

紙の蛍光を反映した測色が可能な分光濃度計FD-7のコア技術

The FD-7 Spectrodensitometer:
Taking the Fluorescence of the Substrate into Account when Measuring the Color of a Printed Object

山本 信次*
Shinji YAMAMOTO

後藤 泰史*
Yasushi GOTO

松原 範明**
Noriaki MATSUBARA

要旨

測色計は、色校正や印刷機の管理、印刷物の検査など印刷用途で広く使用されてきたが、近年、特に、印刷ワークフローの効率化のために更に拡がりを見せている。一方、従来の測色計には、紙に含まれる蛍光増白剤が放射する蛍光の影響が正しく反映されないという課題があった。FD-7では、新たに開発したVirtual Fluorescence Standard (VFS) 法を用いて、蛍光増白剤を含んだ紙に印刷された色を、蛍光の影響を反映して、簡便に測定することを可能にした。

さらに、波長ずれ自動補正機能の採用による高信頼性の確保、LED光源を使用することによる低消費電力およびランプ交換不要化を実現している。

本稿では、これらの特徴を実現しているFD-7のコア技術の内容について紹介する。

Abstract

Colorimeters have been widely used in printing for color proofing, printer management, and inspection of printed material. In recent years, the use of the colorimeter has further expanded, in particular for the purpose of increasing efficiency in a printing work flow. However, when current colorimeters are used, the influence of fluorescent light emitted by optical brighteners contained in a paper is not properly taken into account in the measurement.

The FD-7 enables simple and easy measurement of colors printed on paper containing an optical brightener by taking into account the influence of fluorescent light by using a newly developed virtual fluorescence standard method (VFS method). In addition, the FD-7 realizes high reliability by adopting an automatic wavelength compensation function, and it achieves lower power consumption and needs no lamp replacement by using an LED light source. This report introduces the core technologies that realizing the features of the FD-7.

1 はじめに

測色計は、試料を照明したときの、試料からの放射光の特性から、色を数値化する測定器である。色の定量化のニーズは幅広く、ペイント、プラスチック、テキスタイル、インクの調色や、それらが用いられた工業製品の工程管理など、さまざまな用途で使用されている。

印刷物の色管理も測色計の用途のひとつであり、色校正や印刷機の管理、印刷物の検査などで広く使用されてきたが、近年、特に、印刷ワークフローの効率化のために更に拡がりを見せている。一方、従来の測色計には、紙に含まれる蛍光増白剤が放射する蛍光の影響が正しく反映されないという課題があった。

筆者らは、この課題を解決するべく、印刷用の蛍光分光濃度計FD-7を開発した (Fig. 1)。FD-7は、また、測定器に共通した課題である長期信頼性の点でも改善されており、以下の特徴を持ち、これらの原動力となっている技術について紹介する。

- 1) 新たに開発した Virtual Fluorescence Standard (VFS) 法¹⁾を用いて、蛍光増白剤を含んだ紙に印刷された色を、蛍光の影響を反映して、簡便に測定することが可能である。
- 2) 業界初の波長自動補正機能を用いて、波長ずれを自動補正することで、長期間にわたり高い信頼性を保つことが可能である。
- 3) 照明系の光源にLEDを使用することで、低消費電力およびランプ交換不要を実現している。

なお、印刷用途では、色彩値と濃度値を測定できる製品を使用することが多く、測色計とも濃度計とも呼ばれるが、以下では測色計とする。



Fig. 1 Spectrodensitometer FD-7.

* コニカミノルタセンシング(株)
開発部
** コニカミノルタセンシング(株)
企画管理部

2 印刷用紙に含まれる蛍光増白剤の影響を反映した色測定

用紙に蛍光増白剤が含まれている印刷試料（以下、蛍光試料）の場合、測色計による測定値が目視と相関しない事がしばしば問題になる。相関のためには、目視および測色計の照明光の分光分布が一致する必要があり、印刷物の目視観察の照明光については、ISO3664:2009²⁾がCIEイルミネントD50（以下、D50）を規定し、測色計の照明光についてはISO13655:2009³⁾がやはりD50を推奨している。D50は実現が難しいため、ISO13655:2009は、①測色計の照明光をD50近似とする方法以外に、②測色計の照明光による測定データをD50によるデータに近似させるような補正をする方法を規定しているが、FD-7は、②に相当するVFS法により、D50による測色を可能にした最初の実用的測色計となっている。

