

工業製品の色，光沢の管理に適した 分光測色計CM-26dGの開発

Development of Spectrophotometer CM-26dG Appropriate for Color and Gloss Control of Industrial Products

河野 利夫*
Toshio KAWANO

延本 祐司*
Yuushi NOBUMOTO

澤村 茂樹*
Shigeki SAWAMURA

長井 広治*
Koji NAGAI

米川 諒*
Ryo YONEKAWA

要旨

工業製品の色の品質管理において、色見本などの実物を基準とした管理からデジタルカラーデータを基準とした管理であるDCDM (Digital Color Data Management) への移行を進める動きがある。色見本による管理では、ブランドオーナーは色見本の製作、値付け、サプライヤーへの配布、管理作業が必要であったが、DCDMに置き換えることで、これら作業が削減され、品質管理の効率化、コストダウンが期待できる。

DCDMを実現するためには測色計間の性能差を出来る限り小さくする必要がある。また、工業製品の外観品質管理では色だけでなく、光沢値の管理も同時に行われているケースがあり、作業性向上による管理工数の削減が望まれている。

これらの顧客課題を解決するため、器差を抑制し、且つ、色と光沢の同時測定を可能にした分光測色計CM-26dGを開発した。

CM-26dGでは校正技術の改良により測色計の器差を抑制し、低ノイズ化した電気回路により測定繰返し性能を向上させることで、ポータブル分光測色計でありながら高性能な据置型分光測色計に匹敵する性能を実現した。また、高い測色性能と光沢測定性能を両立する照明光学系と光沢補正技術を開発することで、分光測色計に光沢計を一体化することができた。

さらに、顧客の測定作業を登録、ナビゲーションするジョブ機能と、測定条件を簡単に設定管理できる機能を開発することでユーザビリティを向上しており、CM-26dGは工業製品の品質管理のさらなる効率化に貢献できる製品となっている。

Abstract

In the quality control of industrial products, there is a shift from management using an actual article such as a color card as a standard, to DCDM (Digital Color Data Management), in which digital color data is used as a standard. Management by way of color cards requires a brand owner to perform management tasks including producing color cards, assigning values, and distributing them to distributors. However, DCDM eliminates these tasks, thereby streamlining the quality control and reducing costs.

In order to realize DCDM, the difference in performance between colorimeters needs to be minimized. In addition, in the quality control of external appearances of industrial products, gloss values are controlled in addition to color in some cases.

To solve these customers' issues, the spectrophotometer CM-26dG has been developed in which an instrument error is reduced and color and gloss are simultaneously measured. The instrumental error is controlled with an improved compensation technique, and a low-noise electronic circuit provides excellent repeatability of measurement, thereby achieving performance as high as a benchtop spectrophotometer. In addition, an illumination optical system and a compensation technique have been developed to achieve both a high color measurement performance and a gloss measurement performance, and a gloss meter has been integrated in a spectrophotometer.

In addition, two other functions have been developed: a job function to register and navigate a measurement work of a customer; and a function to manage measurement conditions in a simple way. These functions provide an improved usability and thus enables the CM-26dG to contribute to further streamlining of quality control of industrial products.

*産業光学システム事業本部 センシング事業部開発部

1 はじめに

企業のコスト構造の変革，生産性の向上を目的に，企業の生産拠点，サプライチェーンがグローバルに展開されるようになった。企業のブランドイメージを守るため，各生産拠点での製品品質の維持，管理は大変重要であるが，生産ネットワークの広がりにとともに，その難易度は高くなっている。これは製品デザインの重要な要素である色においても同じである。

工業製品の色の品質管理において，従来の色見本などの実物の基準を用いた管理から，デジタルカラーデータを基準とした管理であるDCDMへ移行することで，色見本による管理で実施していた色見本の作製，値付け，サプライヤーへの配布，管理作業を廃止し，作業の効率化，コストダウンを実現することが望まれている。

しかしながら，DCDMを実現するためには測色計間の性能差を出来る限り小さくし，また装置の測定条件をサプライチェーン間で統一させて，出力するカラーデータを同じ尺度で比較できるようにする必要がある。

また，工業製品の外観品質管理では色だけでなく，光沢値の管理も同時に行われているケースがあり，作業性向上による管理工数の削減が望まれている。

我々はこれらの顧客課題を解決するため，色と同一測定箇所の60°光沢測定を可能にし，且つ，装置の高精度化，ユーザビリティ向上を実現した分光測色計『CM-26dG』を開発した（Fig. 1）。



Fig. 1 CM-26dG Spectrophotometer.

