

“分光フィッティング方式”を用いた色彩輝度計 CS-200 の開発

Development of Chromameter CS-200 Adapting “Spectral Fitting Method”

清水 晋二*
Shimizu, Shinji

長嶋 義幸*
Nagashima, Yoshiyuki

霧谷 克敏*
Tsurutani, Katsutoshi

麻生 耕平*
Aso, Kohei

要旨

従来より、高精度な色彩輝度計は大型になるという欠点があった。

CS-200は、独自開発の「分光フィッティング方式」を採用した色彩輝度計であり、高精度でありながら、小型かつ軽量を実現している。

本稿では、「分光フィッティング方式」の原理と実現した精度の評価結果とともに、CS-200の他の特徴のいくつかについて紹介する。

Abstract

Conventionally, high-precision colorimeters have a disadvantage of being oversize.

The chromameter CS-200, however, realizes all together high-precision, compactness, and lightweight by adapting a newly developed “spectral fitting method”.

The principle of “spectral fitting method” and the evaluation results, as well as the several other features of the CS-200 are hereby presented.

1 はじめに

近年、表示デバイスの高性能化により、その評価に使用される色彩輝度計への要求精度が厳しくなっている。例えば、sRGBの規格制定¹⁾に見られるような画像出力機器間の色再現の整合性をとろうとする動きに対応して、これまで、あまり問題にされてこなかった単色測定時の輝度・色度精度も重視されるようになってきた。他方、測定器側からみて要求精度を確保するのがより難しい各種輝線性光源は増加傾向にある。

色彩輝度計は、分光輝度計、刺激値直読型色彩輝度計に分類される。

分光輝度計は、分光データを狭い半値幅と細かい波長ピッチで測定する。例えば半値幅約 5 nm、波長ピッチ 1 nm（可視波長域を約400個のセンサーでカバーすることに相当）で求めた分光データから輝度・色度を算出する。

分光応答度を等色関数に精度よく一致させることができるため、高精度な輝度・色度測定が可能である。しかし、このような分光データを得るためには高分解能で明

*コニカミノルタセンシング(株) 開発部 開発2課



Fig.1 Chromameter CS-200

るい光学系が必要であり、比較的大型の測定器とならざるを得ない。

刺激値直読型色彩輝度計では、センサーの分光応答度を色フィルターの組み合わせで等色関数に近似する（Fig. 5参照）。この方法は、光学系が単純で、センサー数も少なく済むことから製品を小型にすることが可能である。しかし、色フィルターによる分光応答度の制御自由度が低いいため、分光応答度の近似精度を高めることが難しく、精度は分光輝度計と比較して低くなる。

これらに対して、筆者らが開発した「分光フィッティング方式」は、分光輝度計の1/10以下となる40個のセンサーを用い、センサー出力の加重積算により得られる合成分光応答度を分光輝度計に迫る精度で等色関数に近似させるものである。

この方式を採用した色彩輝度計CS-200は比較的小型な構成でありながら、複数のセンサーに関わるパラメーターの最適化を行うことで、輝度・色度測定において分光輝度計と同レベルの測定精度を実現している。

2 光学ユニット

光学系全体の構成をFig. 2に示す。「分光フィッティング方式」を採用したCS-200では、グレーティングとシリコンフォトダイオードアレイから構成される分光光学系を選択しているが、他の光学構成と比較して、各センサーの分光応答度を最適化するための設計柔軟性に優れているという特長がある。

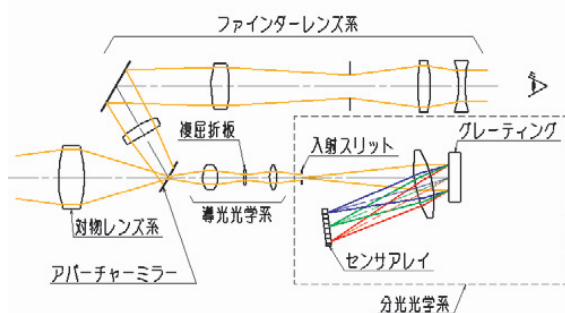


Fig.2 The Optical system of CS-200

CS-200の分光光学系は、従来の分光輝度計に対し、波長ピッチを約10倍の10nm、分光応答度の半値幅を約5倍の25nmとしている（4. 光学パラメータの最適化を参照）ので、小型化のために光学系の明るさを犠牲にしても、なお高感度を実現できる。小型化を意図してグレーティングをリトロ配置で使用したCS-200の分光光学系による各センサーの分光応答度をFig. 3に示す。