2.1 蛍光試料測定

蛍光試料の観察では、反射光と蛍光とが重ねあわされた全放射光が反射光として認識されるため、その色は白色との相関色 (related color) として認知される。それに対応して、測色においても、蛍光試料からの反射光 $S_r(\lambda)$ と蛍光 $S_f(\lambda)$ が重ねあわされた全放射光 $S(\lambda)$ の、同条件で照明・受光されたときの完全拡散反射面からの反射光 $W_r(\lambda)$ に対する波長毎の比である「全分光放射率係数」 $B(\lambda)$ が測定、評価される (Fig. 2)。

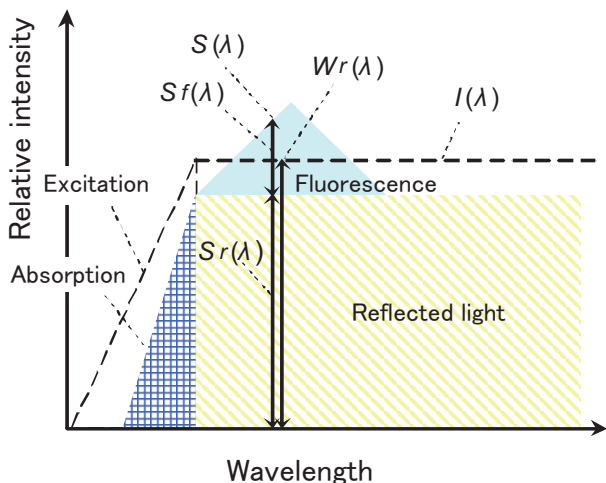


Fig. 2 Emission spectrum of a fluorescent object. The fluorescent object is illuminated by $I(\lambda)$. $W_r(\lambda)$ is the reflected light from a perfect diffuser while $S_r(\lambda)$ and $S_f(\lambda)$ are the reflected and fluoresced lights from the object respectively. $S(\lambda)$ is the total emission, being the sum of $S_r(\lambda)$ and $S_f(\lambda)$.

全分光放射率係数 $B(\lambda)$ は、その反射光成分である分光反射率係数 $B_r(\lambda)$ と蛍光成分である蛍光分光放射率係数 $B_f(\lambda)$ の和である。

$$B(\lambda) = B_r(\lambda) + B_f(\lambda) \quad (1)$$

分光強度分布 $I(\mu)$ の照明光 I で照明された試料の蛍光分光放射率係数 $B_f(\lambda)$ は、試料の二分光蛍光放射率係数 $F(\mu, \lambda)$ を用いて式 (2) で表される。

$$B_f(\lambda) = \int I(\mu) \cdot F(\mu, \lambda) d\mu / I(\lambda) \quad (2)$$

分光反射率係数は照明光の分光分布に依存しないが、蛍光分光放射率係数は依存するため、両者の和であり、次式で表わされる全分光放射率係数 $B(\lambda)$ も照明光の分光分布に依存する。

$$B(\lambda) = B_r(\lambda) + \int I(\mu) \cdot F(\mu, \lambda) d\mu / I(\lambda) \quad (3)$$

2.2 従来の測定方法

式 (3) に示すように、蛍光分光放射率係数は、試料照明光の可視域の光量 $I(\lambda)$ と UV 光 $I(\mu)$ で励起される蛍光 $\int I(\mu) \cdot F(\mu, \lambda) d\mu$ の相対比に依存する。従って、この相対比が、D50による相対比に等しくなるように、測色計の照明光の可視域に対するUV域の相対強度を調整することで、D50相当の蛍光分光放射率係数、従って全分光放射率係数が得られる。

GaertnerとGriesserにより提案された測定法(G-G法)では、光源からの光束中におかれたUVカットフィルタの挿入度を調整し、UV光量を調整する。標準機関によってISO Brightness, CIE Whitenessなどの基準値が値づけられた蛍光標準を測定し、測定値が基準値に一致するまで、挿入度調整と測定を繰り返す。UV校正と呼ばれるこの作業には、数分を要する。

G-G法は製紙業界において広く用いられており、蛍光標準には、ISO2469:2007⁴⁾が規定し、STFI (Swedish Pulp and Paper Research Institute, Sweden) などのAuthorized Laboratoryが提供するIR3 (ISO Reference of Level 3) といわれる蛍光標準紙を用いている。蛍光標準紙は経時変化が避けられず、通常、月に一度、更新する必要がある他、光被曝、高温、高湿によって劣化するため、保管環境にも注意しなければならない。