本稿では顧客課題解決の原動力になっている「性能向上」，「ユーザビリティ向上」のコア技術について紹介する。

2 システム構成

CM-26dGでは，測色における照明および受光の幾何学条件に関して，JIS Z 8722の幾何学条件^{c1)}に準拠した「拡散照明／8°方向受光（以下，d:8ジオメトリ）」を採用している。d:8ジオメトリでは光源からの光を積分球の内壁面で拡散反射させ，試料に対してあらゆる方向から均等に光を照射する。試料からの反射光のうち，試料面法線に対して8°方向に反射する光を回折格子で分光し

た後，センサーで受光し，センサー出力値から分光反射率の算出，色の数値化を行う。積分球には閉鎖式のライトトラップが備わっており，8°方向の正反射光を含む測定SCI（Specular Component Included）と，正反射光を含まない測定SCE（Specular Component Excluded）を自動で切り替えることができる。

また，光沢測定に関しては，JIS Z 8741²⁾やDIN 67530³⁾に準拠した60°鏡面光沢測定方式を採用している。CM-26dGでは測色計の測定箇所と同一箇所が測定できるように，積分球の壁の一部に光沢計の照明，受光光学系が一体化されている（Fig. 2）。

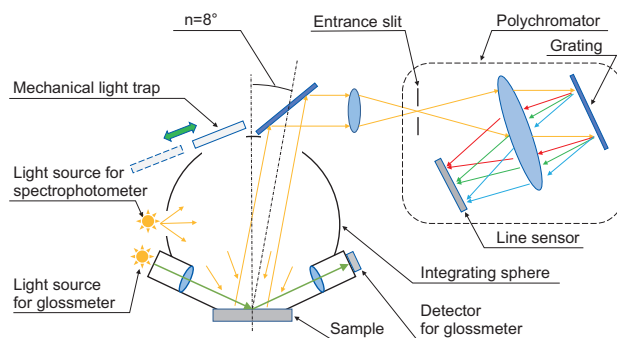


Fig. 2 Internal configuration of CM-26dG system.

3 顧客課題を解決するためのコア技術

3.1 測色計の高精度化

従来の色見本を使用した工業製品の色管理では，色見本と測定対象部品を測定し，2つの色彩値の差（色差）が管理幅に入っていることが要求される。一般的に上記のような相対管理の場合，オーナー及び，サプライヤーが所有する測色計への性能要求は高くなかった。一方で，オーナー側は作製する同一色見本間の色差を抑え，各色見本の変化を正確に管理する必要があった。

一方，DCDMの場合は，オーナーは作製した色見本の色彩値を測定し，サプライヤーには色見本の代わりにデジタルデータ化された色彩値が提供され，サプライヤーは提供された色彩値を基準として，所有する測色計で部品の色を管理し，部品をオーナーへ納めることになる。そのため，オーナーはサプライヤーに提供する色見本の作製，配送，経年変化の管理が不要になるが，オーナー及び，サプライヤーが所有する測色計の正確さに対する要求は高くなる。

部品寸法の管理では測定データでの管理が当たり前であるが，これは長さという物理量を正確に計測する技術が広く確立されているおかげである。しかし，長さにおいても器差仕様が±0.02 mmのノギスを使用して0.05 mmの精度で寸法を管理する場合，ノギスの個体差だけで最大0.04 mmの誤差が生じて問題となるように，色の管理においてもデータで管理する場合は測色計間の性能差が問題になる場合がある。例えば部品同士の突合せ部分など，特に色の差が目立ち易い部品の色差管

理幅には $\Delta E^*ab < 0.4-0.8$ 程度が要求されることがあるが、コニカミノルタの従来のポータブル分光測色計CM-2600dの器差性能は $\Delta E^*ab < 0.2$ (BCRAタイル12色平均)、測定繰返し性は $\sigma \Delta E^*ab < 0.04$ (白色校正板測定時)であるため、DCDMの場合、オーナー側とサプライヤー側の測色計の差が色差管理幅の大部分を占め、サプライヤー側での良品が受入検査で不合格になるリスクが高かった。

