

# 色彩計のコア技術動向

Key Technologies of Konica Minolta Color Measuring Instruments

鳴瀬 一彦\*  
Kazuhiko NARUSE

清水 晋二\*  
Shinji SHIMIZU

長嶋 義幸\*  
Yoshiyuki NAGASHIMA

霧谷 克敏\*  
Katsutoshi TSURUTANI

## 要旨

コニカミノルタは写真用メーターの露出計、カラーメーターを開発し市場化してきた。この写真用メーターで培ってきたセンサー開発、測光技術およびマイコンによる制御技術を更に発展させることで、現在では研究開発部門からデザイン・生産現場まで幅広い分野で使用される測光測色機器を開発・生産している。その中で、ディスプレイの黒表示の評価を可能にした分光放射輝度計、小型・軽量化を実現した分光濃度計、太陽電池の性能評価を可能とした太陽電池評価装置のコア技術を紹介する。

## Abstract

Konica Minolta has long developed and marketed exposure meters and color meters for use in photography. In the continuing refinement of these meters, advances in sensors, photometric technology, and control technology using microcomputers have been made. Konica Minolta is now developing and manufacturing photometric and colorimetric instruments which are used widely in R&D labs, design departments, and manufacturing sites. In this report, the core technologies of these products are presented as found in a spectroradiometer which enables the evaluation of black displays, in a compact, lightweight, and portable spectrodensitometer, and in equipment for evaluating solar cell performance.

## 1 測光・測色機器へのコア技術の変遷

### 1.1 写真用メーターのコア技術の展開

コニカミノルタの測光測色機器の出発点はカメラに組み込まれた露出計であり、単独商品としては、1964年発売の単独露出計「ミノルタビューメーター9」である。

それ以後、写真用メーターとしてプロ写真家、アドバンスアマチュアの必携の写真用機材として、ユーザーのノウハウをできる限り盛り込む事をテーマとして開発が進められてきた。その中で、受光素子としてはCdSセンサーからSiセンサーへ切り替わることで相当に暗い状況下でも安定した測定が可能となり、センサーからの出力はAD変換処理され、マイコンで演算処理が行われ、液晶にデジタル表示されるようになった。C-MOSタイプの4ビットマイコンおよび液晶をカメラに先駆け製品に導入したのも、ユーザーニーズであるノウハウを小型で軽量である製品に組み込むためであった。

被写体の位置で被写体照度を測定する入射光式露出計の発展として照度計の開発、カメラ位置から被写体の輝度を測定する反射光式露出計の展開として輝度計の開発が行われた。また、カラーメーターで使用されるセンサー感度をフィルムの感度から人間の眼の感度である等色関数に置き換えることで、光源の色を測定する色彩照度計CL-100の開発が行われ、カメラのストロボを光源として用いることで、物体の色を測定する色彩色差計CR-100が開発され、商品化される事になった。

### 1.2 測光測色機器のセンサー感度

写真用メーターのセンサー感度は、当時プロカメラマンの中で一番好まれて使われていたフィルムの感度特性に合わせてこむ事で作られてきた。

測光測色機器としての照度計、輝度計、色彩計のセンサー感度としては、国際照明委員会(CIE)で決められた人間の眼の感度である等色関数(Fig. 1)に合わせる事が重要な要素となる。具体的には、Fig. 2に示される分光感度を有するSiセンサーにFig. 3, Fig. 4, Fig. 5に示す分光透過率を有する複数の光学フィルタを組み合わせることで実現している。

$$z(\lambda) = Si(\lambda) * Tz1(\lambda) * Tz2(\lambda) * Tz3(\lambda) * Tz4(\lambda)$$

$$y(\lambda) = Si(\lambda) * Ty1(\lambda) * Ty2(\lambda) * Ty3(\lambda) * Ty4(\lambda)$$

$$x2(\lambda) = Si(\lambda) * Tx1(\lambda) * Tx2(\lambda) * Tx3(\lambda) * Tx4(\lambda)$$

