

# 分光輝度計CS-2000を支える超高感度分光技術

The Super-Sensitivity of the CS-2000 Spectroradiometer

高橋 誠\*      今井 澄\*\*      市川 晋\*\*\*      門脇 豊\*\*\*  
Takahashi, Makoto      Imai, Kiyoshi      Ichikawa, Susumu      Kadowaki, Yutaka

## 要旨

世界最高レベルの0.003cd/m<sup>2</sup>（測定角1°）の超低輝度領域までの測定が可能な分光放射輝度計CS-2000を開発した。

本稿では、性能実現の原動力となる技術の中から、光学技術、低輝度測定時のドリフト低減および放熱設計について述べる。加えて、高感度センサを採用するために影響が大きくなるフリッカ光源測定誤差に対応した新たな測定アルゴリズムについても紹介する。

## Abstract

The CS-2000, which can detect the super-low luminance of 0.003cd/m<sup>2</sup> (measuring angle 1°), is the most sensitive spectroradiometer in the world. Among the technologies which make its performance possible are advanced optics, decreased drift while measuring low luminance, and thermal radiation design. Further, the CS-2000 employs a new measurement algorithm which counters the flicker light source measurement error involved in using the CS-2000's high-sensitivity sensor.

## 1 はじめに

近年のディスプレイ市場では、FPD市場が拡大し、高品位・高画質化も急速に進んでいる。それに伴い、画質を評価する計測器においても高精度化が要求されている。また、LED・有機EL等の各種光デバイスの技術革新が進む中、分光測定要求も拡大している。

ディスプレイ・光源色測定器の分野に対応する測定器の最上位機種として当社が1996年発売した「分光放射輝度計CS-1000」は、これまで高精度に可視光の分光放射率を測定する測定器として、市場ニーズの変化の中でも業界トップレベルの性能で発売以来長きにわたり好評を得てきた。しかしながら最近のディスプレイ性能の主要な指標となっているコントラスト測定においては、より低輝度を測定する新たな課題対応が求められている。

筆者らは、この課題に対応すべく「分光放射輝度計CS-2000」を開発した（Fig. 1）。従来機CS-1000に比べ3桁低い0.003cd/m<sup>2</sup>（測定角1°）の超低輝度領域までの測定を可能とした。



Fig.1 The CS-2000 spectroradiometer

ここでは、低輝度性能を達成するために開発した主要技術である、①光学技術②センサ回路技術③高感度センサを使用するためのフリッカ光源の影響低減方法④センサ暗電流低減・発熱対策のための熱対策設計について紹介する。

\* コニカミノルタセンシング(株) 開発部 開発11課  
\*\* コニカミノルタセンシング(株) 開発部 開発22課  
\*\*\* コニカミノルタセンシング(株) 開発部 開発21課

## 2 光学技術

光学技術のうち従来機に対して変更、改善した点を主に紹介する。光学系全体の構成をFig. 2に示す。

CS-2000では従来機で実績がある測定角 $1^\circ$ に加えて、測定角 $0.2^\circ$ 、 $0.1^\circ$ にも切り替えることができるようになった。測定角 $1^\circ$ の最小測定径は $\phi 5\text{mm}$ （ただし、オプションのクローズアップレンズをつけない場合）であり、従来機より小さな光源にまで超低輝度測定が可能になったことが特長のひとつとなっている。また、対物レンズの合焦の誤差による測定値の変化を抑制するように対物レンズやファイバー部分の設計を行ったので、本来なら合焦の誤差の影響が生じやすい小測定角でも、安定した測定が可能になっている。

ファインダーでは、出射瞳の径を大きく設計したので、低輝度測定の用途に適した明るいファインダーが実現されている。さらに、高倍率で設計しているため、被測定物、照準円が拡大され、測定角 $0.1^\circ$ でも照準が容易にできるファインダーとなっている。また、照準円内の視度差が小さくなるように、対物レンズ光軸に対するアパーチャミラーの角度を可能な限り小さくするメカ設計、レンズ設計を行い、照準円を見たときの違和感はない。

分光放射輝度計で回折格子を使うことは一般的である。回折格子を使うことによる最大の欠点は偏光誤差が大きくなることである。CS-2000ではこの偏光誤差の問題を大幅に改善し、偏光誤差の実力は2%以下（ $400 \sim 780\text{nm}$ :測定角 $1^\circ$ ）と、従来機の1/2以下に抑えている。

