

自動車外装の色管理に適した マルチアングル分光測色計CM-M6の開発

The CM-M6: A Portable Multi-Angle Spectrophotometer for Automotive Vehicle Body Color Management

山口 巨*
Wataru YAMAGUCHI

寺岡 良隆*
Yoshitaka TERAOKA

飯田 慎一*
Shinichi IIDA

吉田 英史**
Hidefumi YOSHIDA

要旨

自動車外装に多く使われているメタリック塗装、パール塗装は、観察角度により明るさや色が変わるため、複数角度での色管理が求められている。また、外装形状は自由曲面が多く複雑化しており、従来の測定器では測定したい場所が測定できないケースが増えてきている。

このような課題を解決するために、複数角度の測色が可能で、誰でも安心して測定できるマルチアングル分光測色計『CM-M6』を開発した。

CM-M6では、測定安定性を確保するために、測定器が多少傾いても安定した測定値を得ることができる、独自技術のダブルパス光学系を開発した。また、測定誤差(器差)縮小のために、光学系の角度誤差を補正するジオメトリ補正技術により、顧客要求レベル以下の器差を実現した。

更に世界各地の生産工場ですストレスなく使用いただくために、小型・軽量でハンドリング性の良い測定器をコンセプトとしてユーザビリティの向上を図った。

Abstract

Automotive vehicle bodies are often painted with metallic and pearlescent paints. Since the brightness and color of those bodies depend on the angle of observation, color must be controlled on the basis of multi-angle observation. Further, automotive vehicle body shapes are complicated with free-form surfaces, and conventional measuring instruments have difficulty measuring such free-form surfaces. Responding to these problems, we developed the CM-M6, a multi-angle spectrophotometer that makes multi-angle color measurement not only possible, but simple to accomplish.

The CM-M6 technologies include a double-path optical system that provides stable measurement even when the CM-M6 is not perpendicular to the surface measured. The CM-M6 also employs geometry compensation to compensate for angular error of the optical system, and thus the CM-M6 achieves high inter-instrument agreement. Further, the CM-M6 is so small and lightweight that it can be used in manufacturing plants, large and small, around the world.

*産業光学システム事業本部 センシング事業部 開発部

**ヒューマンエクスペリエンスデザインセンター

1 はじめに

近年、自動車外装にはメタリック塗装、パール塗装が多く使われている。メタリック塗装、パール塗装は、観察角度により明るさや色が変化するため、複数角度での色管理が求められている。

また、塗料は環境負荷を考慮し、VOC、CO₂を削減した水性塗料へ移行している。自動車外装部品ごとに塗料の種類が異なる場合があり、色合わせが更に難しくなってきた。

更に、外装形状は自由曲面が多く複雑化しており、従来の測定器では測定したい場所が測定できないケースが増えてきている。

コニカミノルタは、1992年にマルチアングル測色計CR-353/CR-354を発売、2011年にはCM-512m3Aを発売し、大手自動車メーカーに導入いただいている。しかし、上記環境の変化から従来の測定器では、下記のような課題があった。

- ・測定結果が目視評価に合わない塗料が増えてきている。
- ・曲面を測定する際に安定した測定ができない。
- ・製品が重く大きいため、ホールド性が悪く、長時間の使用に不向きである。
- ・結果表示が見難く、現場での使用に不向きである。



Fig. 1 The CM-M6 Portable Multi-Angle Spectrophotometer.

我々はこのような課題を解決するため、複数角度の測色が可能で、誰でも安心して測定できるマルチアングル分光測色計『CM-M6』を開発した¹⁾ (Fig. 1)。

本稿では、「性能向上」、「ユーザビリティ向上」の原動力であるコア技術について紹介する。

2 基本原理

自動車の塗装の種類には、ソリッド塗装、メタリック塗装 (Fig. 2 (i))、パール塗装 (Fig. 2 (ii)) などがある。メタリック塗装、パール塗装は、塗料内部にフレークと呼ばれる多数の微小片を含み、自動車外装特有の高い意匠性の源となっている。

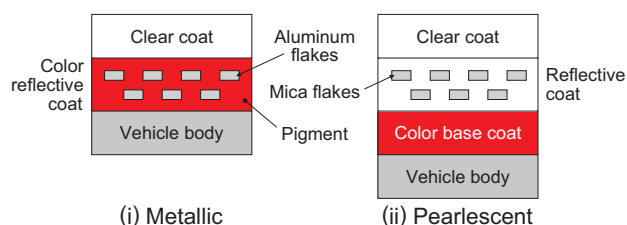


Fig. 2 Metallic and pearlescent paint layers.

