

平成27年度革新的ものづくり産業創出連携促進事業

(戦略的基盤技術高度化支援事業)

「光干渉断層画像化法による塗装膜検査システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成28年3月

委託者 東北経済産業局

委託先 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

目 次

第 1 章 研究開発の概要

1.1	研究開発の目的・概要	1
1.1.1	研究開発の目的	1
1.1.2	研究開発の概要	1
1.2	研究体制	2
1.2.1	研究組織	2
1.2.2	管理体制	2
1.2.3	管理員および研究員	3
1.2.4	協力者	4
1.3	成果概要	5
1.3.1	事業履行状況	5
1.3.2	目標達成度	5
1.4	研究実施場所	7
1.5	知的財産取得状況	7
1.6	当該プロジェクトの連絡窓口	7

第 2 章 本論

2.1	塗装膜への OCT の最適化	8
2.1.1	塗装膜の分析	8
2.1.2	最適な光源の選択	10
2.1.3	光プローブの最適化	12
2.2	塗装膜厚計測システムの開発	13
2.2.1	微動光プローブの開発	13
2.2.2	塗装膜厚計測システムの開発と評価	15
2.3	塗装膜解析システムの開発	17
2.3.1	塗装膜解析システム用光プローブの開発	17
2.3.2	塗装膜解析システムの開発と評価	19
2.3.3	塗装膜評価アルゴリズムの開発	26

第 3 章 全体総括

3.1	研究開発成果	30
3.2	事業化計画	31

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の目的・概要

1.1.1 研究開発の目的

自動車ボディの塗装では工程の短縮と VOC 削減のために 3 ウェットオン塗装などの高度な塗装技術が開発され導入されている。しかし、積層された塗装膜の各層膜厚を非破壊で計測する方法はなく、現在は製造条件管理と電磁界や渦電流を利用した全膜厚の計測によって塗装品質を管理している。また、異物の巻き込みなどの塗装不良解析は、塗装面を研ぎ出して不具合発生工程を調査する必要がある、手間も時間もかかることから解析の負担が大きくフィードバックにも時間がかかる。こうした課題を解決するため、非接触で断層解析を行うことが可能な光干渉断層画像化法(OCT : Optical Coherence Tomography)の技術を応用して、塗装膜の各層の膜厚計測や塗装膜の断層イメージングによる不具合解析の迅速化を実現することを目指す。

1.1.2 研究開発の概要

本研究の鍵となる計測技術である OCT とは、一般的な光学干渉計では光源に短波長であるレーザー光源を利用するのに対して、スペクトル幅を持つ光源を利用することで干渉計における光分岐後の光路長が丁度バランスしたときにだけ特異的に干渉を示す現象を利用した計測手法である。この方法を利用すれば試料内に浸入した光が試料表面及び内部での散乱による反射光について、干渉信号を解析することで反射強度と反射位置を把握することができ、試料の断面情報を非接触で取得することが可能となる。特に、干渉光を分光解析するスペクトルドメイン型 OCT(SD-OCT)では、ラインセンサのフレームレートで断層情報を非常に高感度に取得可能である。

これまでに予備実験として、現在、我々が保有している SD-OCT で塗装膜を観察した結果、塗装表面とその内部に存在する散乱体の観察が可能であることが分かっている。こうした結果を踏まえて、より観察性能を上げることにより、詳細な塗装状態の計測が可能になると考え、塗装膜に最適な OCT 用の光源の選択や光プローブの光学系の最適化を実現し、塗装膜計測システムに適した OCT の基本性能を設計する。

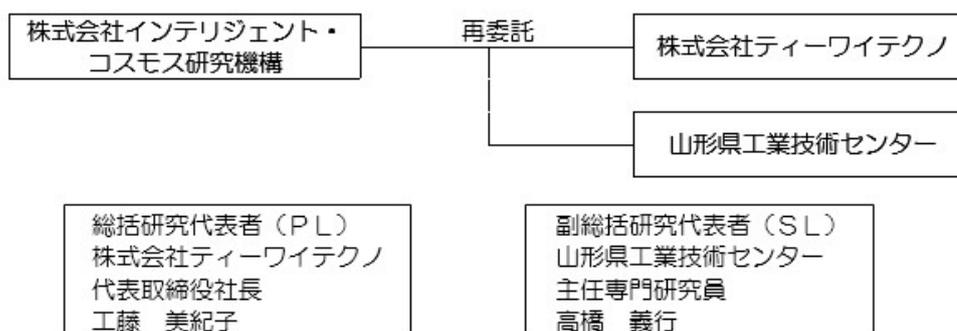
また、現在の塗装膜厚計では電磁界や渦電流方式により、計測時間が約 100ms で、分解能約 1~2.5 μm での総膜厚計測が可能であることから、同程度の性能で且つ各層毎の膜厚計測が可能な塗装膜厚計測システムを開発する。計測方式は、光干渉による断層信号を取得し、その断層プロファイルから塗装膜毎の界面を求め、塗装膜の厚さを測定するというものである。同様に、断層イメージングにより塗装膜の異物不良などの不具合解析するシステムも構築する。現状の OCT システムでは深さ分解能は約 15 μm 、測定時間は約 8s であるが、これを高分解能化して 10 μm 以下の分解能とし、高速なカメラの採用とグラフィックプロセッサを用いた高速演算処理により測定時間を短縮し、測定時間 3s 以内

を目標とする。更に、こうして得られた断層画像情報から、塗装内部の散乱体の分布状態などを数値化するアルゴリズムを開発し、外観評価との関連付けを行う。

1.2 研究体制

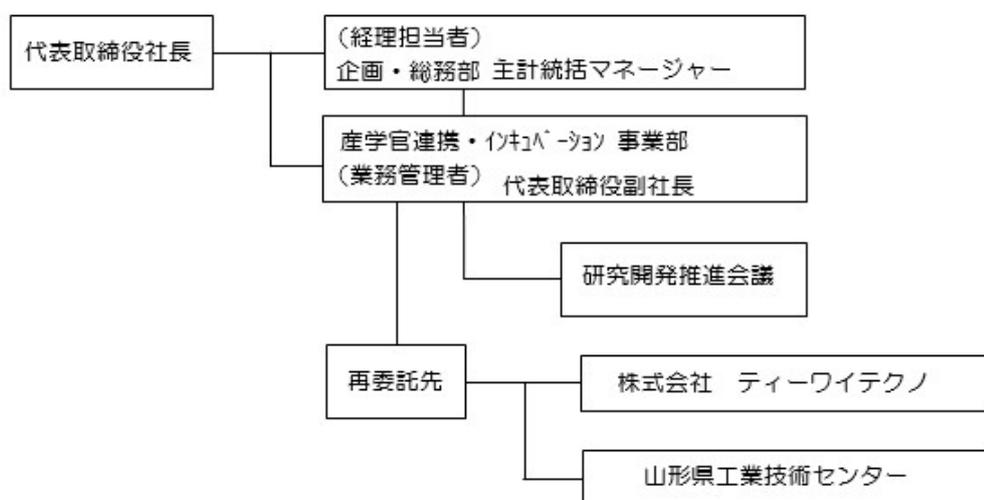
1.2.1 研究組織

本事業における研究体制は下図の通りである。



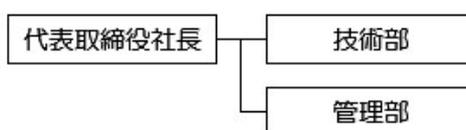
1.2.2 管理体制

①事業管理機関 [株式会社インテリジェント・コスモス研究機構]

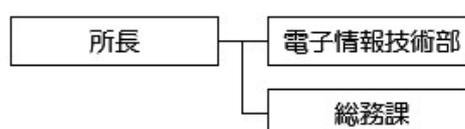


②再委託先

[株式会社ティーワイテクノ]



[山形県工業技術センター]



1.2.3 管理員および研究員

【事業管理機関】株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

氏名	所属・役職
田村 光男	産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー
松田 さとみ	産学官連携・インキュベーション事業部 管理員

【再委託先（研究員）】

株式会社ティーワイテクノ

氏名	所属・役職
内田 和弘	技術部 プロジェクトリーダー
寺崎 政人	技術部
安田 宗弘	技術部 ソフト設計グループリーダー
小関 和則	技術部 サブリーダー
齋藤 誠	技術部

山形県工業技術センター

氏名	役職・所属
高橋 義行	電子情報システム部 主任専門研究員
橋本 智明	電子情報システム部 主任専門研究員
今野 俊介	電子情報システム部 専門研究員

【経理担当及び業務管理者】

【事業管理機関】

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

（経理担当者）企画・総務部 主計統括マネージャー

高橋 徹

（業務管理者）取締役 事業部長

矢口 仁

【再委託先】

株式会社ティーワイテクノ

（経理担当者）管理部

熊谷 裕美

（業務管理者）代表取締役社長

工藤 美紀子

山形県工業技術センター

（経理担当者）副所長 兼 総務課 課長

金子 孝彦

（業務管理者）所長

小関 敏彦

【研究推進会議 委員】

氏名	所属・役職	備考
工藤美紀子	株式会社ティーワイテクノ 代表取締役社長	PL
内田 和弘	同 技術部 プロジェクトリーダー	委
安田 宗弘	同 技術部 ソフト設計Gリーダー	委
小関 和則	同 技術部 サブリーダー	委
寺崎 政人	同 技術部	委
高橋 峻	同 技術部	委
山田 裕一	同 技術部	委
高橋 義行	山形県工業技術センター 電子情報システム部 主任専門 門研究員	SL
橋本 智明	同 電子情報システム部 主任専門研究員	
今野 俊介	同 電子情報システム部 専門研究員	
矢口 仁	株式会社インテリジェント・コスモス研究機構 取締役 兼 産学官連携・インキュベーション事業部長	
猪股 則夫	同 産学官連携・インキュベーション事業部 統括プロジェクト・マネージャー	
田村 光男	同 産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー	委
大山 靖男	トヨタ自動車東日本株式会社 宮城大衡工場 製造技術 改革室 製造技術グループ 主担当員	アドバイザー
雪下 勝三	加美電子工業株式会社 技術顧問	アドバイザー
長尾 五郎	KFアテイン株式会社 技術最高顧問	アドバイザー
佐藤 学	山形大学大学院 理工学研究科 教授	アドバイザー
青木 孝文	東北大学大学院 情報科学研究科 教授	アドバイザー

1.2.4 協力者（アドバイザー）

アドバイザー	主な指導・協力事項
大山 靖男	自動車の塗装技術に関するアドバイスを頂く
雪下 勝三	樹脂やレンズへの塗装に関するアドバイスを頂く
長尾 五郎	塗料や塗装技術に関するアドバイスを頂く
佐藤 学	OCT及び光学に関するアドバイスを頂く
青木 孝文	画像処理に関するアドバイスを頂く