$$x(\lambda) = x2(\lambda) + x1(\lambda) = x2(\lambda) + k * z(\lambda)$$

\*コニカミノルタセンシング(株)  
開発部

センサー感度を Fig. 1 の等色関数により良く近似させるために、色ガラスフィルターの厚みを研磨によって調整し、干渉フィルターでは膜厚を変える事によって、分光透過率を調整している。しかしながら、これらの調整を行っても等色関数に完全には一致できないため、計算処理によって等色関数とセンサー感度の差を見かけ上非常に小さくするようにしている。初めに測定色近傍の色度点の判っているサンプルに対して基準校正を行い、ルーター条件\*1を満足させるための X, Y, Z 三刺激値各々の補正係数を算出する。次に実際に測定対象から得られる三刺激値にこの補正係数を掛け合わせて色度点を求める事で、センサー感度を等色関数に非常に近似させた精度の高い測定が可能となる。また、この校正機能は複数の色彩色差計の間で起こり得る機差をキャンセルさせることができる。

\*1 ルーター条件：色彩計の総合分光感度を CIE の等色関数に比例させる条件

### 1.3 測光測色機器への変遷

コニカミノルタの測光測色機器は人間の眼の感度に合わせた3つのセンサーを持つ刺激値直読型の測定機器で、構成が簡単で低コストであり、測定スピードが速く、暗いところまで測定ができるという利点がある。しかしながらセンサー感度を等色関数にぴったり一致させることは難しく、ユーザーの要求精度から分光型の測定機器が望まれるようになってきた。測定する光を回折格子等で分光し、リニアセンサーで分光された光を計測するポリクロメーター及びその制御がCPUで簡単に行うことができるようになってきた事から、ハンドヘルドの分光測定機器の商品化が可能となってきた。分光型として暗いところでの測定、測定スピードが遅いといった課題に関しても、センサー自身の温度制御を確実に行うことでユーザーニーズをカバーできるレベルまで達成できるようになってきている。

分光型測定機としてユーザーニーズに合致したコニカミノルタの開発商品を、①光源色測定分野、②物体色測定分野で紹介するとともに、近年注目される③太陽電池の性能評価へのフィルタリング技術の応用を紹介する。

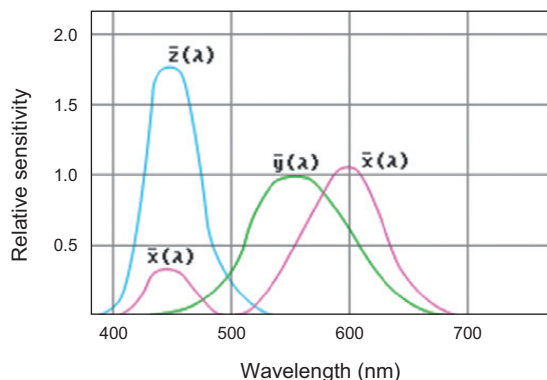


Fig. 1 CIE Color-matching functions.  
(Weighting functions for tristimulus integration.)

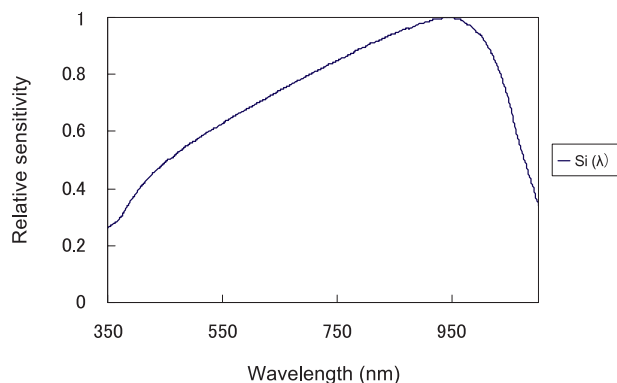


Fig. 2 Spectral sensitivity of silicon photo cell.

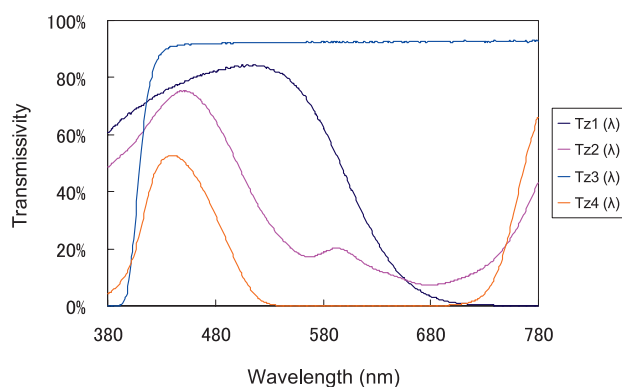


Fig. 3 Spectral transmittance of filters for z(λ).

