

測光・放射標準

齊 藤 一 朗

Photometric and Radiometric Standards

Ichiro SAITO

Photometry is a science to measure optical radiation as quantities to be weighted by the sensitivity of the human eye. The base of all photometric quantities is the luminous intensity and its unit, the candela, is one of the base SI units. The luminous intensity scale has been realized based on absolute radiometry at several national laboratories according to a redefinition of the candela in 1979. Development of cryogenic radiometers enabled us to realize the photometric scales with high-accuracy. Further studies on the development of more accurate photometric measurements are now in progress. This paper describes the history of definition, instrumentation, standard artefacts and techniques used to realize the candela and another photometric standards. The present status of the photometric and radiometric standards is also presented.

Key words: photometry, luminous intensity, candela, base SI units, cryogenic radiometer

現在用いられている光の単位の基本である光度：カンデラ (cd) は、国際単位系 (SI) 中唯一の感覚量に基づく基本単位である。古来、人間が生活上必要とする情報の、かなりの部分は目から得ており、その情報は実生活に密接にかかわってきた。そのため、生活に不可欠な高密度の情報を昼夜にかかわらず十分に取り込む必要から、人工照明が発展した。しかし目が感じる明るさは感覚量であり、その明るさに対する各個人の反応は異なることから、照明環境を再現よく正確に評価することは困難であった。そこで同じスケールを用いた評価が必要となり、安定した測定値を得るために導入されたのが測光標準であり、測光単位である。人間の目による比較が容易に行えたためであろうか、長さ、時間、重さなどの原器を設定しやすい標準量と比較すると、明るさを決定するために必要な標準の原器の設定・標準量としての計測学的認知は、それほど古くない。

古来の測光単位に使われている「燭」は、ろうそくに由来する。測光法の誕生は、1729年に始まる。最初の測光器は、1729年に開発された「影の光度計」といわれ、2つの光源に照らされた棒の影の濃さを目で比較するものである。さらに照明が実生活で必要不可欠となり、測定法の開

発・標準の設定は急速に進行する。感覚量ではあるが国際単位系 (SI) として光度 (cd:カンデラ) が1948年に採用され、単位名称：カンデラが現在に至っている。

光度の定義は、国際照明委員会 (CIE) によって、より安定な標準光源を模索し、測光原器とする時代に始まる。さらに国際度量衡委員会 (CIPM) の諮問機関である測光放射測定委員会 (CCPR: 当時は、測光諮問委員会; CCP) によって制定された、有名な「白金点黒体炉の白金凝固点温度にある黒体の輝度をカンデラの単位とする」という時代を経て、1979年の第16回国際度量衡総会 (CGPM) で採択された現在の定義に至っている。

ここでは、日本における測光標準 (標準器・測定法) の変遷と各時代における国際比較の結果、測光・放射標準の単位、現在の定義に基づいた光度単位の具現方法、測光・放射標準の供給方法について述べる。

1. 測光標準の変遷

1.1 創設時代

最初の光度単位は、1860年イギリスで標準ろうそくの仕様書が設定され、1本のろうそくの単位として用いられた

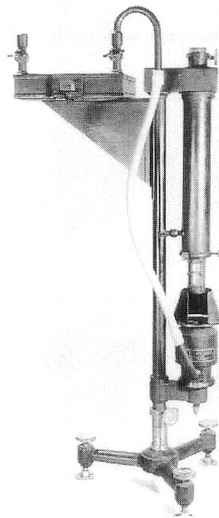


図1 ペンタン灯.

「燭」である。その後、ペンタン灯 (1877 年)、ヘフネル灯 (1884 年) などのガス炎が標準となり、わが国では、明治 44 年 (1911 年) に電気事業施行規則第 52 条により、定額灯用電灯の料金を規定する必要上、光度単位と標準が定められた。その時代の標準器はハーコート 10 燭ペンタン灯の標準状態における水平光度の 1/10 を 1 燭とし、国際的には 1908 年 4 月英米仏の 3 国立機関の協定による国際燭があり、それは英国国立物理研究所 (NPL) のペンタン灯によって定められていた。電気試験所 (電子技術総合研究所 (電総研) を経て現独立行政法人産業技術総合研究所 (産総研)) では、明治 42~43 年 (1909~1910 年) ごろから光度単位と標準について調査を開始した。電気試験所所有の NPL の検定票がついた標準ペンタン灯 2 基の湿度校正係数を独自に測定し、NPL、米国標準局 (NBS: 現在は、米国標準技術研究所; NIST) と同じ係数を得た。このペンタン灯の光度は 10.02 燭であり、誤差範囲で国際燭に一致したことになる。ペンタン灯の外観を図 1 に示す。