1.3 成果概要

1.3.1 事業履行状況

塗装膜への OCT の最適化について、15 点の塗装サンプルを入手して試料の断面出し作業を行い、開発中の OCT システムによる光学的な断面データとの相関確認を実施し、物理的な塗装膜厚と光学的な塗装膜厚の間の関連や評価上の課題を抽出した。また、各塗装膜の赤外狭帯域画像観察を実施して使用する光源の帯域に対して特異な吸収帯がないことを確認した。

塗装膜厚計測システム開発については、専用のラインセンサ基板を開発し、カバーガラスによる自己干渉光を解析して MCU と FPGA による組み込み型塗装膜厚計測システムで OCT 計測ができることを確認した。塗装膜厚計測用光プローブの開発については、当初、微動走査機構として中空モーターを用いた偏心光学系による光プローブの試作開発を行ったが、調整難度から MEMS 型光プローブへ移行し、光走査性、光学特性評価を実施した。更に、小型・高速化のために SoC FPGA へ移行し、塗装膜厚計測及び相関確認を実施した。この計測システムと塗装膜厚計測用光プローブヘッドの組み合わせにより、塗装膜に光プローブヘッドで接することで塗装膜厚計測を実現した。

塗装膜解析テスト機では、当初、MEMS 型光プローブを実用性の高い構造ということを踏まえて、試作開発を行った。光プローブヘッドには試料とのアライメント用にヘッド自体にあおり調整機構とサンプル間の距離調整機構を搭載し、干渉計ユニットと接合可能な光コネクタ接合フードを試作して、脱着性の改善も図った。その後、塗装膜解析システム開発では、計測精度の観点からガルバノミラー方式の光プローブへ移行し、光学特性の評価を実施した。分光解析部ではエリアカメラを用いた光学系のアライメント調整と光源である SLD の分光スペクトルの波形成形処理により感度と分解能の向上を図った。また、ラインスキャンカメラの高速化にも対応した。塗装膜解析ソフトウェアでは、断層画像から塗装膜厚値を算出するアルゴリズムを開発した。計測した 3D データを即座に三次元で表示可能な 3D ビュアー機能の開発と、計測位置をリアルタイムで把握するためのエリアモニタ機能を開発し、計測ソフトウェアに実装した。また、こうして計測した画像から様々な特徴量を抽出して、独自の塗装膜評価アルゴリズムの開発を行い、いくつかのサンプルのデータの比較を行った。

1.3.2 目標達成度

塗装膜の OCT 計測による断面画像と光学的な断面データとの相関確認を実施した。これまで、データ分布幅が狭いことが起因してベース層の相関が低かったが、膜厚を可変したサンプルを用意して OCT 計測との相関確認を行ったところ、各層の相関係数は、クリア層で 0.97、ベース層で 0.90、プライマ層で 0.97 の結果を得ることができ、達成率は 100%である。今後、計測誤差の要因調査を実施する。

塗装膜厚計測システムの開発では、計測システムを専用ラインセンサ基板開発と MCU と FPGA によるシステムに改造し、OCT 計測評価を実施した。達成率は 100%である。また、当初、偏心光学系による微動光プローブを構築したが OCT 計測の特性評価で課題が見つかったことから、MEMS 型プローブへ移行して計測に成功した。達成率は 100%である。

塗装膜解析システムの開発では、計測システム改造として、分光光学系のアライメント、ソフトウェア改造、カメラの高速化対応などを行い、塗装膜解析に十分な性能を確保することができたことから、達成率は 100%である。解析用光プローブ開発では、ヘッド自体へのアライメント機構の搭載と小型筐体への収納、干渉計ユニットとの接続仕様見直しにより、実用性を高めた。更に川下企業のニーズに応じてハンドキャリー型とスタンド固定型併用可能なプローブヘッドを開発した。達成率は 100%である。また、塗装膜の外観評価へ適用することを想定した OCT データのテクスチャ解析処理による評価を実施し、塗装状態の数値化に取り組み、異なる演算処理によるパラメータの結果同士に相関が得られることを確認し、客観的に塗装状態をとらえられていることを確認できた。達成率は 100%である。

1.4 研究実施場所

株式会社ティーワイテクノ

〒990-2334 山形県山形市蔵王成沢字町浦 746

山形県工業技術センター

〒990-2473 山形県山形市松栄 2-2-1

1.5 知的財産取得状況

事業期間中に3件の特許を出願済み

1.6 当該プロジェクト窓口

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

〒989-3204 宮城県仙台市青葉区南吉成 6-6-3

産学官連携・インキュベーション事業部

プロジェクト・マネージャー 田村光男

第2章 本論

2.1 塗装膜への OCT の最適化

2.1.1 塗装膜の分析

研究に先立って、OCT により塗装断面の観察が可能であることを確認しているが、塗装膜厚計測を考える場合、実際の塗装膜厚と OCT による計測値である光学距離の相関を予め確認する必要がある。OCT により光学計測される光学距離 l と試料の機械的な厚さ t の間には屈折率 n を用いて、 $l = n \times t$ の関係がある。このため、光計測により光学距離を計測することにより、既知の屈折率を用いて機械的な厚さを推定することが可能となる。



図 1-1 サンプル写真

こうした目的で、川下企業よりサンプルを入手した。サンプルは自動車用部品で、金属ベースに塗装されたサンプル 4 点、樹脂ベースに塗装されたサンプル 11 点である。サンプルはそれぞれ色調や積層状態が異なるものである。サンプルの写真を図 1-1 に示す。全サンプルについて断面画像を取得した後に、画像のスケールから換算して各層の膜厚を計測し、この値を塗装膜の実体の機械的な厚さデータとする。作業概要を図 1-2 に、断面画像を図 1-3 に示す。

表 1-1 断面出しの作業フロー

- ①. 試料切断
- ②. 垂直出し治具で試料ピースを固定
- ③. 硬化用の容器に入れエポキシ樹脂で硬化
- ④. 硬化後、容器から取り出し粗研磨で断面を表面に出す
- ⑤. 微細研磨により断面のバリなどを除去
- ⑥. 断面観察顕微鏡により仕上げ状態を確認

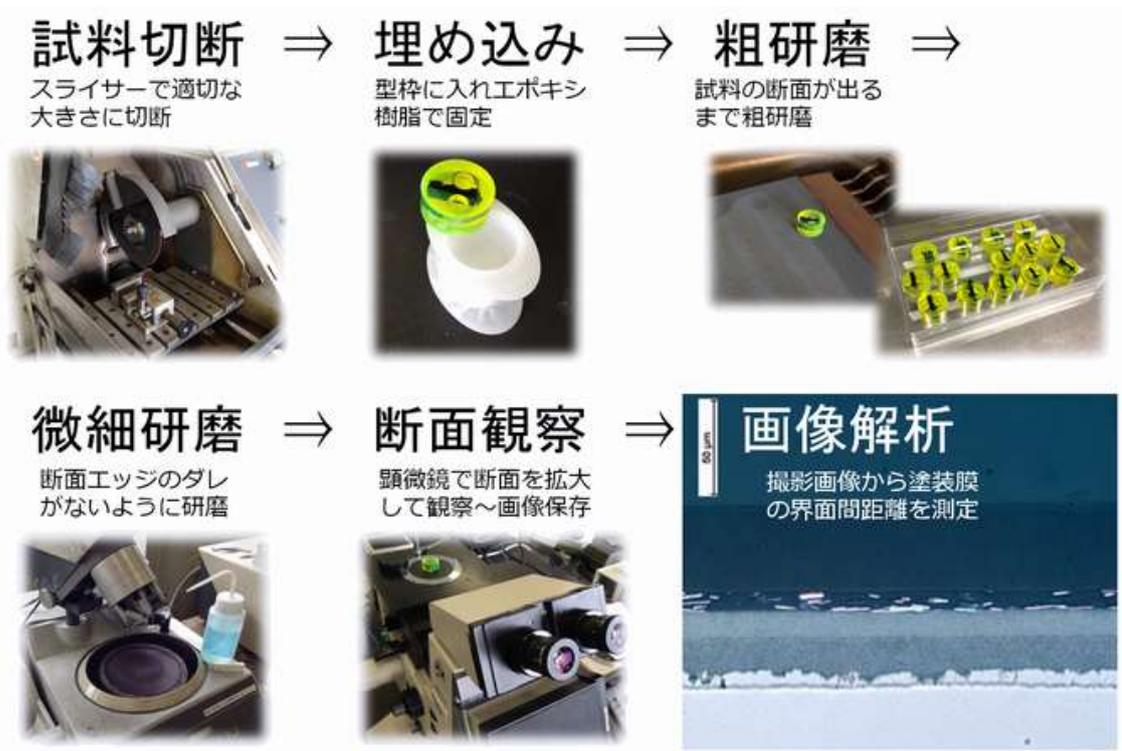


図 1-2 断面出しの作業概要図

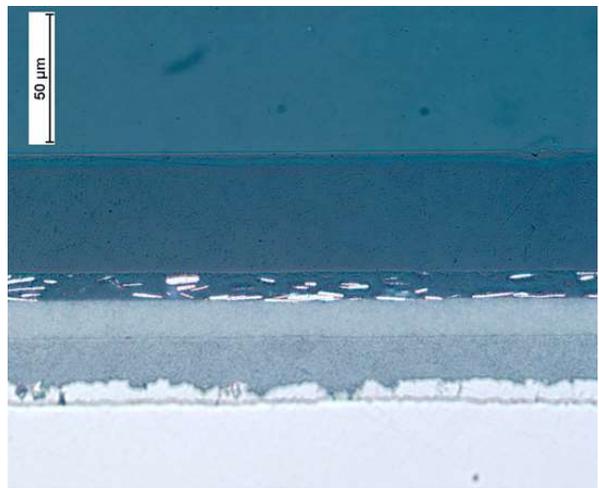


図 1-3 断面画像例

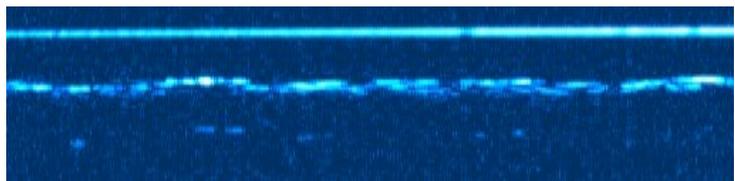


図 1-4 OCT 観察画像例

次に、OCT による計測を行い、各サンプルの断層画像を取得する。OCT 画像例を図 1-4 に示す。これを屈折率換算して光学的距離を算出する。

尚、この際、断面画像観察の結果と OCT 画像の対比確認を行い、層を最表層から順に Layer1~3 と定義して分析を行うこととした。これらの計測で得られたサンプルの各層の塗装膜厚の機械的厚さデータである断面厚と光学的距離のデータである OCT 測定結果の相関を確認した。断面厚と OCT 計測値との分布を散布図にしたものを図 1-5 に示す。この結果から、それぞれの Layer の膜厚についての相関係数は、Layer-1 では 0.974、Layer-2 では 0.900、Layer-3 では 0.973 となることが確認された。この際、分布に直線近似を実施して屈折率換算値を算出し、その比例係数による補正を行っている。