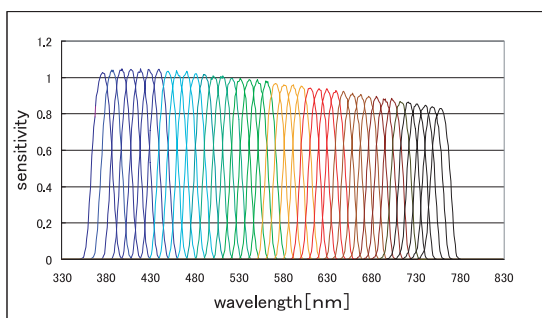


Fig.3 Spectral sensitivity of each sensor in sensor array

CS-200は、測定エリアの視認性に優れたファインダーレンズ系を装備している。対物レンズ系を通った光束は、開口をもつアパーチャミラーに入射する。この光束のうち測光エリアからの光束のみが、アパーチャミラーの開口を通して直進し、分光光学系で分光される。測光エリア以外からの光はアパーチャミラーで反射され、ファインダーレンズ系に入射する。つまり、ファインダーレンズ系には測光エリアからの光のみがカットされるため、測定エリアが黒抜きされたファインダー像が得られることになり、測定エリアを視差なく確認できる。

これらによりCS-200は、分光輝度計に匹敵する性能、機能を持ちながら、当社の分光輝度計CS-1000に対して、体積比で70%、重量比で40%の小型化を実現しており、測定器を片手で保持して測定することを可能としている。

3 「分光フィッティング方式」の原理説明

分光応答度 $S(i, \lambda)$ をもつ N 個の光センサー (i) の出力に、加重係数 $k(i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) を乗じて合算した出力は、式(1)で示される分光応答度 $G(\lambda)$ を有する (λ は波長)。

$$G(\lambda) = \sum_{i=1}^N k(i) \cdot S(i, \lambda) \quad (1)$$

これは各センサーの分光応答度に加法則が成立することによるが、言い換えれば、分光応答度が既知の N 個のセンサー (i) に対し、 $k(i)$ を適切に設定することで、 N 個のセンサーが感度を有する波長範囲内で、式(1)が与える合成分光応答度 $G(\lambda)$ のセンサーを仮想的につくることができることを意味する。

目標とする分光応答度 $X(\lambda)$ を設定し、 $k(i)$ を変数として $G(\lambda)$ を $X(\lambda)$ に近似させることを考える。近似誤差を小さくするためには、式(2)に示す誤差関数 Err を最小化する $k(i)$ を最小二乗法によって求めればよい。

$$Err = \int \{G(\lambda) - X(\lambda)\}^2 d\lambda \\ = \int \left\{ \sum_{i=1}^N k(i) \cdot S(i, \lambda) - X(\lambda) \right\}^2 d\lambda \quad (2)$$

ここで、 $X(\lambda)$ として、等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ を設定し、各々について $k(i)$ を算出すれば、合成分光応答度 $G\bar{x}(\lambda)$ 、 $G\bar{y}(\lambda)$ 、 $G\bar{z}(\lambda)$ を等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ に近似することができる。

4 光学パラメータの最適化

既に述べたように「分光フィッティング方式」においては、複数センサーに関わるパラメータの最適化が、合成分光応答度を目標とする等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ に高精度で近似させるためのカギを握っている。

