

分光測定に基づく新しい光度の 具現方法に関する調査研究

神門 賢二*†

(平成15年9月30日受理)

A survey on new realization method of the *candela* using spectroradiometric approach

Kenji GODO*†

1. 序 論

1.1 本調査研究の背景

人類の生活にとって空気や水が不可欠であるように、光の存在もまた大変重要であり、光を通して得られる情報は実生活に密接に関係している。そのため、生活に不可欠な情報を昼夜にかかわらず十分に取り込む必要から、人工照明が発達したと考えられる。人類が初めて作り出した光は“火”である。火山や山火事等の火を見ながら、やがて人類は、物と物との摩擦や衝突により火が発生することを知り、火きりの道具を作り、火打ち石を使い火を造ることを習得したものと思われる。彼らが得た火は、その後、次第に形を変えながら進化していった。たき火から、松明、かがり火、提灯、蠟燭、カンテラ、カーバイド、そしてエジソンの電灯へと至るわけである。そして現代においては第4の光源といわれる発光ダイオード(LED)などの固体素子光源も次世代の灯として登場している。

一方人間の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個人差があることから、その明るさを個人差を加味し正確に評価することは困難かつ実用的でない。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。このため現在用いられている光の単位の基本となる光度：カンデラ(cd)は、国際単位系(SI)中、唯一の感覚量を含んだ基本単位である。

光度は、古くから、炎または仕様の決められた白熱電球などにより“燭”という基準が定義されてきた¹⁾。国際的には、1948年にはじめてCGPM(国際度量衡総会)でSI単位として光度：カンデラ(cd)が採用された²⁾。1948年の定義は、白金の凝固点における黒体放射を利用するもので、プランクの放射則

により光度を具現化するものであった。しかしながら、高精度の白金黒体炉の製作、国際温度目盛への依存などの問題点を含んでいた。

そこで、上記の問題を解決すべく1979年にCGPMにおいて新しい定義、“カンデラは、周波数 540×10^{12} Hzの単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が1/683ワット毎ステラジアンである光源の、その方向にあける光度である。”³⁾が採択され、現在に至っている。この定義により、測光量が直接、放射量(W)から関係づけられたことと、単位の具現方法も任意になることから、以前の定義の問題点も解決された。産業技術総合研究所(産総研)においても、現在の定義に基づき、つまり黒体ベースから極低温放射計の絶対応答度を基準とした分光視感効率近似受光器により、光度単位が具現化されている⁴⁾。しかしながら、更なる高度化を考えたとき、分光視感効率近似受光器： $V(\lambda)$ 受光器を用いた測定方式では、 $V(\lambda)$ 受光器への分光応答度の値付け並びに $V(\lambda)$ 受光器特性改善限界があると考えられ⁴⁾、また次世代光源として期待されているLEDや有機ELなどのプランクの放射則からはずれた分光分布を持つ光源の精密測定への適用なども、現在の方式では分光分布の正確な測定が出来ないため困難であるという問題点がある。上記の問題を解決する手段として、分光測定はひとつのキーアイテムと考えられており、分光測定を用いた光度単位の具現化、ならびに新しい光源への対応が課題となっている。

1.2 本調査研究の目的

本調査研究では、SI基本単位である光度単位と関連する測光標準及び、またLED等の次世代光源に対する測光技術の現状と問題点に関して調査するとともに、分光測定に基づく新しい高精度測光方法を提案し、確立のために議論すべき問題点を明らかにすることにより、今後の研究の方針とすることを目的とする。