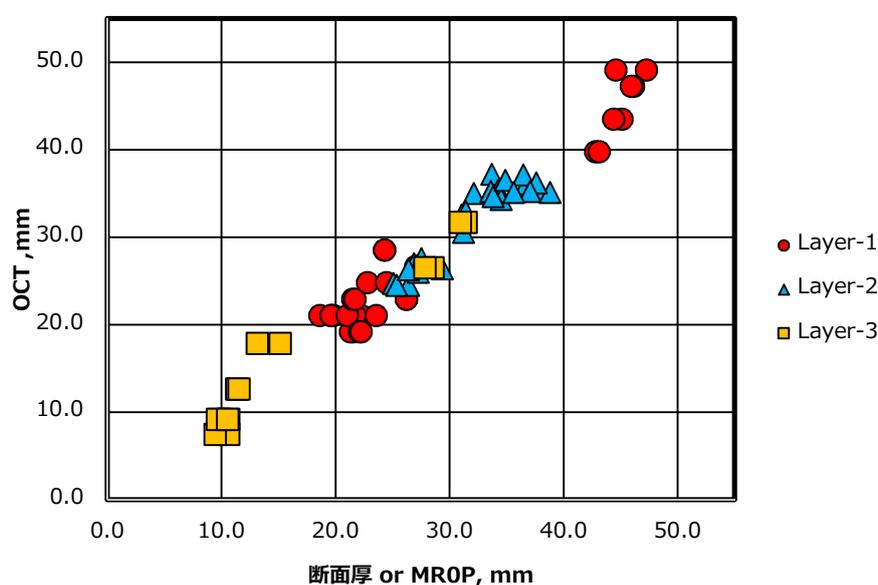


図 1-5 塗装膜厚と OCT 計測値との相関（屈折率補正あり）

2.1.2 最適な光源の選択

塗装膜に適する OCT を構築するために非常に重要な要素となるのが光源の選定である。干渉計の原理からこれらを考察する。OCT の原理図を図 1-6 に示す。この干渉計モデルにおいて、光源から出力される光強度を I 、光源の波数を k_0 、光波の時間的な位相変化を $\omega_0 t$ とする。これがハーフミラーやビームスプリッター(BS)によりサンプル側とリファレンス側に分配され、それぞれ分配後の光強度を I_s 、 I_r として、分岐後それぞれサンプルとリファレンスミラーにより反射して再び合波するまでの光路長を L_s 、 L_r とする。

ここで得られる干渉信号の強度は元々の光源の強度と反射効率により決定される。このことから、強度の高い光源を利用することと、試料に応じた反射効率の高い光源の選定が干渉強度を確保する上で重要なポイントと言える。次に光源の波長について考えると、OCT の光源には、レーザーに似た可干渉性を有するが特定の波長を中心にスペクトル幅を持つ点でレーザーとは異なる低コヒーレンス光源を利用する。

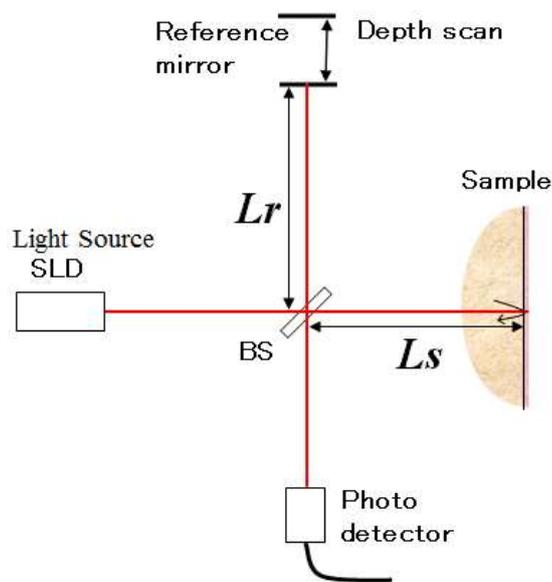


図 1-6 OCT の干渉計モデル

OCT におけるコヒーレンス長は、断層計測時の深さ方向の分解能に相当する値で、この値が小さければ分解能の高い断層画像が得られることになる。このため、OCT としては、中心波長が短く、スペクトル幅の広い光源が理想的であると言える。

OCT 用に用いる光源として、図 1-7 に示す試料の反射分光特性確認の結果と高分解能化を目的として中心波長 860nm の SLD を選定しているが、確認の意味も含め、試料の赤外画像観察を行った。仮に試料内部の層で対象波長域での特異な吸収がある場合、観察画像としては極端に暗く観察されることとなり、OCT 計測を行った際にも吸収層での光の減衰が極端に大きくなり、内部の観察が困難となることが予想される。

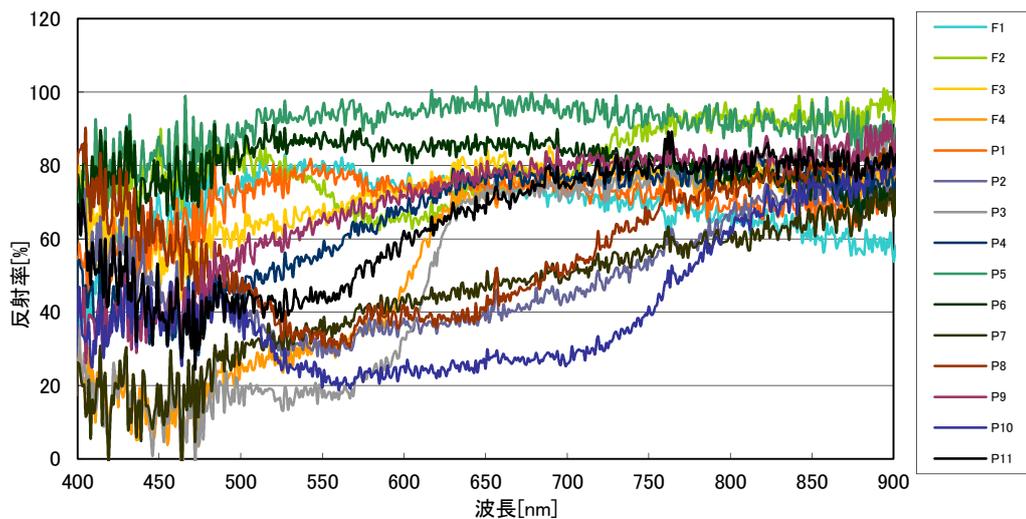


図 1-7 塗装サンプルの反射分光特性

赤外画像観察に使用したのは、近赤外線カメラと狭帯域のバンドパスフィルターである。観察画像例を図 1-8 に示す。こうした観察結果から、可視光での観察画像の明度に対して、極端な低下は認められず、近赤外の各帯域においても試料からの十分な光の反射が得られていることが確認され、選定した光源で問題のないことが分かった。

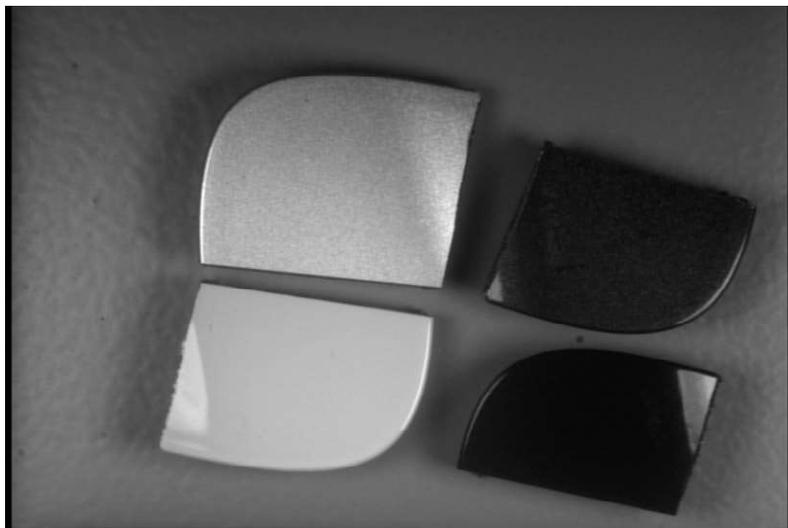


図 1-8 近赤外画像観察例

2.1.3 光プローブの最適化

塗装膜に OCT を適用するにあたり、選択した光源波長を踏まえて光プローブの最適化を考える必要があり、二軸ガルバノミラーを用いた光プローブ構成とした。最初に選定した対物光学系の最適化を行う必要がある。塗装膜厚計測システムに用いる光学系として、光ファイバー出力をコリメートした後に対物レンズで集光する。ここで、対物レンズは小型のヘッドサイズに収容可能な物で焦点距離最短のものを選定し、このレンズで固定する一方、コリメートレンズは NA の異なる 3 種類のレンズがあることから、それぞれの組み合わせによる集光特性をビームプロファイラーで測定した。測定結果を図 1-9 に示す。

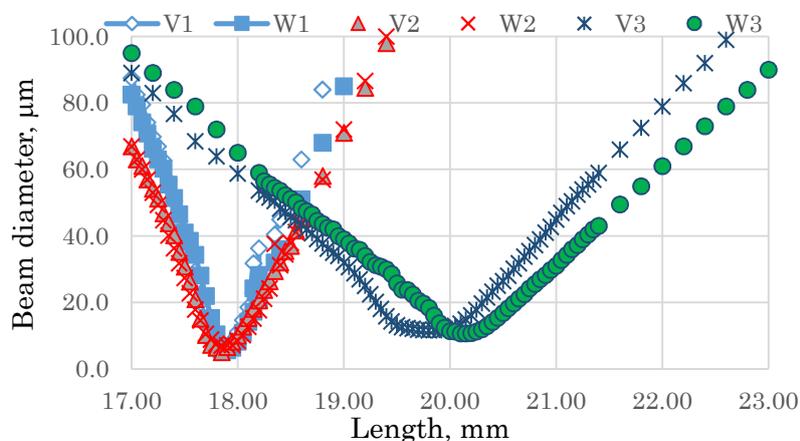


図 1-9 ビームプロファイル

この結果を踏まえてコリメートレンズを選定した。また、塗装膜解析システム用の光学系としては、極力広範囲でのエリアスキャンを考慮して、OCT用対物レンズの使用を選択した。このレンズによる解像度評価を実施したところ、テストターゲットより Group6 の識別可能なことから約 9~14 μm 程度の解像力が確認できた。撮影画像を図 1-10 に示す。