このパラメータとは、

- ①センサー数
- ②センサーごとの波長間隔 (波長ピッチ)
- ③各センサーの分光応答度

であり、実際には、まず①②のパラメータを設定してから、シミュレーションにより、最適な③のパラメータを見出した。

①②のパラメータについて、電気回路の低コスト・省スペースを考慮して総センサー数を40とし、センサー間の波長間隔を10nmとして可視波長域 (380nm~780nm) をカバーすることとした。

次にシミュレーションにより、(2)式の誤差関数 Err の最少化に適した③各センサーの分光応答度の条件を見出した。結果的には、各センサーの分光応答度はガウス関数に近い形状が適しており、更に、分光応答度の幅を与える“半値幅”は25nm程度が適切であることが分かった。

この最適化の過程では以下の点にも留意した。

- ・最適条件は、等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ について一様ではないこと。(実用的に最適のバランスを得るために、実際に測定対象となる光源での輝度、色度誤差が最小になる条件とした。)

・製造誤差に対する近似精度の誤差感度の最小化。

5 実現した分光応答度、及び輝度・色度の精度

<分光応答度>

Fig. 3 の分光応答度を $S(i, \lambda)$ として、(2)式の誤差関数 Err を最小にする最適解 $k(i)$ を求めた。これによって(1)式が与えるCS-200の合成分光応答度(CS-200 \bar{x} , CS-200 \bar{y} , CS-200 \bar{z})を、目標値である等色関数(CIE \bar{x} , CIE \bar{y} , CIE \bar{z})と共にFig. 4 に示す。

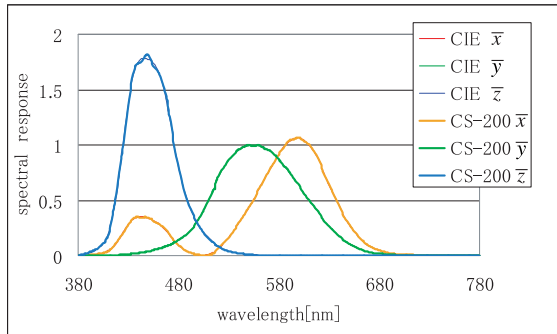


Fig.4 Spectral response of CS-200

比較のため、刺激値直読型色彩輝度計の分光応答度(直読型 \bar{x} , 直読型 \bar{y} , 直読型 \bar{z})の例をFig. 5 に、また、それぞれの分光応答度の等色関数からの誤差をFig. 6 に示す。刺激値直読型色彩輝度計と比較してCS-200の分光応答度の精度が大幅に向上していることが分かる。

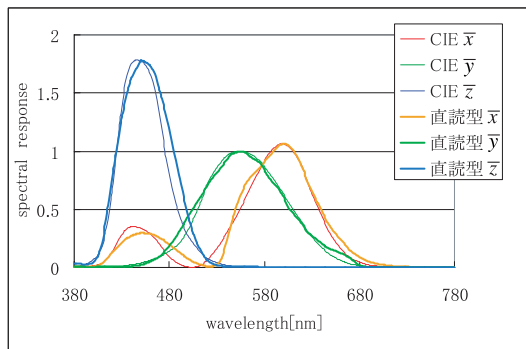


Fig.5 Spectral response of tristimulus colorimeter

<輝度・色度>

Fig. 7、8 に、LCD、PDP、及びLEDの白色、単色(Red、Green、Blue)について、基準とした分光輝度計CS-1000による測定値に対するCS-200(3台)の測定値の差を示す。一般的な刺激値直読型色彩輝度計の誤差範囲(破線で示す)と比較すると、CS-200の精度が非常に高いことが分かる。

CS-200では様々な光源に対して、輝度差 ΔL_v で $\pm 2\%$ 、色度差 Δx , Δy で ± 0.002 程度となっている。分光輝度計で保証している確度が、分光応答度誤差の影響が出にくい標準光源Aに対して、輝度 ΔL_v で $\pm 2\%$ 、色度 Δx , Δy