メタリック塗装は、アルミフレーク表面での反射光と塗料での反射光が混ざり、観察方向により反射光強度が変化する。メタリック塗装の角度による反射光強度を模式的に表したのがFig. 3である。

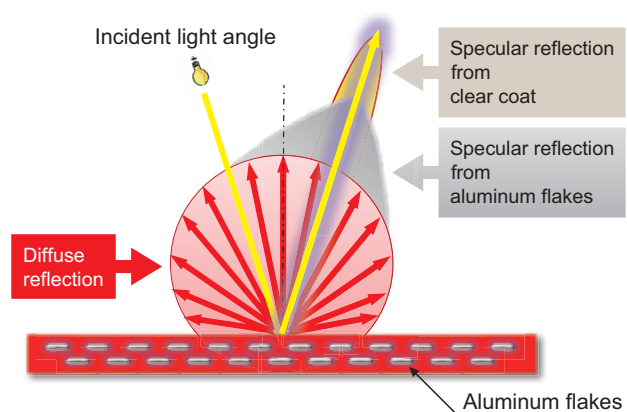


Fig. 3 Components of light reflected by a metallic coating.

Because the ratio between the two components of reflected light depends on the angle of observation, the appearance of the color does also.

一方、パール塗装は、マイカフレーク表面での反射光と透過光の光路差により干渉が起き、観察方向により反射光強度および色に変化する。

近年、高い意匠性を持たせるため塗装の構造が複雑化しており、従来機種であるCM-512m3Aの3角度計測 (Fig. 4 (i) 相当) よりも広範囲の角度で反射の特徴を持つ塗装が市場化され始めた。そこで、測定角度を従来機種の3角度から6角度 (Fig. 4 (ii)) に増やし、より広範囲にすることで、目視相関の高い測定を可能とした。国際規格であるASTM E2194²⁾にて規格化された5角度 (as15, 25, 45, 75, 110) (asはaspecularの略で正反射からの角度を意味する) に加え、負角であるas-15を追加することで、より多くの塗装で目視相関を得ることができる。

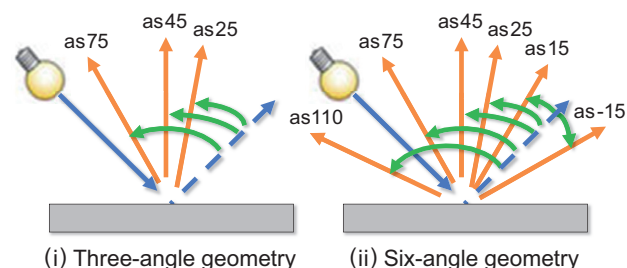


Fig. 4 Multi-angle spectrophotometer geometries.

3 顧客課題を解決するためのコア技術

3.1 性能向上

3.1.1 安定性 (ダブルパス)

近年の自動車外装形状の特徴として、自由曲面が増加している。これら曲面を正確に測定するには、試料の法線方向と測定器の基準方向とを一致させる必要があるが、従来の測定器では難易度が高く安定した測定が困難であった。