大正 12 年の関東大震災により標準器・測定設備に壊滅的打撃を受けるが、NPL・NBS の援助により標準値を再建した。このときの値を電試燭と称した。この当時は、電気事業法施行規則が唯一の法的根拠であり、国内の測光単位は統一されていない。各事業者が NPL、現ドイツ連邦物理工学研究所 (PTB: 当時は PTR) などの値を使用していたが、電気試験所の努力により国内単位が統一された。次いで 1930 年に NBS が中央局となり、炭素フィラメント標準電球を用いた国際比較が行われた。この国際比較から電試燭と国際燭との間には、「1 国際燭 = 1.013 電試燭」の関係

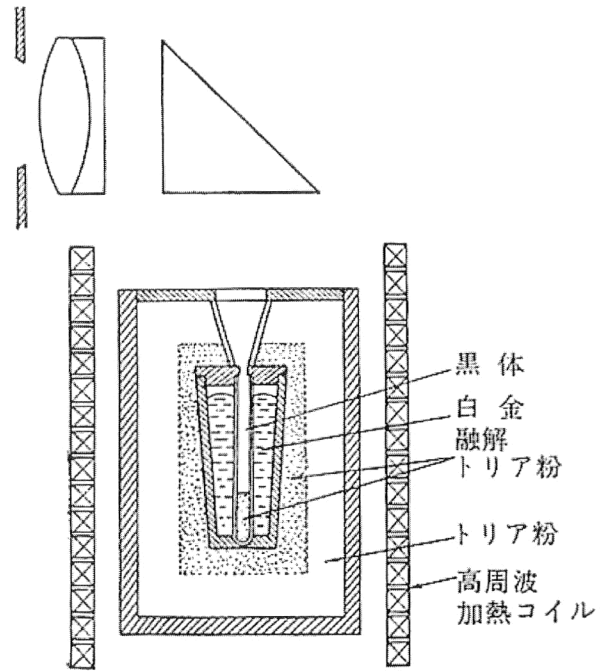


図2 白金点黒体炉の構造.

があることがわかった。

1.2 白金点黒体標準器の実現

測光標準器としてペンタン灯が用いられていたが、再現性の不足と大気条件の不確定要素などにより、一次標準器としては好ましいものではなかった。1879 年ごろより白金の凝固温度の輝度を標準に用いる提案がなされたが、安定な標準器の作製に難航し、ようやく 1931 年に NBS において実用的な標準器の製作と測定に成功した。これを受け、1931 年の国際度量衡委員会の電気諮問委員会で測光単位の国際統一が提案され、1933 年に開かれた電気および測光諮問委員会で具体的審議が行われた (その後、測光諮問委員会は独立)。1937 年の第 1 回測光諮問委員会および国際度量衡委員会では以下の内容が決定され、1940 年 1 月 1 日から実施することが取り決められた[†]。

- (1) 白金凝固点における黒体を標準器とし、その輝度を新しく平方センチメートルあたり 60 単位とする
- (2) これと色の異なる光源の光度は国際度量衡委員会で採択された基準視感度曲線 (現在の用語では、分光視感効率) を考慮に入れた方法で決定する

この決議を受け、各国の国立標準機関は NBS 製作のトリア黒体炉を使用して測光単位具現を目指した。電気試験所では、NBS の製作寸法に基づき、NBS 以外では唯一独自に黒体炉を製作し、黒体標準器を具現した。白金点黒体炉の構造を図 2 に示す。電気試験所で製作された 2 つの黒

[†] この実施時期は、その後 1941 年に変更され、さらに第二次世界大戦のため 1948 年 1 月 1 日から実行された。

体炉を用いた最初の値としては、59.60 電試燭/cm² が得られ、これを国際燭に換算すると 58.84 国際燭/cm² となる。

新測光単位に対する第 1 回の国際比較が 1939 年に行われたが、第二次世界大戦のため延期され、1948 年 10 月の第 9 回国際度量衡委員会において承認され、新光度単位の名称をカンデラ (cd) とすることが決議された。この年に、戦後第 1 回の国際比較が新しく測光設備を整備した国際度量衡局 (BIPM) において実施された。電気試験所は連合国の占領下であり、設備の再建途中であったが万難を排して参加した。その後、戦後第 2 回目の国際比較が 1952 年に行われ、1957 年に白金黒体炉を用いる最後の国際比較が行われた。この国際比較には日本が開発した高い安定性を示す光度標準電球 (通称：M 字型光度標準電球) が新たに採用され、国際度量衡局から賞賛された。この定義は、1956 年 (昭和 26 年) 6 月に制定された計量法に盛り込まれ、1952 年 3 月 1 日より実施された。