前述のように、UV校正は、蛍光標準に付与された基準値に基づいて行われるが、基準値は特定の照明光下 (CIE D65, CIE Cなど) での基準値であり、それ以外の照明光については、各々、UV校正が必要になる。

これらの課題、特に蛍光標準とそれを用いたUV校正作業を要することが、印刷分野での普及を阻んできたが、新開発のVFS法はこれらを解決するものである。

2.3 Virtual Fluorescence Standard (VFS) 法

VFS法は、従来の測定方法と比べて、以下の特徴をもつ。

1. 蛍光標準を使用するUV校正が不要であり、従来から印刷用途に使用されている測色計と同様の使い勝手で利用できる。
2. 任意の照明光下の蛍光試料の測定値が測定可能。複

数の照明光下の複数の色彩値を1回の測定から導くことも可能である。

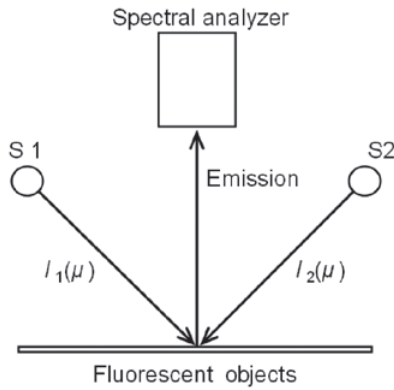


Fig. 3 Schematic diagram of the VFS method.

VFS法による測色計は、Fig. 3に示されるように励起域 (UV領域) の分光強度分布が異なる2つの照明光 I_1 , I_2 をもち、それらの分光分布 $I_1(\lambda)$, $I_2(\lambda)$ は、予め測定、記憶されている。測色計は I_1 , I_2 で試料を照明して、それぞれによる全分光放射率係数 $B_1(\lambda)$, $B_2(\lambda)$ を測定し、式 (4) に示すように、それらの重み係数 $w(\lambda)$ による重み付き線形結合により、評価用照明光 I_s ($S=D50$) 下の全分光放射率係数 $B_s(\lambda)$ を合成する。

$$B_s(\lambda) = w(\lambda) \cdot B_1(\lambda) + (1 - w(\lambda)) \cdot B_2(\lambda) \quad (4)$$

重み係数 $w(\lambda)$ は式 (5) を満足するように求められる。

$$B_{fs}(\lambda) = w(\lambda) \cdot B_{f1}(\lambda) + (1 - w(\lambda)) \cdot B_{f2}(\lambda) \quad (5)$$

ここで、 $B_{fs}(\lambda)$, $B_{f1}(\lambda)$, $B_{f2}(\lambda)$ は、各々、D50, I_1 , I_2 による蛍光分光放射率係数であり、各照明光による仮想的な蛍光標準 (Virtual Fluorescent Standard) の蛍光分光放射率係数の測定を表わす式 (6) によって算出される。

$$B_{fa}(\lambda) = \int I_a(\mu) \cdot F(\mu, \lambda) d\mu / I_a(\lambda) \quad (\alpha=1, 2, S) \quad (6)$$

つまり、VFS法はG-G法のUVカットフィルタの挿入度を重み係数 $w(\lambda)$ に置き換え、蛍光標準の測定を仮想的な蛍光標準 $F(\mu, \lambda)$ の式 (6) による仮想測定に置き換えている。仮想的な蛍光標準を仮想測定することで、D50 など実現困難な標準イルミナントによる測定を可能にし、重み係数 $w(\lambda)$ の決定を可能にしている。

FD-7では、照明光 I_1 , I_2 の光源 $S1$, $S2$ として、Fig. 4に示す分光分布をもつ白色LED、紫LED、UV LEDの3つのLEDを使用し、全LEDを点灯して I_2 を、UV LEDを除く2つのLEDを点灯して I_1 を実現している。

式 (6) が示すように、VFS法は原理的には、仮想蛍光標準として実際の試料に類似する二分光特性 ($F(\mu, \lambda)$ など) を必要とする。しかし、二分光特性の測定には、二

分光計という大掛かりな装置と長い測定時間を要し、すべての試料について二分光特性を得ることは非現実的である。そこで、VFS法を実践的な手法とするために、2段階の単純化を導入した。