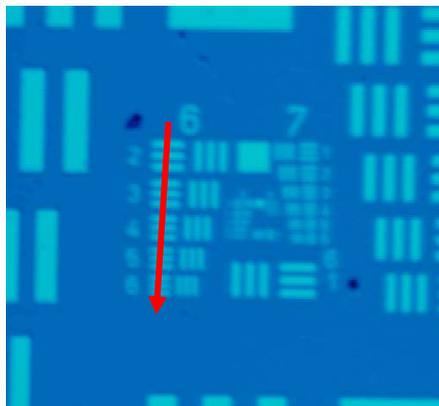


図 1-10 USAF テストターゲット撮影結果

2.2 塗装膜厚計測システムの開発

2.2.1 微動光プローブの開発

アルミ片を含む層は散乱体が分散している状態が観察されることが予想されるため、計測の安定性を確保するために小エリアの光走査が必要である。このため、光プローブには、製造現場への導入コスト抑制や検査者の負担軽減のために、低コストで小型であることが望ましく、当初、減速ギアを用いた回転走査方式を選定した。しかし、焦点位置変動などに対するアライメントに開発時間を要すると考えられるため、本事業の中では、塗装膜厚計測用の光プローブとして、塗装膜解析用に開発を進めた MEMS ミラー型光プローブを流用して計測の実現を優先することとする。

本テスト機では、山形県工業技術センターで試作した MEMS ミラーを採用して試作を行った。また、ステンレス製のハウジングを製作し MEMS ミラーを接着固定して試料台となるチルトステージに搭載した。ヘッドの概観を図 2-1 に示す。

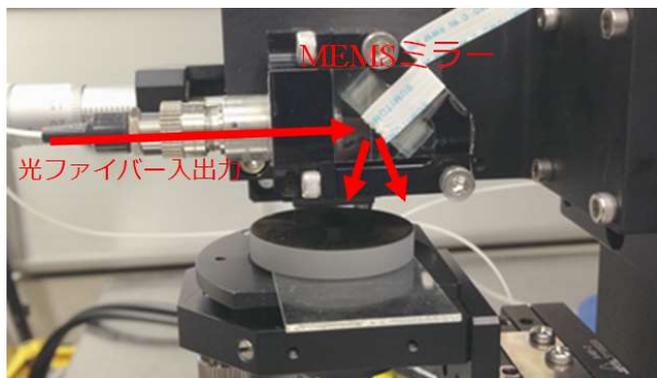


図 2-1 MEMS ミラーを用いた光プローブヘッド



図 2-2 試作 1 回目の光プローブ概観

この MEMS ミラーを用いたプローブヘッドを 3D プリンターで試作したケースへ収納する試作を行った。概観を図 2-2 に示す。ケース左側から、光ファイバーや信号線を保護するためにコルゲートチューブに入れた状態で配線を引き入れ、ケース内のヘッドへ接続する。プローブ光は図の下方向のケース出射穴から出力される。この際、計測対象の塗装面とケースとの接触部にはゴムブッシュのリングを設置しており、これを試料に密着させることで計測を実現する。

その後、抽出された課題を踏まえて、再度プローブの試作を実施した。まず、光軸調整をケースではなくヘッド自身で行えるように改造した。設計図面の 3D モデルを図 2-3 に示す。

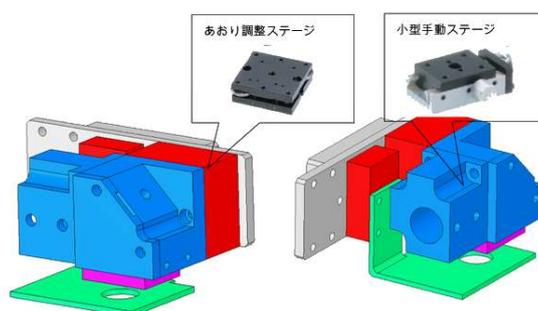


図 2-3 試作 2 回目の光プローブヘッド設計図



図 2-4 光プローブ用ケース

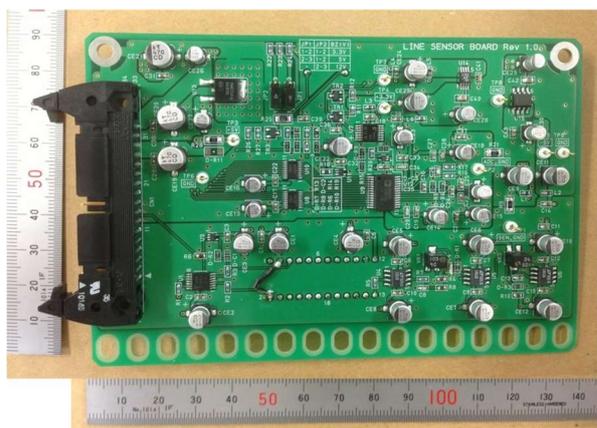
試作ヘッドを収納するためのケースも 3D プリンターで試作を行った。概観を図 2-4 に示す。これにより、この光プローブを試料へ密着させることで OCT 計測を行うことができるようになった。このプローブによる分解能は約 12 μm 程度と考えられる。計測エリアは最大で約 3 \times 3mm² 程度であった。

2.2.2 塗装膜厚計測システムの開発と評価

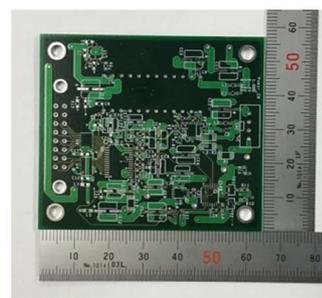
塗装膜厚計測テスト機開発では、装置化をすすめながら装置の小型化及び低コスト化のための検証を行なった。干渉計の構成は後述する解析システムとほぼ同等である。取り組んだ内容は、ラインセンサ基板開発、組み込みシステム開発と小型化・高速化、同システムでの波形解析処理の実装である。こうして開発してシステムでカバーガラス及び自動車ボディサンプルの計測評価を実施した。

① ラインセンサ基板開発

CMOS リニアイメージセンサを用いた自作基板開発により、光学系の小型化及び低コスト化を図った。イメージセンサのビデオ信号はアナログ信号として出力されるため、組み込みシステム基板での処理を実現するために 12 ビットの AD コンバータによってデジタル信号に変換した。更に不要箇所の洗い出し及び最適化を行い基板の小型化を進めた。図 2-5 に開発した基板を示す。ラインセンサ IC で取得した干渉波形データの信号振幅に最適化し、デジタル回路に用いる信号線を最適化することで部材を削減した。その結果、初期試作のサイズの約 1/3 まで小型化することができた。また、キャラクタ LCD 制御基板や MEMS ミラー制御基板などの周辺回路基板の開発も行った。



(a) 旧ラインセンサ基板



(b) 新ラインセンサ基板

図 2-5 新旧ラインセンサ基板

② 組み込みシステム開発及び小型化・高速化

ラインセンサ基板の制御は主に FPGA で行い、波形解析処理は MCU で分担する。FPGA によりビデオ信号をメモリに格納し、MCU からのメモリアクセスを FPGA によるアービトレーションにより行うことで、波形解析処理を実現するシステムを構築した。また、演算処理の短縮のため、処理対象画素は干渉波形を中心とした 1024 画素とした。

次に組み込みシステムの小型化及び高速化を図った。初期のシステムではラインセンサ制御を FPGA、波形解析処理を MCU で行っていたが、FPGA と MCU がワンチップに搭載されている SoC (System on a Chip) FPGA に変更した。SoC に搭載されている MCU は高性能であり、演算処理の高速化も実現可能である。本システムでは、SoC にラインセンサ制御と波形解析処理を実装することでシステムの小型化・高速化を実現した。開発したシステムはモジュールを動作させる基準クロックを生成するクロック生成部、ラインセンサ制御部、波形解析を行う MCU、波形データを格納し、MCU による波形データ読み取りを可能にするための Block RAM、演算ステータス表示のための LED Controller、などのモジュールから構成されている。それぞれのモジュール間のインターフェースは規格化された高速なバスである AXI4 である。図 2-6 に組み込みシステム基板を示す。SoC を用いることで基板を約 1/4 に小型化し、処理時間を約 4.7 倍高速化した。



図 2-6 一次試作基板 (左) と SoC FPGA 基板 (右)

③ 組み込みシステムによる波形解析処理の実装

従来 PC で行っていた波形解析処理を MCU へ移植した。MCU にメモリからのビデオ信号読み出し処理と波形解析処理を実装し、本システムの性能検証を行なった。また、性能検証のために、リファレンス側のミラー表面にカバーガラスを挿入し、自己干渉を生じさせてピーク位置検出分解能とダイナミックレンジの評価を行なった。確認の様子を図 2-7 に示す。

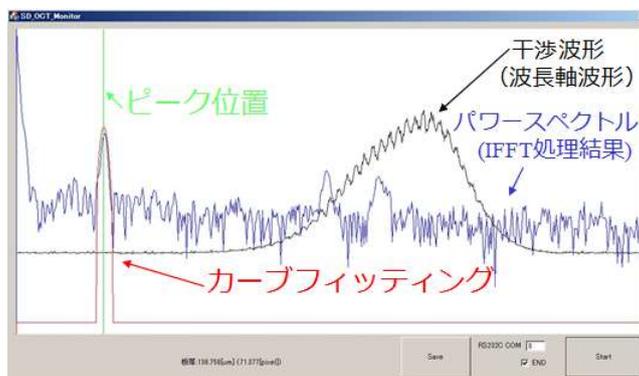


図 2-7 PC 解析処理ソフトウェアによる処理確認

次に、開発した塗装膜厚計測システムの計測精度評価のためにカバーガラスの測定を行った。マイクロメーターで測定したところカバーガラスの厚さは $144\mu\text{m}$ であり、膜厚計測システムによる計測値が実測値に近い値を得られることを確認した。

また、自動車ボディの塗装膜厚計測のために、光プローブに搭載された MEMS ミラーを制御するソフトウェアを実装し、MEMS ミラーを制御しながらラインセンサデータを取得して、平滑化した波形解析処理、膜厚計測処理を実装した。計測に用いたサンプルは図 1-1 に示した 15 種類で、塗装膜分析と同様に断面画像から得た塗装膜厚データと OCT 測定結果の相関を確認した。この結果、Layer-1 で 0.788 が得られた。一方、Layer-2 と Layer-3 では本システムでは良好な結果が得られていない。カバーガラスのような透明体では十分な計測精度が得られているため、原因として、測定ポイント数が少ないこととチューニングが不十分で計測感度が不足しているためと考えられる。今後、測定ポイント数の増加と光ヘッド部の改善を行うことでさらなる自動車塗装への最適化が可能と思われる。

