

分光放射計用校正装置の開発及び分光放射計の校正精度

居島 修*・高野 松美*・山崎 明宏**・石田 春磨**・工藤 玲**

Development of the Calibration System and Accuracy of Calibration for the Spectroradiometer

Osamu IJIMA, Matsumi TAKANO, Akihiro YAMAZAKI, Haruma ISHIDA and Rei KUDO

要旨

従来のブリューワー分光光度計用校正装置を使用した分光放射計の校正では、測器の設置や距離の測定に個人差が生じ、また、校正結果にも迷光が影響している可能性があったため、分光放射計専用の校正装置を新たに開発することとなった。新たに開発した校正装置は、測器の設置時において測器受光面と光源との距離の変動に伴う NIST ランプの波長別放射照度の不確かさを最小限に抑える構造とし、迷光の影響を可能な限り低減した。また、新型校正装置及びブリューワー分光光度計用校正装置の分光放射計の校正精度について、①基準となる波長別放射照度に関連する不確かさ、及び、②分光放射計測定値への迷光の影響を調査した。その結果は以下のとおりである。

①基準となる波長別放射照度に関連する不確かさ

1) ブリューワー分光光度計用校正装置

校正の基準となる波長別放射照度の相対標準不確かさは、①測定距離の不確かさ：0.5%、②電源装置の安定性による不確かさ：0.6%(推定)、③NIST ランプの校正における不確かさ(350nm)：1.1%となり、合成した相対拡張不確かさ(k=2)は 2.8%(350nm)であった。

2) 新型校正装置の不確かさ

校正の基準となる波長別放射照度の相対標準不確かさは、①測定距離の不確かさ：0.2%、②電源装置の安定性による不確かさ：0.7%、③NIST ランプの校正における不確かさ(350nm)：1.1%となり、合成した相対拡張不確かさ(k=2)は 2.6%(350nm)であった。

②分光放射計測定値への迷光の影響

ブリューワー分光光度計用校正装置においてランプカバーを取り付けた校正では、カバー内部の反射等の迷光によって測定値が全波長平均で 3.1%増加していた。また、ブリューワー分光光度計用校正装置と新型校正装置の測器常数の比較において、新型校正装置では迷光が低減されたことを確認した。

これらの結果から、新型校正装置では、ブリューワー分光光度計用校正装置に比べ、基準となる波長別放射照度に関連する不確かさのうち、測定距離の不確かさを 3 分の 1 に改善することができた。また、新型校正装置では、分光放射計測定値への迷光の影響が低減された。

両校正装置による分光日射計の校正において、波長別放射照度の相対標準不確かさは NIST ランプの値付けに起因する不確かさや電源の安定性による不確かさによる影響が大きく、校正精度の向上のためにはランプの校正精度の向上及び電源装置の不確かさの低減等が課題である。

1. はじめに

高層気象台では、分光放射計の校正方法を確立することを目的として 2011 年から校正に関する調査を開始した。また、2012 年に宇宙航空研究開発機構(JAXA)及び国立環

境研究所(NIES)と「陸域生態系の生産量推定等に関する共同研究」を、2014 年に気象研究所と共同で「分光日射観測とデータ同化によるエアロゾル・雲の地表面放射収支に与える影響監視に関する研究」を開始した。これらの共同研究において、高層気象台は分光放射計の光学特性等の把握及び校正方法の調査を担っている。

*高層気象台 観測第二課 **気象研究所 気候研究部

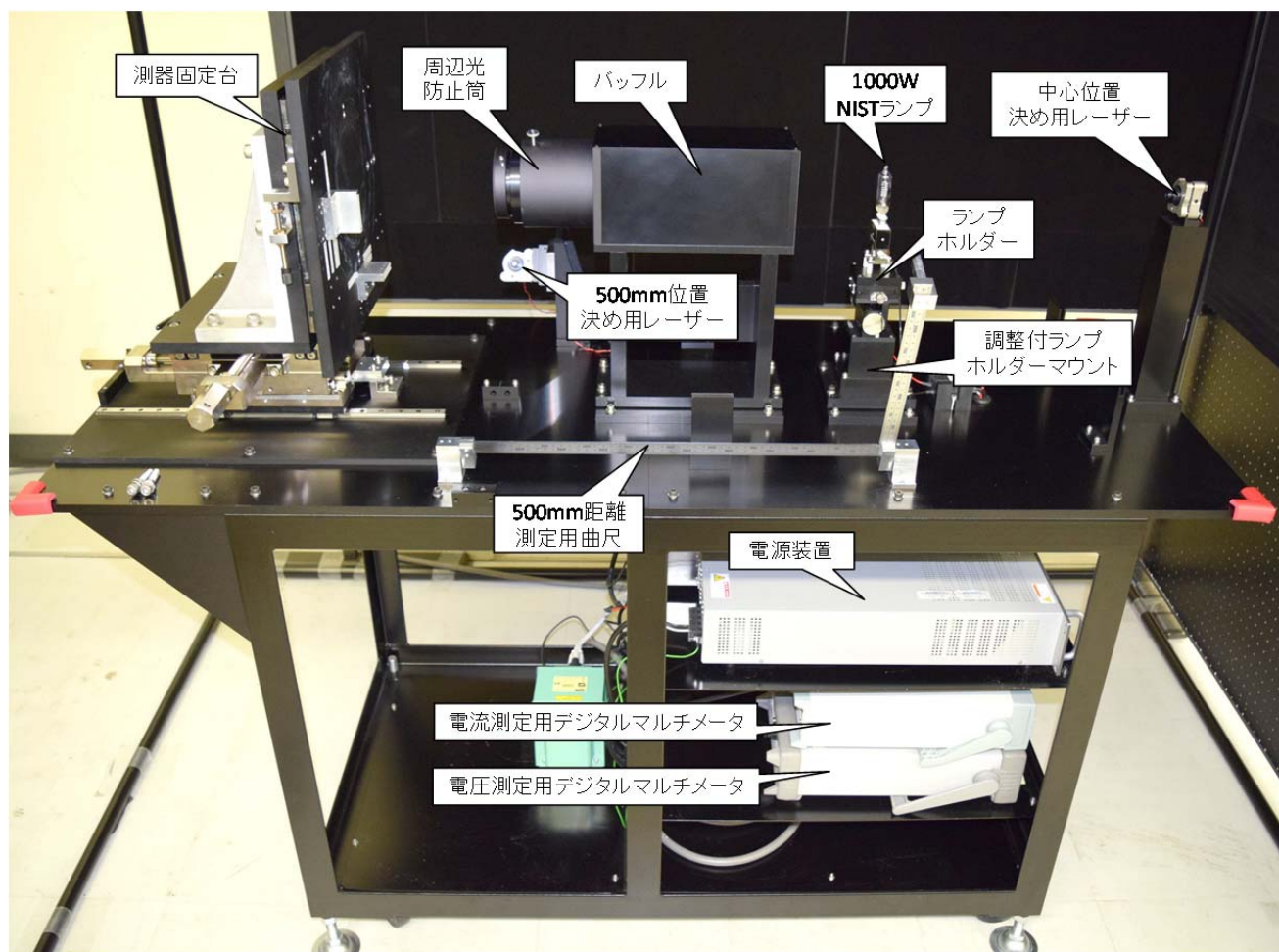


写真 1 新型校正装置外観

分光放射計の校正は、2012 年 6 月から 2015 年 2 月まではブリューワー分光光度計用校正装置(以下、BR 用校正装置という)を使用していた。しかし、BR 用校正装置を用いて分光放射計を校正する場合、測器を簡易的な台に設置するため、標準光源から受光面までの距離の測定及び測器受光面の中心位置の決定において個人差が生じ、校正の度に測器の設置に伴って NIST ランプの波長別放射照度の不確かさが変動していた。また、BR 用校正装置の校正結果は、カナダ気象局の BR 用校正装置に比べて 3% 高い値を示し(伊藤ほか：2007)、迷光の影響の可能性が考えられた。このため、分光放射計専用の校正装置(以下、新型校正装置という)を新たに開発することとなった。

新型校正装置を開発するにあたり、①測器の位置決めにおいて個人差が生じない構造とし、②迷光による校正への影響を可能な限り低減することを検討した。

本稿では、新型校正装置の概要を紹介し、両校正装置の精度について、①基準となる波長別放射照度の不確かさ、②迷光による測定値への影響、の 2 点により評価を行った。なお、本文中の不確かさについては、説明がな