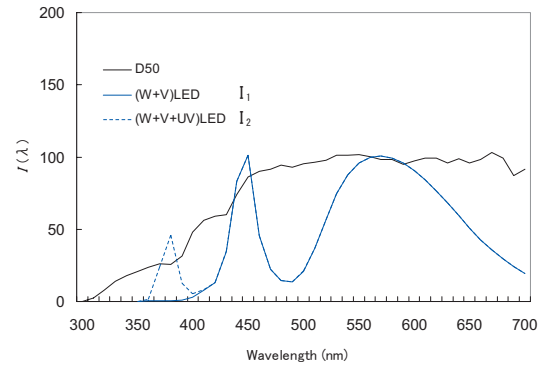


Fig. 4 Relative spectral power distributions of I_1 , I_2 in FD-7. W, V and UV indicate white LED, violet LED, and UV LED respectively.

第1の単純化は、印刷基材である用紙の二分光特性を全印刷試料の仮想蛍光標準とすることである。これは、印刷試料からの蛍光は非印刷面からの放射が支配的であることに依拠している。

第2の単純化は、一般的な用紙は分光励起特性が互いに類似するという前提で、典型的な用紙の二分光特性をすべての用紙上の全ての印刷試料に対するユニバーサルな仮想蛍光標準とすることである。

用紙の分光励起特性は、Fig. 5に示すように種類によって多少異なるが、FD-7では、前述のIR3標準紙を典型的な用紙として選択した。

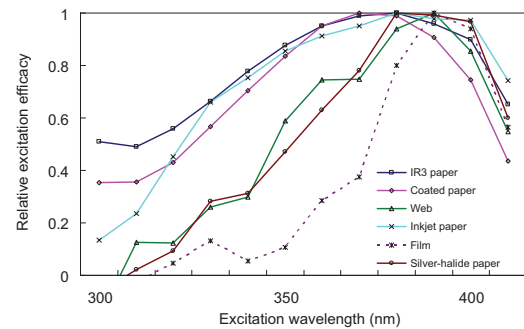


Fig. 5 Relative spectral excitation efficacies of six different substrates, which are normalized at their respective peaks.

これらの単純化による誤差を、5種の方式のプリントシステムで印刷したC, M, Y, Kによる0%, 25%, 50%, 100%トーンバリュー印刷面について、シミュレーション評価した。Fig. 6は、代表例として、2つのプリントシステムによる印刷面の、印刷用途で従来から使用されている白熱ランプ (イルミナントAに相当) を光源とする測色計による測定値と、IR3をユニバーサルな仮想蛍光標準としたVFS法による測定値との、理論的なD50照明下の色彩値からの色差 (ΔE_{00}) を示す。

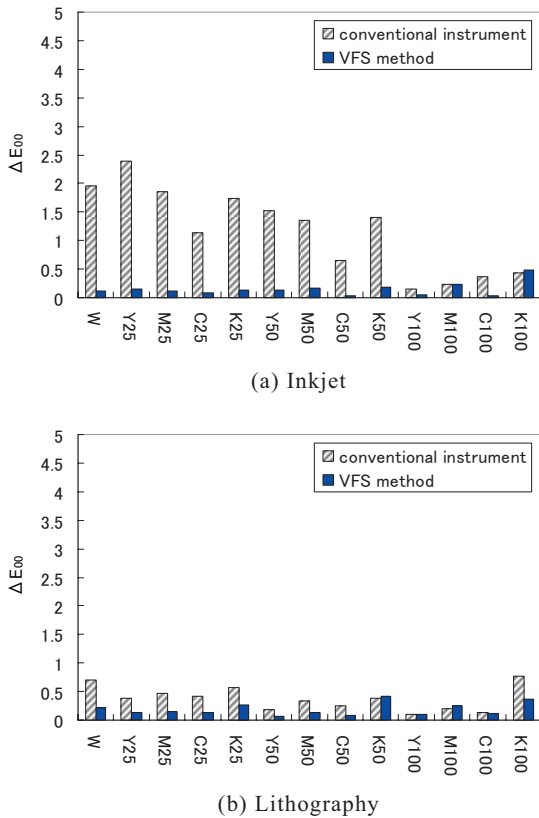


Fig. 6 Colorimetric errors in ΔE_{00} measured for the samples printed by two different printing systems, inkjet (a) and lithography (b). The errors of the VFS method and the conventional instrument are represented by blue and grey bars respectively.