図 2-8 に装置の外観を示す。筐体サイズは最終的に $260\times 130\times 220\text{mm}$ となり、約 8L 以下に小型化できた。



図 2-8 塗装膜厚計測システム

2.3 塗装膜解析システムの開発

2.3.1 塗装膜解析システム用光プローブの開発

塗装膜解析システムでは試料である塗装面の三次元断層画像の取得を行う必要があることから、プローブ光を試料上でエリア走査する仕様となる。この際の主な要件としては、約 $3\times 3\text{mm}^2$ 程度のエリアを走査したい、走査速度は毎秒 10 万ポイント程度の測定に対応できること、サイズは極力小さく抑えたい、といったものが挙げられる。こうした点を踏まえ

て、開発当初は MEMS ミラー型光プローブヘッドを構築したが、今後、光走査精度への要求が高くなることを踏まえて、ガルバノミラー方式のヘッドへ移行を進めた。この際、ヘッドサイズを塗装外観評価に使用されているウェーブスキャン (Nihon Denkei co.,ltd.)の本体サイズ 155×73×48mm 以下を目指して開発を行った。この結果、二次元走査用のガルバノミラーを内蔵して、ヘッドサイズは 90×75×45mm となり目標をクリアしている。光走査部構造を図 3-1 に、ヘッド概観を図 3-2 に示す。

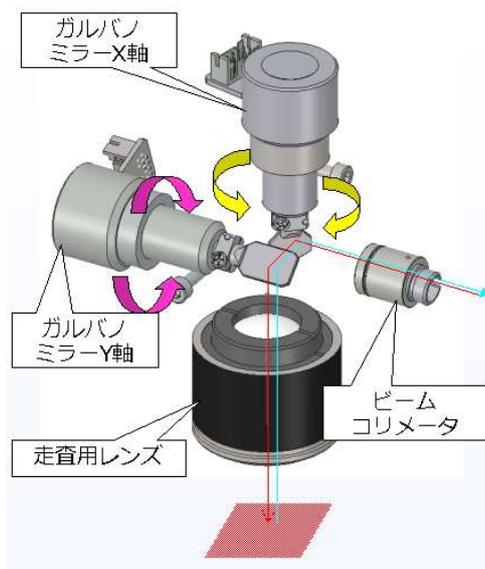


図 3-1 ガルバノミラーによる光走査ヘッド内部

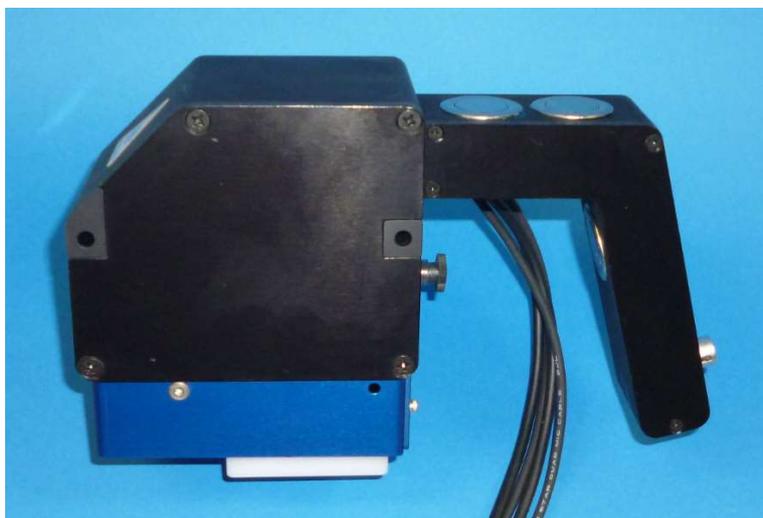


図 3-2 塗装膜解析システム用光プローブヘッド概観

川下企業のニーズを踏まえて、塗装膜解析システム用の光プローブヘッドでは、顕微鏡スタイルの据置型、手持ちタイプのプローブ型、固定タイプのスタンド型での計測に対応できるようにヘッドを構成している。プローブヘッド概観を図 3-2 に、計測スタイル毎の概観を図 3-3 に示す。

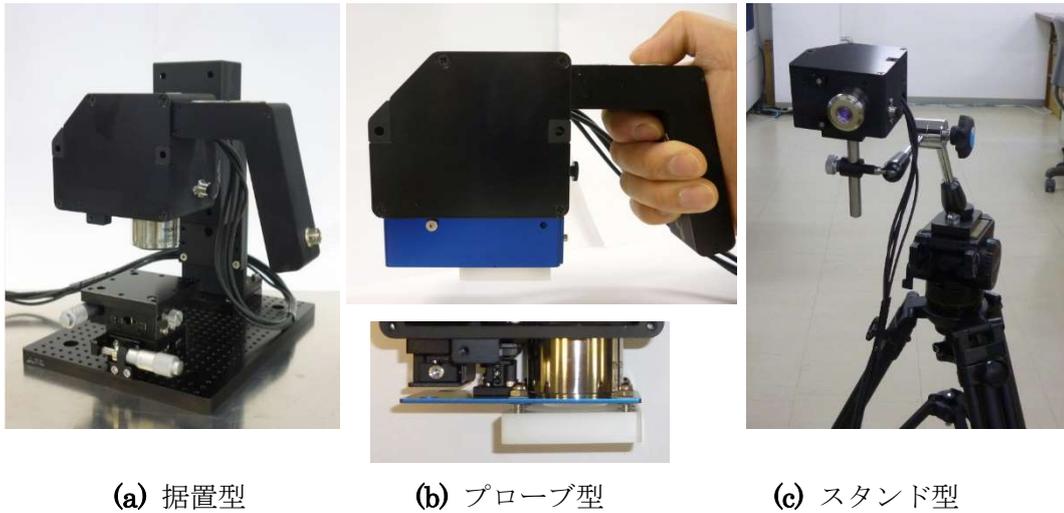


図 3-3 計測スタイル別概観

2.3.2 塗装膜解析システムの開発と評価

塗装膜解析テスト機開発では、塗装膜内への異物の封入などの不具合解析などの際には塗装の研ぎ出しや断面出しといった破壊的で煩雑な手法でしか行えなかった解析を OCT で非破壊・非接触での観察の実現性評価をする。

計測システムのテスト機の構成は、図 3-4 に示すオール光ファイバーの干渉計による SD-OCT システムである。この構成は、光源に SLD 光源を使用し、光アイソレーターを經由で光カップラに接続、光カップラではリファレンスとサンプルにパワーを分配し、分配後の経路にはそれぞれ光ファイバーパッチコードが挿入され、サンプルアームの取り回し距離を確保している。リファレンスアームでは、マイクロステージに設置したミラーへ照射して反射させ同じ経路で再び光ファイバーへ戻す。サンプルアームでは、光ファイバーに接続したコリメートレンズ経由で空間へ平行光出力され、光プローブ経由で試料へ照射される。リファレンスとサンプルそれぞれの反射光は再び光カップラで合波されて分光器側へ向かう。この合成光をラインセンサーカメラに分光投影して分光スペクトルを得る。

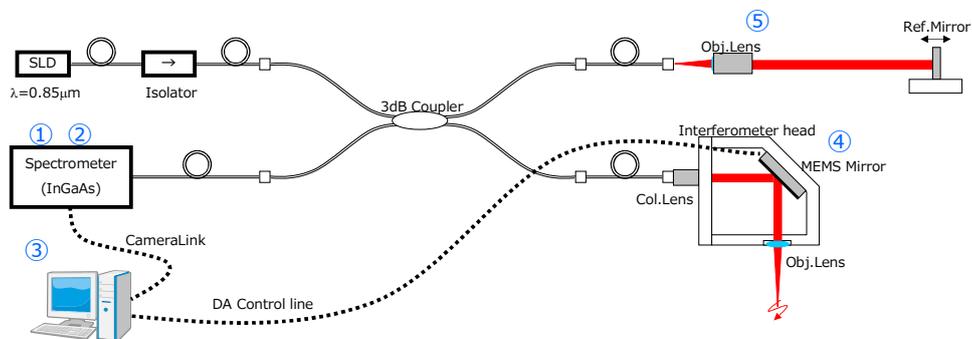


図 3-4 OCT システム構成

開発した装置概観を図 3-5 に示す。装置上部が据置型を想定した計測ステージとなり、中断に干渉計ユニット、下段に電源と計測処理用の PC が設置されている。装置安定化のために、干渉計のリファレンス部は集光型の光学系を採用し振動や熱的な変化に対して比較的影響を受け難くなるように配慮している。同様に、SLD の制御も独自基板を開発して光出力制御方式を採用し、SLD の廃熱による出力変動を抑制する様にしている。集光型リファレンス部の図 3-6 に、SLD 制御基板を図 3-7 に示す。



図 3-5 塗装膜解析システム概観



図 3-6 集光型リファレンス



図 3-7 SLD パワー制御基板

データ処理については、計測用のソフトウェアを独自に開発しておりラインセンサの制御、DAC(Digital to analog converter)ボードの制御、スペクトル解析、画面表示、データ出力処理を担っている。ラインセンサーカメラはフルフレームレートで動作する。この際、光走査信号と同期処理することでエリア走査しながら OCT 計測を実現する。

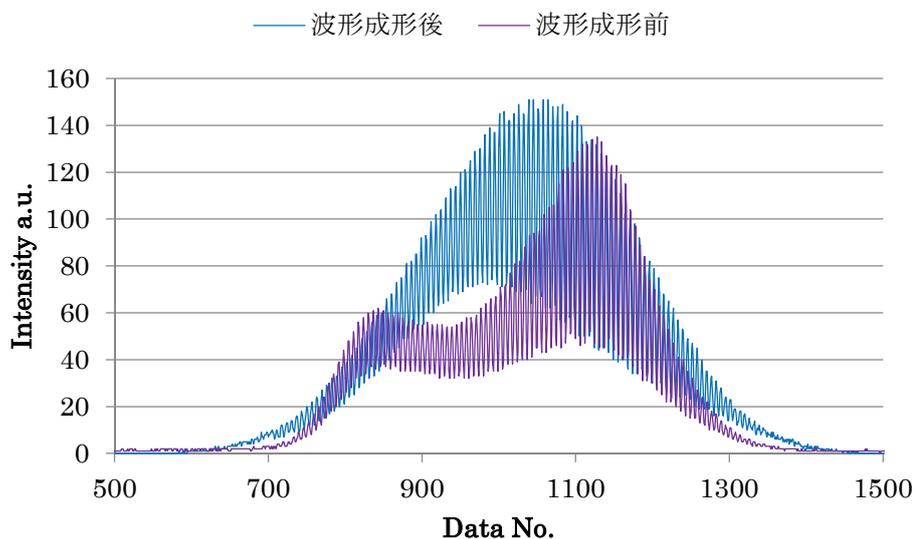


図 3-8 分光スペクトル例

干渉時の分光スペクトル例を図 3-8 に、その解析プロファイルを図 3-9 に示す。これにより、ノイズフロアからの最終的な SNR は 100dB 以上であることが確認された。このピーク部を拡大したグラフを図 3-10 に示す。