分光応答度の半値幅を決めているのは、光ファイバーからセンサに至る光学系とファイバー出口にあるスリットの幅である。超低輝度測定を実現する際、この半値幅を大きくして光量を増やす光学設計をすれば比較的容易に実現できるが、CS-2000では半値幅を大きくせず、光学系でとりこむ光量や効率をあげるという設計で光量を増やすことに成功している。HgCd光源の3本の輝線（ $435.8\text{nm}$ 、 $546.1\text{nm}$ 、 $643.8\text{nm}$ ）を実測したときの半値幅は $5\text{nm}$ 以下であり、超低輝度測定だけでなく、輝線の分解にも最も有利な測定器となっている。

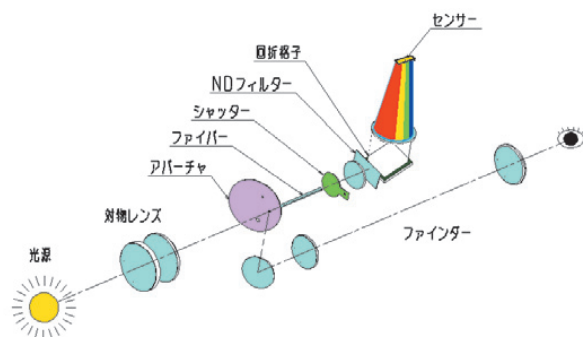


Fig.2 Optical components of the CS-2000

## 3 センサ回路技術

### 3.1 駆動パラメータの最適化

CS-2000では低輝度性能の向上のため、低ノイズの高感度CCDセンサを採用している。

低輝度性能を向上させるためには、CCDセンサを含めた信号回路のノイズを小さくする必要がある。品質工学を利用し、駆動電圧・クロックパターン等の設計パラメータの最適条件を見つけ出し、性能を最大限に発揮させることができた。この結果、回路ノイズはA/Dコンバータの量子化誤差程度となりほとんど性能に影響しない。

### 3.2 短期ドリフトの改善

$1\text{cd}/\text{m}^2$ 以下の低輝度域測定で、短期ドリフトの改善に取り組んでいる。このドリフトはCCDセンサの特性が原因である。

CCDセンサは多数の光電変換素子が配置されており、光が入射されると受光素子が光電変換することで光の強さに応じた電荷を発生する。発生した電荷は電位のポテンシャルウェルを利用し、次々に転送され出力される。しかしながら、実際のCCDセンサでは転送の障害となる電位のディップやバリアによって信号電荷が捕獲され電荷の転送残りが発生するため、全ての電荷が隣の転送レジスタへ転送されるわけではない<sup>1)</sup>。このときの信号電荷を転送したときの信号電荷と元の信号電荷との割合を転送効率（charge transfer efficiency）という。

CCDセンサの転送効率が100%の時は、転送レジスタの信号電荷は残さず隣の転送レジスタに信号電荷が渡されていき、最後に出力部に導かれる。しかし転送効率が劣化した場合は、転送レジスタにて電荷の転送残りが発生し、例えばQ0の信号電荷があったときの出力部での転送損失電荷は、転送効率： $\eta$ と転送レジスタ数： $n$ より、

$$\text{転送損失電荷} = (1 - \eta^n) \times Q0$$

となり、転送損失電荷の信号量が測定誤差となる。

信号電荷量により転送効率は変化する。転送中に捕獲される電荷の量は決まっており、信号電荷量が少ないとき、すなわち分光放射輝度計では低輝度を測定するときほど測定誤差が大きくなり無視できなくなる。

測定を開始する前にCCDセンサへの光が遮光された時間が長くなると測定値の短期ドリフトが発生する。メカニズムは遮光時には転送レジスタでの電位のディップやバリアに蓄えられていた電荷が減少する。その後、連続測定した場合は、入射光による電荷が再び電位のディップやバリアに捕らえられることによる。Fig. 3に改善前の連続測定時データを破線にて示す。測定回数10回目を基準にし、連続測定時の測定輝度値の短期ドリフトを示したものである。

対策としては、信号電荷に加え一定の電流を流すこと

により転送レジスタでの電位のディップやバリアを常に電荷で埋める方法も知られているが、流す電流自身のノイズが影響し低輝度測定時のS/Nが悪化する問題がある。

筆者らはこの問題に対し、測定停止時でも常時CCDセンサへの測定光の入射をコントロールすることで、CCDセンサの転送効率の劣化の原因である転送レジスタでの電位のディップやバリアにより捕獲される信号電荷の量を常に補完させる方法を考案した。これにより、CCDセンサの転送効率の劣化に起因する信号損失を改善し、測定誤差を抑えた安定した測定ができる分光放射輝度計を提供できた。Fig. 3に改善後の連続測定時データを実線にて示す。