従来の測定器の誤差が最大2.5であるのに対し、VFS法による誤差は、すべての試料において0.5以下であり、単純化されたVFS法が実用上問題ない性能をもつことが分る。評価に用いたプリントシステムは、全く異なる方式と用紙を用いていることから、他のプリントシステムや用紙においても同等の精度が期待できる。

3 波長自動補正技術

測色計の分光手段に使用するポリクロメータは、光学配置の経時のおよび熱的な位置ずれに起因して波長シフトを起こし、濃度値や色彩値に誤差を与える。測色計の性能を満足するためには0.1~0.2nmの波長安定性が求められるが、長期にわたって、この波長安定性を確保することは極めて困難であり、性能を維持するためには波長の再校正が必要になる。ポリクロメータの波長再校正は、波長の安定したレーザや輝線光源を測定することで行われるが、これらはいずれも高コストで取り扱いも難しいため、一般的に、製造メーカーで行う必要があり、ユーザーに負担を強いることになっている。

これに対し、FD-7では、低コストのUV LEDを組み込んで、波長の自動補正を可能としている。UV LEDは、動作温度によって発光波長が変化するため、そのままでは波長基準にならないが、1次回折光と2次回折光を用

いることで、UV LED自体の波長変化の影響を排除する波長補正技術が組み込まれている。なお、このUV LEDは前述のVFS法に使用するものと共通である。

FD-7の波長分散範囲は320~830nmであり、この波長範囲を128画素のセンサアレイでカバーしている。UV LEDの波長は約375nmであり、センサアレイ上にはFig. 7に示すようにスリットの1次回折像とともに750nmに相当する2次回折像が結像する。ポリクロメータのシフトは、主として光学配置の位置ずれによって生じ、これに起因する1次回折像と2次回折像のシフト量は同じである。例えば、1画素あたりの波長ピッチが一律に4nmの場合、センサアレイが分散方向に1画素分位置ずれると、1次回折像も2次回折像も1画素分、つまり4nmシフトする。一方、UV LEDの波長変化では、2次回折像のシフトは1次回折像のシフトの2倍になる (Fig. 8 参照)。

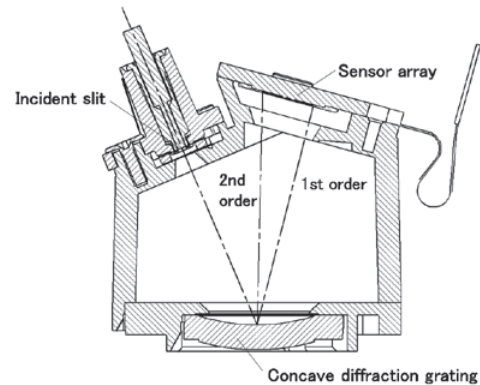


Fig. 7 Structure of the spectrophotometer in FD-7 and the 1st and 2nd order diffractions of incident flux at 375 nm.

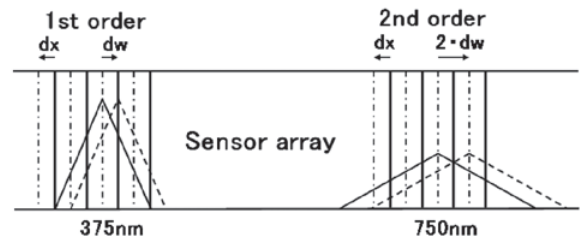


Fig. 8 Slit images on the sensor array by 1st and 2nd order diffraction of the incident flux at 375nm.

UV LEDによる1次回折像と2次回折像の波長校正時からのシフト量測定値 d_1 、 d_2 と、ポリクロメータのシフト量 dx とUV LEDの波長変化量 dw との関係を式(7)、式(8)に示す。

$$d_1 = dx + dw \quad (7)$$

$$d_2 = dx + 2dw \quad (8)$$

- d_1 : UV LEDの1次回折像のシフト量測定値
- d_2 : UV LEDの2次回折像のシフト量測定値
- dx : ポリクロメータのシフト量
- dw : UV LEDの波長変化量

式(7)と式(8)から式(9)が得られ、UV LEDの波長変化を排除したポリクロメータのシフト量 dx を求めることができる。

$$dx = 2d_1 - d_2 \quad (9)$$

求めたポリクロメータの波長シフト量を用いて製造時の波長校正による画素-波長テーブルを修正することで、波長シフト補正が完了する。

この波長補正により、例えば、35°C 80%、168時間放置の経時変化加速試験で生じる、0.34nmの波長シフトが、0.03nmと1/10に抑えられる。

4 メンテナンスフリー化、低消費電力化

従来の測色計の光源には、キセノンフラッシュランプやタングステンランプが使用されていたが、Table 1に示すように、ともにランプ寿命が短く、ランプ交換を必要とする。さらに、タングステンランプは消費電力が大きく、キセノンフラッシュランプは発光が不安定で分光分布のモニタが必要、点光源でないので45°:0°光学系と効率的に結合できないという欠点がある。FD-7は、光源にLEDを使用することで、照明に関わる部分の消費電力を、自社従来商品の約1/10に抑えるとともに、長寿命化によってランプ交換が実質的に不要となった。

