

## 光学センサの校正・性能評価試験技術の研究

## Radiometric Calibration Facility for Optical Sensors

エレクトロニクス技術グループ

Electrical Engineering Group

山本泰志

Yasuji Yamamoto

**Abstract:** A radiometric calibration facility for optical sensors was developed using wavelength-tunable lasers as the light sources and a silicon photodiode as the standard detector of radiometric responsivities. This facility enabled us to calibrate the responsivities that were previously impossible to measure, such as the relative spectral responsivity of an optical sensor with a large aperture, and the linearity continuously over four orders of dynamic range. This paper describes an overview of this facility and its characteristics.

## 1. はじめに

地球観測センサ(ものさし)による観測精度は、センサの性能だけでなく、センサをどれだけ精度良く校正・性能評価できるか(ものさしに目盛りを付ける精度)によっても決まる。また、「ものさし」に目盛りを付ける以前の問題で、曲がったり振れている「ものさし」を(開発したハードには必ず多くのバグがある)、不具合バグを見つけて、真直ぐに直す必要がある。校正・性能評価試験技術は、観測データを利用するために、またハードの開発における不具合の発見・改修のために不可欠な基本的技術である。本研究では、最低限測れなければいけない特性を測れるようにする(順次、穴を埋めていく)とともに、開発した校正・性能評価試験技術の標準化を行なう。

## 2. 研究の概要

### 2.1 輝度校正標準の維持管理と運用および改良

我国が有する光学センサを一つの基準から校正することを目的とし、輝度校正標準を産業技術総合研究所と共に開発した。その輝度校正標準の維持管理と運用を行い、衛星搭載センサやその検証試験に用いる地上用センサ等の校正試験を実施している。平成15年度は、SELENE搭載LISMの校正・性能評価試験の他、軌道上で運用中のセンサを検証するためのセンサの校正試験を実施した。

また、平成15年度は、輝度校正の不確かさ要因のうち大きな要因について詳細な評価を行った。積分球の分光放射輝度の経時変化等の詳細な評価を行ない、不確かさを小さくする運用方法の検討を行った。

### 2.2 新規試験技術の研究

これまでに衛星搭載センサの光学性能評価試験を実施してきた中で明らかになった問題点を改善するために、波長可変レーザを用いた性能評価試験技術を開発している。従来不可能だった分光応答度を測定することと、線形性を4桁のダイナミックレンジで連続的に測定することが可能となった。また、

感度偏差・フラット特性を精度良く測定することが可能となった。また、高精度放射計を開発しており、その要素技術としてのアナログ回路、赤外検出器の実装技術等の検討を行なっている。

### 3. 成果の概要

#### 3.1 波長可変レーザを用いた性能評価試験技術の開発

##### 3.1.1 装置の概要

本装置は、単色光光源と標準検出器からなる。光学センサのラジオメトリック特性は、標準検出器を基準に測定される。Fig. 1 に本装置の概要を示す。

出力が 1 W 程度の連続発振の波長可変レーザを光源とし、レーザ光を直径 60 cm の積分球に入射し、積分球開口より一様かつ無偏光な拡散光を得る。波長可変レーザは、Nd:YVO<sub>4</sub> レーザの第二高調波 532 nm で励起された色素レーザおよびチタンサファイアレーザで、536 から 1100 nm までを連続的に発振する。なお、レーザ光の一部をマイケルソン干渉計に入射して単色光の波長を決定する。また、EO モジュレータを用い、レーザ光の偏光面を回転させることによって、レーザ光強度の安定化を行う。標準検出器のシリコンフォトダイオードの分光応答度(A/W)は、極低温放射計を基準に校正されている。なお、平成 16~17 年度に、励起レーザとしてクリプトンレーザを用い、380 から 536 nm も発振させることを予定している。

本装置の特徴は、大面積で、明るく、空間的に一様、無偏光な単色光光源が得られることである。積分球開口での放射輝度の最大値は、3 W/m<sup>2</sup>/sr 以上であり、ほとんどのバンドで地表面輝度の最大値よりも明るい。放射輝度レベルは、4 桁以上のダイナミックレンジを連続的に変えることができる。積分球開口での輝度むらは 0.5% 以下であり、偏光度は 0.3% 以下である。また、放射輝度の安定度は、レーザ共振器のアライメント調整と色素ジェットの調整に注意を払うことで、0.1%rms 程度まで安定化が可能である。さらに、EO モジュレータを用いて、0.01%rms 以内まで安定化が可能である。