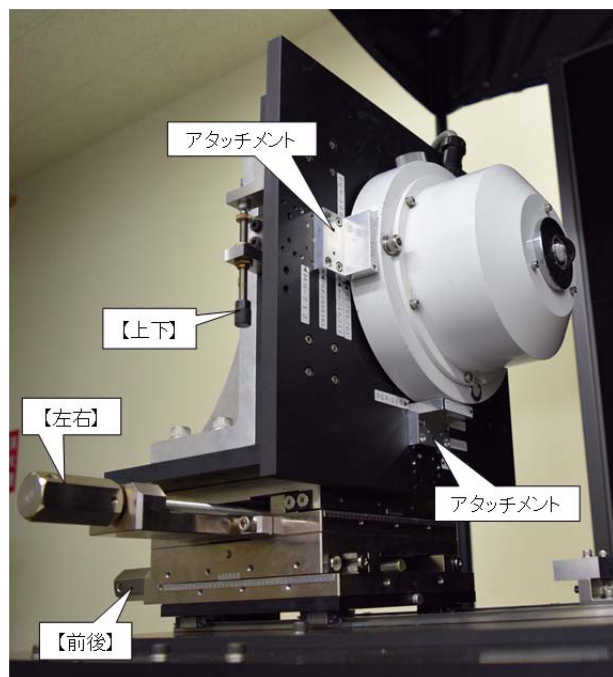


写真 2 測器固定台 (測器：MS-710)

い限り標準不確かさまたは相対標準不確かさのことをいう。

2. 新型校正装置の概要

新型校正装置((有)オーケーラボ社製)の外観を写真 1 に示す。新型校正装置は、(1)測器固定台、(2)中心位置決め機構(ランプホルダーを含む)、(3)距離測定機構、(4)電源装置類、(5)バッフル(迷光低減対策)で構成される。また、基準となる標準光源は、BR 用校正装置と同様に、NIST(米国国立標準技術研究所：National Institute of Standards and Technology)にトレーサブルな 1000W のタングステンハロゲンランプ(以下、NIST ランプという)を使用した。

各構成機器等の詳細について以下に解説する。

(1) 測器固定台

測器固定台に分光放射計(MS-710)を設置した状態を写真 2 に示す。測器固定台は、測器受光面を垂直に保ち、2 か所に測器の固定位置を決めるアタッチメントを取り付けることによって測器受光面を常に同じ位置に固定することができる。このアタッチメントは数種類あり、国内で販売されている英弘精機社製及びプリード社製のすべての分光放射計に対応している。また、測器固定台は前後、左右、上下に位置を調整することができる。

(2) 中心位置決め機構(ランプホルダーを含む)

分光放射計の校正において、NIST ランプの中心位置と測器受光面の中心位置を合わせる必要がある。中心位置決めの方法は、次の①から③の手順で行う。①ランプホルダーに「中心位置決め治具」(写真 3(a))を取り付け、写真 3(b)右端にあるレーザー光を「中心位置決め治具」に照射する。②レーザー光が「中心位置決め治具」の中心に照射されていることを確認し、治具を取り外す。中心からずれている場合は、ランプホルダーを上下左右に調整する。③測器受光面にレーザー光を照射し、測器固定台を上下左右に調整して受光面の中心位置を決定する。

(3) 距離測定機構

NIST ランプは、500mm の距離における波長別放射照度が値付けされている。このため、NIST ランプを用いた校正では、NIST ランプから受光面までの距離を精確に 500mm に合わせなければならない。例えば、この距離を 1mm 縮めて 499mm にした場合、光の強さは距離の 2 乗に反比例するため、NIST ランプの放射照度は 0.4%強くなる。NIST ランプは、BR 用校正装置では両口型(ダブルエンド)を使用しているが、新型校正装置では距離の始点が明確な片口型(シングルエンド)を採用した。なお、NIST ランプから受光面までの基準の距離(50cm)は、cm 単位で表記されることが多いが、本稿では測器設置時の不確かさの

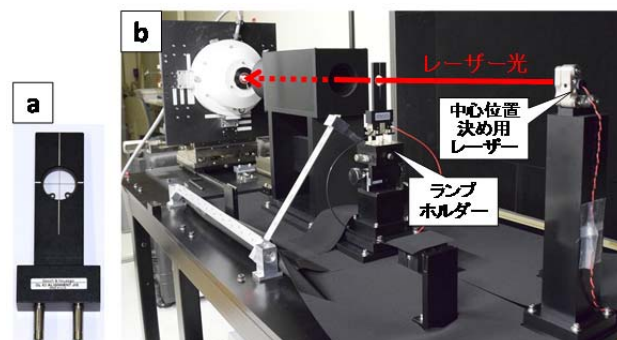


写真 3 中心位置の決定(測器：MS-710)

(a)：中心位置決め治具

(b)：レーザー光による中心位置決め

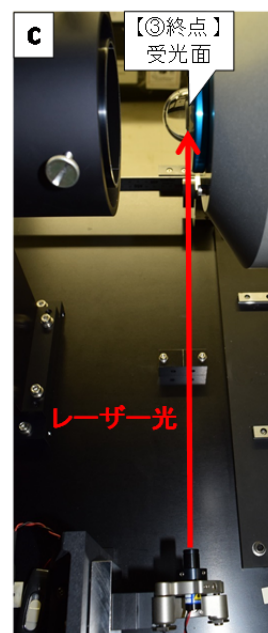
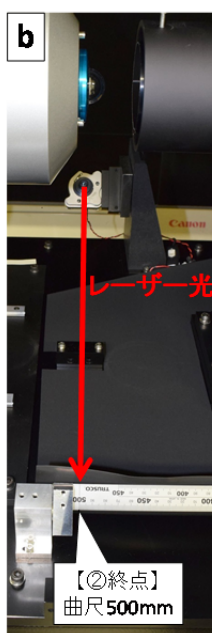
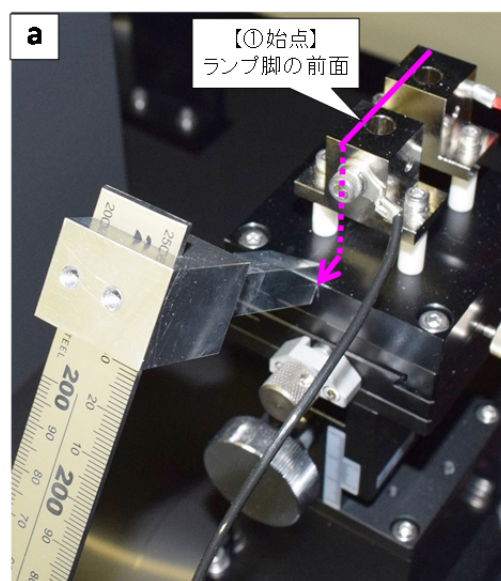


写真 4 距離決めの始点位置及び終点位置

(a)：始点位置 (b), (c)：終点位置(測器：MS-711)

説明において mm 単位を使用することから 500mm と表記する。

NIST ランプから受光面までの距離の測定は、次の①から③の手順で行う。①始点位置は、NIST ランプの脚の前面(写真 4(a):NIST ランプホルダーの脚穴の前面)となる。500mm の距離は固定された金属製曲尺(JIS1 級)を用いて始点を確認する。②終点位置を決定するレーザー(写真 4(b))は、垂直な金属板に強力な磁石で付けられており、垂直方向に自由に回転できる。レーザー光を曲尺に向け、500mm の終点位置を確認する。③レーザー光を測器受光面に向け照射し(写真 4(c)), 測器固定台を前後に移動させ、受光面にレーザー光が当たる位置で測器固定台を固定する。

(4) 電源装置類

新型校正装置の電源装置類を写真 5 に示す。電源装置は、松定プレジジョン社製、型番 PR150-14 を使用している。電源装置にデジタルマルチメータ(ADCMT 社製、型番 7351E)を接続し、電流値が 7.9995A~8.0005A の範囲内になるように、電源装置を手動で調整する。また、電源装置は、電流の変動や電圧降下等の影響を最小限に抑えるため、ランプホルダーの真下に配置し、電源装置と NIST ランプとの配線を最短にしている。

デジタルマルチメータの表示値を用いて電流を制御するため、デジタルマルチメータについては定期的に国家標準器とのトレーサビリティを確保する校正を受ける必要がある。2017 年 9 月にデジタルマルチメータを JCSS (Japan Calibration Service System)校正した結果、8.0000A の電流に対し、表示値は 7.9986A であったため、0.0014A の差を考慮して電流値を調整した。また、校正時の電圧の変動についても確認するため、ヒューレットパッカー社製デジタルマルチメータ(型番: HP34401A)を接続し、電圧値を計測している。

(5) バッフル(迷光低減対策)

NIST ランプから受光面の間における迷光の影響を低減するため、箱状のバッフルを設けている。迷光を低減するための対策について写真 6(a)~(c)に示す。

写真 6(a): NIST ランプと受光面の間に設けた箱の前後には直径 50mm のバッフルが取り付けられている。箱状のバッフル内部には、反射率が約 1%のファインシャット SP(光陽オリエンタジャパン社製)を貼り付け、内部の反射を低減している。

NIST ランプ正面のバッフル周辺には反射率が約 0.5%の Metal Velvet(Actar 社製)を、バッフルの下方にはファインシャット SP を貼り付けた。なお、Metal Velvet 及びファインシャット SP の波長毎の反射率について