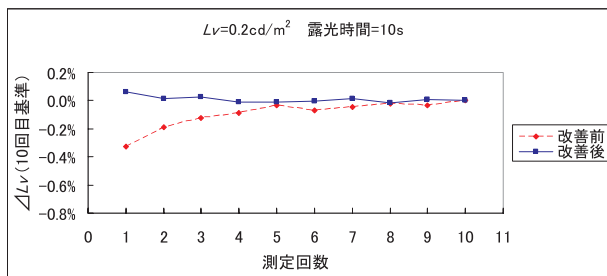


Fig.3 Error arising from consecutive measurement

#### 4 フリッカ光源の影響低減方法

CS-2000の主な測定対象としてFPDがある。そのFPDの多くは細かな点滅を繰り返すフリッカ光源である<sup>2)</sup>。PDPや一部の有機ELディスプレイは輝度階調を表現するため時分割発光を行っており、また本来は保持型の表示を行うLCDに於いても動画表示の改善のためにフレーム毎に黒画像を挟む処理が行われているものもある<sup>3)</sup>。

このようなフリッカに対して人間の目は60Hz以上の点滅を認識できないために、なめらかな画像として見る事ができるが、輝度計による測定では注意が必要である。Fig. 4に示すように、同一露光時間であってもディスプレイの発光との位相差によっては10回の発光を測定

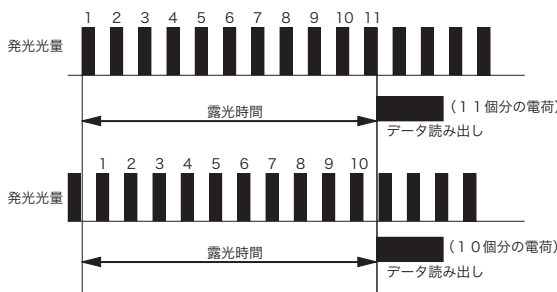


Fig.4 Flicker measuring model

する場合や11回の発光を測定する場合があります、このとき10%もの測定誤差が生じることになる。

このため、従来からフリッカに対して精度良く測定できるようにするために様々な工夫が施されている。

一つは、ディスプレイの垂直同期信号を測定器にも入力して信号周期を検出しこの整数倍の露光を行うようにする方法である(外部同期)。この方法では、同期信号を取り出せないか取り出すのが容易でない場合には適さない。次に、測定器に発光周波数を数値設定する方法がある(内部同期)。この方法では電気信号として同期信号は必要ないが、数値設定する発光周波数の精度が低いと測定精度も下がる。

別の方法として露光時間を1秒以上というような長い時間に設定すれば、発光周波数の多少の誤差の影響は相対的に小さなものとなる。長い露光時間が可能であれば問題はないが、高輝度ではCCDセンサが容易に飽和してしまい測定ができない。

このため筆者らはCCDセンサに溜まる電荷を分割読み出しし、A/D変換後に数値積算することで、フリッカの影響を受けずに測定する方法を考案し、Multi Integral modeと名付けた。

単純に複数回測定をして平均処理をする場合ではセンサの露光は間欠的で光のエネルギーを取りこぼしてしまうが、センサそのものは連続的に露光させ、溜まった電荷のA/D変換のみを分割して行うこの方法では、測定時間も短く、高輝度でも飽和せずにより安定した測定が可能となる。

Fig. 5は、その比較を模式化したものである

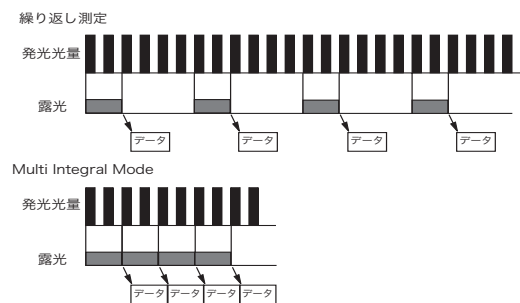


Fig.5 Timing models of conventional and multi-integral mode methods

Multi Integral modeの方法では、センサの露光そのものは低輝度に於ける長時間露光と同様でありながら、溜まった電荷が飽和する前に順次読み出すため、高輝度に於いても実質的に長時間露光と同等の効果を得ることができる。