そこで、CM-26dGでは分光器の波長校正技術の改良、電気回路の低ノイズ化を進め、器差性能、測定繰返し性能を約2倍向上させることでポータブル分光測色計として最高レベルの性能を実現し、DCDM適用範囲を拡大させることを目標に開発した。

3.1.1 分光器校正技術

分光器は、入射スリットで入射光を制限したのち、スリットを通過した光をレンズ等で平行光にして回折格子に入射させ、回折格子で波長分散された光を再びレンズを用いてラインセンサー上に集光させる光学ユニットである (Fig. 2)。分光器の波長ずれや、波長分解能変化を引き起こす主要因として、上記光学素子組立時の位置、姿勢誤差が挙げられる。

各光学素子の位置、姿勢誤差による波長分解能誤差を光学シミュレーションによって求めた一例を Fig. 3 に示しており、最終的な誤差はそれらを合成した形で生じる。従来のCM-2600dでは上記のような詳細な光学シミュレーションによる誤差モデリングは行わず、最終的な波長ずれや分解能変化を測定し、低次の冪関数で近似して補正していたが、近似精度が不十分であり器差の原因となっていた。

そこで、CM-26dGでは光学シミュレーションにより各光学素子起因の誤差の傾向をモデリング、テーブル化し、各テーブルの重み付け線形結合により測定した誤差を近似して補正している。これによって、より正確に分光器の状態をモデル化することが可能になった。

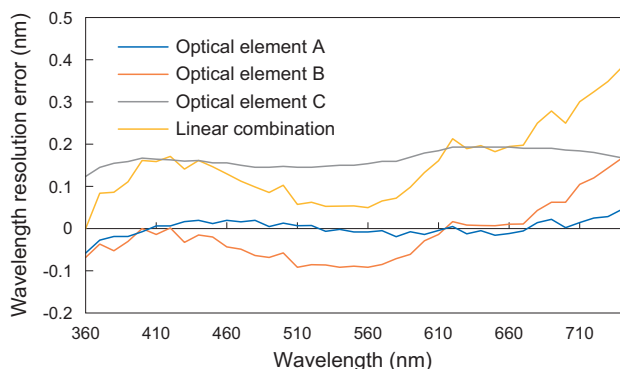


Fig. 3 Wavelength resolution error due to orientation error of optical element.

Spectrophotometric errors due to positions and orientations of optical elements are calculated by an optical simulation, and the errors are weighted and linearly combined to approximate the error.

Fig. 4 に示すように、CM-26dGはCM-2600dと比較して器差を40%縮小し、 $\Delta E^*ab < 0.12$ を実現しており、コニカミノルタの最上位機種である据置型分光測色計CM-3700Aに迫る性能を実現した。

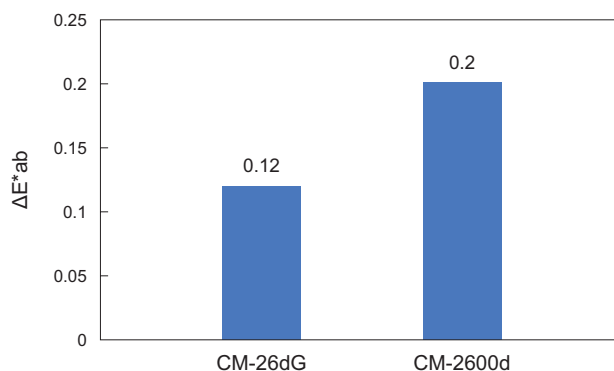


Fig. 4 Comparison of inter-instrument agreement with Konica Minolta d:8 type portable spectrophotometer.

The CM-26dG has an instrumental error inter-instrument agreement of $\Delta E^*ab < 0.12$, which is smaller than that of the conventional spectrophotometer CM-2600d by 40%.