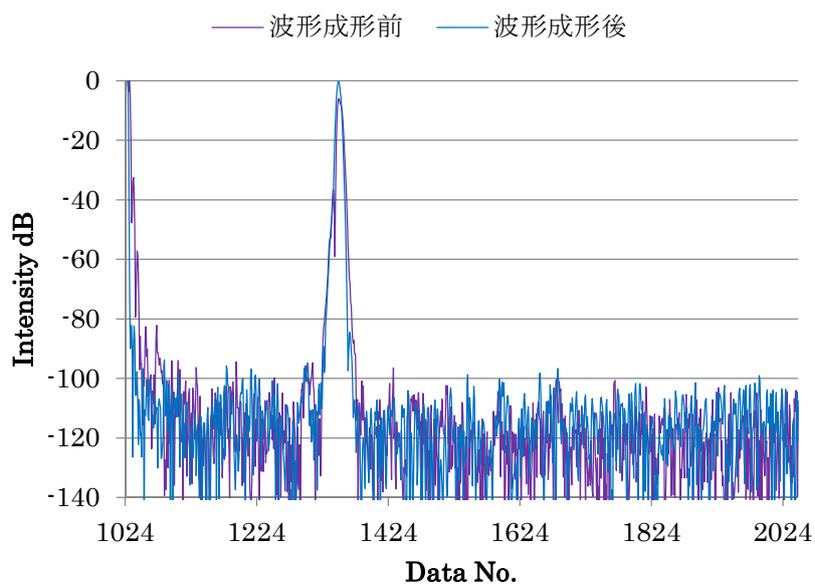


図 3-9 解析プロファイル

この測定系での最大計測深さ 1.6mm で 1024data 相当であることから、データ分解能は $1.6 \div 1024 \div 1.56 \mu\text{m}/\text{data}$ となる。これより、半値全幅は $1.56 \times 5 = 7.8 \mu\text{m}$ となり、光源の中心波長とスペクトル幅から算出される理論的な分解能 $8 \mu\text{m}$ とほぼ同じ値であることが確認された。また、この値は、塗装膜厚の最低値の $10 \mu\text{m}$ 程度に対しても十分計測可能な分解能を有していることを示している。

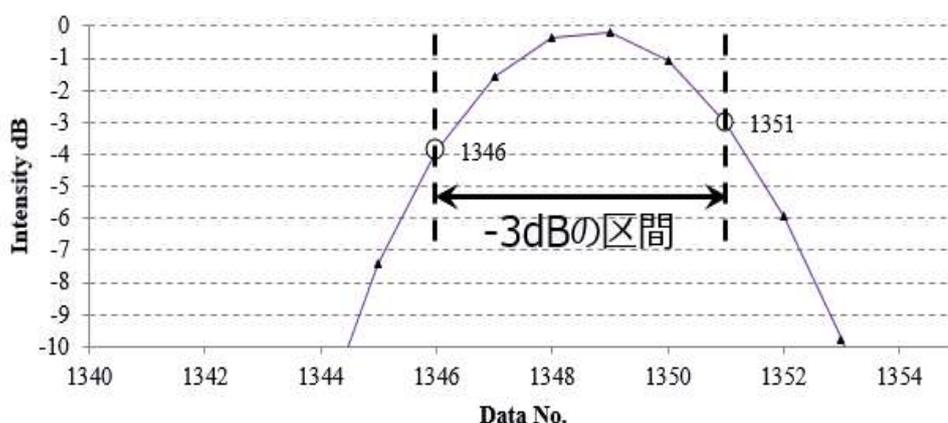


図 3-10 解析プロファイルピーク部拡大図

塗装膜厚計測アルゴリズム開発のために、本ソフトウェアで解析を行いながら塗装膜厚値の算出を行い、精度評価などを行うこととした。実際の塗装膜の断層を観察して画像例を図 3-11 に示す。図の右側が塗装膜表面で、左側に行くくと塗装内部の観察画像という断面画像になっている。この結果、この画像での計測結果は図 3-12 に示す通り、第一層 $45.7 \mu\text{m}$ 、第二層 $10.4 \mu\text{m}$ 、第三層 $15.1 \mu\text{m}$ となった。

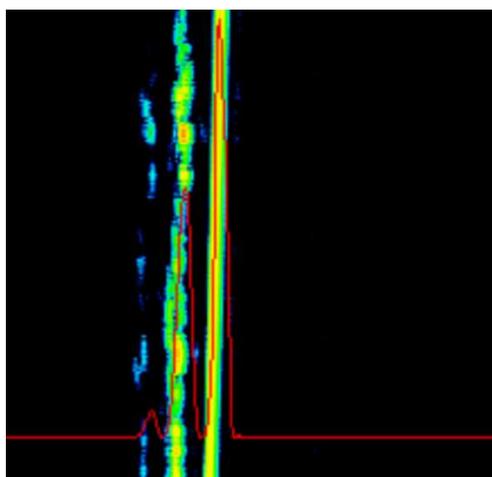


図 3-11 塗装膜断層計測例

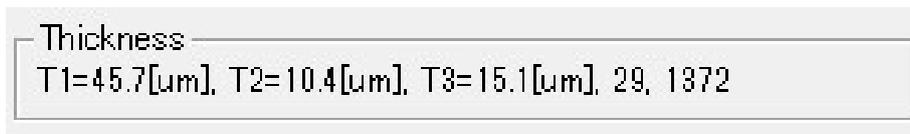
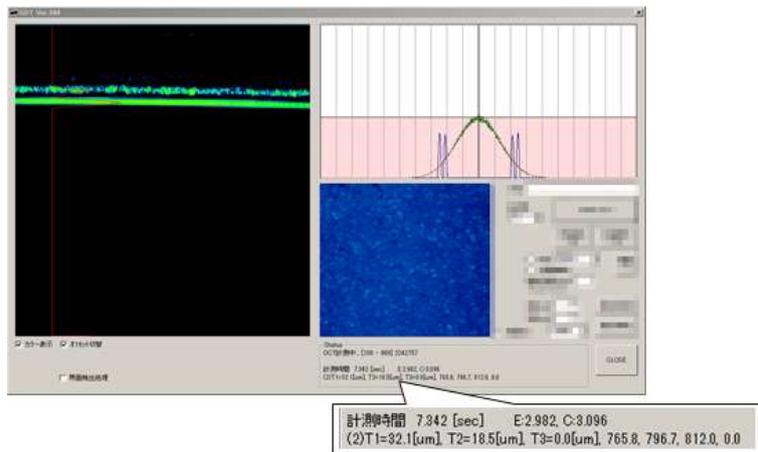


図 3-12 膜厚計測値出力例



塗装膜計測値 **クリア層:T1、ベース層:T2、プライマ:T3**
塗装膜評価 **エントロピー:E、同時生起行列:C**

図 3-13 解析ソフトウェア概観

次に、塗装膜解析用ソフトウェアについては、安定した膜厚計測が実現できるようなアルゴリズムを実装している。短時間に得られる数百本の個々の深さプロファイルから、塗装膜厚を算出する処理を行う。同様に、次節で取り上げる塗装膜評価用パラメータとして、エントロピー値(E)と同時生起行列の高次モーメント値(C)をリアルタイムで表示する。ソフトウェア概観を図 3-13 に示す。また、OCT 計測で得られるデータは三次元データであり、例えば 512(W)×512(H)×1024(Z)×1Byte として、RAW データのサイズは 256Mbyte になる。折角 OCT 計測を実施しても、この大量のデータを保持して可視化しようとするには非常に困難を伴う。このため、まずデータには独自の高速圧縮処理を施し、データサイズを約 1/10 に圧縮した。このデータをロードして表示するビューア開発も並行して進めた。OCT データビューアでは、X-Y 平面と X-Z 平面の二面図表示として断層画像を表示し、それぞれの画像上のスライスラインをマウスでスライドさせることにより任意の位置の断層像を簡単に観察することができるようになった。ビューア外観を図 3-14 に示す。これにより、局所的な膜厚について画像から直感的に把握することができるようになる。同様に、図に示す通り、欠陥部位についても任意の位置で断層観察することで、内部状態の把握から欠陥の原因の推定などに有効に活用できるものと考えている。

こうした改良を経て、製品化に近い装置化が完了したことから、実際の生産ラインへ装置を持ち込み、膜厚計測評価試験や塗装膜解析を実施した。計測の様子を図 3-15 に示す。この際、ドアパネルの面内で図に示す 9 ポイント (①～⑨) をそれぞれ従来の塗装膜厚計と OCT で計測を行い、一番下地の ED 層を仮に 10 μ m と想定した場合のドアパネル面内での塗装各層の測定位置マップと膜厚分布マップを図 3-16 に示す。こうした解析により、この例ではドアパネル面内でクリア層が比較的均一であること、測定点①、②でベース層が比較的薄い状態であることなどが直感的に確認できる。