前述の通りメタリック塗装、パール塗装は、塗膜内部に微小なフレークを含有し、その反射角特性はFig. 5に示すように正反射に近い角度で高い反射率を示す。

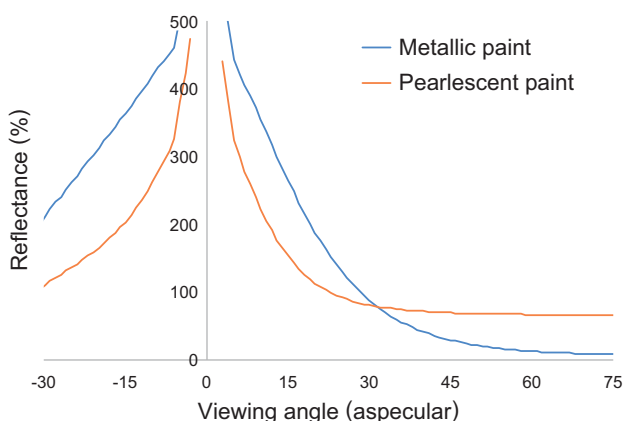


Fig. 5 Dependence of metallic and pearlescent paint reflectance on angle of observation.

このため、正反射に近い角度では観察角度変化に対する反射率の変化量が大きく、それに起因して測定器の姿勢 (傾き) に対する誤差感度も高くなり、測定再現性の向上が課題であった。

これに対し、接触部に圧力センサーを設けて姿勢を検出する構成も検討したが、正しい姿勢で保持するのは容易ではなく、ユーザビリティの低下を招く恐れがあった。そこで我々は、測定器を正しい姿勢に制限するのではなく、多少傾いた姿勢であっても誤差が生じない方法として、基準軸に対し対称な2つの光学系を持つ「ダブルパス光学系」³⁾を開発した (Fig. 6)。

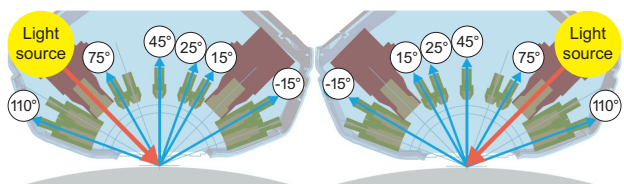


Fig. 6 Double-path optical systems.

測定器が傾いた場合、測定試料に対する照明角および観察角が変化するが、一つの光学系では角度が正反射角に近づくとも測定値は増加し、逆に正反射角から遠ざかると測定値は減少する。一方CM-M6では、対称な2つの光学系を有し、一方の測定値は増加する (Fig. 7 (A)) の

に対し、相対する他方の測定値は減少する (Fig. 7 (B)) ため、これら両方の測定値を用いることで姿勢誤差を相殺し、常に誤差がない場合 (Fig. 7 (C)) 相当の測定値を得ることができる。

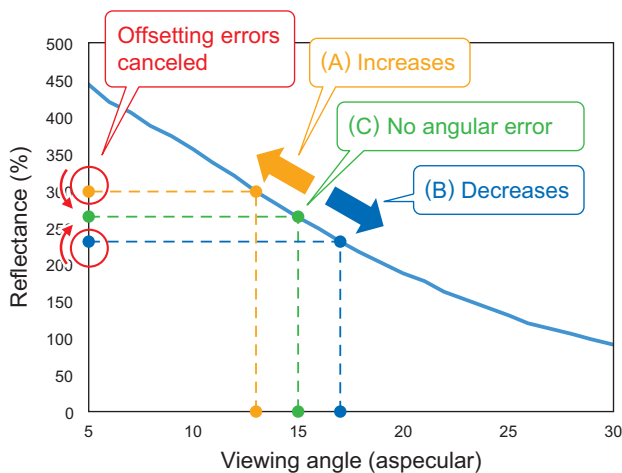


Fig. 7 Slope error correction in a double-path optical system. Reflectance is measured from equal but opposite angles. Since the angles offset each other, the resultant measurement is accurate.