3.1.2 測定繰返し性

器差を縮小するうえで、測色計の繰返し性向上は重要な要素であり、センサーによって検出された光信号をデジタル信号に変換する回路で生じるノイズが測定繰返し性に大きく寄与する。

CM-26dGでは、回路構成を刷新、低ノイズ化したことで、測定繰返し性は $\sigma \Delta E^*ab < 0.02$ (白色校正板測定時)を実現しており、従来のCM-2600dと比較して1/2に改善した。

また、ピアノブラックと呼ばれる意匠性の高い黒色を測定、管理するシーンが増加しているが、上記ノイズは黒色試料を測定する際に顕著に影響する。Fig. 5 に示すように、黒色試料測定においてはCM-2600dの1/6に改善しており、据置型分光測色計CM-3700Aに匹敵する性能を達成した。

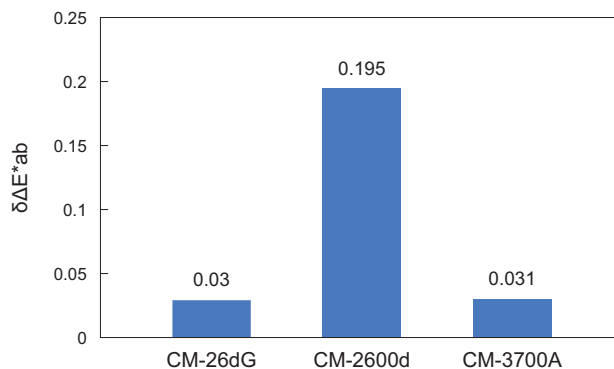


Fig. 5 Comparison of repeatability with CM-26dG and conventional model when measuring BCRA Black tile in SCE mode.

In the case of measurement of a black sample, the repeatability is improved to be 1/6 of that of the conventional spectrophotometer CM-2600d and is as good as that of the benchtop spectrophotometer CM-3700A.

また、このノイズの改善により測定光源の光量は従来機種約1/10倍まで低減させることが可能になった。光源として採用しているキセノンフラッシュランプは発光光量が小さいほど電極へのダメージが低減し、光源寿命を延ばすことができるため、光源寿命は従来機種と比較して3倍以上に改善できた。

さらに、従来機種ではキセノンフラッシュランプの発光のために短時間に大きなエネルギーを供給することが求められるため、光源用コンデンサへの充電時間が長く製品の測定時間、測定間隔を短縮することが困難であった。CM-26dGでは、前述のように発光光量を低減したことに伴い、光源用コンデンサの容量、充電時間が半減しており、Table 1 に示すように測定時間、測定間隔は従来機種と比較して大幅に改善している。

Table 1 Comparison of measurement time by CM-26dG and conventional model in SCI mode or SCE mode.

The measurement time and measurement interval are vastly improved compared to the conventional model.

	CM-26dG	CM-2600d	CM-3700A
Measurement time	Approx. 0.7s	Approx. 2s	Approx. 2s
Measurement interval	Approx. 1.5s	Approx. 3s	-
Auto-averaged measurement (3 times)	Approx. 2s+	Approx. 8.5s	Approx. 9s

これらの改善により、一日数千回の検査を行うような使用頻度が高い顧客に対しても使い勝手の良さと、長期間使用可能な高い耐久性を実現した。

3.2 d:8ジオメトリ分光測色計と光沢計の一体化

3.2.1 光沢計に対する再帰反射光ノイズ補正

60°光沢計は試料法線から60°の角度で平行光を照射し、試料からの正反射方向に反射した光を受光する測定システムであるが、光沢計をd:8測色計と一体化し、試料面の同一箇所を測定する場合、光沢計の照明光が試料面で反射し、反射光の一部は積分球内壁で再度反射して試料を拡散照明する。この照明光はノイズとなり、光沢測定値に誤差が生じる原因となる。このノイズ光量は、試料の表面反射率、面粗さ、内部拡散反射率、及び、積分球効率により変化するが、これらの因子を測定の度に正確に求めようとすると測定が複雑化してしまう。

そこでCM-26dGでは、試料の反射特性や、積分球の状態に依存せず、且つ、簡素なシステムで誤差を補正する技術を開発した。

Fig. 6 に示すように測定を2回行い、第1の測定では光沢計光源で試料を照明し、光沢受光系で検出される出力値 G_1 と、積分球内壁の明るさを検出するセンサーの出力値 B_1 を取得する。第2の測定では、積分球壁面に取り付けた光源を発光させて試料を拡散照明した際の積分球内壁の明るさ出力値 B_2 と、光沢受光系で検出される出力値 G_2 を取得する。

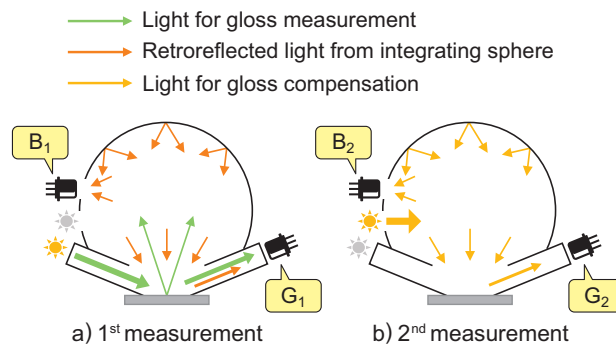


Fig. 6 Schematic configuration of noise compensation system in glossmeter.