この時代、セレン光電池・光電管などの物理測光器を測定に用いる研究が行われていたが、性能的に不十分であり、国際比較の測定には視感測光器が用いられ、選ばれた標準観測者が測定を行っていた。しかし白金点黒体による測光単位の定義は、運用面の困難さと炉に使用しているトリウムが放射性物質であること、また、物理測定に用いる検出器の急速な進歩などの理由により、新たな定義の時代を迎える。

2. 極低温放射計に基づいた新たな光度・光束単位の設定

2.1 旧定義から新定義への移行

黒体放射を用いる旧定義から新定義の光度単位改定に向けて、 K_m 値 (1/683 W/sr) 決定のための測定が各国で行われた。電気試験所では常温動作の電力置換型放射計に標準視感効率近似フィルター ($V(\lambda)$ フィルター) を使用することにより 1/683 W/sr の値を得た。この値が現在の定義に採用されたため、従来の光度単位が新光度単位にそのまま移行された。このときの光度単位の流れを図 3 に示す。現在の定義に基づく 1985 年の光度・光束単位の最初の国際比較は、このときの単位を用いてなされている。参加各国の国際平均値からのばらつきは±1%程度であった。日本の国際平均値からのはずれは光度-0.8%、光束+0.2%であり、光度測定に何らかの問題が存在することを示す結果となった¹⁾。

2.2 基本単位 (カンデラ) の定義²⁾

現在の光度の定義は、1979 年の第 16 回国際度量衡総会で採択された「カンデラは、周波数 540×10^{12} Hz の単色放

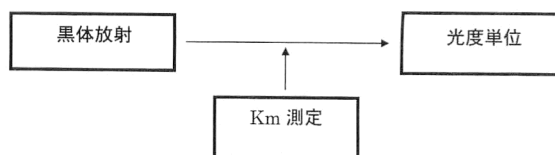


図 3 光度単位の旧定義から新定義への移行 (黒体放射ならびに常温動作電力置換型放射計による)。

射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が 1/683 W/sr である光源の、その方向における光度である」である (日本においても新計量法に新定義が取り入れられた)。旧定義は、白金凝固点の温度にある黒体からの放射を標準にして規定されていた。これに対し、新定義では、標準光源、標準検出器といった特定の標準器にたよらず、周波数 540×10^{12} Hz (波長 555 nm) の単色放射に対して、他の SI 単位から導かれた物理量 (電気量) が用いられ、厳密な計測が行えるようになった。しかしながら 555 nm 以外の波長あるいは広い波長分布をもつ光源の光度を求めるには、人間の目の分光感度を標準化・規格化した分光視感効率 $V(\lambda)$ を併用しなければならない。したがって測光量は $V(\lambda)$ というフィルターをかけた放射束 ϕ_e の測定と考えられる。実際に測定されるものは、人間の視感波長領域 360~830 nm の範囲で積分した

$$F = K_m \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} V(\lambda) \phi_e d\lambda$$

$$K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \quad \phi_e = \text{放射束 (単位: W)}$$

(1)

という量で、この量を光束ルーメン (記号 lm) とよび他のすべての測光量の基本となる。量としては光束が基本であるが、単位としては光度カンデラ (cd) が基本となっている。

測光量としては基本単位の光度と光束、照度ルクス (記号 lx) が用いられる。光度は発光面を頂点とした単位立体角に含まれる円錐形内の光束の量 lm/sr で表される。光束の単位はすべての方向に 1 cd の光度をもつ光源が、単位立体角内に放出する光束と定義されている。光を受けとる側 (または発光面) の測光量である照度は、その点を含む単位面積あたりに入射 (または出射) する光束の量 lm/m² で表される。照度 1 lx は、面積 1m² あたりに、光束 1 lm の割合で光が入射していることを示している。また照度 E は発光面と受光面との距離 l (単位: m) との逆二乗則と光度 I から、

$$E = I/l^2 \quad (2)$$

と表すことができる。

表1 基本単位.