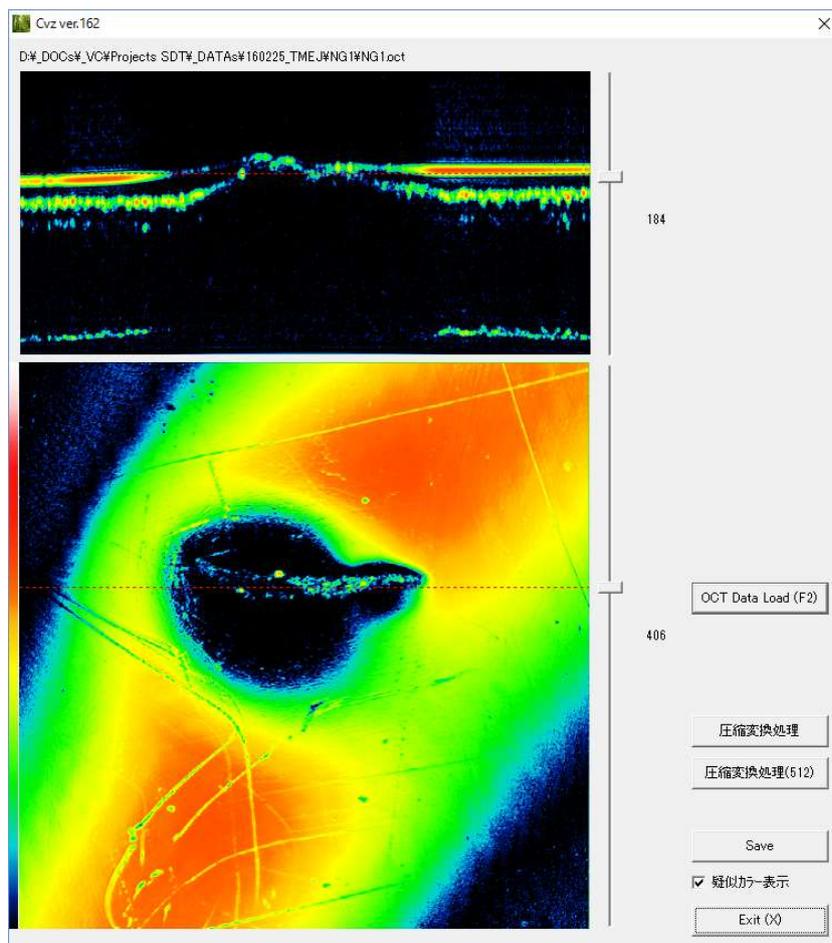
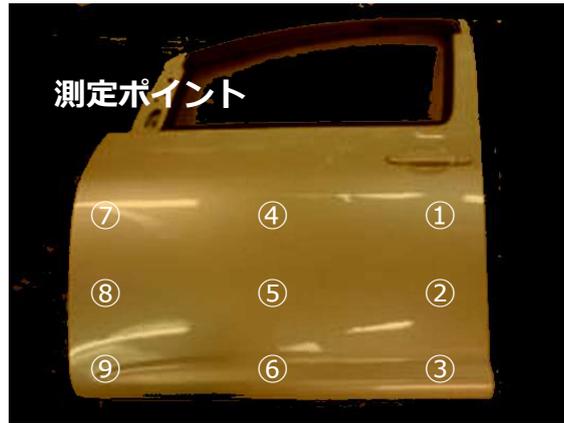


図 3-14 OCT データビューアー



図 3-15 実施計測試験



(a) ドアパネル測定点マップ



(b) 膜厚計測マップ

図 3-16 塗装各層膜厚計測マップ

2.3.3 塗装膜評価アルゴリズムの開発

OCTにより取得した断層プロファイルから塗装膜の外観状態を客観的に評価するための指標の定義を目的に、塗装膜の膜厚状態や散乱体などの分布状態を数値化するアルゴリズムの開発を行なった。

解析に先立ち、積層された断層画像群から塗装面のテクスチャデータを抽出するために、特定深さの断面画像を抽出や深さ方向の分散値などによる面画像生成を行う。評価を行った試料画像を図 3-17 に示す。また、こうして得られた面画像の例を図 3-18 に示す。

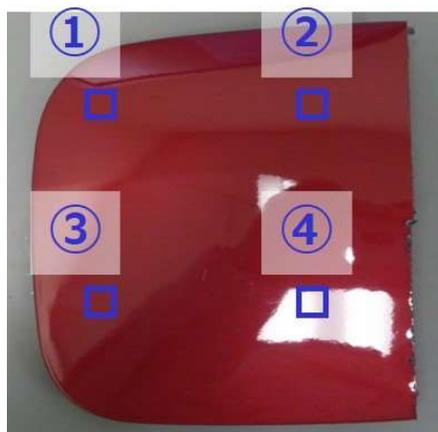


図 3-17 塗装膜解析システムで計測したボディの計測箇所

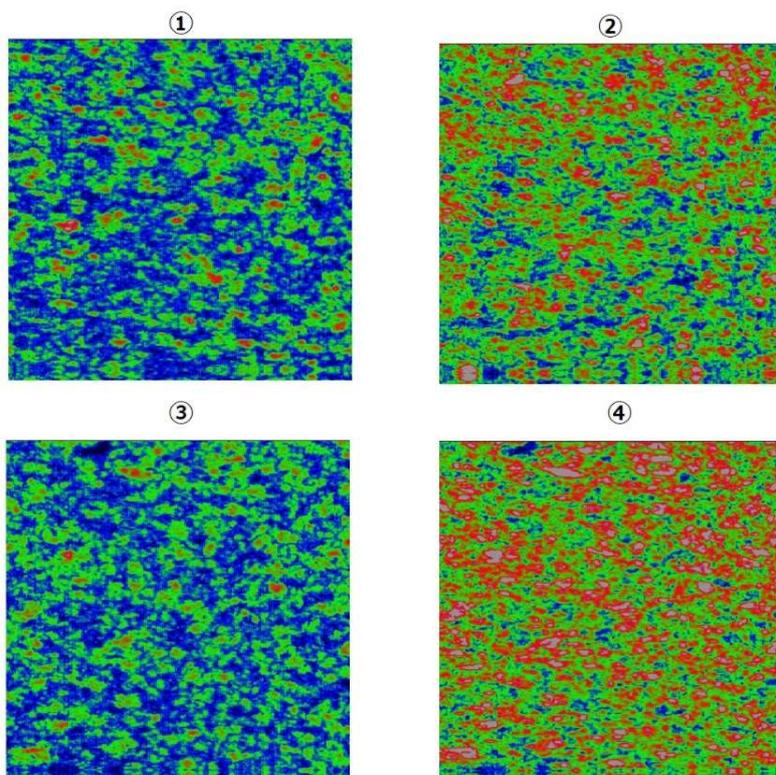


図 3-18 各計測箇所のベース層評価画像

得られた評価画像から特徴量を解析する手法としてテクスチャ解析があげられる。テクスチャとは物の表面の質感や手触り等を示す概念で、本来は布地の織目を意味する用語であり、画像工学では物体表面の模様を示すものである。テクスチャ解析により異なる模様のパターンを識別することができ、様々な解析手法がこれまで研究されてきている。本研究では、テクスチャ解析で用いられる特徴量として、①標準偏差、②高次モーメント、③フラクタル次元、④エントロピー、⑤周波数成分、⑥画素パターンエントロピーなどを算出した。

図 3-19 に各色ボディの特徴量を比較した棒グラフを示す。特定の塗装で各特徴量が他と比較して差異が認められた。

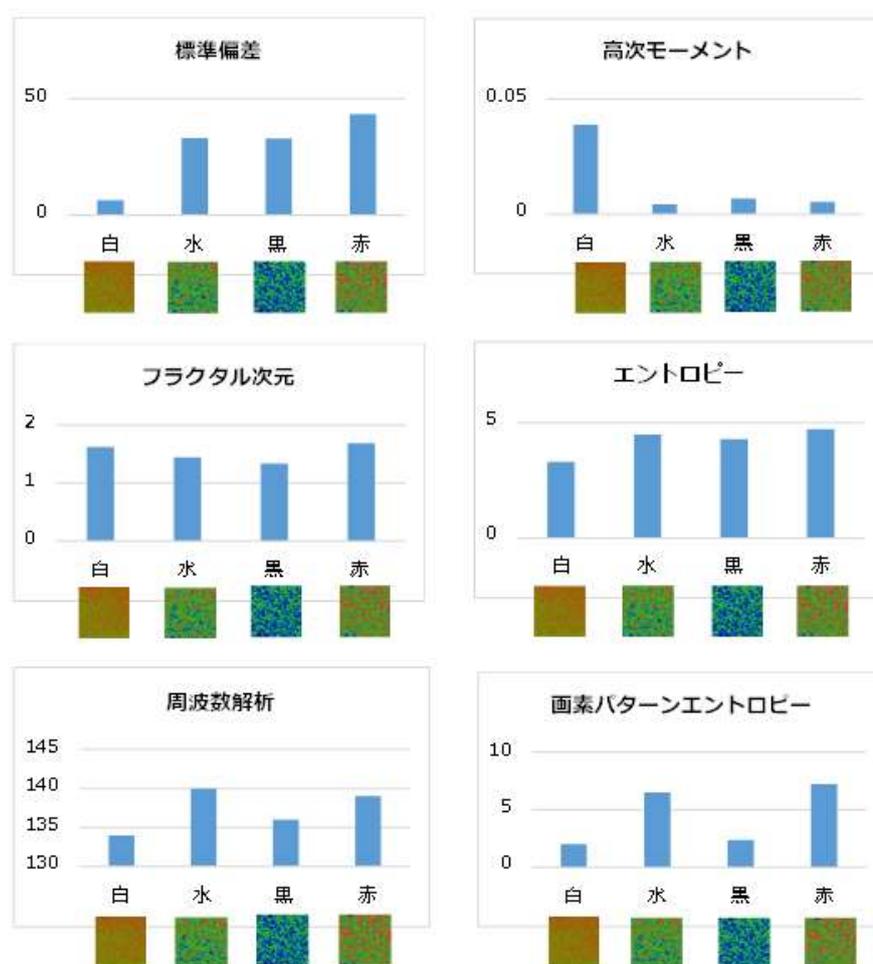


図 3-19 各色ボディの特徴量の比較

各特徴量の有効性を確認するために、メタリックムラはボディの部位によってアルミフレイクの粒度分布が異なり、光沢感がばらつく現象を評価した。シルバー系に近い塗装の複数箇所の計測データを取得し、各特徴量を算出した。図 3-20 に計測に用いたサンプルと計測箇所と各評価画像を示す。