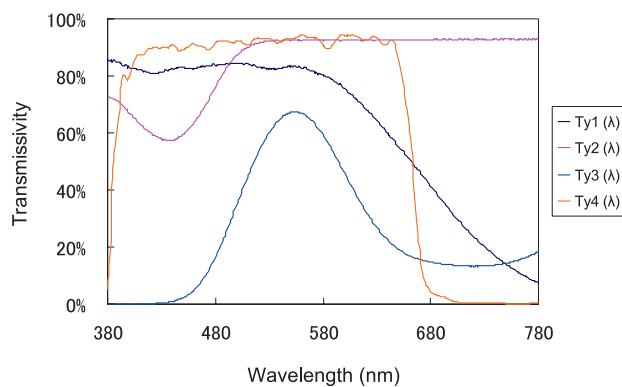


Fig. 4 Spectral transmittance of filters for y(λ).

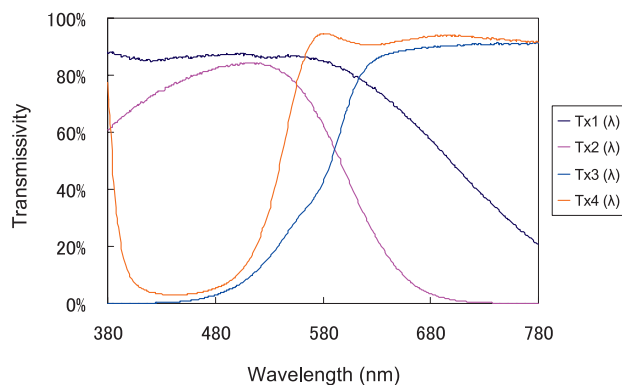


Fig. 5 Spectral transmittance of filters for x2(λ).

## 2 光源色測定装置

### 2.1 分光放射輝度計 CS-2000

最も普及している光源の一つにディスプレイがあるが、ここでは黒表示時の評価が重要であり、この評価のために高感度かつ、高精度な測定器が必要とされている。

コニカミノルタが開発した分光色彩輝度計 CS-2000 は、高精度な分光型でありながら高感度を実現しており、ニーズにマッチした測定器であると言える<sup>2)</sup>。

以下に、その高感度を実現した技術原動力について説明する。ポイントは、光学系の工夫、センサー冷却、回路ノイズの軽減処理の3つである。

### 2.2 光学系の工夫

光学系の構成を Fig. 6 に示す。

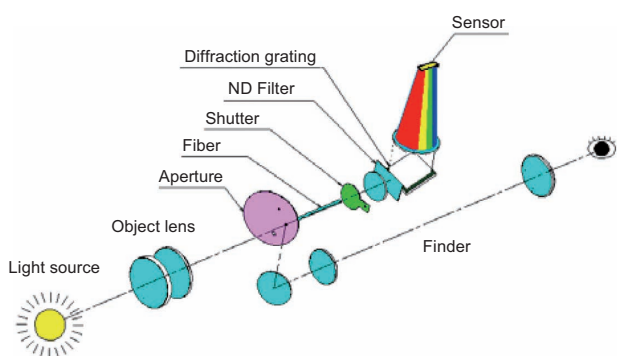


Fig. 6 Optical components from light source to measurement sensor and viewfinder.

高感度を実現するためには光学系のエネルギー伝達効率を上げることが重要である。今回開発した光学系におけるエネルギー伝達効率率は、光ファイバーからセンサーに至る光路中のファイバー出口に配置されたスリットの幅と開口角に依存する。スリット幅を大きくすると効率上がるが分光分解能が低下し分光品質を低下させる。よって、これを避けるため、スリット幅は極力小さくするが、収差を抑えた高開口角光学系を開発し搭載することでエネルギー伝達効率の大幅向上を達成した。

また、光ファイバーを配置したこともこの光学系の特長である。この形状を最適化することにより、入射光のミキシング性を高め分光品質を確保しながら、光ロス軽減を実現することで感度向上を達成している。

### 2.3 センサー冷却と放熱設計

感度向上と回路ノイズ低減は相関関係がある。つまり、回路ノイズを低減させることで感度向上と同等の効果を得ることができる。

ところで回路ノイズの主成分として CCD 暗電流ノイズがある。この低減のためには暗電流の量自体を小さくすることが効果的だが、このためには CCD を冷却する必要がある。その手段としてペルチェ素子を用いている。しかしこの場合、冷却側と反対面は逆に発熱するために、