量	名称	記号
光度	カンデラ	cd

表2 基本単位を用いて表現される SI 組立単位.

量	SI 単位	
	名称	記号
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²

表3 固有の名称をもつ SI 組立単位.

量	SI 単位			
	名称	記号	他の SI 単位 による表現	SI 基本単位 による表現
放射束	ワット	W	J/s	m ² · kg · s ⁻³
光束	ルーメン	lm		cd · sr*
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² · cd · sr*

*無次元の組立単位, 測光ではステラジアン(steradian)の記号を単位(steradian)の表現の中にとどめる.

表4 固有の名称を用いて表現される SI 組立単位.

量	SI 単位		
	名称	記号	SI 基本単位 による表現
放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg · s ⁻³

このように測光量は, 他の SI 基本単位と異なり光度, 光束, 照度の3つの単位が相互に密接な関係で結びつく特殊な量であるといえる.

2.3 測光・放射標準の単位²⁾

光度の定義は, 他の SI 基本単位と異なり, 放射束を電流量に置き換えて測定する. さらに, 測光量は放射量に $V(\lambda)$ というフィルターをかけて得られる組立量である. SI で定めた測光・放射標準の単位は, 表1~6に示す基本単位, 組立単位ならびに補助単位に分類されている. この単位のほかに検出器の分光応答度(分光感度)として, 検出器へ入射する放射(W)と検出器の出力(VまたはA)との関係から, V/W または A/W が用いられている.

2.4 新たな光度・光束単位の設定

光度の定義に基づいて光度単位を具現するには, 高温黒体炉などの放射源を用いる, あるいは電力置換型放射計などの検出器を用いるという2つの方法がある. 黒体炉は, 温度目盛の精度の影響を受けるのに対して, 電力置換型放射計は, 入射パワーと置換電力との等価性が問題となる. しかしキャビティーを極低温(液体 He 温度)に保つことにより良好な等価性を実現できるので, 各国の標準機関で光度単位を具現するために導入・使用されている. 産総研(当時は電総研)では, 極低温放射計を1994年に導入し,

表5 補助単位.

量	SI 単位		
	名称	記号	SI 基本単位 による表現
立体角	ステラジアン	sr	m ² · m ⁻² = 1

表6 補助単位を用いて表現される SI 組立単位.

量	SI 単位	
	名称	記号
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/m ² /sr

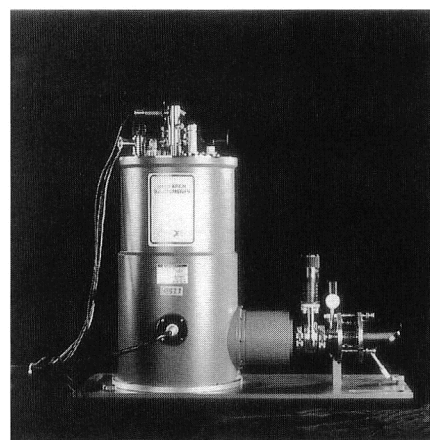


図4 極低温放射計.

光度単位はもとより測光・放射諸単位設定の基準に用いてきた. そして, この極低温放射計を使用して, 高精度な分光応答度に基づいた, 新たな光度・光束単位を設定した.

2.4.1 極低温放射計

産総研で導入した極低温電力置換型放射計は, 英国オックスフォードインスツルメンツ社製である. 液体 He 容量4 l, 動作温度4.5 K 一定 (He バス温度は4.3 K), 1回の液体 He 充填により約36時間の測定が可能である. 外観を図4に示す. 入射窓は熔融石英をプリユースター窓として用いている. 図5には, 電力置換キャビティーの構造を示す.