When a glossmeter is integrated in a d:8 colorimeter, light reflected by the inside wall of the integrating sphere serves as a noise and causes a measurement error in a gloss measurement value. The CM-26dG conducts two types of measurements to compensate such a measurement error.

第1の測定で試料表面から拡散して積分球に入射する光と、第2の測定で積分球壁面に取り付けられた光源から積分球に入射する光が同等な影響を及ぼすと仮定すると、これら4つの出力値から以下の式で光沢値を推定することができる⁴⁾。

$$Gloss = G_1 - G_2 \cdot B_1 / B_2$$

Fig. 7 は光沢専用測定器であるコニカミノルタ GM-60 との出力差を示しており、試料の色、素材、表面状態に依存せず、補正効果があることが分かる。この補正により光沢計においても高い測定性能を実現した。

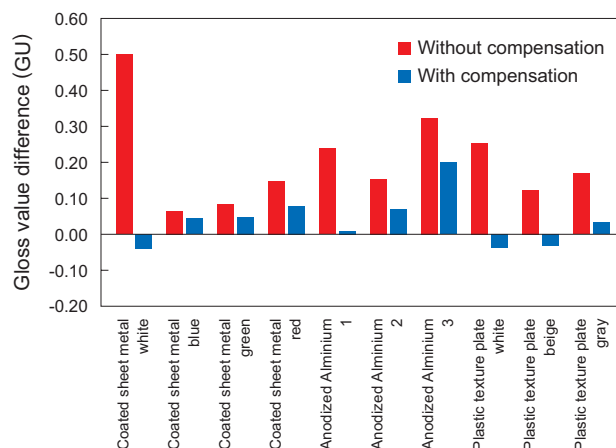


Fig. 7 Comparison of difference in gloss value from standard gloss meter with and without reflected-light noise compensation.

The graph shows that a compensation effect works well regardless of a color, material, and surface condition of the sample. This compensation achieves a high measurement performance also with a glossmeter.

3.2.2 理想的な積分球型測色計

測定試料の表面には、例えば繊維やシボ、材料起因のテクスチャーによるマクロな凹凸構造が形成されることがある。こうした凹凸構造を有する試料を測色する

際、特定方向からの照明光のみでは試料の凹凸、回転方向に依存して陰影や表面反射光の反射角度が変わり、測定値変動（回転誤差）を引き起こすことがある。

一般的な据置型のd:8ジオメトリ分光測色計では、積分球が大型なので、光源やその他構成要素のレイアウトの自由度が高く、理想に近い積分球構成が実現できる。そのため光源からの光束は積分球内壁で十分に拡散反射を繰り返し、試料を様々な角度から一定の放射輝度で照明できるので、前述した回転誤差は小さく抑えられていた。しかし、従来のd:8ポータブル分光測色計では装置サイズの制約から積分球が小さいため、光源レイアウトに自由度が無く、積分球内壁構造が複雑になり、放射輝度の角度均一性が低かった。そのため、回転誤差の観点で不利となることがあった。

CM-26dGでは光沢計一体化により積分球がより複雑になりながらも、あらゆる角度から均一な放射輝度で照明する理想的な積分球照明に近づけるべく、光学シミュレーションによる積分球内部構成の最適化を実施した。Fig. 8 に示すように、CM-26dGの積分球には、UV光を含む光源と含まない光源の2種類の光源部が結合しており、その他に試料面開口や、光沢照明/受光用の開口、光源からの照射方向を制御するバッフル等が形成されている。

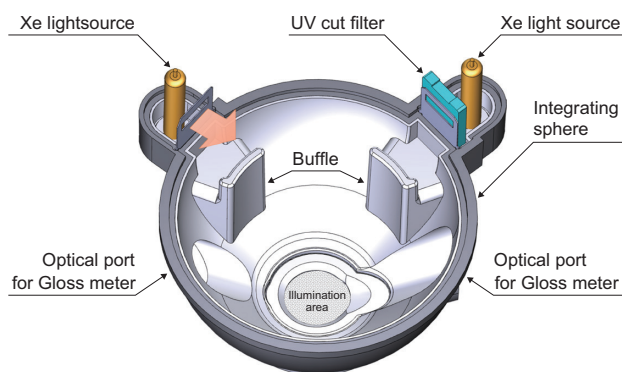


Fig. 8 Internal configuration of lower half of integrating sphere.