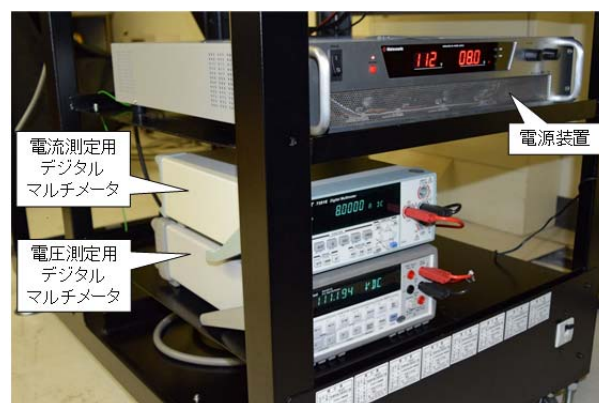


写真 5 電源装置類

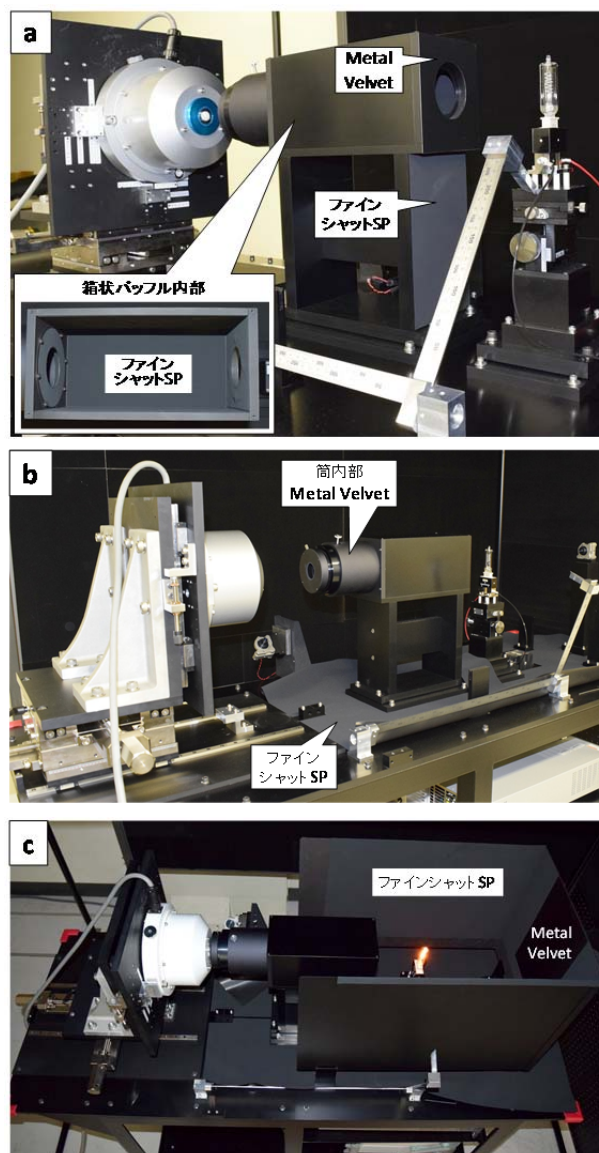


写真 6 バッフル(迷光低減対策)

- (a): 箱状バッフル
- (b): 伸縮式の筒
- (c): ランプを囲うカバーの設置(校正時)

は、丹羽ほか(2012)を参照いただきたい。

写真 6(b): パッフルに取り付けている筒は伸縮式となっており、筒の前面には測器のガラスドームと同じ直径の穴が開けられている。校正時(写真 6(c))には筒を伸ばし、ガラスドームを筒内部に挿入して壁や天井など周囲の反射光の測器受光面への入射を防いでいる。また、ガラスドームに反射した光が筒内部で反射することを防ぐため、筒内部にも Metal Velvet を貼り、内部の反射光を最小限に抑えている。さらに、曲尺や装置の床面についても光が反射しないようにファインシャット SP を敷いている。

写真 6(c): 校正時は NIST ランプの光が部屋の壁等に反射しないようにランプを囲うカバーを取り付けている。NIST ランプ後面の反射を最小限に抑えるため、カバー後面には Metal Velvet を、側面にはファインシャット SP を貼り付けている。

3. 校正装置の精度及び校正に伴う不確かさの評価

NIST ランプを用いた分光放射計の校正では、①NIST ランプと測器受光面までの測定距離、②NIST ランプを点灯させる電源装置の安定性、③NIST ランプの値付け(NIST ランプの校正)の不確かさによって、基準となる波長別放射照度に不確かさが加わる。

分光放射計の校正に使用した BR 用校正装置及び新型校正装置について、校正装置の精度を明らかにするとともに、基準となる波長別放射照度に関連する精度を不確かさという指標を用いて評価した。

3. 1 BR 用校正装置の精度

BR 用校正装置の外観を写真 7(a)に示す。この装置では、校正する測器の受光面を NIST ランプの下方 500mm の位置に設置し、上方から NIST ランプを照射して校正する。

ここでは、①NIST ランプと測器受光面までの測定距離、②電源装置の安定性、③NIST ランプの不確かさについて調査した結果についても述べる。また、①、②については、不確かさの評価も行った。なお、BR 用校正装置の詳細については、伊藤(2002)を参照いただきたい。

3. 1. 1 NIST ランプと測器受光面までの測定距離

BR 用校正装置に使用される NIST ランプを写真 8 に示す。NIST ランプは、Gooch & Housego 社製(以下、G&H 社という)の OL200-A(校正波長範囲: 250nm~750nm)及び OL200-C(校正波長範囲: 250nm~2500nm)の 2 種類あり、末尾の A と C の違いは、校正波長範囲の違いだけである。このタイプの NIST ランプは、フィラメントの中心から

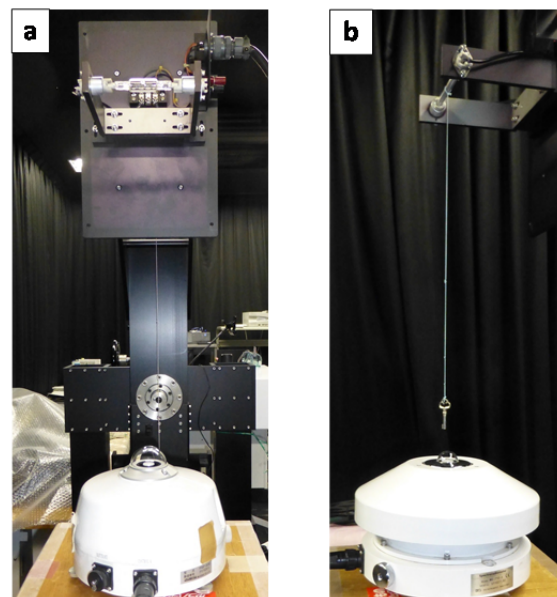


写真 7 ブリュワー分光光度計用校正装置
(a): 装置外観(測器:PGP-200, ドーム直径 50mm)
(b): 中心位置決め(測器:MS-710, ドーム直径 30mm)

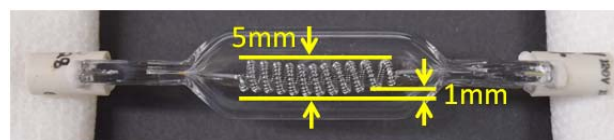


写真 8 NIST ランプ(ダブルエンド型)

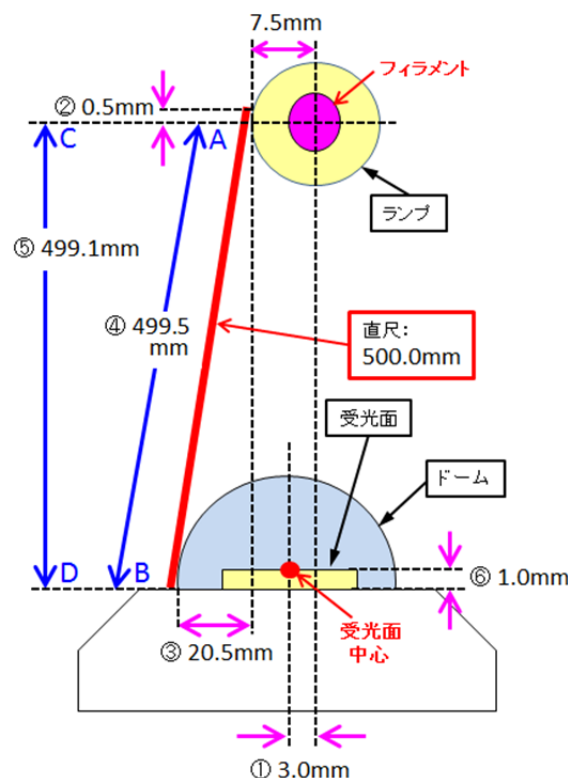


図 1 距離測定概念図

500mm の距離における波長別放射照度が値付けされている。

(1) 中心位置の決定

BR 用校正装置の中心位置決めの方法を写真 7(b)に、NIST ランプから測器までの測定距離における概念図を図 1 に示す。フィラメントの中心位置から錘を垂らし、目視により受光面の中心位置を決定する。しかし、錘の底は平らで幅は 5mm あり、錘を用いた目視による方法では中心位置を±1mm 以内に合わせることは困難であったが、500mm という距離に比べて、水平方向のずれは十分小さく、影響は無視できると判断していた。これまで行った校正については、実際の中心位置との差を調べることができないため、錘の底の幅を考慮し、最大で±3mm の差が生じていたと推測した(図 1 内①)。

