絶対分光応答度標準の現況[†]

—各国標準の相互比較結果について—

専門会員 西 師 毅*

1. は じ め に

単色放射の放射パワーは、どれくらい正確に測れるものだろうか？ 1982年の測光放射測定諮問委員会(CCPR)において、この点に関する各国標準研究所の能力を比べてみようということになった。以来、アメリカ国立標準局(NBS)が幹事研究所になって準備を進め、1986年に各国で測定が実行された。その結果がこのほどまとめられ国際度量衡局から報告された¹⁾。ここにその概要を報告し関係各位のご参考に供したい。

2. 巡 回 器

光源ではなく、シリコンホトダイオードを用いるということがCCPRで決められていた。そのほうがより安定であろうと期待されたからである。NBSが準備を進めていくうちに、ホトダイオードだけではなく、信号処理(電流電圧変換および増幅)の電子回路も付けて巡回しようということになった。このほうが各国がまちまちの方法で信号処理をするより不確かさ**を小さくできると考えたわけである。巡回器として使用した検出器の信号処理回路のゲイン設定は0.1 mA/V から nA/V までの6段階で、不確かさは0.1 mA/V から 100 nA/V までが0.1%以下、10 nA/V

と1 nA/V では1%であった。

シリコンホトダイオードはPN形(EG&G, Model UV-444BQ)とNP形(UDT, Model UV-100)の両方を用いた。両方を用いることにした理由は、どちらの形のものにも安定性において心配な点があったからである。すなわち、PN形ではシリコンと酸化層との境界で少数キャリアの捕集効率が不安定になりうることが知られていたし、NP形はその点はよいが、何分にも新形ゆえ安定であるという証拠がほとんどなかったからである。

ホトダイオードの表面を保護するために、拡散板または窓を付けることが考えられたが、結局どちらも付けなかった。安定で場所むらのない(0.1%以下)拡散板を作ることではできなかったし、反射防止膜付きの窓も相互反射と干渉効果のため0.1%レベルの測定には不十分と判断されたからである。結局、輸送中のほこりをよけるためのキャップをするだけにとどめ、ホトダイオードそのものが周囲の空気に触れるのを防ぐようなシールはしなかった。その結果、巡回した16個のホトダイオードのうちの13個はきわめて安定であったが、3個は633 nmでの分光応答度に大きな変化を示した。それで、特性が途中で変化した検出器で測定をした二つの研究所には、測定をやり直してもらうことになった。この第2回目の巡回のときには、ホトダイオードが周囲の空気から保護されるようにキャップを改良し、さらに検出器全体を乾燥剤入りのプラスチック容器に納めて密封した状態で輸送するようにした。

3. 巡回および測定

PN形シリコンホトダイオードによる検出器8台(検出器番号1~8)、およびNP形シリコンホトダイオードによる検出器8台(検出器番号9~16)が用意された。PN形およびNP形各1台が組にされて、NBSから各参加研究所に送られ、各参加研究所はそれらの分光応答度を測定した後、測定データを添えてNBSに送り返すという方式で巡回測定が行なわれた。NBSでは送り出す前と送り返されてきた後の2回測定を行なった(ただし、488 nmについてはアルゴンイオンレーザ不調のため、発送前の測定はできなかった)。以上の第1回目の巡回測定は1986年2月から8月の間に行なわれた。