電力置換キャビティーは, 0.1 mm 厚の銅板を開口径10 mm, 長さ40 mm のチューブ状に成形してあり, 内広がり構造をもち, 入射光は30度傾斜した終端部分に吸収される. 外部は金メッキ, 内部は Ni·P をメッキした後, エッチング処理により吸収率0.999981 (633 nm) を得ている. 電力置換用ヒーター A は終端部の裏側に, ヒーター B はキャビティーチューブ入り口外側に装着されている. 温度検出用センサー(ロジウム鉄薄膜)は, さらに20 mm 後方の

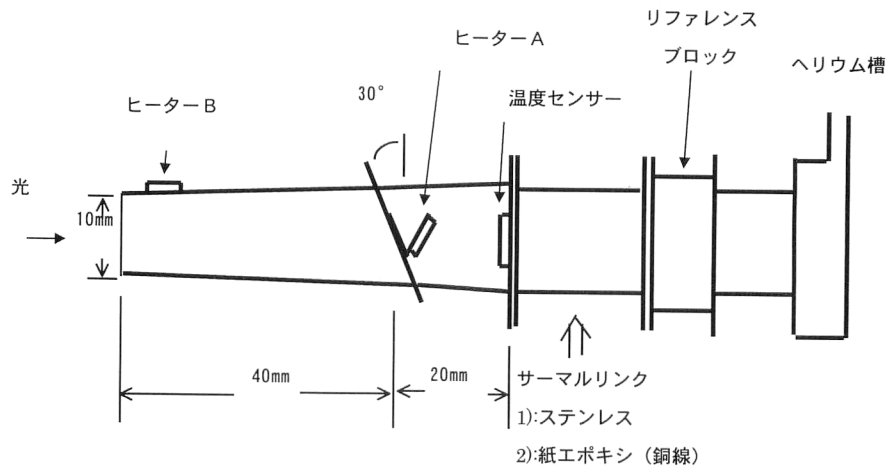


図5 電力置換キャビティー構造図。

表7 極低温放射計等価性の検討 (絶対分光応答度測定値の比較による)。

サマルリンク	L 4-A 基準		B/A%
	ヒーター-A	ヒーター-B	
L 8 (銅線 8 本)	+0.050	-0.103	-0.153
L 4 (銅線 4 本)	+0.000	+0.018	+0.018
L 2 (銅線 2 本)	+0.684	+0.702	+0.018
ステンレス	+0.939	-0.173	-1.106

サマルリンク接続部に位置している。キャビティー感度はサマルリンクの熱抵抗を変えることにより変更できる。サマルリンクの熱抵抗の違いによる等価性の変化を表7に示す。現在はサマルリンクには銅線4本(L4)を用い、感度は約1.22 K/mW (置換電力換算)で使用している。このときの時定数は約4.9秒であり、最小分解能は2~5 nWである。電力置換精度は0.01%以下である。

極低温放射計の絶対分光応答度測定精度は、ブリュースター窓の透過率測定に伴う不確かさなどが加わり0.05% (包括係数 $k=1$) である。使用しているレーザー群は Ar-Kr (488.0, 514.5, 568.2, 647.1 nm), He-Ne (632.8 nm) であり、通常 100~200 μ W で測定を行う。

2.4.2 光度測定用検出器および光度・光束測定

極低温放射計の絶対分光応答度を基準とした、光度・光束単位のトレーサビリティ体系図を図6に示す。具体的な単位の具現方法は、以下のような手順による。

光度測定用検出器は窓なしのシリコンフォトダイオード (以下, Si-PD) (S1337-1010) を用い、 $V(\lambda)$ フィルター、精密マスク (6.00357 mm 径) より構成される。Si-PD の分光応答度の校正は、極低温放射計で直接行う。この分光応答範囲を可視域全域に内挿、外挿して拡大し、次に分光器を用いて $V(\lambda)$ フィルターを組み込んだ検出器に可視域 5 nm 間隔の絶対分光応答度 (A/W) を値付けする。さらに