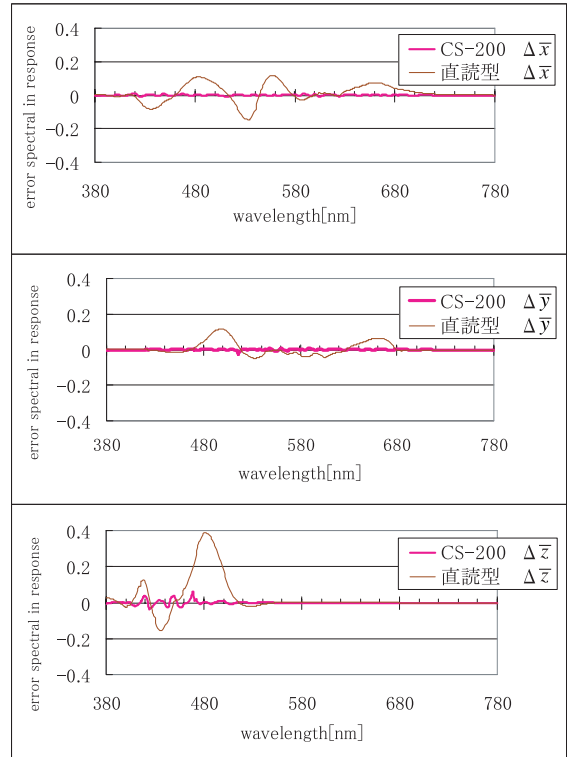


Fig.6 Error in spectral response of CS-200 and tristimulus colorimeter

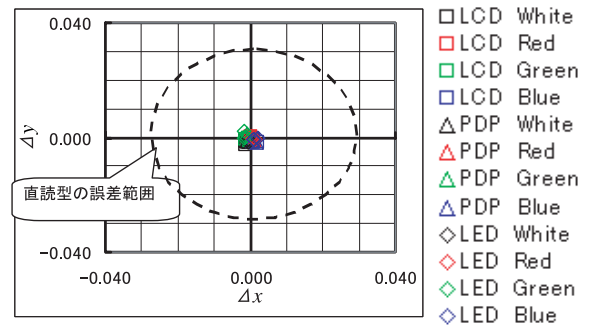


Fig.7 Differences of chromaticity values by CS-200 from those by CS-1000 with error range of typical tristimulus colorimeter (broken line) for comparison

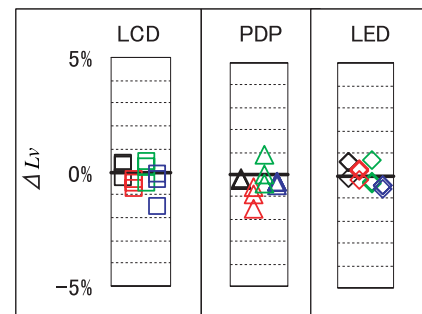


Fig.8 Differences of luminance values by CS-200 from those by CS-1000

で ± 0.001 であることをえると、今回の評価結果は、CS-200が分光輝度計と同レベルの輝度・色度測定精度を確保

していることを示している。

なお、分光フィッティング方式では、10°視野の等色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ に対しても同様の原理で加重係数 $k_{10}(i)$ をもつことができるので、2°視野、10°視野いずれの等色関数でも切換え対応できる。

6 その他の光学設計課題と解決方法

色彩輝度計には分光応答度の精度以外にも解決されるべき課題がある。以下にそのいくつかについて、CS-200で実施した対策の特徴を述べる。

<偏光誤差の軽減>

安定した測定のためには、液晶のような偏光した光源を測定する場合でも、測定値が偏光状態の影響を受けないことが望まれる。

しかし、分光光学系に用いられる分光素子であるグレーティングの回折効率には偏光依存性があり、Fig. 9に示すように、偏光面が分散方向に平行(0°)の場合と、垂直(90°)の場合とで回折効率が異なる。こうした回折効率の偏光依存性の影響を軽減することは、分光輝度計における大きな課題となっていた。