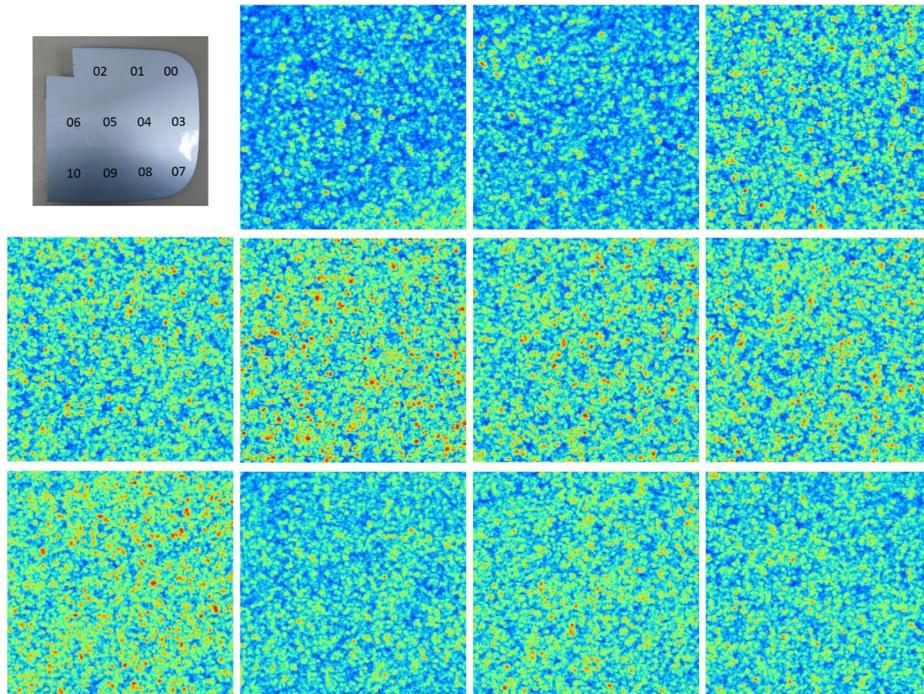


図 3-20 シルバー系（水色）ボディの計測箇所と評価画像

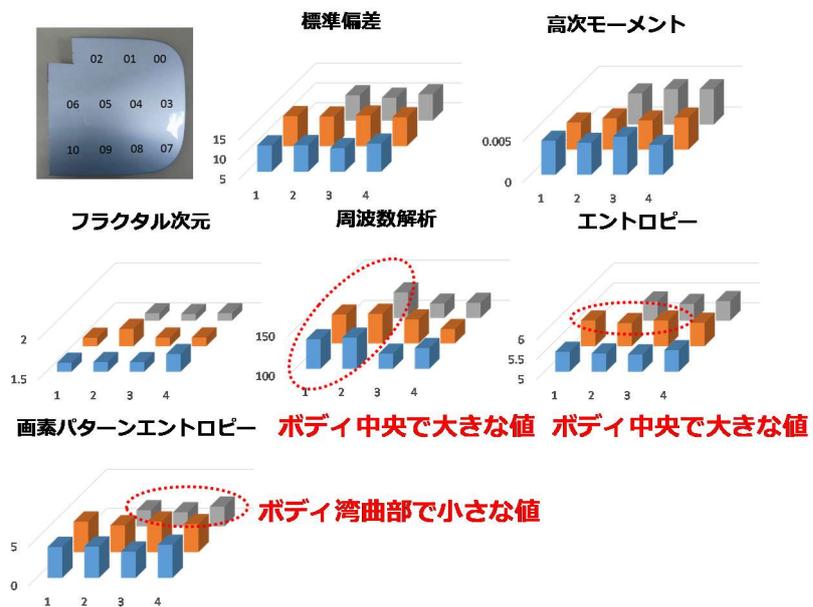


図 3-21 シルバー系ボディの計測箇所別特徴量

ボディの中央、コーナーを含めた計 11 箇所からデータを取得した。図 3-21 に各特徴量の棒グラフを示す。周波数解析、エントロピー、画素パターンエントロピーで特に計測箇所による違いが見られた。ボディの中央と湾曲部で違いがあり、中央では反射光量の高い画素が多く、周波数解析、エントロピー、画素パターンエントロピーの数値が高く、アルミフレークの粒度分布が高いと思われる結果であった。目視による外観の違いがあまり感じられ

ない全ての計測箇所で特徴量に違いが見られ、目視検査では検査できない違いを数値化できる可能性があると思われる。

同様に、金属面への塗装を行った 5 種類の試料を対象に、テクスチャ解析の主要なパラメータとして考えられるエントロピーと高次モーメントを計測して相関を確認した。概念的に、エントロピーは面内での輝度バラツキの大きさに応じて大きくなる値、高次モーメントは同時生起確率の自乗値で数値化した輝度の分散度合いの逆数と見なすことができ、輝度バラツキに応じて小さくなる値と考えることができる。計測は各試料の任意の 10 ポイントで OCT 撮影を行い、深さ方向の標準偏差値画像を生成し、そこから各パラメータを算出した。パラメータの分布を図 3-22 に示す。この結果から、エントロピーと高次モーメントに相関係数 0.980 の非常に高い負の相関が認められた。この様に、それぞれ異なる演算で求められたパラメータ間に高い相関があることが確認されたことから、個々のパラメータが試料の特性を明確に数値化していることが推察される。

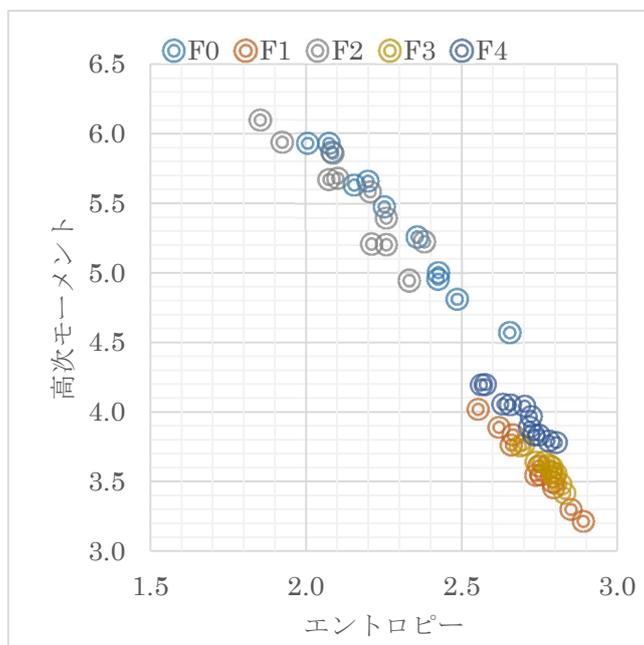


図 3-22 エントロピーと高次モーメントの相関

第3章 全体総括

3.1 研究開発成果

光干渉断層画像化法による塗装膜検査システムの開発というテーマについて、次の三つのテーマに分けてそれぞれ開発を行った。

1. 塗装膜への OCT の最適化
2. 塗装膜厚計測システムの開発
3. 塗装膜解析システムの開発

各テーマについて、実績を整理する。

<塗装膜への OCT の最適化の成果>

このテーマでは、川下企業より入手した塗装サンプルの断面出し作業を行い、断面の画像分析と既存の OCT 解析を平行して行い、積層された塗装膜を 3 つのレイヤーに分別して、それぞれのレイヤーについて、実体の膜厚と先に構築した 850nm 帯の OCT システムによる計測結果から測定した膜厚の相関をとった。この結果、最表面のクリア層にあたる Layer-1 については相関係数 0.974、メタリック塗装にあたる Layer-2 については相関係数 0.900、プライマ層にあたる Layer-3 については相関係数 0.974 という非常に高い相関が得られた。

試料へアプローチする際の光プローブの最適化を行うために、MEMS ミラーの使用を想定した塗装膜厚計の対物光学系用に NA の異なるコリメートレンズ毎の対物レンズによる集光特性を計測し、計測に最適なコリメートレンズを選択し、約 6 μm の高い光学分解能を確保した。同様に塗装膜解析システム用には解像度と走査幅を踏まえて OCT 用対物レンズを選定し、テストターゲットの計測で約 9 μm の解像度を得られることを確認した。

<塗装膜厚計測システムの開発の成果>

塗装膜厚計測システム開発では、当初、偏心光学系を利用した微動光プローブの試作と評価を行った。偏心光学系と回転機構による円周走査型プローブ構造による試作を行い、各種特性確認を行った。光学特性はビームプロファイラーによって対物レンズ面から約 18mm の位置に焦点を結ぶことを確認し、その際の分解能が約 6 μm と計算値通りの値となることを確認した。一方、このプローブの OCT 計測結果から、プローブ光が回転動作により試料への入射角や距離が変化する不具合が認められ、改善の必要があることが分かった。しかし、アライメントには時間を要することが予想されることから、解析システム用に開発した MEMS 型へ移行し試作を実施し、膜厚計測できることを確認した。

また、塗装膜厚計測システム開発では、オリジナルのラインセンサ基板を開発し、2048 画素、ピクセルクロック 10MHz で駆動し、出力されるビデオ信号を波形成形して 12bit の ADC でデジタル信号へ変換して出力できるようにした。このラインセンサの制御には FPGA を採用し、波形解析用には MCU 採用している。更に、これまでの FPGA+MCU という構成から SoC FPGA へ移行した。このデバイス基板では、処理時間は従来の約 4.7 倍に高速化し、基板面積は 1/4 となった。この基板をベースに装置化を行い、塗装膜の膜厚計測評価を実施した。

＜塗装膜解析システムの開発の成果＞

OCT 計測システムのベースとなるオールファイバー型スペクトルドメイン OCT を構築し、塗装膜解析システムを構築した。塗装膜解析システム用の光プローブは、当初、MEMS ミラー型で開発し、更に、これを内蔵した光プローブヘッドを収納できるケースを 3D プリンターで試作し、ヘッドを試料に密着させて計測を実現した。しかし、今後の光走査の高精度を踏まえてガルバノミラー方式へ移行した。更に、川下企業のニーズに沿って、ヘッドは、据置型、手持ち型、スタンド型で利用できるようにして計測評価を実施した。

塗装膜解析システム開発では、高速なラインスキャンカメラを採用し、OCT 計測ソフトウェアの処理を最適化してカメラのラインレートで断層解析を行えるようにした。これにより、三次元の OCT 計測に要する時間は最短で約 1.9 秒となる。また、分光光学系のアライメント、解析波形の改善と計測深度方向でのゲイン改善を実現し、ミラーを試料にした感度計測で 100dB 以上の感度を確認し、深さ分解能は 7.8 μm 相当であることを確認した。

OCT 計測ソフトウェア開発では、断層画像を解析した塗装膜厚を算出するアルゴリズムを実装し、各層の膜厚値について断層計測を行いながらリアルタイムで出力する。同様にエリアモニタ機能を実装して、計測箇所の面画像がリアルタイムで観察できるようになった。

また、OCT の三次元計測データを圧縮保存する機能を実装し、データを可視化できる画像ビューアーの開発を行った。ビューアーでは、保存された OCT データファイルを読み込み、画像上のスライスを移動させるだけで任意の断層画像を即座に観察できる。

塗装膜評価アルゴリズムの開発は、従来の塗装外観評価システムでは差異が現れないが目視では微妙な違いが出るようなケースにおける評価指標の発掘が目的である。これまでの色調や指向性依存反射強度などのマクロな視点での検査方式に対して、本手法はミクロな視点で塗装面の状態からパラメータ抽出の可能性を探るものである。現在着目している要素としては、塗装膜における散乱体の分布状態で、積算画像に対してテクスチャ解析の手法を適用して、標準偏差、高次モーメント、フラクタル次元、エントロピーといった特徴量の評価を実施し、各サンプルによる違いが数値化できることを確認した。また、塗装片 5 種を対象にエントロピーと高次モーメントの同時取得を行い、パラメータ相互の相関確認を実施したところ相関係数 0.980 の高い負の相関が得られ、相互に異なる演算手法で求められたパラメータ間に非常に高い相関が得られたことから、各パラメータには試料の状態を表す指標としての確からしさが確認された。

3.2 事業化計画

本事業による開発成果の事業化計画については、当面、自動車の塗装による評価を実施するが、開発した装置は高品位の積層塗装膜を対象にした汎用的な塗装評価システムとして、自動車メーカーや家電等の各種装置メーカー、塗料メーカーとのコンタクトにより実用化を進める。

リサイクル適正：A