Table 1 Characteristics of different light sources used in colorimeters.

| Light source | Advantage | Disadvantage |
|------------------|--|---|
| Xenon flash lamp | <ul style="list-style-type: none"> High emission intensity. | <ul style="list-style-type: none"> Complicated, large-scale driving circuit requires special insulation due to high voltage. Unstable light emission requires a reference system to monitor spectral power distribution. Non-point light source. Lifetime: about 400 thousand measurements. |
| Tungsten lamp | <ul style="list-style-type: none"> Simple, low-cost driving circuit. Nearly a point light source. | <ul style="list-style-type: none"> Lifetime: about 300 hours, about 500 thousand measurements. Large power consumption. |
| LED | <ul style="list-style-type: none"> Simple, low-cost driving circuit. Nearly a point light source. Long life: over 2,000 hours, over 5 million measurements. | <ul style="list-style-type: none"> Spectral power distribution varies depending on operation temperature. |

一方、LEDにはFig. 9に示すように、動作温度によって出力光の分光特性が変動するという問題がある。FD-7では、順電圧 V_f が動作温度と相関があることを利用し、製造時に、波長毎の V_f とLED出力の分光特性の関係(Fig. 10に550nm出力の例を示す)を1台毎に測定、記憶し、測

定時には、同時測定された V_f と記憶された V_f -分光特性関係に基づいて測定データに補正をかけることで、分光分布をモニタする参照系なしに高精度を実現している。

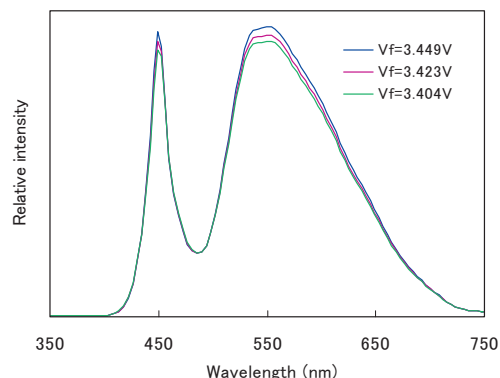


Fig. 9 Relative spectral power distributions of LED at different forward voltages (V_f).

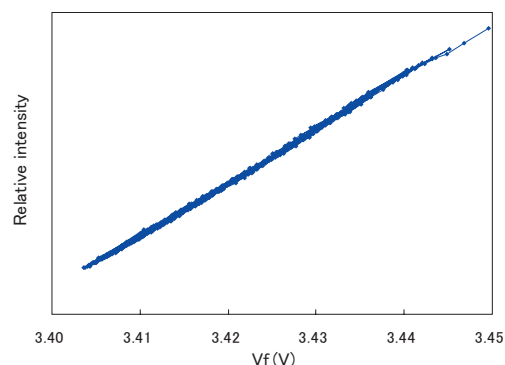


Fig. 10 Correlation between intensity at 550nm and forward voltages (V_f).

5 おわりに

紙に含まれる蛍光増白剤による蛍光の影響を反映した測色や、長期にわたる信頼性の向上、ランプ交換の不要化を、本稿に取り上げた新技術によって実現した印刷用の測色計FD-7を製品化することができた。

印刷用途では、主に色校正用を使用するスキャン式の測色計や、印刷機組込み型の測色計など、FD-7とは異なる形態の測色計があり、それらにおいても同様の課題や異なった課題が残されている。本稿で紹介した技術を用いることと、新たな技術開発によって、それらの解決を図り、幅広い製品を提供することで印刷用途のニーズに応えていきたい。

●参考文献

- 1) Kenji Imura, New method for measuring an optical property of a sample treated by FWA. Color Res Appl 2007; 32: 195-200.
- 2) ISO3664:2009 Graphic technology and photography -- Viewing conditions
- 3) ISO13655:2009 Graphic technology -- Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images
- 4) ISO2469:2007 Paper, board and pulps -- Measurement of diffuse radiance factor.