[†] Comparison of the National Standards of Absolute Spectral Responsivity

* 電子技術総合研究所 Morotake Nishi
〒305 つくば市梅園1-1-4
1-1-4, Umezono, Tsukuba, 305 Japan

**測定値が真値から離れている程度を意味する。英語はuncertainty。
測定の信頼性を表す用語には、いろいろなものが使われており、国際的にも国内的にも不統一な面があった。国際度量衡委員会は、1980年に「測定の不確かさの表示法」についての勧告を出し、その中で不確かさの概念およびその表示法を示した。その内容の概略は以下のとおりである。不確かさは通常いくつかの要因によって生じるが、それらの要因は二つのカテゴリーに分類される。一つは統計的な方法によって評価されるもので、これをカテゴリーAと呼ぶ。他の一つは統計的な方法以外の方法によって評価されるもので、これをカテゴリーBと呼ぶ。カテゴリーAに属する要因による不確かさについては統計的な方法によって分散を求め、カテゴリーBに属する要因による不確かさについては何らかの方法によって分散に相当する量を求め、これらを通常の統計的な方法によってまとめて総合的な不確かさを求める。総合的な不確かさは標準偏差で表わす。もし標準偏差の定数倍で表わす場合は何倍であるかを明記する。

図1 PN形ホットダイオード (EG&G, UV-444B Q) の 633 nm における応答度の変化
1 回目の巡回に送り出す前と送り返された後における NBS での測定値の比

図2 NP形ホットダイオード (UDT, UV-100) の 633 nm における応答度の変化
1 回目の巡回に送り出す前と送り返された後における NBS での測定値の比

第1回目の測定データから、633 nm での分光応答度の NBS における2回の測定値の比を取り出してみると、図1および図2のようであった。

すなわち、巡回の前後で検出器2 (PN形) では応答度が約4%減少し、検出器9および10 (NP形) では8~10%増加し、これら以外の検出器はきわめて安定であった。数値的にいうなら、安定であった7個のPN形ホットダイオードの巡回の前後の応答度の比は平均が1.001で、その不確かさ (3σ) は0.13%、また安定であった6個のNP形ホットダイオードの巡回の前後の応答度の比は平均が0.9984で、その不確かさ (3σ) は0.17%であった。

3個の検出器の分光応答度の変化は、最初にNBSからNPL (検出器2と10)、およびNRC (検出器9) に送られる途中で起こり、それ以後は安定しているようであった。したがって、返送後のNBSの測定データと比較することによれば、途中で分光応答度に変化したこれらの3台の検出器についての測定によっても十分意味のある比較が

できたのであるが、念のため、これらの不安定な検出器を受け取った研究所 (NPL と NRC) に対しては別の検出器の1組 (PN形1台とNP形1台) ずつを送って再測定をしてもらった。また、PTBでは第1回目の測定ときには散乱光の問題、あるいは受光器の不安定の問題があったかも知れないというので、こちらには2組の検出器を送って再測定をしてもらった。この第2回目の巡回測定は1986年12月に行なわれた。

なお、図1と図2にはそれぞれ番号6と14の検出器が3回ずつ現われているが、これはこの2台が組になって3研究所 (NBS → ASH → OMH → NBS → INM → NBS と巡回された。) で測定されたためである。ただし中ほどに並んでいる2点は全く同じデータであるから、本来1点として図示されるべきものである。