*計測標準部門 電磁波計測科

† e-mail: kenji-godo@aist.go.jp

1.3 本調査研究の構成

本報告書は本文6節と謝辞ならびに参考文献で構成されている。以下各節ごとにその内容の概要を述べる。

第1節 序論：本節では、本調査研究における背景と経緯を概観し、これらをもとに本調査研究の目的を明らかにした。

第2節 測光・放射測定の実況と課題：本節では、産総研における、光度・光束の具現方法について述べ、現在の方式での問題点・改善点について述べる。

第3節 次世代光源に対する測光技術の実況：本節ではLED等の次世代光源に対する測光技術の実況と問題点について、国内外のLED標準化活動の動向を踏まえて述べる。

第4節 分光測定に基づく新しい高精度測光方法の提案とその検討：本節では、現在の $V(\lambda)$ 受光器方式では高度化に限界、その測定対象が限られてしまうことから、極低温放射計にトレーサブルな高精度分光応答度標準を有する分光光学系から直接光度を導く2つの方法を提案し、確立のために議論すべき問題点を明らかにする。

第5節 今後の方針：本節では上記述べてきた調査研究を踏まえ、今後の展開について述べる。

第6節 まとめ：本節では本研究の総括と結論をまとめた。

2. 測光・放射測定の実況と課題

2.1 測光量と放射量

7つのSI基本単位に含まれる光度単位：カンデラ(cd)の定義は1979年のCGPMにおいて“カンデラは、周波数 540×10^{12} Hz単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が1/683ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度である。”³⁾となった。この定義により、測光量が直接、放射量(W)やヘルツ(s^{-1})という、他のSI単位から直接導かれた物理量を用いて定義され、その具現方法も任意になった。555nm以外の波長、あるいは広い波長分布を持つ光源の光度を求めるためには、人間の目の分光感度を標準化・規格化した分光視感効率を併用する。この分光視感効率 $V(\lambda)$ は、可視放射が人間の目に入ったときに感じる明るさの知覚の度合いを示す尺度であり、CIE(国際照明委員会)によって図1のように定められている^{5),6)}。厳密にはCIEが1924年に同意し、その後、補間と補外を行って完全なものとしたものを、1972年にCIPM(国際度量衡委員会)が勧告した値が分光視感効率である⁷⁾。これにより、光放射エネルギーに対して時間的・空間的な量を組み合わせることによって構築される量を“放射量”、光放射が人間の視覚に対して与える影響を波長に対する重みづけ(分光視感効率)として加えたものを“測光量”と定義できる。一般的には、ある放射量： X_e の分光密度を $X_e(\lambda)$ としたとき、対応する測光量： X_v は、

$$X_v = K_m \int_{\lambda=360}^{\lambda=830} X_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

で表される。ここで、比例定数： K_m は最大視感効果度と呼ば

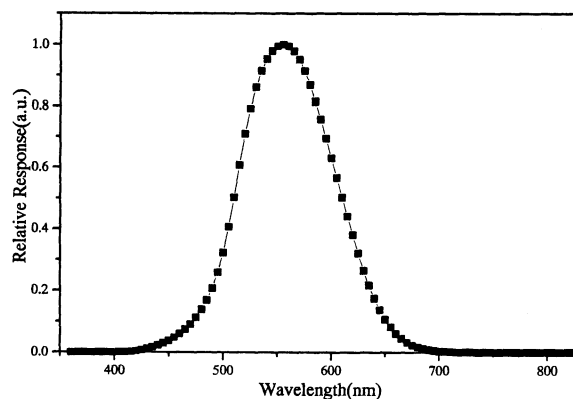


図1 分光視感効率 $V(\lambda)$

表1 主な測光量と対応する放射量

主な測光量	単位	対応する放射量	単位
光束 (Luminous Flux)	lm (ルーメン)	放射束 (Radiant Flux)	W
光度 (Luminous Intensity)	cd (カンデラ)	放射強度 (Radiant Intensity)	W/sr
輝度 (Luminance)	cd/m ²	放射輝度 (Radiance)	W/sr/m ²
照度 (Illuminance)	lx (ルクス)	放射照度 (Irradiance)	W/m ²