「ダブルパス光学系」の補正効果をFig. 8に示す。この技術により、従来の測定器では測定が難しかったドアパネル、ドアミラー、ピラー、ボンネットなど曲面を有する部品でも再現性良く測定することが可能となった。

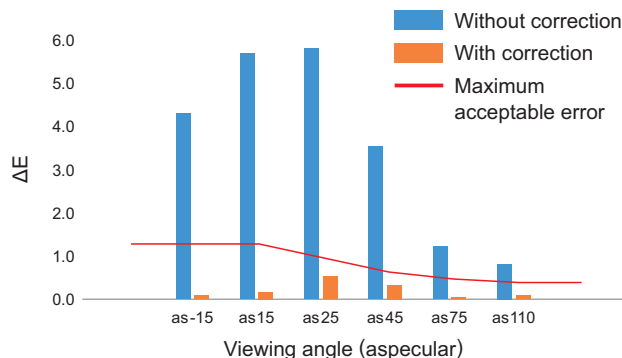


Fig. 8 Measurement errors at different viewing angles. Double-path optics reduce error to far below the maximum acceptable level. Conventional apparatus without correction results in unacceptable error.

3.1.2 器差 (ジオメトリ補正)

メタリック塗装、パール塗装の反射特性は、別の技術課題も併せ持つ。正反射に近い角度において角度変化に対する感度が高いことで、測定器のもつ光学系の製造角度誤差により、測定値に大きな誤差 (器差) をもたらす。

仮に部品精度および調整精度のみで要求性能を達成させる場合、10 μ mレベルの精度が必要となり、実現難易度が高い。そこでCM-M6では光学系の角度 (ジオメトリ) 誤差を補正する独自アルゴリズム⁴⁾を開発し、顧客要求レベル以下の器差を実現した。

塗装面からの反射光は、i) フレークからの正反射光、ii) ベース塗料からの拡散光に分解できる。各々の反射角特性は、i) がフレークの塗膜内部でのフレーク配向分布に起因しているためガウス分布に、ii) が反射角度によらずほぼ一定と見なせるため、その和である式 (1) をモデル関数のベースとした。

$$R(\theta) = a \exp(-\theta^2/b^2) + c \quad (1)$$

式 (1) の θ は観察角度、 a , b , c は試料によって決まる定数である。CM-M6 では更に、演算時間短縮のため、単純化した近似モデルとすることで、高速測定が要求される自動車生産ラインでの使用も可能となった。このモデル関数を用いて、Fig. 9 に示すフローに従ってジオメトリ補正を行う。

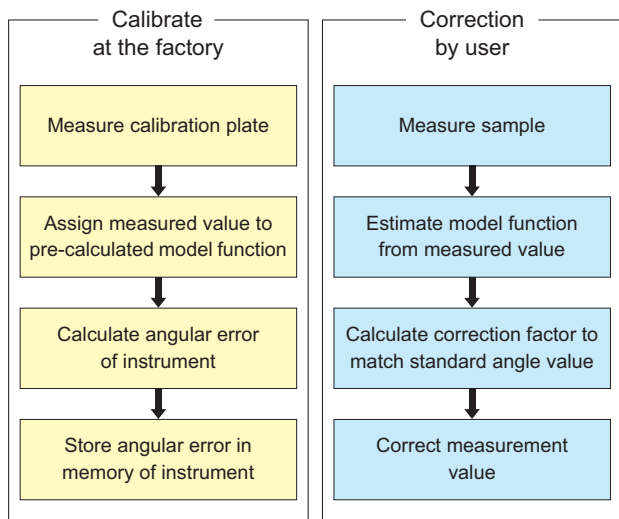


Fig. 9 Geometry calibration and correction.

これらによる器差補正効果を Fig. 10 に示す。補正により器差は低減し、顧客要求レベル以下を実現した。

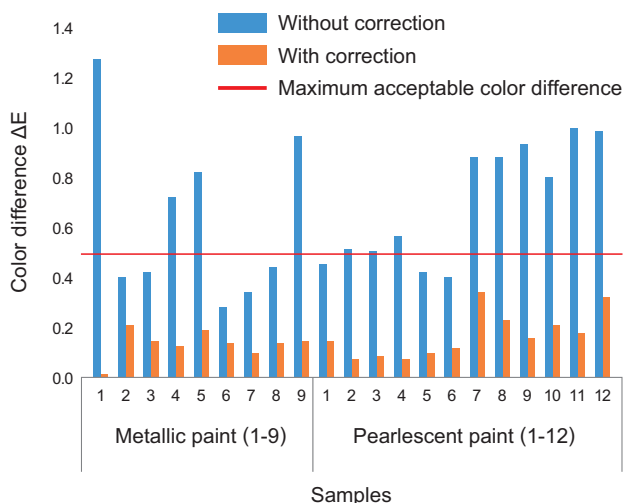


Fig. 10 Improved inter-instrument agreement through geometry correction (as25) of the color differences of 9 metallic and 12 pearlescent paints.