光学系構成部品の熱変形により分光品質を低下させる可能性がある。また、これ以外に回路基板が発熱源となり同様な問題を引き起こす懸念もある。

それらを回避するために、測定器内部に放熱機構を設けている。その構成を Fig. 7 に示す。CCD にヒートシンクを設け、冷却ファンを活用することで放熱を行っている。ここでは、回路基板の位置、排気口の位置、大きさをパラメーターとして熱流量を考慮した放熱最適化設計を行い、CCD 冷却、回路による発熱を効果的に軽減している。

また、CCD 固定部の熱歪を小さくするために、その形状を設計するにあたり熱解析を行い最適な形状を見出している。

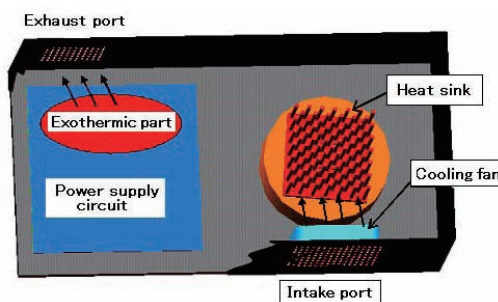


Fig. 7 System for effectively reducing thermal deformation.

### 2.4 回路ノイズの軽減処理

CS-2000 を上市後に、さらに低輝度性能を向上させた CS-2000A を開発している。ここでは測定可能な輝度を  $0.003 \text{ cd/m}^2$  から  $0.0005 \text{ cd/m}^2$  へと、大幅な性能向上を達成している。この技術原動力としては、回路で発生したノイズを数値演算により軽減するデジタル処理手法を搭載したことが挙げられる。

この開発にあたっては、まず、実測により得た膨大なデジタルデータを分析することにより、ノイズの特徴抽出を行った。そして、ノイズのみを除去する適切なデジタルフィルターを設計・適用することにより、分光データに影響を与えずノイズのみの低減を図ることに成功している。

## 3 物体色測定装置

### 3.1 物体色測定装置の変遷

コニカミノルタは Table 1 に示すように、1980 年代前半から現在に至るまで、様々な種類の物体色測定装置を提供して来た。刺激値直読型の色彩計 (colorimeter) から始まり、より高精度な分光型の分光測色計 (spectrophotometer) ヘラインナップを拡充してきた。また、小型化・軽量化も時代と共に進んで来た。2011 年に発売した FD-7 は従来機種 (CM-2500c) に対し、40% 以上の軽量化を達成した。

ここでは、これら物体色測定装置の小型化・軽量化に寄与しているコア技術について紹介する。

Table 1 Timeline of development of Konica Minolta colorimeters and spectrophotometers.

Category	Spectral separation device	Light source	1980's	1990's	2000's	2010's
Colorimeter	Color filter	Xenon	CR-100			
		Xenon	CR-200			
		Xenon	CR-300			
		Xenon	CR-400			
		Tungsten	CR-10			
Spectrophotometer	Spectral filter	Xenon	CM-1000			
		Xenon	CM-2002			
		Xenon	CM-508d			
		Xenon	CM-512m*			
		Xenon	CM-3500d			
	Grating	Xenon	CM-3700d			
		Xenon	CM-3600d			
		Xenon	CM-2600d			
		Xenon	CM-2500c			
		Xenon	CM-700d			
Spectro-densitometer	Grating	Xenon				CM-5
		LED				FD-7

### 3.2 ポリクロメーターによる小型化

分光測色式の場合には、多くの場合、光を選択的に受光する手段として、ポリクロメーターが採用されている。ポリクロメーターの大きさは、製品の大きさを大きく左右する。これまでの製品は、平面回折格子にレンズやミラーを組み合わせて設計をしていた為に小型化には限界があった。FD-7ではプラスチック凹面回折格子を搭載することで、これまであったレンズやミラーを廃止した (Fig. 8 参照)。これにより Table 2 に示すように非常に簡単な構成で低コストポリクロメーターを実現し、ポリクロメーターの大きさを当社従来機種との比較で体積比 1/6、重量比 1/10 を達成した。