(2) NIST ランプから受光面までの距離の測定

フィラメントから受光面までの 500mm の始点は、フィラメントの中心位置から測定するが、写真 8 のようにフィラメントは必ずしも石英ガラス管の中で水平になっていない。この NIST ランプのフィラメントは下に湾曲しており、幅は 5mm でフィラメントの下辺の中心と端では 1mm の差がある。このようなフィラメントの中心を目視で決定した場合、個人差が生じる場合がある。写真 8 のランプを用いて、フィラメントの中心から受光面までの距離について、500mm に設定する試験を 3 名で 10 回実施した。その結果、最大で 1mm の差が生じ、目視による測定の個人差は±0.5mm 程度と推測できる(図 1 内②)。

校正する測器を PGP-200(ブリード社製)とした場合、PGP-200 のドーム直径は 50mm、NIST ランプの幅は 15mm のため、受光面の中心とフィラメントの中心を垂直に測定することができず、図 1 のように僅かに斜めの距離を測定することになる。また、距離の測定には金属製直尺を使用しているが、校正で使用している JIS1 級の直尺は、500mm の測定において±0.2mm の許容差を持っている。

NIST ランプのフィラメントの中心と受光面の中心について、(1)項で推測した 3mm(図 1 内①)のずれを加えた場合、ランプの端とドームの端は、 $(50\text{mm}/2)-(15\text{mm}/2)+3\text{mm}=20.5\text{mm}$ (図 1 内③)となる。さらにフィラメントの中心位置を図 1 のように実際の中心位置(図 1 内 A 点)より 0.5mm 上方の位置を始点(図 1 内②)として 500mm を測定した場合、実際のフィラメントの中心位置から受光面までの距離は $500\text{mm}-0.5\text{mm}=499.5\text{mm}$ となる(図 1:AB,④)。

AB を垂直にした距離(図 1:CD)は 499.1mm(図 1 内⑤)、直尺の許容差 0.2mm 及び受光面の厚さ 1mm(図 1 内⑥)を考慮すると、フィラメントの中心から受光面までの距離は $499.1\text{mm}-0.2\text{mm}-1.0\text{mm}=497.9\text{mm}$ となり、ランプの

放射照度は 500mm の距離に比べて 0.8%強くなる。したがって、測定距離における放射照度の不確かさは、 $0.8/\sqrt{3}=0.5\%$ となる。なお、測定距離の不確かさの確率分布を矩形分布とした。矩形分布の不確かさの求め方については、NITE(2014)を参照いただきたい。

3. 1. 2 電源装置の安定性

(1) 電源装置の計測確度

BR 用校正装置の電源装置(高砂製作所、型番 IPS0130-10)では、NIST ランプに供給する 8.0000A の電流値が一定となるように自動制御している。この電源装置の性能について製造メーカーに問い合わせたところ、保証期間内の計測確度は $0.1\%+2\text{mA}(8.0000\text{A}$ の計測確度: $0.0080\text{A}+0.0020\text{A}=0.0100\text{A})$ であるが、製造から 25 年以上経過しているため、計測確度は 0.1%を超えているとの回答であった。計測結果の確率分布を矩形分布、計測確度を 0.0100A と仮定した場合、不確かさは $0.0100/\sqrt{3}=0.0058\text{ A}$ となり、8.0000A の 0.07%となる。なお、この不確かさは性能保証期間内における値である。

(2) 電源装置の不確かさ

電源装置の安定性を確認するため、デジタルマルチメータ(ADCMT 社製、型番 7351E)を接続して NIST ランプを点灯させ、5 分毎に 30 分間電流値を測定した。ここで、7351E の分解能は $100\mu\text{ A}$ 、測定確度(% of reading + digits)は $0.15\%+7$ であり、8.0000A における測定確度は $8.0000\text{A} \times 0.0015+7 \times 100\mu\text{ A}=0.0127\text{ A}$ となる。この測定確度の包含係数は仕様に明記されていないため、確率分布を矩形分布と仮定した場合、7351E の不確かさは $\pm 0.0127/\sqrt{3}=\pm 0.0073\text{ A}$ となる。

30 分間測定した結果、電流値は NIST ランプを点灯した 5 分後に安定し、それ以降の 5 分毎の測定値はすべて 7.9974A であった。8.0000A から 0.0027A のずれであり、保証期間の不確かさの範囲内に収まっていたが、デジタルマルチメータの不確かさがこの測定値のずれよりも大きく、この方法では電源装置の精度を正確に確認することができなかった。電流の測定方法については、シャント抵抗と電圧計を用いるなど、今後の課題とした。

なお、BR 用校正装置の電源装置における放射照度に関連する不確かさについては、3. 2. 2において新型校正装置の電源装置の不確かさを基に推定している。

3. 1. 3 NIST ランプの不確かさ(ダブルエンド型)

(1) NIST におけるランプ校正時の不確かさ

G&H 社製の NIST ランプは、NIST において校正されたランプを基に分光器を用いて作業用ランプに波長別放射

照度を移し、さらにこの作業用ランプを用いて同様に販売用ランプへ値付けしている。表 1 に、NIST が校正したランプの相対拡張不確かさを示す。なお、相対標準不確かさは、相対拡張不確かさを包含係数(k=2)で割ることで求められる(350nm : $1.26/2=0.63\%$)。

(2) G&H 社におけるランプ値付け時の不確かさ

G&H 社の販売するランプには、表 1 の不確かさに、Super High-Accuracy タイプのランプでは $\pm 0.5/\sqrt{3} = \pm 0.3\%$ 、High-Accuracy タイプのランプでは $\pm 1.0/\sqrt{3} = \pm 0.6\%$ の不確かさが加わる。また、メーカーでは、使用時間 50 時間(または 1 年以内)までは値付けした波長別放射照度を $\pm 1\%$ で保証しており、50 時間までの不確かさは $\pm 1.0/\sqrt{3} = \pm 0.6\%$ となる。高層気象台が購入した NIST ランプは High-Accuracy タイプのため、例えば、350nm の放射照度の不確かさは、

$$\pm \sqrt{\left(\frac{1.26}{2}\right)^2 + (0.6)^2 + (0.6)^2} = \pm 1.1\%$$

となる。

(3) ダブルエンド型 NIST ランプの比較

販売されている NIST ランプは、(2)に示すように $\pm 1.1\%$ の不確かさを含んでいる。BR 用校正装置において使用したダブルエンド型 NIST ランプ(写真 8)について、メーカーによる校正のばらつきを調べるため、2012 年に MS-710 を校正した 4 本の NIST ランプ(シリアル番号 : S1231, S1249, S1265, S1269)の校正結果を用いて、それぞれの測器常数を算出し比較した。S1231 については他の 3 本と同時に検定に使用しており、このランプを基準とした。

図 2 に、S1231 の測器常数を基準とし、S1249, S1265, S1269 における測器常数の比を百分率で示す。なお、S1231 の校正波長範囲は 750nm までのため、比較する波長範囲は 350nm~750nm までとした。また、NIST ランプの校正結果から測器常数を算出する方法については、居島・島村(2013)を参照いただきたい。

3 本のランプの 400nm~750nm の比を平均した結果、S1249 では-4.4%, S1265 では-2.0%, S1269 では+0.4%の差がみられ、S1231 を基準とした場合、メーカーの示す不確かさ($\pm 1.1\%$)を超えていた。比較した 4 本のランプについては、使用時間の詳細が不明なため、使用時間を超えていた可能性もあるが、販売されている NIST ランプの波長別放射照度にはばらつきがみられることを確認した。

3. 2 新型校正装置の精度

新型校正装置の精度について、①NIST ランプと測器受光面までの測定距離、②電源装置の安定性、③NIST ランプの不確かさについて調査した結果についても述べる。

表 1 NIST におけるランプ校正の拡張不確かさ
(NIST ランプ校正証書より転記)

Wavelength (nm)	NIST Uncertainty (k=2) (%)
250	1.74
350	1.26
450	0.91
555	0.77
654.6	0.69
900	0.57
1600	0.47
2000	0.50
2300	0.50
2400	1.11

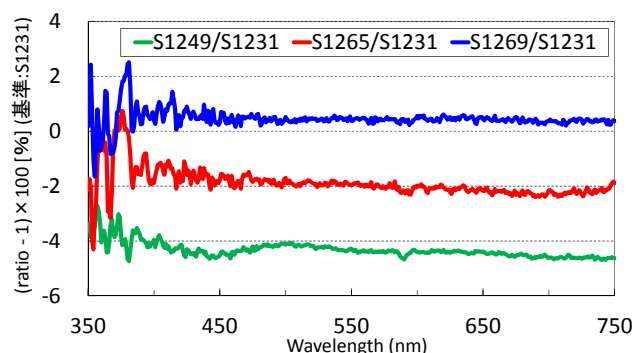


図 2 測器常数の比較(基準 : S1231) (測器 : MS-710)