光学シミュレーションでは光源であるキセノンフラッシュランプからの光束について光線追跡を行い、試料面における照明角度分布を推定することで、特に①バッフル形状とサイズ、②光源開口位置の設計パラメータを最適化した。

Fig. 9 は従来のCM-2600dと、CM-26dGの照明時の放射輝度角度分布を比較した画像である。縦軸及び横軸は試料面法線からの光線入射角度を示している。また、試料面から見たキセノン光源方向も図示している。CM-2600dではキセノン光源近傍の積分球内壁の放射輝度が非常に高く、局部的に照明光が強い照明角度があるのに対し、CM-26dGでは放射輝度の均一性が改善していることがわかる。

こうした積分球内部形状の最適化により、回転誤差が小さい照明光学系を実現した。

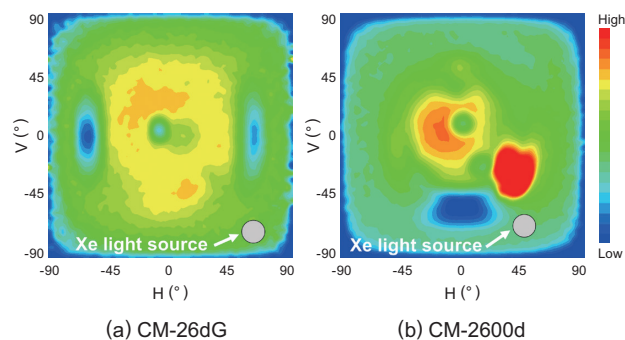


Fig. 9 Simulation result of radiance angle distribution.

The radiance angle distributions of the conventional CM-2600d and the CM-26dG are compared. The horizontal axis and vertical axis each represent the incident light angle to the normal line of the sample surface.

3.3 ユーザビリティ向上

測色計を正しく使用するには、試料ごとに適した測定条件を設定しておく必要がある。また、試料の基準値と測定値の差に対して色差管理幅を定め、機器に登録した基準値ごとに管理幅を設定しておく必要がある。従来のCM-2600dでは、作業者は作業手順書に従って、測定試料に合わせた基準値、測定条件を手動で設定しなければならなかった。

CM-26dGでは、別売のPCアプリケーションソフトSpectraMagic NXを通じてジョブという単位で顧客のワークフローを登録することができる「ジョブ機能」を新たに搭載した。ジョブ機能を使用すれば、Fig. 10 に示すように測定試料を画像として本体液晶に表示して、測定箇所を指示することが可能であり、表示された測定試料に合わせて予め登録された基準値、測定条件が自動的に本体に設定される。

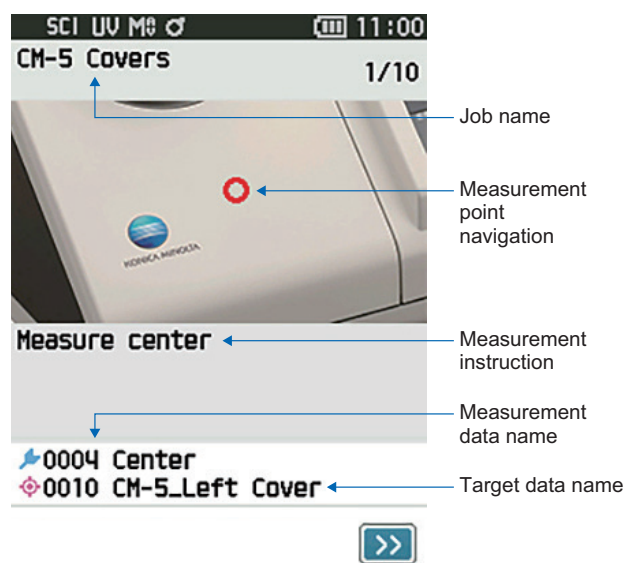


Fig. 10 Display screen when job function is used.