れる量で、 $V(\lambda) = 1$ となる波長($\lambda = 555\text{nm}$)において測光量と放射量を関係づける値であり、 $K_m = 683(\text{lm/W})$ と規定されている³⁾。ここで X_e が放射束の時、対応する測光量 X_v を光束と呼び、全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(cd)が基本となっている。主な測光量の定義は以下のようになっている。また主な測光量とそれに対応する放射量の関係を表1に示す⁸⁾。

- 光束(lm)：単位時間当たりの光放射エネルギーを放射束とよび、これに人間の目の分光感度である分光視感効率を重みづけした量
- 光度(cd)：点光源からある方向に向かう光束を、その光源を頂点とし、その方向への単位立体角当りの光束に換算した値(光束の立体角密度)
- 輝度(cd/m²)：光源面からある与えられた方向の光度を、その方向への正射影面積で割ったもの
- 照度(lx)：与えられた点を含む面要素に入射する光束を、その面要素の面積で割ったもの

また照度 E は発光面と受光面の距離 l との逆2乗の法則と光度 I から、

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

と表すことができる。このように測光量相互の間には簡単な

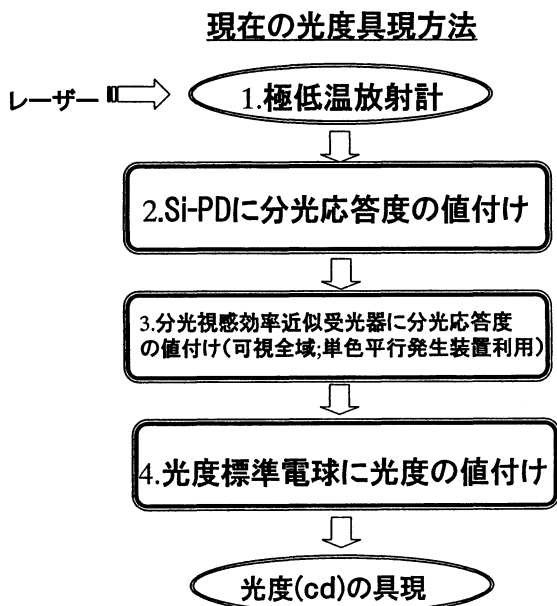


図2 産総研における光度単位の測定方式

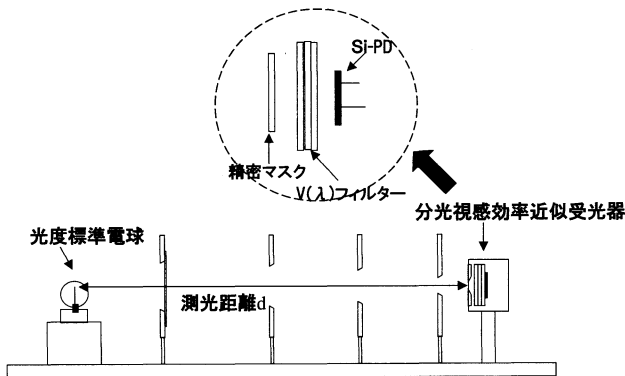


図3 光度標準電球の光度絶対校正

関係が成り立ち、基本量である光度単位を具現化するに当たり光度、光束、照度の3つの単位が密接に関係する。

2.2 産業技術総合研究所の光度・光束単位の設定方法

1979年に改定されたカンデラの定義に基づき光度を導くには、放射束の絶対量を測定する必要がある。その方法としては、温度を正確に決めた黒体炉から導くことも可能であるが、より精度の高い方法として現在では電力置換型放射計などの検出器を用いる方法が各国で採用されている。産総研においても1994年に極低温放射計が導入され、極低温放射計の絶対応答度を基準とした $V(\lambda)$ 受光器により、光度・光束単位のトレーサビリティが構築されている^{4),9)}。図2に光度標準電球を用いて光度単位カンデラを具現化するまでの流れを示す。また図3に現在の光度標準電球に対する光度絶対校正の概要を示す。光度単位の具現方法は大きく4つのステップに分けることができる^{4),9)}。次項以降にて、それぞれのステップの概