また、①、②については、不確かさの評価も行った。

3. 2. 1 NIST ランプと測器受光面までの測定距離

(1) 中心位置の決定

中心位置を決定するレーザー光の直径は約 1mm あるため、中心位置決めの不確かさは、 $\pm 0.5\text{mm}$ 程度となるが、中心位置が 0.5mm ずれた場合の放射照度の変化は 0.001% 未満であり、無視することができる。

(2) NIST ランプから受光面までの距離の決定

終点位置を決定するレーザー光の直径は約 1mm あるため、500mm の距離を決定する不確かさは $\pm 0.5\text{mm}$ 程度となり、さらに曲尺の許容差 $\pm 0.2\text{mm}$ が加わり、 $\pm 0.7\text{mm}$ となる。受光面までの距離が 499.3mm の場合、ランプの放射照度は 500mm の距離に比べて 0.3% 強くなる。したがって、距離測定における放射照度の不確かさは、 $0.3/\sqrt{3} = 0.2\%$ となる。

3. 2. 2 電源装置の安定性

電源装置の電流値を確認するデジタルマルチメータ(7351E)の測定精度は 3. 1. 2 と同様に $\pm 0.0073\text{A}$ である。電流の変化に伴う放射照度の変化量を確認するため、電

流を $\pm 0.0100A$ 変化させた場合の NIST ランプの放射照度を 2 回調査した(2017/1/13, 2017/1/17). 図 3 に, 電流を $8.0000A \pm 0.0100A$ とした場合の NIST ランプの照度変化を示す. なお, 実際の電流は, 1 月 13 日では $7.9895 \sim 7.9898A$ 及び $8.0098 \sim 8.0100A$, 1 月 17 日では $7.9901 \sim 7.9904A$ 及び $8.0104A$ の範囲内であった. また, 使用した測器は英弘精機社製 MS-710(測定波長範囲: $350nm \sim 1000nm$)である. この結果, $350nm$ では $\pm 1\%$, $850nm$ では $\pm 0.4\%$ の放射照度に変化することを確認した. したがって, デジタルマルチメータの測定精度 $\pm 0.0073A$ では, NIST ランプの放射照度の不確かさは最大で 0.7% と推定される. なお, 図 3 において, $350nm \sim 400nm$ と $900nm \sim 1000nm$ の値にばらつきがみられるが, MS-710 はこの波長範囲において出力が小さく, バックグラウンドノイズの変動の影響を受け, データにばらつきが生じている(居島・島村: 2013).

同様に BR 用校正装置の電源の不確かさは, $\pm 0.0058A$ であり, NIST ランプの放射照度の変化を新型校正装置と同程度と仮定した場合, BR 用校正装置の電源による放射照度の不確かさは最大で 0.6% と推定される.

3. 2. 3 NIST ランプの不確かさ(シングルエンド型)

新型校正装置で使用するシングルエンド型の NIST におけるランプ校正時の不確かさ及び G&H 社におけるランプ値付け時の不確かさは, 3. 1. 3(1)及び(2)と同様に $\pm 1.1\%$ である. ここでは, シングルエンド型 NIST ランプの比較結果を以下に示す.

新型校正装置において使用しているシングルエンド型 NIST ランプについても同様に比較を実施した. 高層気象台は, JAXA 及び NIES との共同研究で, JAXA から新型校正装置用の NIST ランプ 2 本(G&H 社製, 型番: OL FEL-C, 校正波長範囲: $250nm \sim 2500nm$, S/N: F1376, F1377)を貸与されている. 図 4 に, F1376 の測器常数を基準とし, F1377 の測器常数との比を百分率で示す(使用測器: MS-711). F1377 の測器常数は, F1376 に比べて 1.5% (全波長平均)大きく, 同時期に校正及び販売されたランプでも測器常数は同じにはならなかった. NIST ランプの不確かさを確認する上でも, 複数の NIST ランプを用いて 1 台の測器を校正し, 測器常数を比較することが重要である.

4. 分光放射計測定値への迷光の影響

BR 用校正装置及び新型校正装置について, 分光放射計の校正時における測定値への迷光の影響を調査した. また, BR 用校正装置と新型校正装置の校正結果から得られた測器常数を比較し, 新型校正装置における迷光の低減についても調査した.

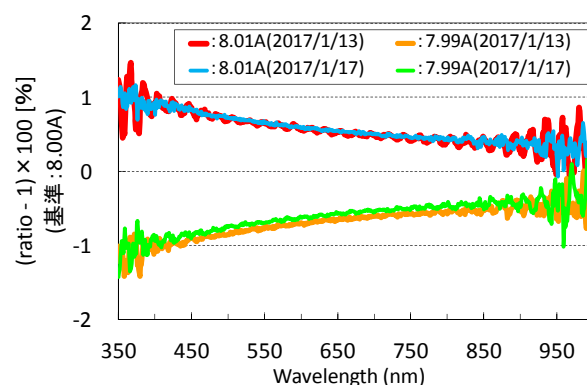


図 3 電流値の変化に伴う NIST ランプの照度変化 (測器: MS-710)

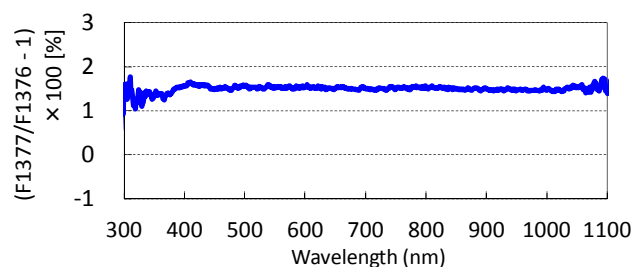


図 4 測器常数の比較(基準: F1376) (測器: MS-711)

4. 1 BR 用校正装置における迷光の影響

BR 用校正装置を用いたブリュワー分光光度計の校正では, NIST ランプの光が壁や天井など周囲に反射し, その反射した光(以下, 周辺反射光という)が受光面に入射しないようにランプカバーを取り付けている(写真 9(a)). ランプカバー内部は空洞となっており, NIST ランプはランプカバーの中央に配置され, ランプカバーの底(中央)には長方形(縦 $44mm \times$ 横 $120mm$)の照射口が開いている. NIST ランプの固定治具及びランプカバーは, 内部の反射を低減するため, 黒アルマイト処理及び黒色の塗装を施している. 固定治具等を製作したメーカーに確認したところ, 黒アルマイト処理の反射率は, 紫外域から可視域において約 5% とのことであった. なお, ランプカバー内部の黒色塗料の反射率については不明との回答であった.

現在, BR 用校正装置を使用していないが, 2012 年 6 月から 2015 年 2 月までは分光放射計の校正に使用していた. 当初はランプカバーを取り付けた場合(以下, カバー有りという)とランプカバーを取り付けない場合(以下, カバー無しという)で校正を実施しており, その後ほとんどの校正についてはカバー無しで校正を実施していた. 過去の校正結果を見直すため, カバー有り及びカバー無しにおける校正について, 迷光による測定値への影響を調査することとした.

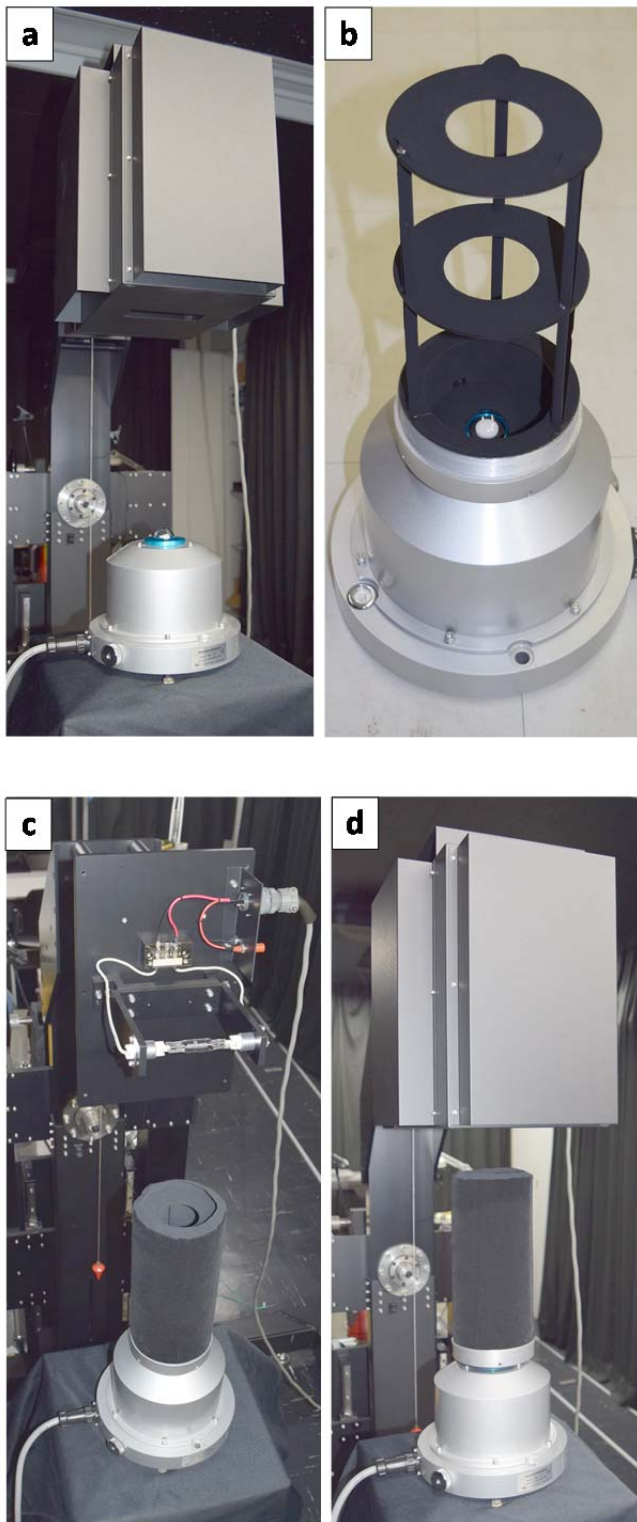


写真9 ランプカバー及び周辺反射光防止筒の取り付け
(測器：MS-711)

