した際の光源が異なり、赤外線領域におけるエネルギー分布も異なっていたことが挙げられる。また、図 10 に示した分光光度計の測定結果が 1200nm の波長を分析したものであるのに対して、図 11 に示した測定結果は赤外線カメラが測定できる波長域 (約 950~1700nm) での光学特性が影響したものであり、対象とする波長域が異なることが挙げられる。

各基準塗料の膜厚が 80μm と 40μm の場合の輝度を図 11 から実測し、これらの差分を算出した結果を表 4 に示す。これより、赤外線カメラの撮影においても基準塗料 D が最も大きな差分を示し、目標膜厚 ±20μm で形成された塗膜について膜厚を高精度に測定できると考えられる。

4.2 塗膜の耐久性評価

4.2.1 試験方法

基準塗料 A~D を用いて、前章と同様の手順によってフィルム状試験体と塗装試験体を作製した。なお、基準塗料 E~G については、膜厚の増加とともに膜厚計測が困難になる可能性が示唆されたため、本試験では割愛した。また、鋼板には寸法 150×70×3.2mm のブラスト鋼板を用いた。

塗膜の耐久性評価には、一般的な評価方法とされる環境遮断性評価と防食性評価を実施した。環境遮断性評価には膜厚を 60 μm としたフィルム状試験体を用い、JIS Z 0208 に規定される透湿カップ法を採用した。これは、所定時間に対して塗膜を通過した水蒸気量を測定し、その値から算出される水蒸気透過係数⁷⁾から塗膜の環境遮断性を評価するものである。

防食性評価には、塗装指針の附属書 C に記載される鉄道総研式複合サイクル試験²⁾ による室内促進劣化試験を実施した。試験体には塗装試験体を用いた。膜厚は防食性に大きく影響することから、1 回塗りでの膜厚を 60 μm とし、1, 2, 4 回塗りの塗装試験体を試験に供した。なお、塗膜損傷個所での防食性を評価するため、試験体には塗膜損傷を模擬したスクラッチを導入し、塗膜の健全部とスクラッチ部の両方について、塗膜変状程度から防食性を評価した。

4.2.2 試験結果と考察

透湿カップ法による各試験体の測定結果を表 5 に示す。比較のため、エポキシ樹脂塗料を用いる塗装仕様の上塗りに用いられるポリウレタン樹脂塗料の水蒸気透過係数を併記した。ポリウレタン樹脂塗料の水蒸気透過係数は 7.6 であるのに対して、基準塗料 A~D の水蒸気透過係数は 1 前後であった。このことから、各基準塗料の水蒸気透過係数に大きな違いはなく、環境遮断性に対する着色顔料の配合量の影響は小さいと考えられる。

室内促進劣化試験結果については、一般的な環境の 10 年程度に相当する 10 サイクルまで実施した結果、健全部ではいずれの試験体にも変状は見られなかったため、スクラッチ近傍に発生した膨れの体積（以下、膨れ体積とする）から評価した。なお、膨れ体積についてはレーザ変位計（株式会社キーエンス製、LJ-G080）を用いて試験体の表面形状を計測し、健全部を基準面として算出した（図 12）。このときのスポット径は $\phi 80\mu\text{m}$ 、測定ピッチは 50 μm とし、計測は目視で膨れが容易に視認できるようになった 4 サイクル以降で実施した。サイクル数と膨れ体積の関係を図 13 に示す。1 回塗りの場合、10 サイクル時点で膨れ体積が最も小さいのは基準塗料 C であり、最も膨れ体積が大きくなった基準塗料 A と比較して半分以下の膨れ体積になるなど、着色顔料の配合割合によってスクラッチの変状程度に違いが生じることが分かつ

表 5 各塗料の水蒸気透過係数

塗料名	水蒸気透過係数 ($\text{g}\cdot\text{cm}/\text{m}^2/\text{day}/\text{mmHg}$)
基準塗料 A	0.9
基準塗料 B	0.9
基準塗料 C	0.9
基準塗料 D	1.0
ポリウレタン樹脂塗料	7.6