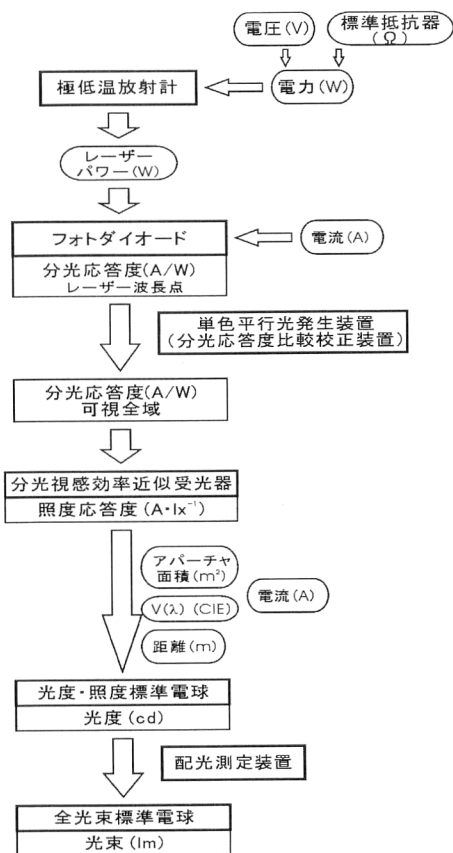


図6 光度・光束単位のトレーサビリティ体系図。

光度の定義と分光視感効率の値から検出器光出力-照度 (A/lx) を計算により求める。Si-PD のみの分光応答度と $V(\lambda)$ フィルターを組み合わせたときの分光応答度を図7に示す。光度標準電球 (東芝: コイル M 字型, オスラム: Wi41G) の光度値は、この光度測定用検出器を用い、測光距離 2.3107 m として、距離の逆二乗則より決定した³⁾。光束は、上記の方法により得られた光度単位に基づき配光測定装置 (電球-検出器: 腕の回転半径 1.5 m) を用いて全光

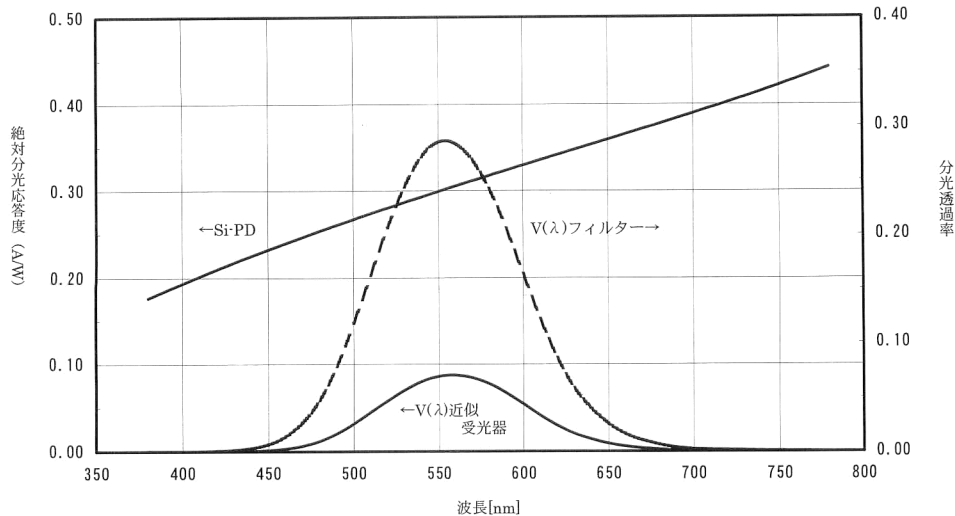


図7 検出器絶対分光応答度 (Si-PD, $V(\lambda)$ 検出器), $V(\lambda)$ フィルター分光透過率.

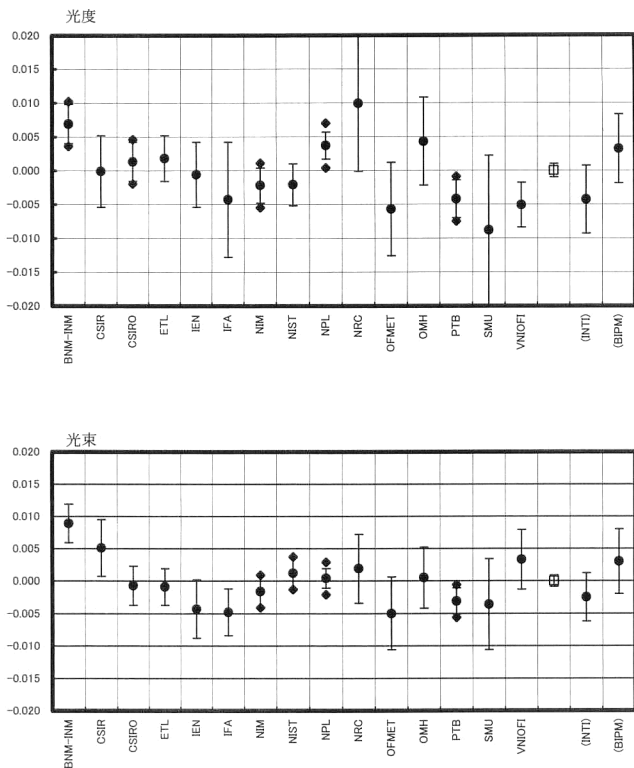


図8 光度・光束国際比較 (CCPR-K3a, K4) 参加国の KCRV からのはずれ.