3.2 ユーザビリティ向上

3.2.1 小型・軽量化

世界各地の生産工場で使用いただくためには、ユーザーの手の大きさによらず操作性が良いこと、長時間の使用が苦にならないことが要求される。そこで我々は小型・軽量（従来機種比75%）でハンドリング性の良いボディ形状をコンセプトとして検討を進めた。Table 1 は製品構成の比較である。測定角度毎に分光器を配置する場合、数多くの分光器が必要となり、上記要求にある小型・軽量化を達成することが困難になる。そこで、シャッターにより各角度からの光を順次切り替えて一つの分光器で受光する構成を採用した。

Table 1 Two types of configurations.

	Single spectrometer with optical path switching	Eleven spectrometers without optical path switching
Number of spectrometers	1	11
Time needed to measure	Good	Excellent
Cost	Good	Poor
Size	Fair → Good	Poor

多角度の光学系の搭載とハンドリング性を両立するには、コンパクトにまとめることができる光デバイスが必要であり、受光部には特殊なプラスチック光ファイバーを採用した。しかし、プラスチック光ファイバーは、温度による光学特性の変化が大きいという課題があった。

これに対し、光ファイバーからの出射光を安定させるため、分光器入光部の解析モデルを作成し熱変形解析を行った。Fig. 11 は分光器入光部のモデル、Fig. 12 は熱変形解析結果の一例である。ベース材に光ファイバーを挿入し、ベース材から一定量露出した状態で接着保持をしている。試作モデルでは光ファイバーの露出量の違いから温度変化による光ファイバーの角度変動を招いていた。接着剤の塗布方法を改善した量産モデルでは角度変動の改善が見られた (Fig. 13)。また、実機検証においても目標性能を達成することを確認した。

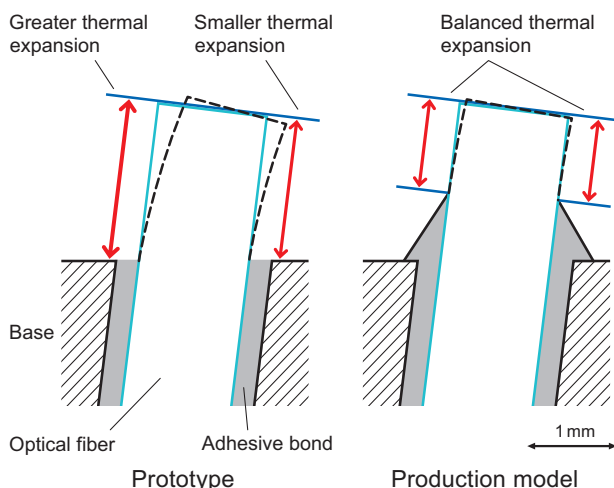


Fig. 11 Thermal expansion of two spectrometer light inlets.

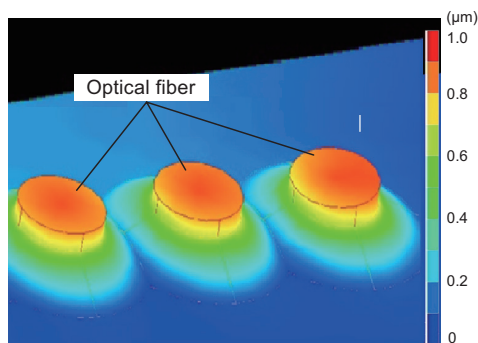


Fig. 12 Displacement due to change in temperature.