略を述べる。

2.2.1 ステップ1：極低温放射計

極低温放射計は液体ヘリウム温度で動作する電力置換型絶対放射計であり、電力置換により入射した光パワー（レーザー光）の測定を行う。受光キャビティにレーザー光が入射すると、受光キャビティが入射パワーの99.99%以上を吸収し、熱に変化され温度が上昇する。次に光を遮断し、受光キャビティに取り付けられたヒータに対してレーザー光入射時の平衡温度と等しくなるよう電力を加える。このとき加えた電力(W)から受光キャビティに吸収されたレーザー光の絶対放射束 ϕ_0 が求められる。そして入射窓の透過率などの補正をすることにより、レーザー光の絶対放射束 ϕ が求まる。

2.2.2 ステップ2：シリコンフォトダイオードへの分光応答度の値付け

放射束 ϕ が絶対校正されたレーザー光路上に、極低温放射計の代わりにシリコンフォトダイオード(Si-PD)を設置することにより、レーザー波長点 λ_i における Si-PD の分光応答度 $S'(\lambda_i)$ (A/W) が求まる。Si-PD の分光応答度は可視域においては単純な関数で記述されることがわかっており、離散的波長点で求めた Si-PD の分光応答度 $S'(\lambda_i)$ をモデル関数によって、可視全波長における分光応答度 $S'(\lambda)$ (A/W) に拡大する。

2.2.3 ステップ3： $V(\lambda)$ 受光器への分光応答度の値付け

$V(\lambda)$ 受光器は Si-PD と $V(\lambda)$ フィルターと精密アパチャーから成る(図3参照)。 $V(\lambda)$ フィルターは、分光視感効率曲線に一致するよういくつかのフィルターからできている。これに分光応答度の値付けを行うときには、まず絶対分光応答度 $S'(\lambda)$ (A/W) が校正された、Si-PD を用いて単色平行光発生装置から出射される出射光の強度を測定する(360-830 nm)。つぎに同様に $V(\lambda)$ 受光器を用いて、単色平行光発生装置からの出射光の強度を測定する。この2つの比をとることにより、 $V(\lambda)$ 受光器の分光応答度 $S(\lambda)$ (A/W) を求めることができる。そして次に、光度標準電球の分布温度を T (K) ($T=2856$ K) とし、光度標準電球の相対分光分布がプランクの放射則に従うとし(360-830nm)、分光応答度 $S(\lambda)$ (A/W) が求められた $V(\lambda)$ 受光器に面積が校正された精密マスク(面積 A) を取り付けられた時の照度応答度 s_0 (A/lx) を以下の式により求める。

$$s_0 = \frac{A \times \int_{360}^{830} P(\lambda, T) S(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{360}^{830} P(\lambda, T) V(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

2.2.4 ステップ4：光度標準電球への光度の値付け

$V(\lambda)$ 受光器と光度標準電球を測光ベンチ上に設置し、光度標準電球を分布温度 T (K) で点灯させ、測光面における照度 (lx) を求める。そして、光度標準電球と $V(\lambda)$ 受光器との間の測定距離 l (m) を正確に測ることにより、式(2)の逆2乗の法則を用いて、光度 I (cd) を求める。

以上のステップ1-4の行程を踏む事により光度を具現している。現在の方式により求めた光度の不確かさは0.28% ($k=1$)である⁹⁾。

2.2.5 現在の測定法の問題点・改善点

上記で述べたように、極低温放射計を用いることにより Si-PD の分光応答度の不確かさを飛躍的に小さくすることが可能である。しかしながら、更なる高精度化を考えた時には、現在の方式では $V(\lambda)$ 受光器への分光応答度の値付けにおける不確かさ、ならびに $V(\lambda)$ 受光器 ($V(\lambda)$ フィルター部分) の温度変動による不確かさが最大の不確かさ要因となっている。これら不確かさを減少させるためには、分光応答度の値付け手法の最適化や $V(\lambda)$ 受光器の諸特性の改善、温度変動の制御などが必要であるが、測定方式の改善と $V(\lambda)$ 受光器特性改善には限界があると考えられる。更に $V(\lambda)$ 受光器は厳密には分光視感効率と一致しておらず、光度標準電球の分光分布を想定し、分光視感効率からのずれに基づく補正をする必要がある (照度応答度変換)。