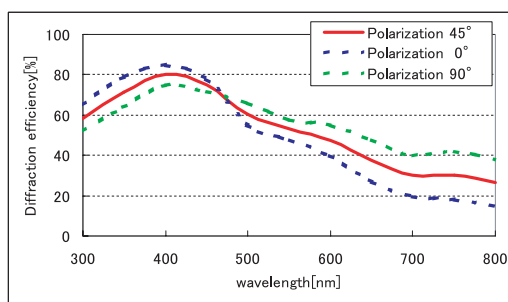


Fig.9 Diffraction efficiency

CS-200では複屈折板を光路上に挿入する方式を採用した。複屈折板は水晶などの異方性結晶を結晶軸に45°の方向に切り出した光学素子であり、入射光を結晶軸に平行および垂直な、互いに直交する偏光面をもつ2つの直線偏光に分離する性質をもつ (Fig.10)。

分離された2つの直線偏光の偏光面が、分散方向に対して45°となるように複屈折板を設置すると、グレーティングには常に分散方向に対し45°の偏光面をもつ直線偏光

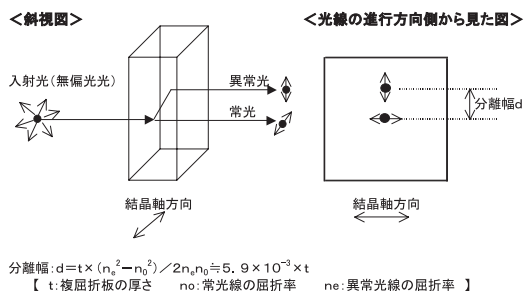


Fig.10 Double refractive element

のみが入射する。分散方向に対し45°の偏光面をもつ直線偏光の分散方向に平行な成分と垂直な成分は等しく、その回折効率はFig. 9に示すように分散方向に平行および垂直の回折効率の平均となる。これにより、入射光の偏光状態にかかわらず、平均的回折効率を示すことになり、測定値の偏光誤差を大幅に軽減することができる。

この方式は

- ①波長依存性がない
- ②取り付け位置・角度などの誤差感度が低い
- ③デジタルカメラなどのローパスフィルターとして大量に用いられているため、低コストである

といった特徴がある。無偏光の標準光源Aに対し偏光板を回転させて直線偏光の偏光面を回転させたときの最大測定値差で評価した偏光依存性を輝度Lvで±1%、色度x、yで±0.001以下にすることができた。

<測定角の切替え>

測定可能な光源の範囲を広げるために、CS-200は1°、0.2°、0.1°の3つの測定角を備えている。これを実現するために、アパーチャミラーに径の異なる3つの開口を配置し、アパーチャミラーをスライドすることで3つの開口の1つを選択している。また、測定角の切替えで、分光応答度の近似精度に関わるセンサーの分光応答度が変わらないような光学設計上の配慮がなされている。

<光源の輝度分布不均一性の影響軽減>

測定対象物の輝度や色は必ずしも均一であるとは限らず、液晶のように指向性のある測定対象物もある。そのような不均一な光源を測定する場合にも、測定器の方位にかかわらず(測定器を測定軸中心に回転しても)同じ測定値を出力する必要がある。ところが分光光学系にはグレーティングやセンサーなど測定軸に対し非対称な光学構成要素をもつことから、CS-200では入射光をミキシングし分光光学系に導く導光光学系を採用することで、測定器の方位にかかわらず安定した測定値を実現させている。

7 まとめ

「分光フィッティング方式」を中心に、色彩輝度計CS-200に取り入れた新技術について説明した。

近年、ディスプレイ開発競争の中で、表示デバイスの色再現範囲の拡大、さらには輝度・色度管理の厳密化が進んでいる。高精度でありながら、小型で携帯性もあるCS-200はこれら評価ニーズに合致した製品であると考えている。

今後も新技術を核とし、市場ニーズに合致した製品を開発していきたい。

●参考文献

- 1) 杉浦博明 : 映像情報メディア学会誌, Vol.56 No.8 1247-1248 (2002)