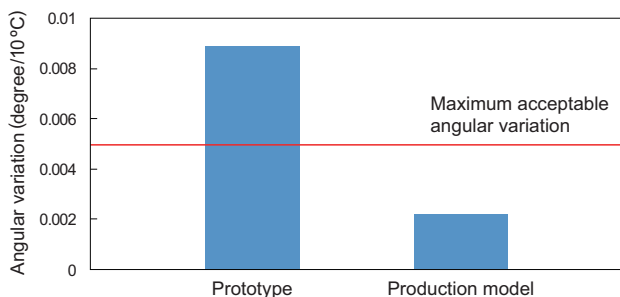
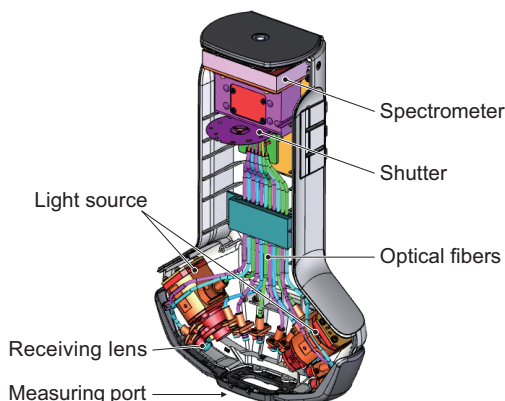


Fig. 13 Angular variation of optical fibers due to change in temperature.

これら検討の結果, Fig. 14 に示すような小型・軽量でハンドリング性に優れた構成を実現した。



	CM-M6	CM-512m3A
Size	152 x 239 x 81 mm	115 x 257 x 164 mm
Weight (including battery)	Approx. 1.1 kg	Approx. 1.5 kg

Fig. 14 CM-M6 structure.

3. 2. 2 デザイン, 操作性

ハンドリング性向上のために開発初期段階から様々なホールド方法, 構成の検討を実施した (Fig. 15)。更に, 各検証ステージにおいてもプロトタイプモデルを作製し, 実車・現物検証を繰り返しながら形状の探索を行った。

その結果, 小型化と合わせて人間の手の「握る」「あてがう」という動作に素直で, 片手, 両手のどちらでも重心をホールドでき, 測定時の負担軽減ができる縦形形状を採用した。更に両手測定に対応した測定ボタンの追加配置, 使用方向に合わせて反転できる画面表示など, 測定姿勢の自由度を上げ活用場面を広げるための工夫も行っている (Fig. 16)。

外観デザインは, インターフェース部をグレー色で明確にツートーンに分けるコニカミノルタ分光測色計としてのシリーズ統一を行っている。堅牢なボディに加えて, 測定対象物への傷防止や測定および可搬時の落下防止の配慮 (ハンドストラップ) により実用面での信頼性を高めている。

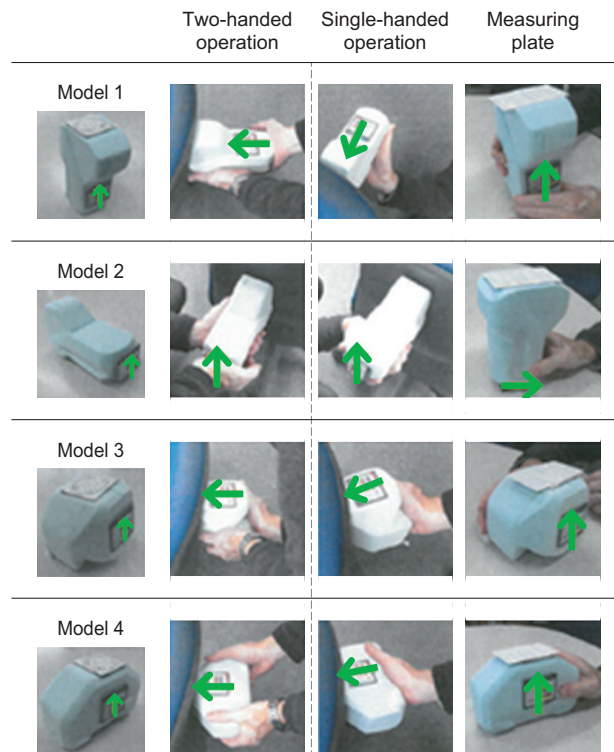


Fig. 15 Evaluating four prototypes for ease-of-use.