488 nm における分光応答度の経時変化は、1回目の巡回から送り返されてきた後の8月と2回目の巡回に送り出

表1 各研究所の絶対分光応答度の標準および比較測定の条件

研究所名	標準および不確かさ	比較測定の標準偏差	放射源、放射パワーおよびビームサイズ	周囲温度 (°C)
NRC (カナダ国立研究協議会研究所)	ESR 0.1%	0.2% (633 nm) 0.15% (488 nm)	Krイオンレーザ 0.3~0.8 mW 3 mmφ (相対分光応答度に基づく内挿)	23~24
NPL (イギリス国立物理研究所)	極低温ESR 0.005%	0.01%	He-Neレーザ, 0.5 mW Arイオンレーザ, 1 mW 4 mmφ	22~23
PTB (ドイツ連邦物理工学研究所)	ESR 0.1%	0.04% (633 nm)	He-Neレーザ, 0.2~1.4 mW 5.3 mmφ	23.0
NIM (中国計量科学研究院)	PQED 0.05% (633 nm) 0.1% (488 nm)	0.06% (633 nm) 0.15% (488 nm)	He-Neレーザ, Arイオンレーザ 1 mW 4 mmφ	21
CSIRO (オーストラリア国立標準研究所)	ESR 0.05% PQED 0.1% (633 nm) 0.2% (488 nm)	0.09% (ESR) PQEDでは 0.15% (633 nm) 0.2% (488 nm)	He-Neレーザ, 0.5 mW Arイオンレーザ, 1.4 mW 6 mmφ	21.5 (633 nm) 20 (488 nm)
ASH (ハンガリー科学院物理工学研究所)	PQED 不確かさ不明	0.1%	キセノンランプとモノクロメータ, 1.5 μW 5 mmφ	24
OMH (ハンガリー国立計量局)	PQED 0.25%	0.07%	タンクステン電球とモノクロメータ 40 nW (633 nm), 20 nW (488 nm) 3.5 mmφ	24
ETL (日本電子技術総合研究所)	PQED 0.5%	0.04%	He-Neレーザ, 40 μW 1 mmφ	23
NPRI (南アフリカ国立物理研究所)	ESR 0.2%	0.2% (633 nmレーザ) 0.3% (ランプ/モノクロメータ)	He-Neレーザ, 2 mW キセノンランプとモノクロメータ 0.1~200 μW 1~3 mmφ	24
INM (フランス計量研究所)	PQED 0.12%	0.05% (633 nm) 0.1% (488 nm)	He-Neレーザ, 0.07 mW ビームサイズ不明 (488 nmについては相対分光応答度を利用)	23~25
NBS (アメリカ国立標準局)	PQED 0.1%	0.1~0.2% (633 nm) 0.1~0.3% (488 nm)	He-Neレーザ, Arイオンレーザ, 0.1~0.6 mW 4 mmφ	23~25

す前の11月のNBSでの測定結果からみると、PN形では平均0.54% (3 σ 不確かさ0.29%)の低下、NP形では平均0.09% (3 σ 不確かさ0.10%)の増大であった。

4. 測定結果

各国での測定データおよび測定の諸条件はすべてNBSに集められ、そこで整理された。それをさらに整理して測定の諸条件を表1に示す。この中には絶対分光応答度の一次標準も示されており、絶対放射計 (ESR: Electrical Substitution Radiometer) を一次標準とする研究所が、自己校正検出器 (PQED: Predictable Quantum Efficiency Detector) を一次標準とする研究所とほぼ同数存在することは、5. 結論で触れるようにたいへん意味のあることである。

各国での測定データは、NBSでの測定データに対する比の形にして相互比較がなされた。NBSでの何回かの測定のうちの時点のデータを使うのか、あるいは平均を取って使うのかについて明確な方針はなかったようである。いずれにせよ、図1および図2に示された再現性を考えれば、特に大きな変化を示した検出器以外は、どの時点のデータを使っても構わないということであろう。文献(1)には各国がNBSに報告した分光応答度の値が表として与えてあり、また第1回目の測定値だけを比較した図も与えてあるが、ここでは第2回目の測定も含む最終結果だけを図3および図4として示す。第2回目の測定を行なったのはNRC, NPL, PTBの3研究所であり、これら3研究所については第2回目の測定値が図示してある。またASHは、標準とした検出器の反射率測定に誤差があったとしてデータの訂正を申し出ており、その訂正後の値が図示してある。図中の誤差棒は、各研究所の標準値の不確かさおよび測定精度と、NBSのそれらとの二乗和の平方根として求めた誤差範囲を表わし、各研究所についてそのデータの平均から上下に引いてある。