- (a)：ランプカバー取り付け(周辺反射光防止筒無し)
- (b)：周辺反射光防止筒の内部構造
- (c)：周辺反射光防止筒取り付け(ランプカバー無し)
- (d)：ランプカバー及び周辺反射光防止筒取り付け

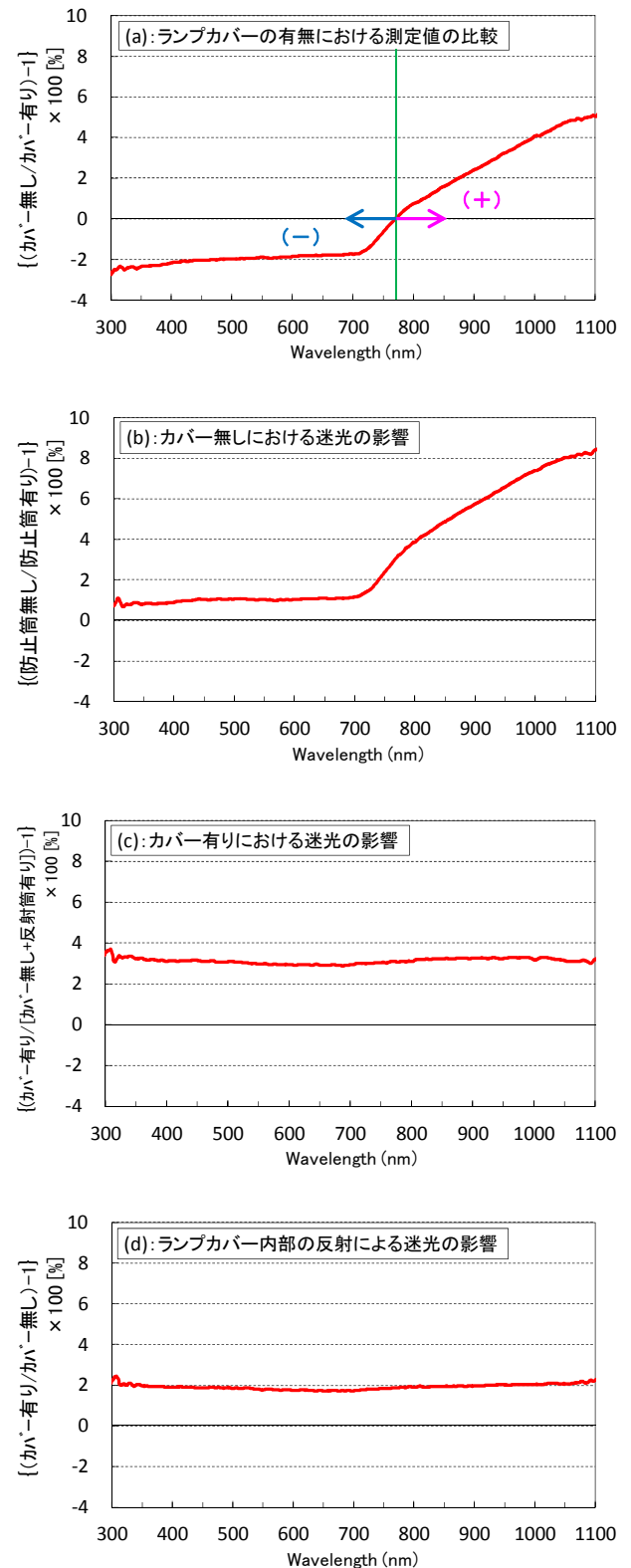


図5 BR 用校正装置の迷光の影響 (測器：MS-711)

- (a)：ランプカバーの有無における測定値の比較
- (b)：カバー無しにおける迷光の影響
- (c)：カバー有りにおける迷光の影響
- (d)：ランプカバー内部の反射による迷光の影響

周辺反射光による迷光を調査するため、測器受光面に周辺反射光の入射を防ぐ筒(以下、周辺反射光防止筒という)を新たに製作した。写真 9(b)に周辺反射光防止筒の内部構造を示す。周辺反射光防止筒の寸法は、高さ 250mm、直径 120mm、内部にはバツフルを 2 枚取り付けている。バツフルの穴の直径はランプのフィラメント(幅:24mm)が十分入る 56mm と 52mm とした。さらに、筒内部の反射を低減するため、内部にはすべてファインシャット SP を貼り付けた。

ここでは、①ランプカバーの有無による測定値の比較、②「カバー無し」における周辺反射光防止筒有無による測定値の比較、③「カバー有り」と「カバー無し+防止筒有り」における測定値の比較、④「反射筒有り」におけるランプカバー有無による測定値の比較について調査した。なお、この調査で使用した測器は、英弘精機社製 MS-711(波長範囲：300nm～1100nm)である。

(1) ランプカバーの有無における測定値の比較

カバー有りの場合(写真 9(a))は、「ランプカバー内部の反射」と「周辺反射光」の迷光が考えられる。また、カバー無しの場合(写真 7(a))の迷光は、「周辺反射光」のみとなる。

ランプカバーの有無による測定値の比較結果を図 5(a)に示す。基準をカバー有りとした場合、770nm より短い波長ではマイナス(-2.7%～0%)、770nm より長い波長ではプラス(0%～+5.3%)となった。

- ・ 300～770nm : カバー有り > カバー無し
⇒ランプカバー内部の反射による迷光が大きい
- ・ 770～1100nm : カバー有り < カバー無し
⇒周辺反射光による迷光が大きい

(2) 「カバー無し」における周辺反射光防止筒有無による測定値の比較(カバー無しにおける迷光の影響)

カバー無しにおける周辺反射光による迷光を調査するため、周辺反射光防止筒を取り付けた場合(以下、防止筒有りという：写真 9(c))と、取り付けなかった場合(以下、防止筒無しという：写真 7(a))の測定値を比較した。その結果を図 5(b)に示す。基準は迷光の影響を低減した「防止筒有り」とした。300nm～700nm では+0.7%～+1.1%、700nm～1100nm では+1.1%～+8.5%となり、近赤外域において周辺反射光による増加が顕著であった。

(3) 「カバー有り」と「カバー無し+防止筒有り」における測定値の比較(カバー有りにおける迷光の影響)

カバー有りにおける迷光を調査するため、「カバー有り(写真 9(a))」と「カバー無し+防止筒有り(写真 9(c))」の測定値を比較した。その結果を図 5(c)に示す。基準は迷光の影響を低減した「カバー無し+防止筒有り」とした。

全波長域においてカバー有りの測定値が大きく、+2.9%～+3.7%(全波長平均+3.1%)であった。カバー有りでは、「ランプカバー内部の反射」と「周辺反射光」の迷光の他に、ランプカバーの照射口(縦44mm×横120mm)が周辺反射光防止筒のバツフルよりも面積が大きいので、受光面に入射する光量が増加したと考えられる。

(4) 「反射筒有り」におけるランプカバー有無による測定値の比較(ランプカバー内部の反射による迷光の影響)

測器受光面に入射する光量を同じにするため、周辺反射光防止筒を取り付けた状態で、カバー無し(写真 9(c))とカバー有り(写真 9(d))の測定値を比較した。その結果を図 5(d)に示す。カバー無しを基準とした場合、+1.7%～+2.5%(全波長平均+1.9%)であった。したがって、ランプカバー内部の迷光によって測定値が 1.9%増加すると考えられる。

このように迷光の影響によって実際より 1.9%大きい校正結果から得られた測器常数を用いて、太陽光の測定値を波長別放射照度に変換した場合、実際の太陽光の放射照度よりも 1.9%小さい値となる。