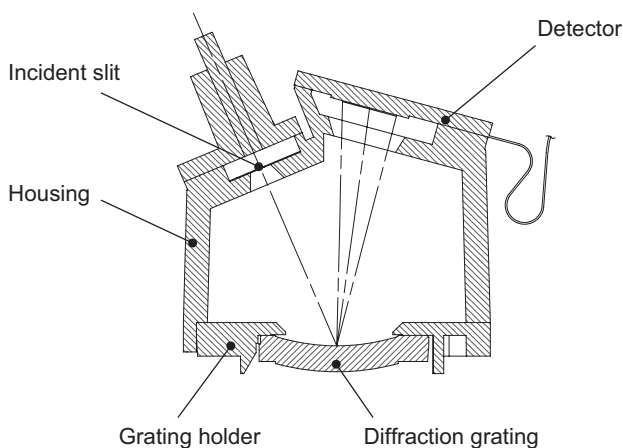


Fig. 8 Structure of the polychromator in FD-7.

Table 2 Comparison of two Konica Minolta polychrometers: CM-2500c (older) and FD-7 (new).

	CM-2500c	FD-7
Optical system	Double beam	Single beam
Weight ratio	10	1
Volume ratio	5	1
Wavelength pitch	10 nm	10 nm
Wavelength range	360 nm to 740 nm	380 nm to 730 nm
Half bandwidth	Approx. 10 nm	Approx. 10 nm

### 3.3 光源による小型化

コニカミノルタの反射物体色測定装置では、CR-100シリーズに始まり現在に至るまで、光源はパルスキセノンランプを採用してきた。パルスキセノンランプは、ハイパワーで、エネルギー分布が昼光に近い分光特性を持つという長所がある。一方、動作させるには大型コンデンサや複雑な回路が必要で、更に発光強度の安定性が悪いので装置に参照光学系が必須であるなどの欠点がある。これらは小型化・軽量化のボトルネックになっていた。近年、LEDの発達によりハイパワーで演色性の良い白色LEDが商品化されて来たのを受け、FD-7ではハイパワー白色LEDを採用した。

Table 3 Comparison of characteristics of light sources used for colorimeters and spectrophotometers.

Light source	Advantage	Disadvantage
Xenon flash lamp	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High emission intensity.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complicated, large-scale driving circuit requires special insulation due to high voltage.</li> <li>• Unstable light emission requires a reference system to monitor spectral power distribution.</li> <li>• Non-point light source.</li> <li>• Lifetime: approx. 400,000 measurements.</li> </ul>
LED	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple, low-cost driving circuit.</li> <li>• Nearly a point light source.</li> <li>• Long life: over 2,000 hours, over 5 million measurements.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spectral power distribution varies depending on operation temperature.</li> <li>• Spectral power at some parts of visible range is low.</li> </ul>

Table 3 に示す様に、LEDの場合は発光回路が簡単になるので電気基板の小型化に寄与した。しかし、LEDの欠点として動作温度によって出力光の分光特性が変動という問題があった。パルスキセノンランプの場合と同じように参照光学系を持つという方法も考えられたが、FD-7ではこの欠点を、LEDの動作温度と順電圧 Vf の間に相関関係があることを利用して、Vf を検知しながら光源の変動を補正するという手法を開発し、この問題を解消した。これにより、従来機種に不可欠であったリファレンス光学系を廃止し、小型化に大きく寄与した。

他にLEDの大きな長所として長寿命があり、FD-7ではメンテナンスフリーを達成し、これも大きなユーザーメリットになっている。

## 4 太陽電池評価装置への応用

### 4.1.1 擬似基準太陽電池セル

コニカミノルタは高度なフィルタリング技術を応用し、シリコン結晶系セルの上に光学フィルタを装着したタンデム型太陽電池用の擬似基準太陽電池セルAKシリーズを作成した (Fig. 9)。

太陽電池の性能測定は、太陽光のスペクトルに近似させた分光放射照度分布を持つ光源システム (ソーラーシミュレーター) が用いられる。ソーラーシミュレーターは「基準セル」により光量 (放射照度) の調整が行われる (JIS C8904-2)<sup>5)</sup>。基準セルは、評価対象の太陽電池と同じ相対分光感度特性を持ち、経年的な特性の変化のない安定した性能が必要である。

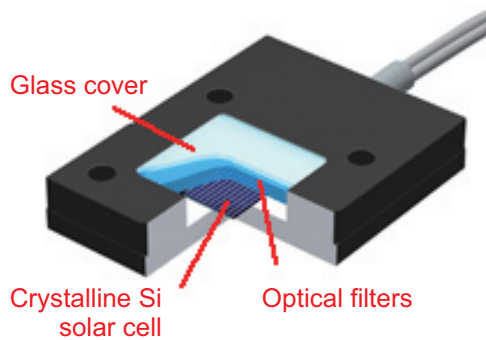


Fig. 9 Reference PV cell.