図3 633 nmにおける応答度の比較
白丸はPN形、黒丸はNP形による測定を示す。

図4 488 nmにおける応答度の比較
白丸はPN形、黒丸はNP形による測定を示す。

ば、特に大きな変化を示した検出器以外は、どの時点のデータを使っても構わないということであろう。文献(1)には各国がNBSに報告した分光応答度の値が表として与えてあり、また第1回目の測定値だけを比較した図も与えてあるが、ここでは第2回目の測定も含む最終結果だけを図3および図4として示す。第2回目の測定を行なったのはNRC, NPL, PTBの3研究所であり、これら3研究所については第2回目の測定値が図示してある。またASHは、標準とした検出器の反射率測定に誤差があったとしてデータの訂正を申し出ており、その訂正後の値が図示してある。図中の誤差棒は、各研究所の標準値の不確かさおよび測定精度と、NBSのそれらとの二乗和の平方根として求めた誤差範囲を表わし、各研究所についてそのデータの平均から上下に引いてある。

図3に示された633 nmにおける絶対分光応答度の世界平均 (NBSの値を1.0000としてこれも含む11研究所の平均) は1.0013で標準偏差は0.34%, 図4に示された488 nmにおける絶対分光応答度の世界平均 (NBSの値を1.0000としてこれも含む9研究所の平均) は1.0011で標準偏差は0.33%である。なお488 nmでの測定において、NIM, NPRL, INMの3研究所はPN形とNP形とで差がある結果を出しているが、これは多分PN形ホトダイオードの不安定によるものであろう。

CSIROは、ESRを標準とする測定とPQEDを標準とする測定の両方を行なった。両方の測定結果の一致度はきわめてよかった (差は0.1%以下)。図3および図4には両測定の平均値が示してある。

NPRLから、検出器7に波長633 nmで約2 mWのレーザービームを入射させて測定をしたら、応答度が1.9%低く出たとの報告があったが、このデータは図には載っていない。

5. 結論

第1の結論は、分光放射パワー (あるいは絶対分光応答度) 測定の標準偏差は633 nmにおいては0.34% (11研究所)、488 nmにおいては0.33% (9研究所) であったということである*。この測定には2種類の一次標準 (絶対放射計および自己校正検出器) が使われたこと、比較測定の際の放射パワーのレベルは5桁に及んでいたことにも注目すべきである。

第2の結論は、以前から使われている絶対放射計による測定と新しい自己校正検出器による測定とは、今回の国際比較の測定精度内で全く等価であったということである。

第3の結論は、シリコンホトダイオードが測光および放射測定の日盛りを維持し、また伝達するための標準として適するかどうかに関してである。今回の国際比較に用いた

* この値は、1985年に電球を巡回して行なった光度および光束単位の国際比較²⁾における各国測定値の標準偏差の2/3~1/2であって、今回の国際比較では従来の国際比較に比べて測定値の各国間のばらつきが小さかったことを意味する。

シリコンホトダイオードの大多数はきわめて優れた性能を示した。PN形は長波長域で優れた性能（633 nmにおける応答度の変化は6か月間で0.1%以下）を示し、NP形は短波長域で優れた性能（488 nmにおける応答度の変化は3か月間で約0.1%）を示した。

国際比較に用いたシリコンホトダイオード16個のうち3個には非常に大きな応答度変化が起こった。大きな変化はNBSから参加研究所へ輸送の途上に起こり、以後はほとんど変化しなかったように見える。このような現象は現在ではまだ十分説明できないが、シリコンホトダイオードの物理と特性の詳細についての研究が進んで、素子の性能改善につながることを期待したい。

PN形とNP形とで、応答度変化の方向が違うことの理由を推理するのも興味深い。PN形は応答度が低下するほうに向かい、NP形では増大する方に向かっているが、この方向は、受光器表面に静電荷が発生したときに予想される方向と一致している。静電荷はおそらく受光器が寒い所から暖かい所に移されたときに受光器表面に水が凝結し、その結果として発生したのであろう。PN形ホトダイオードの内部量子効率、その表面に一時的に静電荷ができただけで、回復できない変化をしてしまうことが知られている³⁾。そしてその変化は通常、量子効率が低下する方向である。NP形に関しては、最近のNBSでの研究で、水蒸気にさらされると反射率がかなり変化することがわかってきた。これらのことから引き出される最も有効な結論は、輸送中に周囲の空気によって受光器の表面が汚染されないように保護しなければならないということであろう。