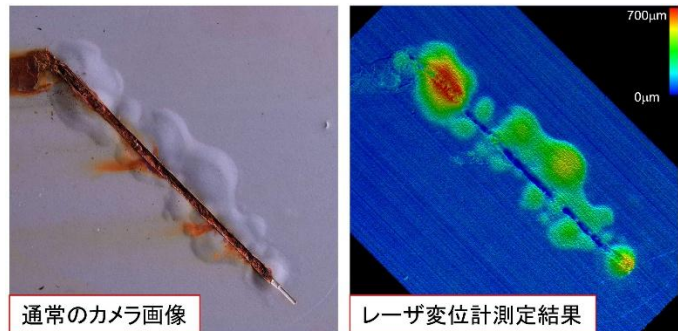


図 12 スクラッチ部の外観とレーザ変位

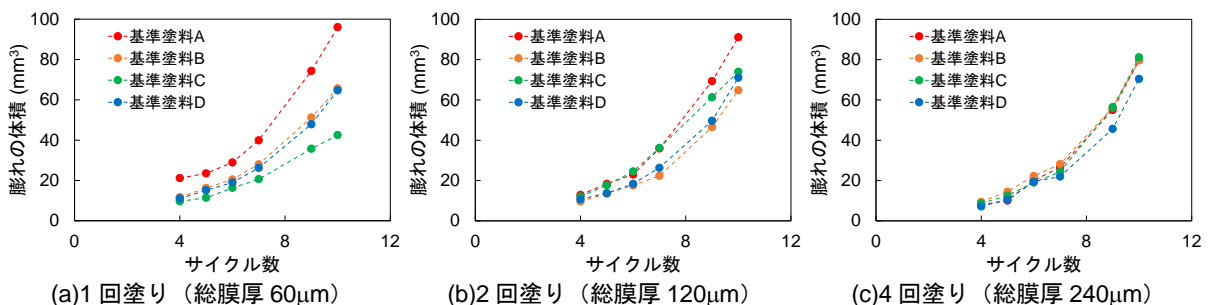


図 13 各試験体のサイクル数と膨れ体積の関係

た。ただし、塗り回数が増すごとにその体積差は小さくなり、4回塗りの場合には大きな違いは確認されなかった。近年採用事例の多い塗装仕様の目標総膜厚は230 μm であることを考慮すると、実用上、防食性に対する着色顔料の配合量の影響は小さいと考えられる。

以上の結果から、着色顔料の配合割合を0~10の範囲で変えた場合、その割合は塗膜の長期耐久性に大きく影響しないことが分かった。このため、前節の塗膜の光学特性評価結果を考慮すると、基準塗料Dが長期耐久性と赤外線による膜厚計測の観点から最も適切な配合と考えられる。

5. おわりに

塗装鋼橋の塗替え時の施工管理にあたり、赤外線カメラを用いた膜厚計測手法の適用可能性を把握することを目的として、当該計測手法による膜厚計測対象をエポキシ樹脂塗料とし、同塗料を鋼板に塗装した際の光学特性を評価するとともに、赤外線カメラによる膜厚計測に適した塗料配合を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 分光光度計を用いて塗装鋼板の光学特性を評価した。その結果、塗装鋼板の反射率は膜厚と関連し、赤外線による膜厚計測の可能性を得た。また、塗料中の着色顔料や鋼板表面の成分や粗度などの表面状態が計測結果に影響することを見出した。
- (2) 目視では膜厚の違いを判断困難な塗装鋼板に対して赤外線カメラ撮影を行った結果、撮影画像の輝度から膜厚の計測が可能であることを見出した。
- (3) 着色顔料の配合量を変えた場合のエポキシ樹脂塗料の光学特性を評価した結果、膜厚を精度よく計測するための塗料中の着色顔料の最適な配合量が存在することを見出した。
- (4) 着色顔料の配合量を変えた場合の塗膜の長期耐久性への影響を評価した結果、複合サイクル試験による促進劣化試験や透湿カップ法による水蒸気透過性の測定結果から、実用的な膜厚の場合には着色顔料の配合割合が塗膜の長期耐久性に大きく影響しないことを明らかにした。

なお、膜厚の増加とともに塗膜に対する光の透過率は低下するため、塗替え時の膜厚計測にあたり、第2層目以降での膜厚計測、すなわち複数回の塗り重ねを行った塗膜の膜厚は計測困難であることが懸念される。このため、本手法は塗装作業者の塗装に関する技能を把握することを主な目的として、第1層目の膜厚分布や塗りむらを計測することを念頭に適用することが適切と考える。今回得られた知見を活用して、赤外線カメラを用いた膜厚計測手法の適用可能性を引き続き検討する予定である。

文献

- 1) J.D.keane : Minimam Paint Film Thickness for Economical Protection of Hotrolled Steel Against Corrosion, J.Paint Technology, Vol.41, pp.372-381, 1969.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，2013
- 3) 溝上善昭, 阪上隆英：赤外線カメラを用いた塗膜劣化評価による実橋調査, 土木学会年次学術講演会, Vol.73, I-027, pp.53-54, 2018
- 4) 松本悠希, 阪上隆英：近赤外線カメラを用いた重防食塗装最表層の損耗度定量評価, 土木学会年次学術講演会, Vol.73, I-028, pp.55-56, 2018
- 5) 坂本達朗, 山中翔：塗装鋼橋の塗替え時を対象とした赤外線による膜厚計測手法の検討, 防錆管理, Vol.68, No.9, pp.295-304, 2024
- 6) H.Chen, A.Baitenov, Y.Li : Thickness Dependence of Optical Transmittance of Transparent Wood : Chemical Modification Effects, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol.11, No.38, pp.35451-35457, 2019.
- 7) K.Nagai : Gas Barrier Properties of Plastic Products for Packaging Applications, Journal of Printing Science and Technology, Vol.52, No.2, pp.149-155, 2015.