更に LED に代表されるシャープなスペクトル構造を有するような光源に対しては、分光分布がプランクの放射則から相違に異なっているため、単に色補正係数を求めただけでは不十分である。特に分光視感効率曲線の短波長、長波長側は分光視感効率自体が非常に小さいため、温度変動などによる $V(\lambda)$ 受光器の分光応答度変化の割合が大きい。また $V(\lambda)$ 受光器の長波長、短波長側は分光視感効率と大きく一致しておらず、大きな不確かさ要因となる。このため、現在の $V(\lambda)$ 受光器を用いた方法では利用範囲が限定されており、LED や有機 EL 素子といった次世代照明光源の精密測定への適用が困難である。次世代光源 (LED) に対する測光技術の現状と問題に関しては次章において更に詳しく述べる。

以上述べたように現在の $V(\lambda)$ 受光器を用いた方法では高精度化並びに応用性において問題があり、新しい光度の具現方法が望まれている。

3. 次世代光源に対する測光技術の現状

3.1 発光ダイオード (LED) とは

最近、発光ダイオード (Light-Emitting Diode: LED) を用いた Solid State Lighting (固体照明) という言葉が登場している^{11),12)}。これは、化合物半導体エピタキシャル成長技術と発光素子プロセス技術の急速な進歩により、電気から光への変換効率の非常に高い発光ダイオードが開発され、可視光領域の赤色-青色において、きわめて高い光強度を有する固体光源として実用化されたためである¹³⁾。最近では高輝度白色 LED が開発され¹⁴⁾、世界的にも白色 LED が次世代省エネルギー光源として脚光を浴びている¹⁴⁾。LED 照明のメリットとしては以下の 6 つが考えられる¹⁵⁾。

- エネルギー効率が高い：LED は他の照明用の光源と違い、直接電子と正孔の再結合により光を放出する。このため

単色 LED の場合、そのエネルギー効率はすでに蛍光灯より高くまた、白色 LED においても将来的には蛍光灯を上回ることが予想されている。

- 長寿命 (単色 100000hr, 白色 5000hr?)：LED は固体素子のため、電球と違いフィラメントの劣化がないため、単色 LED の場合その寿命は 100000hr を超える。白色 LED の場合、蛍光体部分の劣化のため 5000hr 程度である。
- 丈夫 (壊れない)：電球と違い、フィラメントの真空封入などを必要としないため、こわれることはほとんどない。
- 光の分割可能 (ひとつのサイズ小さい)：LED 素子の大きさは 1 cm 以下のものが大半であり、様々な空間デザインが可能である。
- 発光色のコントロール：LED の波長は材料によってコントロールすることが出来る、そのため様々な波長をとりうる事が出来る。
- 環境にやさしい (水銀使わない)：白色 LED の場合、蛍光灯などに使われている水銀を使用していないため、環境調和の光源といえる。

上に挙げたメリットの中で最も注目される点は、エネルギー効率の高さである、このため日本やアメリカでは LED を照明光源として利用する国家プロジェクトが行われている。また LED 信号機の普及も進んでおり、経済産業省では LED 信号機普及の方針を打ち出している。