6. お わ り に

以上、NBSからの報告に従って、1986年に実施された絶対分光応答度標準の国際比較の経過と結果を紹介した。国際比較の途中で特性が変化した巡回器が出たりしたこと、一部の研究所は2回測定のお機会を得、しかも2回目の測定時には、1回目の測定結果をすべて知っていたということで、最終結果（図3および図4）はすべての参加研究所が同じ条件で臨んだ結果を示しているものではない。実際、PTBの場合には、2回目は1回目より平均0.65%分光応答度が大きくなっている。また図3中には間違えてプロットしたと思われる点が2点あるし、図3および図4の誤差棒の長さも表1記載の数値から計算した標準偏差と一致しない（筆者の計算によれば、 $\pm 1.2\sigma$ の棒から $\pm 2.5\sigma$ の棒までである。）。このように、ここに提示された結果は多少厳密さに欠けるように感じられるが、絶対分光応答度測定に関する技術の最先端、および各国標準研究所の技術レベルを知るには十分であると考えられる。

このようにして、CCPRのメンバーに係する各国標準研究所間の相互比較は終了したが、今度は国際照明委員会（CIE）の技術委員会の活動として、それ以外の研究所間の相互比較を行なうことになっている。幹事研究所はやはりNBSである。シリコンホトダイオードの自己校正による分光応答度標準の作成は、絶対放射計による標準に比べればはるかに容易であるから、放射パワーの測定に深い関心をお持ちの機関は、こぞってCIEでの相互比較に参加なさるようお勧めしたい。

自己校正によって絶対分光応答度を正しく値付けできるかどうかは用いる素子によるところが大きい。昭和63年度照明学会全国大会において、国際比較に用いられたシリコンホトダイオードと同形の素子を含む7種のホトダイオードについて絶対分光応答度を自己校正し、これらのホトダイオードで同一のレーザビームの放射束を測定して、自己校正法でつけた絶対分光応答度の確からしさを検討した報告がなされた⁴⁾。この報告によると、むしろ国産のシリコンホトダイオードの中に自己校正に適したものがある。いずれにせよ、絶対の真値に近づくのは容易なことではない。多種類の素子、多種類の手法、そして多くの局所で実験が重ねられることによって、不確かさが少しずつ小さくなっていくのであろう。

最後に、電子技術総合研究所では、この国際比較の後、シリコンホトダイオードの絶対分光応答度自己校正の方法を改良し、現在では国際平均に近い値が得られていること⁵⁾、および波長488 nmにおいても自己校正ができるようになってきていること⁶⁾を付言しておく。

参 考 文 献

- (1) Zalewski, E.F.: Comparison of the National Standards of Absolute Spectral Responsivity, BIPM-Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie-Rapport de la 11^e session (1986) 165 ~ 179
- (2) 西 師 毅：測光単位の現況，照学誌 72-7（昭63）365 ~ 366
- (3) Key, P.J., Fox, N.P. and Rastello, M.L.: Oxide-bias Measurement in the Silicon Photodiode Self-calibration Technique, Metrologia 21-2 (1985) 81 ~ 87
- (4) 大野義弘，西山英夫：可視域におけるシリコンフォトダイオードの自己校正法の精度の検討，昭和63年度照明学会全国大会講演論文集（昭63）116 ~ 117
- (5) 齊藤一郎，三嶋泰雄：633 nmにおける絶対分光応答度の確立，昭和63年度照明学会全国大会講演論文集（昭63）114
- (6) 香取寛二，三嶋泰雄，齊藤一郎：シリコンホトダイオードによる分光放射照度の絶対値の確認，昭和63年度照明学会全国大会講演論文集（昭63）115

（受付1988年7月29日）