Fig. 16 The CM-M6 in actual use.

UI (User Interface) デザインにおいては, 3.5インチのカラー液晶の搭載を前提に画面レイアウト, GUI (Graphical User Interface) を根本的に見直し, プロトタイプ検証を重ねて操作性と視認性の向上を目指した。

例えば, 測定者には一目で合否判別可能な表示 (Fig. 17 A) を行い, 管理者には詳細な測定結果を表示 (Fig. 17 B) するなどユーザーのニーズに合わせた画面表示の選択を可能とした。また, 校正などユーザー操作が必要な場面ではナビゲートを行いユーザビリティの向上を図っている (Fig. 17 C)。更に, 測定器と色管理ソフトウェアのUI 双方で基本画面構成の統一を図り, コニカミノルタの測定器としての高い操作性と信頼感を実現している (Fig. 17 D, E)。

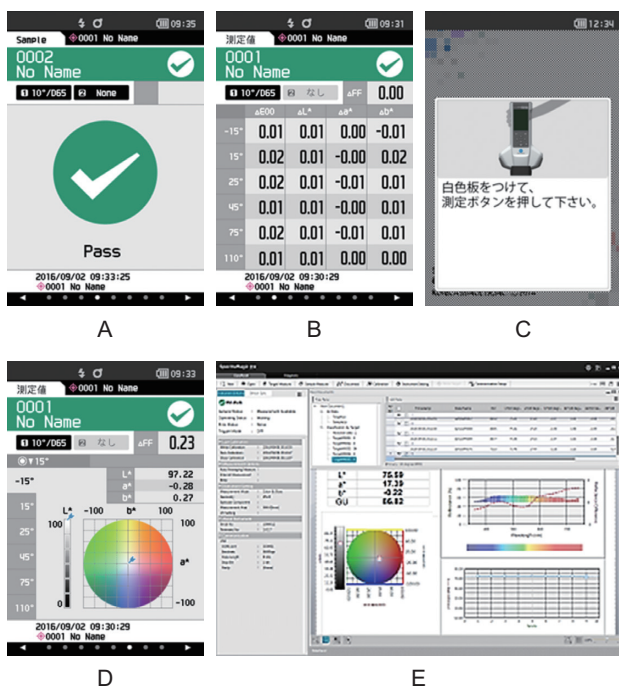


Fig. 17 Screenshots: CM-M6 (A-D) and SpectraMagic DX (E) color management software.

4 まとめ

本稿では、自動車外装の色管理に適したマルチアングル分光測色計『CM-M6』のコア技術について紹介した。

6角度の測色、ダブルパス光学系による測定安定性向上、ジオメトリ補正による器差低減を達成するとともに、小型・軽量でハンドリング性の良いボディ形状、解りやすいUIの搭載によりユーザビリティ向上を図った。

お客様の様々な使用シーンを想定し、お客様の課題を解決するために必要な機能・性能を追求したこれらの取り組みは、第47回機械工業デザイン賞「審査委員会特別賞」、2017年度グッドデザイン賞を受賞するなど、外部団体からも高い評価を受けている。

今後は、導入いただいた自動車メーカーの現場の声を聴き、更なるユーザビリティ向上に取り組みたい。また、自動化・インテリジェント化なども進め、自動車生産現場の変革に貢献したいと考えている。

●参考文献

- 1) 自動車の外装・内装測定現場ニーズに対応した分光測色計新製品2機種を発売
 <https://www.konicaminolta.jp/about/release/2016/0928_01_01.html>
- 2) ASTM E2194-14: 2017. Standard Test Method for Multiangle Color Measurement of Metal Flake Pigmented Materials
- 3) 寺岡良隆, 鶴谷克敏, 山野井勇太, マルチアングル測色計. 特許第5737390号, 2014. (US9001329, CN103492845)
- 4) Kenji Imura & Yoshitaka Teraoka (2016). Model-Based Corrections of Geometric Errors in Multiangle Measurements of Gonio-Apparent Coatings. COLOR Research and Application, 41, 372-383