LED は pn 接合部に電流を注入することにより発光する半導体デバイスである¹⁶⁾。図 4 に LED の模式図を示す。図 4 (a) に示したように、典型的な LED の外観は砲弾型と呼ばれる独特な構造と成っている。チップは透明樹脂によりモールドされており、光は主にチップ表面と一部側面から放出される。透明樹脂の先端はレンズ作用をもっており、中心軸方向に強く光が放出されるようになっている。光を放出する LED チップ (図 1 (b)) は、pn 接合もしくは電子と光の閉じ込めを効率良く行うためダブルヘテロ (DH) 接合、量子井戸 (QW) 構造等を用いている。LED から出てくる光は基本的に活性層の材料に依存するため、活性層の材料並びに、その組成を任意に選ぶことにより、紫外から赤外までの光を放出することが可能である。一方で白色 LED の構造は、単色 LED と違い特殊な構造と成っている。典型的な白色 LED の構造 (図 4 (c)) は、青色 LED と YAG 系蛍光体を組み合わせた構造と成っており、

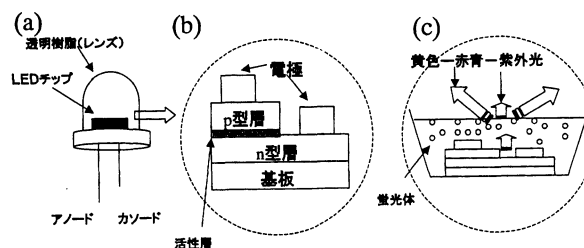


図 4 LED の外観および内部構造

青色光と青色光によって励起された YAG 蛍光体から出る黄色光が組み合わさることにより白色光を実現している¹⁴⁾。

LED の光特性に関しては、現在非常に高い品質が要求されているが、LED が従来の白熱電球や蛍光灯などと構造や発光部の形状、発光原理が異なることから従来の全光束や光度の測光方法がそのまま使用できない。そのため、測定精度が不十分であるという問題があり、現在 CIE では各国の標準研究機関を中心として LED 測光の標準化を検討している。

3.2 LED 光源の特徴とその測光上の問題点

LED 光源は一般の照明用光源と比べて、以下のような特徴を持つ^{17),18)}。

- 発光強度が小さい：LED 一つの発光強度が小さいため、測定光学系が小さくなり、測光距離の設定誤差などの影響を受けやすい。
- 分光分布が標準電球と違う：LED の分光分布は数十 nm 幅と狭く、標準電球と分光分布が大きく異なり測定誤差が大きくなる。分光分布が違う場合、色補正係数を求める必要があるが、分光分布が狭いため、受光器の分光応答度や分光分布の測定精度が要求される。
- 配光特性が強い：配光特性が大きく、測定の幾何条件の影響を受けやすく、そのため再現性が悪い。
- 大きさ・形状の種類豊富：大きさや形状がメーカーによって様々であり、また個体差も大きく、すべての LED に対応するのは困難である。
- 温度特性の影響が大きい：LED は温度により、発光波長、スペクトル強度、スペクトル分布、動作電圧等が大きく変わることが知られており、素子によっては安定性や再現性が悪い。
- 構造軸と光学的軸の不一致：LED の構造によって決定される構造軸と LED 配光パターンを中心方向である光学的軸の不一致のため測定軸の定義が曖昧または決定が難しい。
- 寿命の定義があいまい：LED は非常に長寿命であるといわれているが、白色 LED の場合、蛍光体の劣化のため 5000 hr で発光強度が 70% まで落ちる。このため照明光源として用いる場合、寿命の定義を決める必要がある。

上記の特徴のため、LED において光度を測定する時には、LED 側の基点位置を決めるのが難しく、また LED の光度を測定する方向軸の決め方が難しいなどの問題点がある。また輝度測定を行うときにも、場所によるムラが大きく、均一輝度面の特定が難しいなどの問題点があり、現在の LED の測光量としては一般に光度が用いられている。又、全光束は LED の光源効率を決める上で重要な値であり、測定法としては、配光法と積分球を使用する方法の 2 つがある。配光法は様々な LED に適用できる利点を持つが、高い測光技術を必要とすることや、測定に時間がかかるなどの問題があるため、積分球を用