### 4.1.2 分光感度特性

専用フィルターを含む複数の光学フィルターの厚みを管理し組合せることで所定の分光感度特性に合致させた (Fig. 10)。これにより等級の低いソーラーシミュレーターにおいても、小さなスペクトルミスマッチ誤差 (MM) \*2 の条件で光量調整が可能となる。

\*2 スペクトルミスマッチ誤差 (MM)

$$MM = \frac{\int E_{ref}(\lambda) dS_{ref}(\lambda) d\lambda * \int E_{mes}(\lambda) dS_{mes}(\lambda) d\lambda}{\int E_{mes}(\lambda) dS_{ref}(\lambda) d\lambda * \int E_{ref}(\lambda) dS_{mes}(\lambda) d\lambda} - 1$$

$E_{ref}(\lambda)$ : 基準太陽光の分光放射照度

$E_{mes}(\lambda)$ : ソーラーシミュレーターの分光放射照度

$S_{ref}(\lambda)$ : 基準擬似基準太陽電池セルの分光感度

$S_{mes}(\lambda)$ : 被測定太陽電池の分光感度

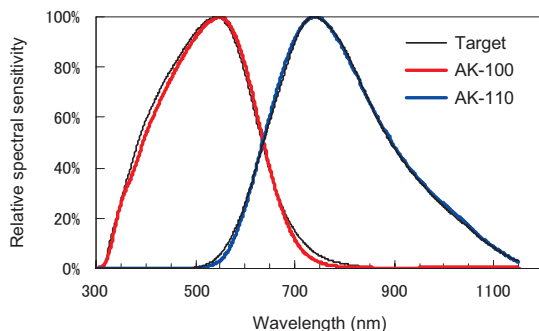


Fig. 10 Spectral sensitivity characteristics.

### 4.1.3 耐光性

ソーラーシミュレーターの放射照度は  $100 \text{ mW/cm}^2$  (1 sun) と非常に大きい。光学フィルターの色材の最適な選択や、信頼性を高める処理を行うことで、照射による特性変化が少なくなる工夫を施している (Fig. 11)。

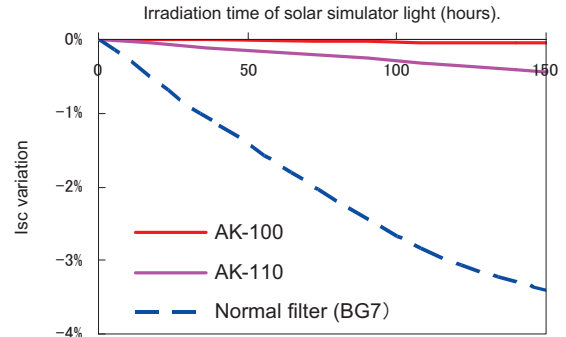


Fig. 11 Improved durability against solar simulator light. AK-100 and AK-110 (newly developed filters), and BG7 (a standard HOYA filter).

## 4.2 今後の展開

色彩計で培ったフィルタリング技術を応用し、信頼性高いタンデム型用の擬似基準太陽電池セルを商品化した。今後は、コニカミノルタの保有技術を活用して、次世代の太陽電池の性能評価に適した商品開発を行ってゆく。

### ●参考文献

- 1) MINOLTA TECHNO REPORT No.3 1986
- 2) KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT VOL.5 (2008) 「分光輝度計 CS-2000 を支える超高感度分光技術」高橋誠, 今井澄, 市川晋, 門脇豊
- 3) 新編色彩科学ハンドブック [第3版] 日本色彩学会
- 4) KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT VOL.8 (2011) 「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」山本信次, 後藤泰史, 松原範明
- 5) JIS C8904-2:2011 基準太陽電池デバイスに対する要求事項