束標準電球 (東芝: 100V 200 W, NPL/GEC: 200 WLPS) を 5 度間隔で全空間の光度を測定することにより得た. 光度の測定精度は 0.28% (包括係数 $k=1$), 光束の測定精度は 0.34% (包括係数 $k=1$) である.

2.5 光度・光束の国際比較

国際度量衡委員会 (CIPM) 測光放射測定諮問委員会 (CCPR) 主催による基幹国際比較 (Key Comparison) の一環として, 光度 (CCPR-K3a) ならびに光束 (CCPR-K4)

の国際比較が中央局 (PTB) により 1997~1999 年に実施された. 産総研 (当時は電総研) も新たに設定を行った光度・光束単位を用い国際比較に参加した. 参加 17 機関のうち 6 機関が極低温放射計を基準にして仲介用標準電球に値をつけた. 同国際比較には, CCPR 主催の国際比較として, 最初に key comparison reference value (KCRV) が導入された. 電総研の KCRV からのずれは 1999 年 12 月の報告書⁴⁾によると, 光度で -0.09% , 光束で $+0.18\%$ である. 各国の結果を図 8 に示す. 国際比較で得られた結果を国内供給値に反映させるため, 計量法に基づいて供給を行っている光度・光束値を平成 13 年 3 月 15 日付で改定した.

3. 国際比較の現状

CCPR で実施中, 実施予定の国際比較 (基幹国際比較) を表 8 に示す.

4. 供給可能な標準量

産総研が現在, 標準として維持し供給可能な測光・放射量を表 9 に示す. 計量法トレーサビリティ制度 (Japan Calibration Service System: JCSS) で供給を行っている量に関しては, 産総研が保有する特定標準器から指定校正機関である日本電気計器検定所 (JEMIC) が保有する特定副標準器に値が移され, さらに認定事業者が保有する特定二次標準器に標準値が供給される. 一般ユーザーは認定事業者者に校正を依頼し, JCSS 校正証明書を取得することができる. 2002 年 11 月現在の光に関する認定事業者は, ミノルタ (株), 日本電気計器検定所, 東芝ライテック (株), (株) トプコン, 浜松ホトニクス (株), 松下電器産業 (株), スガ試験機 (株) の 7 機関である.

表8 CCPR で実施中, 実施予定の基幹国際比較.

記号	計測量	パラメーター	状況	実施年	NMIJ の対応
CCPR-K1a	分光放射照度	波長: 250~2500 nm	進行中	2001~	参加
CCPR-K1b	分光放射照度	波長: 200~400 nm	進行中	2002~	参加
CCPR-K2a	分光応答度	波長: 900~1600 nm	測定終了	1999~2001	参加
CCPR-K2b	分光応答度	波長: 300~1000 nm	測定終了	2000~2002	参加
CCPR-K2c	分光応答度	波長: 200~400 nm	プロトコル完成	2001~	参加を表明
CCPR-K3a	光度(電球)		等価性承認済み, 比較結果利用可	1997~1998	参加
CCPR-K3b	光度(受光器)		(等価性承認済み, 比較結果利用可)	1997~1998	不参加
CCPR-K4	光束		等価性承認済み, 比較結果利用可	1997~1998	参加
CCPR-K5	分光拡散反射率	波長: 360~830 nm	プロトコル完成	2001~	参加を表明
CCPR-K6	分光正規透過率	波長: 380~1000 nm	測定終了	2000~2001	参加

表9 産業技術総合研究所が維持している測光・放射量の, 範囲, 不確かさ.

標準量	範囲	不確かさ	供給形態
光度	2045~2856 K, 600 cd (Max) コイル M 字形光度 標準電球	0.64% (包括係数 $k=2$)	計量法 (JCSS)
光束*	2350~2788 K, 2600 lm (Max)	0.84% (包括係数 $k=2$)	計量法 (JCSS)
分布 温度	2045~2999 K	3 K (包括係数 $k=1$)	計量法 (JCSS)
分光放 射輝度	250~2500 nm, リボン電球	—	—
分光放 射照度	250~2500 nm, JPD 100 V 500 W ハロゲン電球	250~360 nm : 4.8% 360~830 nm : 2.8% 830~2500 nm : 4.0% (包括係数 $k=2$)	計量法 (JCSS)
分光 応答度	紫外, 可視, 近赤外 250~1150 nm, Si-PD (S 2281, S 1337- 1010 BQ)	250~450 nm : 1.64% 450~650 nm : 0.88% 650~1150 nm : 1.24% (包括係数 $k=2$)	依頼試験
分光 応答度	軟 X 線, 真空紫外 10~90 nm	15 nm : 9.1% 30 nm : 5.4% 50 nm : 5.7% 90 nm : 7.3% (包括係数 $k=1$)	依頼試験

*2001年3月15日単位改定.