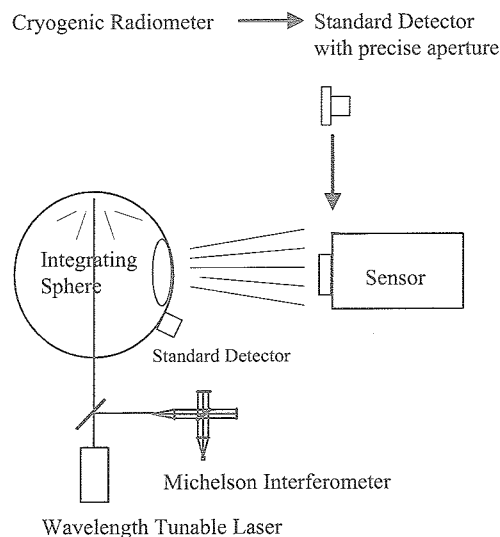


Fig. 1. Schematic diagram of the Radiometric Calibration Facility (RCF). Wavelength-tunable lasers were the light sources and an integrating sphere made the light sources spatially uniform and depolarized. An optical sensor was calibrated against a standard detector that was calibrated traceable to the cryogenic radiometer.

### 3.1.2 分光応答度の測定

光学センサの分光応答度の測定は、レーザの波長を変化させることによって、標準検出器を基準に測定することが可能である。従来、20 cm  $\phi$  程度の開口径を持つセンサの分光応答度は、正確に測定することは不可能であり、個々の光学素子の分光特性を掛け合わせて計算で求めていた。その理由は、モノクロメータ出射光をコリメートして得られる単色光の光量は極めて小さく、十分な測定の S/N を得ることができなかつたためである。また、モノクロメータ出射光は強く偏光しており、むらが大きいなどの問題があつた。それに対し、本光源は前述のような特徴を持ち、これらの問題点が改善されている。

単色輝度計の分光応答度を本装置とモノクロメータを用いた測定方法(放射温度計測の国家標準に用いられている方法)で測定し、結果を比較した。その結果を Fig. 2 に示す。分光応答度の中心波長の差異は 0.01 nm であり、モノクロメータを用いた測定方法の波長不確かさの範囲内であつた。

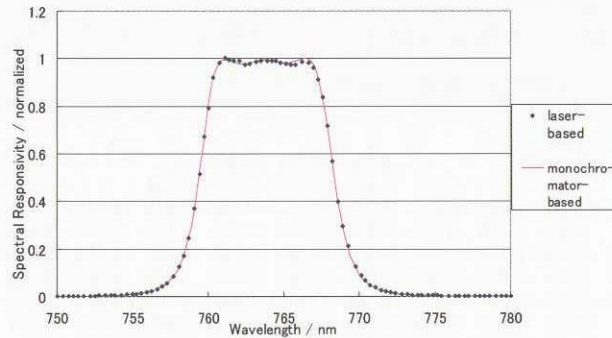


Fig. 2. Spectral responsivity of a filter radiometer with a center wavelength of 764 nm was calibrated using both the laser-based (RCF) and monochromator-based facilities, and the results were compared.

### 3.1.3 線形性の測定

光学センサの線形性の測定は、レーザの強度を変化させることによって、標準検出器を基準に測定することが可能である。従来、ハロゲンランプ積分球を用いる方法では、線形性を正確に測定することはできなかつた。その理由は、ハロゲンランプ積分球の分光放射輝度校正値の不確かさがセンサの非線形性より大きいためである。また、ハロゲンランプ積分球の分光放射輝度レベルは、ランプの点灯個数によって調整するため、連続的に変えることは不可能であり、特に 1 つのランプが作る分光放射輝度以下のレベルを得ることは不可能である。それに対し、本装置では、単色光光源なので、シリコンフォトダイオードを基準に光学センサの線形性を測定することが可能である。また、レーザ光路中に ND フィルタを入れることで、放射輝度を 4 桁以上変えることができ、偏光板を入れて回転させることで、放射輝度を連続的に変えることができる。単色輝度計のリニアリティを本装置で測定した例を Fig. 3 に示す。

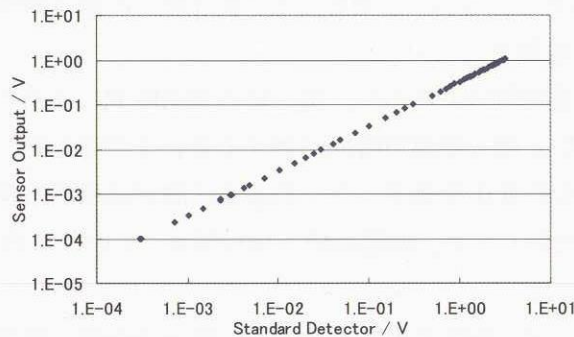


Fig. 3. Linearity of a filter radiometer calibrated against the standard detector continuously over four orders of dynamic range. The laser intensity was changed by ND filters and a polarizer.