4. 2 新型校正装置における迷光の影響等

新型校正装置では、周辺反射光による迷光の影響を低減するため、箱状バツフルや伸縮式の筒を取り付けており、それらの内部には反射率の小さい遮光シートを張り付けている。迷光の影響が低減されていることを確認するため、①伸縮式の筒による周辺反射光低減の効果について調査し、また、②BR 用校正装置の「カバー無し」と新型校正装置における校正結果について比較を行った。

(1) 伸縮式の筒による周辺反射光低減の効果

2. (5) 写真 6(b)に示す伸縮式の筒は、周辺反射光による迷光を低減しているが、筒の効果を調べるため、筒を取り付けた場合(以下、「筒有り」という)と、取り外した場合(以下、「筒無し」という)について測定値を比較した。

バツフルから筒を取り外し(写真 10(a))、バツフル側にはファインシャット SP を貼り、測器本体にはファインシャット SP と植毛紙を貼って反射光を低減した(写真 10(b))。図 6 に、「筒有り」の測定値を基準とした場合の「筒無し」における測定値との比を百分率で示す(測器：MS-710)。この結果、「筒無し」では、400nm～900nm の測定値が最大で 0.2%～0.6%増加しており、筒の有効性が確認された。なお、350nm～400nm と 900nm～1050nm の測定値については、3. 2. 2 と同様にノイズの影響を受けるため、比較から除いた。また、「筒有り」の場合は測器のガラスドームに反射した光が筒内部で反射している可能性があるため、今後さらに調査する必要がある。

(2) BR 用校正装置の「カバー無し」の場合と新型校正装置における校正結果の比較

新型校正装置において、迷光の影響が低減されていることを確認するため、BR 用校正装置の「カバー無し」の場合と新型校正装置の校正結果(測器常数)を比較した。使用した NIST ランプ及び校正日は、BR 用校正装置では S1265(2017 年 10 月 25 日)、新型校正装置では F1376(2017 年 11 月 1 日)である。また、S1265 については、3. 1. 3(3)の NIST ランプの比較でも使用したランプであり、2017 年 10 月において S1265 のみが使用可能なランプであった。

図 7 に、新型校正装置(F1376)の測器常数を基準とし、BR 用校正装置(S1265)の測器常数との比を百分率で示す。測器は MS-710 を使用し、また S1265 の校正波長範囲は 750nm までのため、比較する測器常数の波長範囲を 400nm ~ 750nm とした。BR 用校正装置(S1265)の測器常数は、新型校正装置(F1376)に比べて+2.3%~+7.0%であり、BR 用校正装置では迷光の影響によって測器常数が実際の値より大きくなっていた。この結果からも新型校正装置については、箱状バッフル等によって迷光の影響が低減されていると判断できる。

なお、今回の測器常数の比較については、使用時間の異なるランプを用いており、今後、新型校正装置においてダブルエンド型 NIST ランプを使用できるように改良し、同じ NIST ランプを用いた比較を検討している。

5. 新型校正装置における課題(バッフル直径の違いによる測定値の比較)

分光放射計は、NIST ランプを用いて校正しているため、校正装置の環境(バッフルの位置及び直径)については、G&H 社において NIST ランプを値付けした環境と同じにすることが理想である。しかし、G&H 社では値付けした環境についての情報を開示していないとのことであった。このため、G&H 社での NIST ランプを値付けした環境を仮定し、新型校正装置のバッフル直径を変更して測定値の変化を調査した。

新型校正装置に使用するシングルエンド型 NIST ランプの寸法を写真 11(a)に示す。また、新型校正装置のバッフルは、写真 6(a)に示すように箱の前後に直径 50mm のバッフル(以下、バッフル 50 という)を取り付けている。新型校正装置による分光放射計の校正は、すべてこのバッフル 50 によって実施してきた。NIST ランプの石英ガラス管の長さは 55mm あり、バッフル 50 の場合、NIST ランプのほぼ全体の光を取り込むことになる。

G&H 社のバッフルの直径が 50mm より小さいと仮定し、

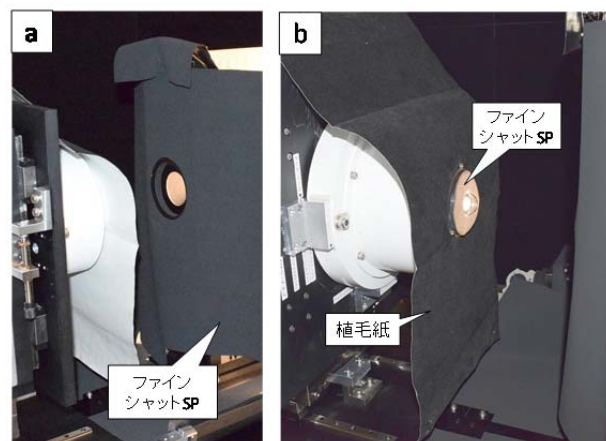


写真 10 筒を取り外した場合の出力変化試験
(測器：MS-710)

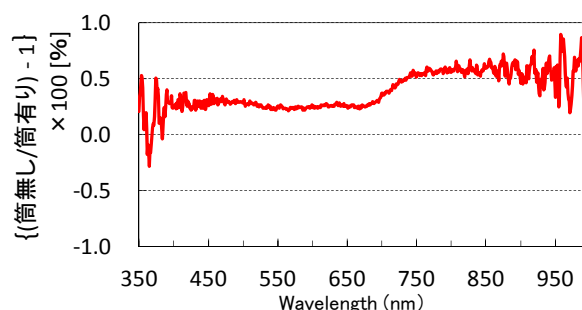


図 6 筒の有無による測定値の比較 (測器：MS-710)

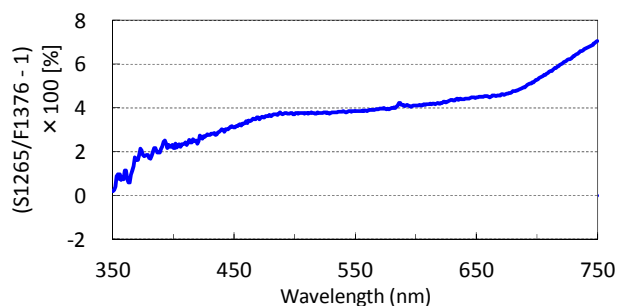


図 7 BR 用校正装置と新型校正装置の測器常数の比較
(測器：MS-710)

まず 20mm のフィラメントより少し広い範囲(28mm)の光を取り込むようにバッフルの直径を変更した。また、箱内部の反射光をさらに低減するため、箱内部に 2 枚のバッフルを追加した。計 4 枚のバッフルの直径は、写真 11(b)に示すようにランプ側から 32mm, 35mm, 38mm, 40mm(以下、バッフル 32 という)である。NIST ランプの光は平行光ではないため、測器側の直径ほど大きくしている。MS-711 に NIST ランプを照射し、バッフル 50 とバッフル 32 の測定値を比較した。その結果を図 8(a)に示す。バッ

フル 50 を基準とした場合、バツフル 32 の測定値は、バツフル 50 に比べて-0.7%~-1.1%(全波長平均-1.0%)となり、NIST ランプはフィラメント以外の石英ガラス管や内部の金属部分から約 1%の光が照射されていることになる。

NIST ランプの販売代理店(旭光通商(株))を通して、写真 11(b)を G&H 社に送付し、バツフルの直径について G&H 社からアドバイスをいただいた。G&H 社のアドバイスは、①バツフルの直径は、写真 12(a)のように測器側からバツフルを通して NIST ランプを見たときにランプ全体が見える大きさとする、②4 枚のバツフルの直径は、ランプ側の直径を最大にして測器側の直径を小さくすること、の 2 点であった。バツフルの直径は、写真 12(b)に示すようにランプ側から 50mm、47mm、43mm、40mm(以下、バツフル 40 という)に変更した。MS-711 に NIST ランプを照射し、バツフル 50 とバツフル 40 の測定値を比較した。その結果を図 8(b)に示す。バツフル 50 を基準とした場合、バツフル 40 の測定値は、バツフル 50 に比べて-0.3%~-0.1%(全波長平均-0.0%)となり、ほとんど差はなかった。また、細かなバラツキについては、バツフル 50 では箱の中にバツフルがないため、内部で光が反射し、迷光が僅かに増加したと考えられる。

このようにバツフルの直径によって NIST ランプの放射照度が異なるため、NIST ランプを値付けした環境と同じにする必要がある。今後、産業技術総合研究所や NIST ランプの校正サービスを行っている旭光通商(株)などからさらに情報収集を行い、新型校正装置のバツフルの直径等について再検討する必要がある。

6. まとめ

6. 1 分光放射計用校正装置の開発

分光放射計専用として新たに開発した校正装置は、測器の設置、NIST ランプの取り付け、NIST ランプのフィラメントと受光面の中心位置決定及び 500mm の距離決定について、個人差が生じない構造とした。また、NIST ランプが反射する箇所には遮光シートを貼り付け、可能な限り迷光を低減した。