いる方法が一般的である。しかしながら積分球を用いて測定する場合、LED の自己吸収や標準光源の選択・使用方法を、測定幾何条件など様々な点を考慮する必要がある。

3.3 LED 測光標準・標準化の国内外の動向

LED が様々な分野で広く使用されるようになり、またその重要性が増してきたため、LED に対する正確な測光技術が重要となってきている。そのため、現在 CIE、や各国の標準研究機関では LED 測光に関する研究が行われている^{17),19)}。以下、国内外における LED 測光標準及びその標準化の動向について述べる。

3.3.1 国際照明委員会(CIE)における LED 測光関連の活動

CIE においては 1994 年、第 2 部会で技術委員会 TC2-34：LED Measurements が組織されて以来、数々の活動が行われている。現在では 4 つの関連委員会ができており、特に TC2-46；CIE/ISO Standards on LED Intensity Measurements では、CIE/ISO 規格で LED 光度測光の標準化を検討している。また TC2-34 の活動成果として、1997 年に CIE の技術報告書：CIE-127：Measurement of LED が発行されている¹⁸⁾。この報告書は LED の光特性の中で重要な光度、全光束の測定法についてまとめられたものである。特にこの報告書においては、前節で述べた LED の光度測定の問題を解決するために、“Average LED Intensity；平均 LED 光度”という新たな考え（定義）を導入している。図 5 に“平均 LED 光度”測定方法の概念図を示す。この方法は LED の距離の基点を LED 先端部とし、また測定軸を LED の構造軸に合わせて測定する方式であり、LED 先端部から受光器（アパーチャー面積 100mm²）までの視野角により condition A (0.001sr) と condition B (0.01sr) に分けている。この技術報告書の内容、並びに“平均 LED 光度”は現在までのところ欧米を中心として広く普及しており、この測定条件に基づいた測定機および校正に適用する標準 LED が、国内外の測定機メーカーにより市販されるまでになっている。

3.3.2 国家標準研究所(NMI)における LED 測光技術の研究動向

現在、国家標準研究所(NMI)で最も、LED 測光標準の研究を行っているのはアメリカの国立標準研究所(NIST)である。NIST では現在、平均 LED 光度と全光束の校正サービスを開

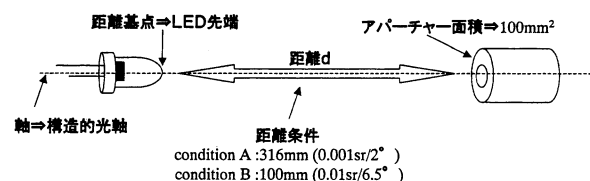


図 5 平均 LED 光度測定法

始しており、不確かさは平均 LED 光度と LED の全光束とも 1% - 3% ($k=2$) と報告している²⁰⁾。更に NIST は現在、標準 LED 供給に向けて LED の温度特性依存性などの研究を行っている。

NIST 以外の国家標準研究所では、ドイツの物理工学研究所 (PTB) が研究計画に LED 測光技術に関する研究を含めることを表明している。実際、ドイツの測定器メーカー：Instrument Systems では PTB により値のつけられた標準 LED (標準用に特別に開発された LED) を作成している²¹⁾。またイギリスの国立物理研究所 (NPL) でも、2001-2004 年の研究計画の中で LED の高精度測光技術に関する研究についても言及している²²⁾。主要な NMI で LED 測光標準に関する研究が行われていることから、LED 測光技術に関する研究はこれからますます拡大していくと考えられる。