A measurement point can be assigned while an image of a measurement sample is displayed on the LCD display of the CM-26dG. The target values and measurement conditions previously registered are automatically set on the main body, depending on a sample to be measured.

これにより作業者は管理者が登録したジョブに沿って作業を行うだけでワークフローを実行することができる。また、管理者が作成したジョブはファイルとして保存できるので、複数台のCM-26dGに同じジョブを登録することが可能であり、作業者の操作、設定ミスを大幅に軽減することができる。

さらに、CM-26dGにはPCアプリケーションソフトCM-CT1が付属しており、これまで本体操作で設定していた詳細な項目をPC画面上で容易に設定できるようになった。設定した項目は、ジョブ機能と同様にファイルとして保存することができるので、例えば複数の工場でCM-26dGを使用している場合、管理部門が決めた本体設定条件をファイルで工場へ配布すれば、工場側はファイルを読み込むだけで本体設定作業を容易に行え、作業ミスを軽減することができる (Fig. 11)。

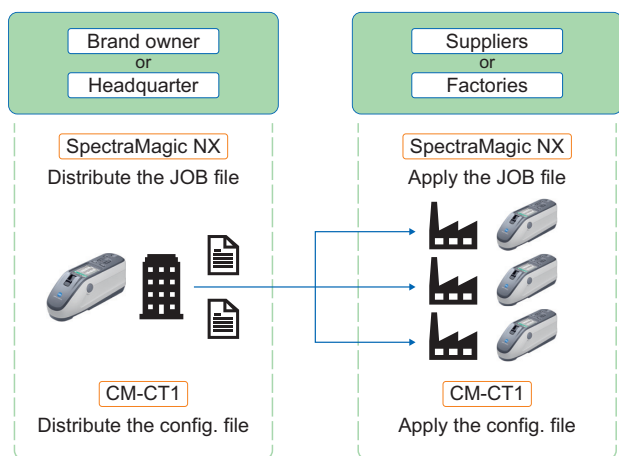


Fig. 11 How device conditions are set in a supply chain with SpectraMagic NX and CM-CT1.

A job generated by PC application SpectraMagic NX and setting conditions for the CM-26dG generated by PC application CM-CT1 can be stored as files, and it is easy to register the same job and settings for main body on a plurality of CM-26dG units; therefore, operation errors can be reduced.

また、CM-CT1はリモートコントロール機能を搭載している。この機能を使用すれば、PC画面上でCM-26dG本体の表示内容が確認でき、本体を操作することも可能となる。市販のリモートデスクトップソフトウェアと併用すれば、遠隔地にある測色計の状態を確認することも可能であり、管理者による迅速、的確なサポートが実現できる。

これらアプリケーションソフトにより顧客ワークフローの効率化、作業ミスを軽減することで、DCDMの実現にさらなる貢献をしている。

4 まとめ

本稿では、工業製品の色、光沢の管理に適し、DCDMの実現に貢献できるポータブル分光測色計CM-26dGのコア技術について紹介した。

DCDMの実現には器差を抑えた測色計をサプライチェーン内で運用することが重要であり、ハードウェアの性能を高め、作業ミス軽減をサポートするソフトウェアを備えたCM-26dGは有用なツールとなる。また、高性能な光沢計を一体化したことで、さらなる管理作業効率の改善が可能となっている。これら顧客課題を解決する取組みは、2019年度グッドデザイン賞を受賞するなど外部からも高い評価を受けている。

様々な分野でデジタル化が進む中で、工業製品の外観管理分野ではアナログな管理手法が主流である。これをデジタルデータによる管理に変革し、効率化を進めようとする顧客の要求に対して、更なるソリューションを提案していけるよう商品開発に努めていく。

●参考文献

- 1) JIS Z 8722:2009 色の測定方法—反射及び透過物体色
- 2) JIS Z 8741:1997 鏡面光沢度—測定方法
- 3) DIN 67530:1982-01 Reflektometer als Hilfsmittel zur Glanzbeurteilung an ebenen Anstrich- und Kunststoff-Oberflächen
- 4) 河野利夫, 川崎貴志, 反射特性測定装置, WO2017/208937.