6. 2 BR 用校正装置及び新型校正装置の精度

分光放射計の校正に使用した BR 用校正装置及び新型校正装置の精度を明らかにした。また、基準となる波長別放射照度の精度に関連する①NIST ランプと測器受光面までの測定距離、②NIST ランプを点灯させる電源装置、③NIST ランプの値付けについては、不確かさという指標を用いて評価を行った。その結果は以下のとおりである。なお、不確かさについては、それぞれの相対標準不確か

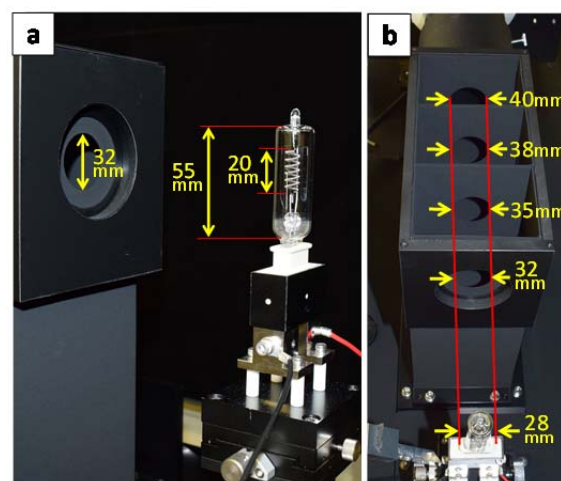


写真 11 NIST ランプ寸法及びバツフル変更

(a): NIST ランプの寸法

(b): バツフル 32 における 4 枚のバツフル直径

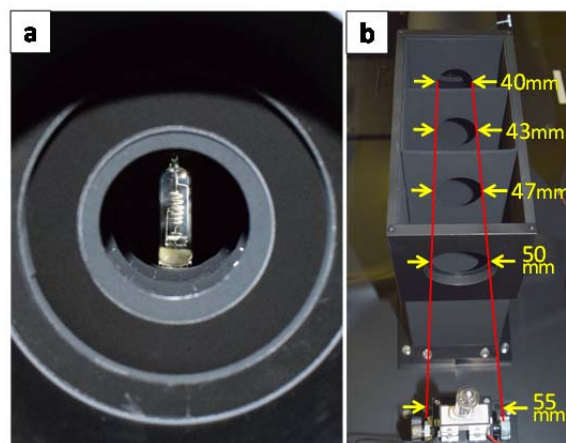


写真 12 ランプの見える範囲及びバツフル変更

(a): 測器側からの NIST ランプの見える範囲

(b): バツフル 40 における 4 枚のバツフル直径

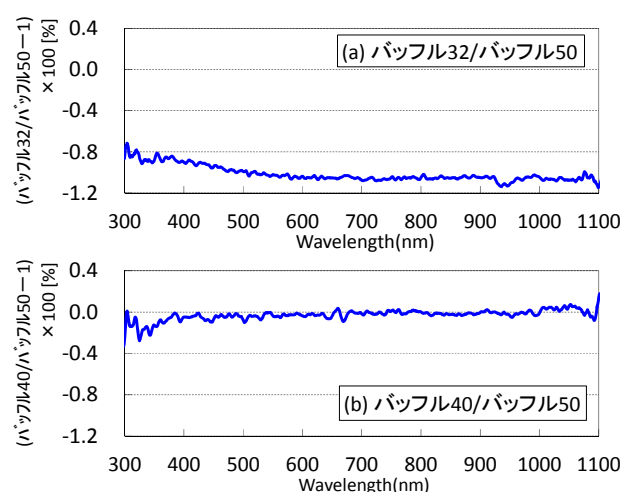


図 8 バツフルの直径の違いによる測定値の比較

(a) 基準: バツフル 50 比較: バツフル 32

(b) 基準: バツフル 50 比較: バツフル 40

さを合成した後、合成した相対拡張不確かさ(包含係数： $k=2$)を計算した。なお、ここでは MS-710 の不確かさが最大となる 350nm について算出した。

1) BR 用校正装置の不確かさ

BR 用校正装置における 350nm の放射照度に関連する相対標準不確かさは以下のとおりである。

- ① 測定距離による不確かさ：0.5%
 - ② 電源装置に伴う不確かさ：0.6%
 - ③ NIST ランプの不確かさ(350nm)：1.1%
- 合成した相対標準不確かさは、

$$\sqrt{0.5^2 + 0.6^2 + 1.1^2} = 1.4\%$$

となり、合成した相対拡張不確かさ($k=2$)は 2.8%となる。

2) 新型校正装置の不確かさ

新型校正装置における 350nm の放射照度に関連する相対標準不確かさは以下のとおりである。

- ① 測定距離による不確かさ：0.2%
 - ② 電源装置に伴う不確かさ：0.7%
 - ③ NIST ランプの不確かさ(350nm)：1.1%
- 合成した相対標準不確かさは、

$$\sqrt{0.2^2 + 0.7^2 + 1.1^2} = 1.3\%$$

となり、合成した相対拡張不確かさ($k=2$)は 2.6%となる。

両校正装置の NIST ランプの放射照度に関係する不確かさは同程度であったが、新型校正装置では測器の設置に伴う不確かさを最小限に抑える構造としたため、①の測定距離による不確かさは、BR 用校正装置の 3 分の 1 に改善することができた。

6. 3 分光放射計測定値への迷光の影響

BR 用校正装置及び新型校正装置について、分光放射計の校正時における測定値への迷光の影響を調査した。

(1) BR 用校正装置における迷光の影響

① ランプカバーの有無による測定値の比較

- ・ 300～770nm：カバー有り > カバー無し

⇒ ランプカバー内部の反射による迷光が大きい

- ・ 770～1100nm：カバー有り < カバー無し

⇒ 周辺反射光による迷光が大きい

② カバー無しにおける迷光の影響

周辺反射光によって測定値が 0.7%～8.5%増加しており、特に近赤外域において周辺反射光による迷光の増加が顕著であった。

③ カバー有りにおける迷光の影響

ランプカバー内部の反射と周辺反射光の迷光によって、測定値が 2.9%～3.7%(全波長平均 3.1%)増加。

④ ランプカバー内部の反射による迷光の影響

ランプカバー内部の反射による迷光によって測定値が 1.7%～2.5%(全波長平均 1.9%)増加。

(2) 新型校正装置における迷光の影響

① 伸縮式の筒の効果

伸縮式の筒を取り付けなかった場合、周辺反射光によって測定値が 0.2%～0.6%増加しており、筒によって迷光が低減されていることを確認した。

② BR 用校正装置と新型校正装置の校正結果の比較

BR 用校正装置の校正結果(測器常数)は、400nm～750nm の波長範囲において新型校正装置よりも +2.3%～+7.0%と大きく、新型校正装置については、箱状バッフル等によって迷光の影響が低減された。

6. 4 今後の課題

分光放射計の校正については、NIST ランプの値付けに起因する不確かさが最も大きく、NIST ランプの校正精度を向上させることが課題である。

新型校正装置の電源装置に伴う不確かさについては、電流の測定精度を向上させることが課題である。しかし、デジタルマルチメータの 10A レンジについては、現状の測定精度を向上させることは難しい。電圧であれば電流に比べ、精度を上げることが可能なため、精密なシャント抵抗と高精度な電圧測定器を組み合わせ、電流の測定精度を改善することを検討する。

NIST ランプを用いた校正装置については、NIST ランプを値付けした環境と同じにすることが重要であり、理想的なバッフルの位置と直径についてさらに検討する必要がある。

BR 用校正装置と新型校正装置の校正結果を正確に比較するため、同じ NIST ランプを用いて校正する必要がある。新型校正装置においてもダブルエンド型 NIST ランプを使用できるように改良し、迷光の影響についてさらに調査する予定である。

謝 辞

本調査に使用した分光放射計及び新型校正装置の製作費の一部は、地球環境保全試験研究費「分光日射観測とデータ同化によるエアロゾル・雲の地表面放射収支に与える影響監視に関する研究(26 年度～30 年度)」を活用した。また、本稿を草するに際し、産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム 猪狩真一主任研究員には、校正装置の製作及び

NIST ランプの不確かさ等についてご助言やご協力を頂いた。厚くお礼申し上げます。

引用文献

居島修・島村哲也(2013)：分光型全天日射計(MS-710)の測器常数校正とつくばにおける太陽光スペクトルの試験観測。高層気象台彙報, **71**, 11 - 20.

伊藤真人(2002)：新型 NIST ランプ検定装置の開発と紫外域日射観測装置(ブリュワー分光光度計)の高度角・方位角特性。高層気象台彙報, **62**, 53 - 66.

伊藤真人・Tom GRAJNAR・Michael BROHART・Vladimir SAVASTIOUK・Ken LAMB(2007)：カナダ MSC におけるブリュワー分光光度計の国際測器相互比較 2006 年と新型検定装置の精度。高層気象台彙報, **67**, 39 - 52.

NITE(2014)：不確かさの入門ガイド(認定-部門-ASG104-05)。独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター, pp34.

丹羽佳人・鹿島伸悟・矢野太平・宇都宮真・田村友範・安田進(2012)：JASMINE の迷光技術 II. 遮光材料と反射率測定。第二回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ。