(105) 計測・制御

低コヒーレンスディジタルホログラフィを用いた 車体用ボディパネル中の光輝材分布の評価 Bright material distribution in car body panels analyzed

by low coherence digital holography

反田 大貴†

横田 正幸†

Hiroki Tanda[†]

Masayuki Yokota[†]

*島根大学 自然科学研究科

1 はじめに

自動車のボディパネルなど多くの工業製品の塗装は、複数の機能性塗料を数10µmの膜厚で塗り 重ねて構成されている.特にメタリック塗装には、 塗膜内に微細な光輝材が含まれており、これらの 配向性やムラが塗装面の仕上がりに大きく影響する^[1].この光輝材の状態を評価する方法には、測 定対象の反射光の強度分布から光輝材の深度方向 の分布を可視化する光干渉断層画像法(OCT)^[2,3] や、高解像度の三次元イメージを作成することで 光輝材の配向を観察する共焦点顕微鏡^[4]がある. しかし、上記の方法では、取得できる情報が干渉 強度のみであることや、視野が数100µmに制限 される問題がある.

そこで我々は、低コヒーレンスディジタルホロ グラフィ(LCDH)による多層塗膜評価法を提案 した^[5].本手法では可干渉距離が10 μm 程度の光 源を用いるため、多層塗膜中において所望の層か らの反射光のみを記録し、再生可能である.従っ て、所望の層のみの情報を持つ反射光の波面から、 対象の見た目の情報を持つ振幅と、形状の情報を 持つ位相が取得できる.これをメタリック塗装に 適用すると、振幅から光輝材の深度分布を作成で き、位相から塗膜表面形状が得られる.また、数 mm から数10 mm 程度の範囲を数 μm の横分解能 で一度に測定可能である.

これまで、塗膜構成・色合いが等しく、見栄え の良否が異なる2種類の車体用ボディパネルから 1箇所ずつ抜き出し、LCDHを用いて測定してき た.今回はそれぞれのパネルから6箇所測定し、 パネル面内の光輝材の分布や塗膜各層の厚さを評 価した結果について報告する.

2 実験方法

実験系を Fig. 1 に示す. 中心波長 λ = 840.0 nm, コヒーレンス長 lc = 12.5 μ m の SLD(Super luminescent diode)を光源とした. 出射光をレンズ でコリメート後に BS(Beam splitter)で二分割し, 一 方を測定試料(Sample)に, 他方をピエゾ鏡



Fig. 1 Experimental setup: SLD, Super luminescent diode; SF, Spatial filter; BS, Beam splitter; P, Polarizer; PZT, Piezo electric transducer; Cooled CMOS, Cooled complementary metal-oxide semiconductor.

(PZT-mirror)に照明し、それぞれからの反射光を物体光、参照光とした.物体光と参照光の干渉により生じる干渉縞(ホログラム)を電子冷却式 CMOS カメラ (Cooled CMOS) で記録した.なお、ホロ グラムの再生計算にコンボリューション法^[6]を用 いたため、測定試料への照明範囲が CMOS の撮 像範囲 (9.4×7.0 mm²)よりも広い場合は再生像 が劣化する.そのため、測定試料には開口 5.0×5.0 mm²の黒画用紙で作成したマスクを貼り付け,測 定範囲を制限した.

実験に用いた 2 種類の測定試料には, 塗膜構成・色合いは市販車両で使用されている暗灰色の 車体用ボディパネルと等しいが, 測定試料間で見 栄えの良否が異なるパネルを使用した. 測定試料 の塗膜構成を Fig. 2 に示す. 以後見栄えの良いパ ネルを DG〇, 悪いパネルを DG×と呼称する.

なお、各パネルの見栄えの評価には金属光沢感を示す指標であるフロップインデックス(FI)^[7]



Fig. 2 Coating constitution of measurement samples.

	500 nm	550 nm	600 nm
DGO	74.29	100.61	88.73
$\mathrm{DG} imes$	71.67	96.79	85.75

Table 1 Flop index values of the measurement samples.



Fig. 3 Measurement samples.

を用いた. 測定試料に対して 45°の角度で光を入 射させたときの正反射光に対して、15°、45°、 110°の角度を持つ光の明度をそれぞれ L_{15}^{*} , L_{45}^{*} , L_{110}^{*} とすると計算式は以下の式で表される

$$F.I. = 2.69 \cdot (L_{15}^* - L_{110}^*)^{1.11} / (L_{45}^*)^{0.85}.$$
 (1)

この値が大きい程メタリック塗装では見栄えが良いとされている.一例として波長 500,550,600 nm を用いた FI によるパネルの評価結果を Table 1 に示す.

各パネルからそれぞれ6箇所抜き出したものを 測定試料とした.測定に用いたパネルと抜き出し た部位をFig.3に示す.なお,抜き出した測定試 料の位置を白線で表し,測定範囲を破線で示した.

ホログラム記録は直動ステージを 2.0 μm ピッ チで走査する度に、位相シフト法^[8]を用いて行っ た.なお、直動ステージの位置Δ*d*は、クリア層表 面からの反射光による再生像を取得した位置を 0 μmとし, BS から遠ざける方向の符号を負とした. また、ステージの走査範囲はΔ*d*が 10 μm~-120 μm の計 130 μm とした.

3 結果と考察

DG○, **DG**×それぞれの測定試料において記録 したホログラムに再生計算を適用し, 各走査位置 での強度・位相画像を取得した. 一例として **DG** ○, **DG**×の1,6番における塗膜表面と光輝材付近 の強度・位相画像を Fig. 4~7 に示す.

DG〇,DG×の各測定試料から得られた強度・ 位相画像を比較すると,DG〇に比べてDG×は, 塗膜表面の平坦度が低く,光輝材の分布位置が深 い傾向にあることが分かった.また,どちらのパ ネルも測定試料の番号が小さくなるほど光輝材は 深い位置に分布している傾向があることが分かっ た.これはパネルに塗布した塗料が乾燥前に垂れ てしまうことなどが原因だと考えられる.

次に、各測定試料における光輝材の深度方向の 分布を可視化するため、強度画像からボクセルイ メージを作成し、それを用いて強度による閾値処 理を行った断層画像を作成した.断層画像の作成 手順のフローチャートを Fig. 8 に示す.なお、塗 膜表面と比較して光輝材の反射光の強度が微弱な ため、塗膜表面部分を除いたΔd = -30~-120 μmの



(a) Intensity images (b)

(b) Phase images

Fig. 7 Reconstructed images of the $DG \times 6$.

① *Δd* = -30 ~ -120 μm の範囲の強度画像を深さ方向に 積み重ねてボクセル画像 1 を作成.

②ボクセル画像1の一平面の全画素において,1画素 ごとに深度方向の最大強度とその深度位置を特定.

③求めた最大強度とその深度位置以外は 0 としたボ クセル画像 2 として作成.

④ボクセル画像2中の最大強度値を1となるように規格化後, 閾値を0.1 に設定.

⑤閾値以下を0としてボクセル画像3を作成.

⑥ボクセル画像3のy軸に垂直な断層画像を作成.

Fig. 8 Procedure for creating the cross-sectional image.

強度画像を用いた.また,今回は光輝材が分離し, より粒の量が多い分布になる様, 閾値を 0.1 に設 定した.強度による閾値処理を行ったボクセルイ メージから求めた断層画像を Fig.9 に示す.

そして, 強度による閾値処理を行ったボクセル イメージを用いて, 各測定試料面内における光輝 材の深度分布の平均値を求め, Table 2 にまとめた.

DG○と比較してDG×は約33μm深い位置に光 輝材が分布していることが分かった.これより, 光輝材の深度方向の分布がメタリック塗装におけ る見栄えの良否を決定する要因の1つであると考 えられる.また,どちらのパネルも測定試料の番 号が小さくなるほど深い位置に分布している傾向 があることが断層画像からも確認できた.

次に,パネルにより光輝材の深度分布に差が生 じる原因を調べるため,測定試料の切断面を金属





Table 2 Depth position of bright material.

	DGO	$\mathrm{DG} imes$
1	-46 µm	-80 µm
2	-46 µm	-84 µm
3	-42 µm	-78 μm
4	-44 µm	-74 μm
5	-40 µm	-74 µm
6	-40 µm	-68 µm



Fig. 10 Microscopic images of the cutting surface.

顕微鏡で観察した.各パネルの観察画像を Fig. 10 に示す.なお,測定試料の切断面は粒度 10,000 番 の研磨紙で研磨後,超音波洗浄機で研磨面を洗浄 した.

Fig. 10 から, DG○と比べて DG×のクリア層が 厚いことが分かった.これより,パネルによる光 輝材の深度分布の差はクリア層の厚みが影響して いると考えられる.

クリア層の厚みが異なる原因の1つとして、ロ ボット塗装における精度の問題が考えられる.ロ ボット塗装は塗装面を監視し、所定の塗装が完成 したかを判定できるセンサがないため、被塗物の 下地や環境の変化に応じた塗膜調整ができない^[9]. したがって、パネルにクリア層を塗布する前の下 地の状態や塗布時の環境によってクリア層の厚み が変化し、見栄えが変化するのではないかと考え られる.

4 まとめ

暗灰色の見栄えの良否が異なる2種類の車体用 パネルにおいて、それぞれ6箇所について測定し た.これに加えて、ホログラムから得られた強度 画像からボクセルイメージを作成し、それに対し て強度による閾値処理を行った断層画像を作成し た.得られた断層画像からパネル面内における光 輝材の深度分布や塗膜各層の厚さを評価した.

見栄えが良いパネルに比べ,悪いパネルは光輝 材の深度分布が約33 μm 深いことが分かった.

また,測定試料の切断面を金属顕微鏡で観察した結果,見栄えの良いパネルに比べて悪いパネル はクリア層が厚いことが分かった.

これより, 塗膜内に含まれる光輝材の配向性や 分布ムラに加えて, クリア層の厚さが見栄えの良 否に影響を与えている可能性が示唆された.

5 参考文献

[1] 中山泰 他, "高エネルギー放射光を用いた X 線イメージングによるメタリック塗膜形成過程観 察方法", 塗装光学, 51, 314-321 (2016)
[2] Mark Brezinski,「Optical Coherence Tomography Principles and Applications」, (2016), ACADEMIC PRESS

[3] 中岡豊人,森健二, "工業用 OCT システムに

よる膜厚評価および塗膜乾燥過程観察への適用", 塗装工学,50,376-382 (2016) [4] 相馬孝吏,岩松明宏,"メタリック塗装の光輝 材分布解析",第32回塗料・塗装研究発表会講演 予稿集,25-29 (2017) [5] 岡田正樹,横田正幸,"低コヒーレンスディジ

タルホログラフィを用いた多層塗膜中の光輝材分 布ならびに塗装外観の評価",塗装光学,53, 213-221 (2018)

[6] 早崎芳夫[編著],「ディジタルホログラフィ」,

(2016), 朝日出版

[7] 上原康博, "定着プロセスと高画質定着のポイント", 日本画像学会誌, 54,61-69 (2015)

[8] I. Yamaguchi and T. Zhang, Phase-shifting digital holography, Optics letters, 22, 16, 1268-1270, (1997)
[9] 相沢憲輔, "塗装用ロボットの現状と稼働実

例", 色材, 55,97-102 (1982)