5. 今後の測光・放射標準の体系ならびに展望

今後の測光・放射単位の体系は極低温放射計に基づいた図9のような体系が考えられる.

2001年12月現在の産総研における測光・放射標準の現状は, 以下の通りである.

- 1) 光度: Si-PD と $V(\lambda)$ フィルターを組み合わせた光度測定用検出器の絶対分光応答度を直接極低温放射計で校正することにより高精度化を実現した. $V(\lambda)$ フィルターを用いた光度測定は, フィルターの温度, 経年変化から 0.1% (包括係数 $k=1$) の測定精度が限界と考えられ, 極低温放射計の精度を有効に利用しているといえない. さらなる高精度測定を目指し, 分光放射測定法の可能性を検討する.

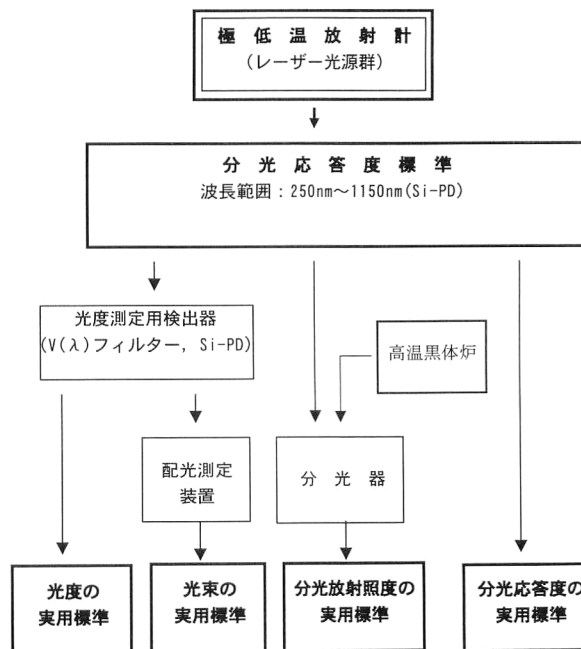


図9 今後の測光・放射標準の体系 (極低温放射計の分光応答度を基準とした).

- 2) 光束: 光度標準値を基準とし, 配光測定装置を用いることにより光度標準に連動した光束標準を具現化した. しかし, 従来使用している配光測定装置の電球-検出器間の距離は 1.5 m と短く, 測定の不確かさを大きくする要因であったため, 新たに電球-検出器間の距離を 2.7 m とした配光測定装置を開発した.
- 3) 分光放射照度: 定点黒体炉 (銅点: 1084.62°C, 1357.77 K) ならびに高温黒体炉 (最高 3000°C, 3273.15 K) を新たに導入し, 波長範囲の拡大 (200~250 nm) の検討を含め, 見直しを実施中.
- 4) 分光応答度: 極低温放射計より得られる高精度の可視域分光応答度を基準とし, 依頼試験で供給する値 (Si-PD: 250~1150 nm) を見直し, 依頼試験を再開した. 現在, 紫外域 (200~250 nm) の分光応答度標準の確立を実施中.

5) 分光拡散反射率：変形シャープリトル法による分光
拡散反射率標準の確立を実施中（可視域）。

文 献

- 1) 西 師毅：“測光単位の現況”，照明学会誌，72（1988）365-366.
- 2) 国際単位系：国際文書第7版（1999年）日本語訳（日本規格協会，1999）.

- 3) 小貫英雄，齊藤一朗，部 洋司，側垣博明，三嶋泰雄：“光放射標準と計測技術の研究；測光・放射標準”，電子技術総合研究所彙報，64（2000）57-63.
- 4) G. Sauter, D. Lindner and M. Lindemann: *CCPR key comparisons K3a of luminous intensity and K4 of luminous flux with lamps as transfer standards*, PTB-Bericht, Opt-62（1999）.

（2002年11月15日受理）