### 3.1.4 感度偏差・フラット特性の測定

光学センサの(画素間)感度偏差の測定は、空間的に一樣な光源に対して行われる。そのため、光源の輝度むらが小さいことが必要である。従来のハロゲンランプ積分球の輝度むらは、典型的には 1%程度である。それに対し、本装置の輝度むらは、Fig. 4 に示すように 0.5%以内と小さく優れている。そのため、感度偏差を精度良く測定することが可能である。平成 15 年度は、積分球内の繰り返し反射におけるレーザの干渉の影響を解消し、輝度むらをさらに小さくすることを検討した。現在、詳細な評価を実施しているところである。

従来、測定要求が多い天文観測機器のフラット特性の評価は、ハロゲンランプ積分球では明るすぎて測定できなかった。それに対し、本装置は前述のように輝度レベルが小さい光源を得ることができるため、天文観測機器用のフラット特性の測定も可能となった。

-	-	-	-	-0.29%	-0.28%	-0.05%	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-0.02%	-0.38%	-0.32%	-0.23%	-0.14%	-	-	-
-	-	0.34%	-0.08%	-0.26%	-0.33%	-0.31%	-0.04%	0.24%	-	-	-
-	0.34%	0.10%	-0.34%	-0.38%	-0.46%	-0.28%	0.11%	0.14%	0.45%	-	-
0.62%	0.23%	-0.10%	-0.10%	-0.35%	-0.28%	0.09%	0.30%	0.23%	0.32%	0.17%	-
0.46%	0.24%	-0.08%	-0.08%	-0.08%	0.00%	0.14%	0.38%	0.22%	0.42%	0.36%	-
0.48%	0.23%	-0.14%	-0.29%	0.10%	0.23%	0.06%	0.10%	0.28%	0.34%	0.36%	-
-	0.15%	-0.18%	-0.10%	-0.08%	0.02%	-0.10%	0.02%	0.10%	0.20%	-	-
-	-	-0.04%	0.04%	0.01%	-0.06%	-0.17%	-0.04%	0.23%	-	-	-
-	-	-	0.17%	0.36%	-0.12%	-0.18%	0.27%	-	-	-	-
-	-	-	-	0.36%	0.14%	0.14%	-	-	-	-	-

Fig. 4. Radiance uniformity at the laser integrating sphere aperture. The aperture of 20 cm diameter was measured at each 2 cm grid with a wavelength of 565 nm. The radiance was normalized with that of the aperture center.

### 3.2 輝度校正標準の改良：積分球の分光放射輝度の経時変化の評価と運用方法の検討

光学センサの輝度校正は、一般的に内部でハロゲンランプを点灯した積分球を分光放射輝度の基準として行う。積分球を用いたセンサの輝度校正の不確かさ要因はいくつかある。宇宙航空研究開発機構の積分球の分光放射輝度の校正値不確かさは、可視近赤外波長域では  $2\sigma$  で 0.9~1.7%(波長による)と評価されている。それに加えて、積分球の分光放射輝度を校正した時からセンサの輝度校正をする時までの間に、積分球の分光放射輝度に変化することが、不確かさ要因の一つとなる。本研究では、積分球の可視近赤外波長域の分光放射輝度の変化の評価と原因の究明を行い、積分球の運用への反映と不確かさの評価を試みた。分光放射輝度の変化の評価は、(株)オプテル製の直径 60 cm  $\phi$ 、開口径 20 cm  $\phi$  の積分球(以下 60 cm  $\phi$  積分球と記す)と、米国の Labsphere, Inc.製の直径 100 cm  $\phi$ 、開口径 36 cm  $\phi$  の積分球(以下 1m  $\phi$  積分球と記す)に対して行った。両者とも、積分球の内壁は硫酸バリウムでコーティングされており、ハロゲンランプを複数個有している。

分光放射輝度の変化が、経過時間によるのか、積分球の運用時間によるのかを調べるために、分光放射輝度の経過時間に対する変化と積分球運用時間に対する変化を評価した。積分球運用時間が多い月と少ない月を作って分光放射輝度の変化を測定した。Fig. 5 に測定結果の一例を示す。分光放射輝度の変化は、積分球運用時間にほぼ比例したが、経過時間とは相関がなかった。積分球運用時間 100 時間に対して 0.9~1.3%の割合で低下した。

分光放射輝度の変化が、ランプの特性変化によるのか、積分球内壁の特性変化によるのかを区別する

ために、1mφ積分球の全く異なるランプセットA(5.8A×4灯)とB(4.3A×5灯)を決め、それぞれ99時間、22時間点灯した。Fig. 6に示すように、ランプを点灯した時間に対する分光放射輝度の変化は、ランプセットAとBで全く異なっていた。一方、積分球としての点灯時間(積分球運用時間)に対する分光放射輝度の変化は、ランプセットAとBでほぼ一致した。また、ランプを新品に交換し、ランプ交換後の分光放射輝度の変化を測定した。ここでは結果を示していないが、分光放射輝度は、ランプ交換直後から低下し、ランプ交換前と同じように積分球運用時間に比例するように低下した。以上の実験結果から、分光放射輝度の変化は、ランプの変化によるのではなく、積分球内壁の特性変化によると考える。

目安として積分球運用時間で100時間毎に、分光放射輝度の校正を行うこととする。分光放射輝度の変化による不確かさを小さくする必要がある場合は、校正周期を短くする。現実的には、校正周期に応じて、分光放射輝度の変化による不確かさの評価を行う。

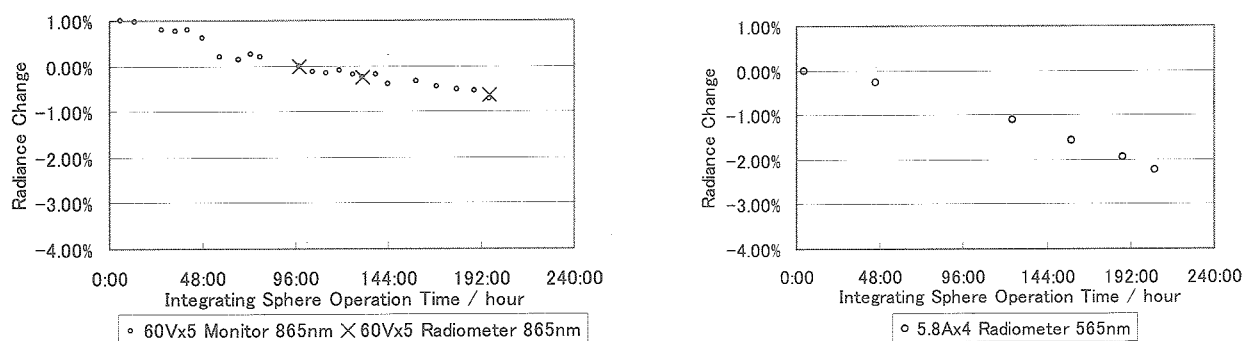


Fig. 5. Left graph : Radiance trend of the 60 cm φ integrating sphere (60Vx5) against the integrating sphere operation time with a wavelength of 865 nm. Right graph : Radiance trend of the 1 m φ integrating sphere (5.8Ax4) against the integrating sphere operation time with a wavelength of 565 nm.

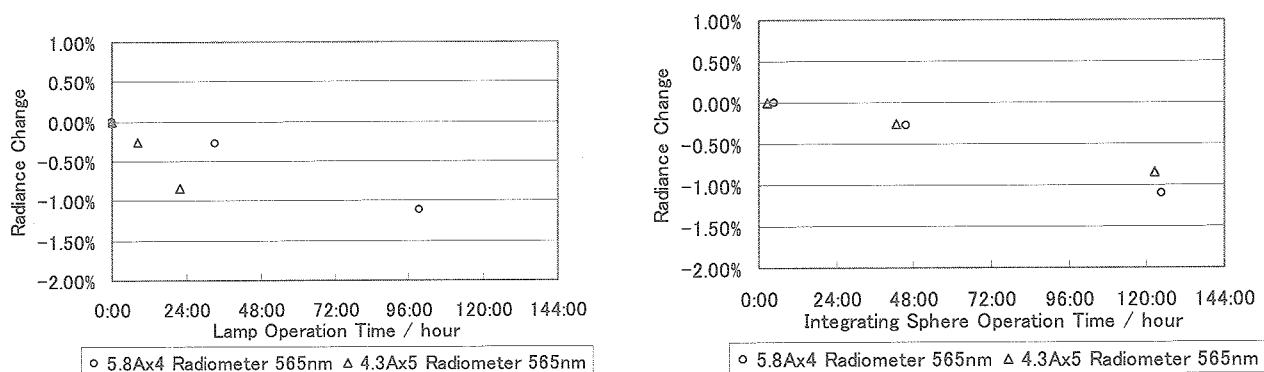


Fig.6. Radiance trend of the 1 m φ integrating sphere against the lamp operation time (left graph) and the integrating sphere operation time (right graph) with a wavelength of 565 nm.

#### 4. まとめ

輝度校正標準の維持管理と運用を行い、衛星搭載センサやその検証試験に用いる地上用センサ等の校正試験を実施した。

これまでに衛星搭載センサの光学性能評価試験を実施してきた中で明らかになった問題点を改善す

るために、波長可変レーザを用いた性能評価試験技術を開発した。従来不可能だった分光応答度を測定することと、線形性を4桁のダイナミックレンジで連続的に測定することが可能となった。また、感度偏差・フラット特性を精度良く測定することが可能となった。