Fig. 6は、発光周期と測定器に設定する周期が異なる場合の測定誤差を通常の測定とMulti Integral modeとで比較したものである。

このように、Multi Integral modeを使用しない場合は、僅かな周波数の不一致で大きな誤差が生じるが、

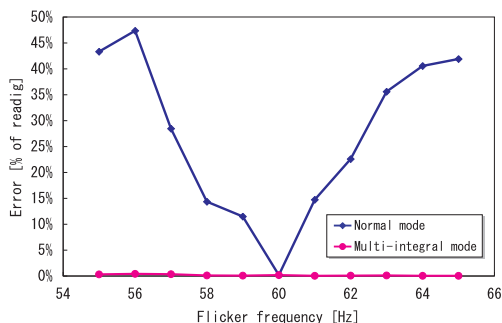


Fig.6 Error of normal mode and multi-integral mode

Multi Integral modeを使用することで、発光周期が正確に分かっていないものや発光周期が不安定なものにたいしても、高精度な測定を可能とすることができた。

## 5 熱対策設計

### 5.1 熱対策

低輝度での測定では暗電流ノイズの低減、すなわち暗電流の電流量の低減が重要な開発要素である。したがってCCDセンサの暗電流を低減するためCCDセンサをペルチェ素子にて冷却し使用している。ペルチェ素子はペルチェ効果 (Peltier effect) を利用した板状の半導体素子である。直流電流を流すと、一方の面が吸熱し、反対面に発熱が起こる。この吸熱面にCCDセンサを接触させ、発熱面をヒートシンクにより放熱させることにより、冷却が行われる。ここで問題となるのは放出された熱対策である。電源回路部の発熱も含め、実施されている熱対策について紹介する。

### 5.2 放熱設計

構成についてFig. 7に示す。

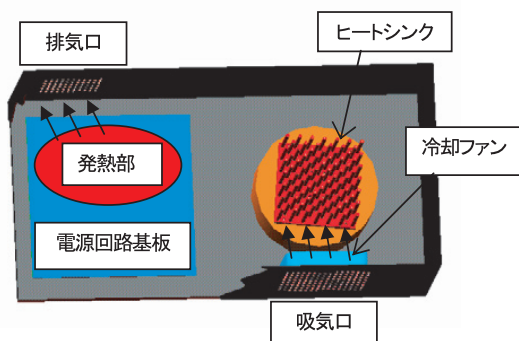


Fig.7 Components of thermal radiation

ヒートシンクに伝わった熱を吸気口より冷却ファンを用い取り入れた外気で空冷させることにより放熱することが可能な構成となっている。また、電源回路基板の発熱部を排気口の近傍に設けることで、効率の良い放熱が

確保できている。

放熱設計での設計パラメータは、ヒートシンクサイズ・吸排気口のサイズおよび位置、冷却ファンの流量等がある。最適化を行なうことにより使用温度範囲5～35℃において、測定性能を確保できるペルチェ冷却温度を設定することができた。

### 5.3 光学系への影響低減

光学系ブロックは熱による影響を受けやすく、測定値の変動となって現れる。したがって発熱部からの影響を極力排除する必要がある。対策として発熱部である“放熱ブロックおよび基板”を上部に配置し、“光学ブロック”を下部に配置する、完全に部屋分けする構成とした。その結果、長時間連続測定における測定値の変化量を小さくすることができた。加えて冷却ファンによる埃が“光学ブロック”に入らない効果もある。

また、熱歪による固定位置ズレが数 $\mu\text{m}$ 以下となるように、Fig. 8のような熱解析を行い、固定部形状及び固定方法の設計にフィードバックをかけている。

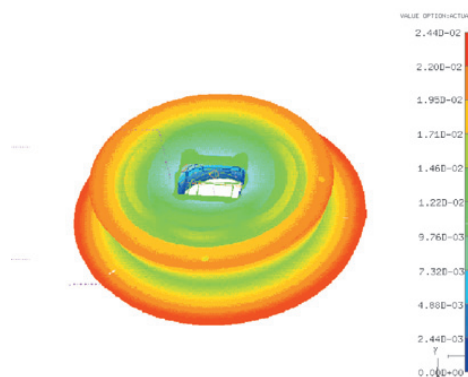


Fig.8 Example of thermal analysis data

## 6 まとめ

以上CS-2000での搭載技術について紹介した。

最近のディスプレイでは、リアルな映像を表現すべく黒の階調表現を改善したコントラスト比競争が熾烈となっており、黒の低輝度をコントラスト比10万対1で測定できるCS-2000は市場のニーズに合致した製品であるといえる。

本器が、ディスプレイおよび各種光源測定の標準機として、今後とも広く使用されることを期待する。

### ●参考文献

- 1) 米本和也, “CCD/CMOSイメージセンサの基礎と応用”, CQ出版社, 東京, 2003, 58-60
- 2) 栗田泰市郎, 映像情報メディア学会誌, 61, 1267 (2007)
- 3) 上松幹夫, 後藤泰史, 門脇豊, KONICA MINOLTA Tech. Rep., 4, 65 (2007)