3.3.3 国内における LED 測光標準化活動

日本国内においても以前から、LED の測光方法についての検討²³⁾⁻²⁵⁾ならびに JIS や EIJA 規格などで測光法が標準化^{26),27)}されてきたが、照明用白色 LED の登場により (社)電球工業会が中心となり、“照明用白色 LED 光源標準化委員会”が組織された¹⁹⁾。この委員会は照明用光源製品使用標準化分科会と測定標準化分科会からなり、前者は将来のデファクト・スタンダードに向けた関連技術の動向や現在の LED 照明利用の状況やそれに立脚した予測などの調査・研究活動を行っている。後者は CIE の国際標準化活動と関係して、LED および照明メーカー 7 社による国内巡回試験などの測定法標準化に向けての活動を行っている²⁸⁾。またこれに関連して松下電器産業 (株)照明社では LED の校正サービスを行っている。

また現在、大部分の LED が日本製であることや、また日本の青色 LED や白色 LED の製品技術が国際的にも高い位置にあることから、日本のこれから LED 測光標準化において占める役割は大きいと考えられる。

3.4 LED 測光標準化の検討点

以上のように、国内外で LED の標準化に関する研究が行われている。しかしながら CIE-127 などの技術報告書は、測定の再現性のみを考慮した方法になっているため、精密な測定法については言及していないため、以下に列挙するような点についての更なる検討が必要である。

- 平均 LED 光度の定義の問題：

CIE では平均 LED 光度という新しい考えを採用しているが、現在の光度の定義との違いを明確にする必要がある。一般的に測光量相互の間には簡単な関係が成立しており、基本量である光度から光束、照度を導くことが出来るが、平均 LED 光度ではこれらの関係について曖昧である。

- 色補正係数の問題：

$V(\lambda)$ 受光器を用いた測光では、測光器の相対分光応答度が $V(\lambda)$ に完全に一致しないので、標準電球と試験電球

の分光分布が違う場合、色補正係数をかける必要がある。色補正係数を求めるためには分光分布を正確に求める必要があるが、LED のような狭帯域のスペクトルの分光分布を正確に求めるのは一般に困難である。また色むらが大きい場合場所による分光分布の違いも大きい。このため分光分布測定の方法も検討する必要がある。

- LED 全光束測定における問題：

LED の全光束を求める方法としては積分球を用いる方法が現在 CIE などで推奨されているが、メーカーなどでは全光束以外に配光特性に関する情報も必要としている。また積分球測定では測定対象物の大きさも限定されてしまう。そのため LED 測光標準化を行うならば、配光測定を行い、標準 LED などに配光に関する情報を与え、提供する必要がある。

- 標準 LED の定義の問題：

NIST などの NMI では、CIE-127 の技術報告書に従って、標準 LED 供給に向けた研究を行っているが、この標準 LED の定義ならびに含むべき情報が曖昧である。標準 LED は装置校正用として使われるものと考えられ、配光測定、ピーク波長、半値幅、主波長、分光分布などの情報を含んでいる必要がある。これらの情報は分光測定から得られる情報であるため、分光測定の高精度化・標準化が必要である。加えて LED の温度特性や経時変化なども評価しておく必要がある。

- 白色 LED の評価方法の問題：

白色 LED の発光効率はその発光機構から紫外領域の LED の強度に大きく依存するため、紫外領域の放射測定の情報が必要である。また紫外領域の発光は人体に有害であるので生体安全性についての評価²⁹⁾も必要である。

以上により、LED 測光標準化に向けては、かなりの検討点があるように考えられる。

4. 分光測定に基づく新しい高精度測光方法の提案とその検討

2 節、3 節において現在の測光技術、並びに次世代光源に対する測光技術の現状と問題点について、調査・言及してきた。これらの調査から言えることは、これからの測光・放射標準の課題は大きく分けて 2 つあることがわかる。ひとつは、標準である光度などの基本単位の高度化である。もうひとつは応用標準である LED 等の多様な光へ対応である。この 2 つの課題を達成するためには、分光測定技術がひとつのキーアイテムになると考える。これは、光度測定を高精度化するためには $V(\lambda)$ フィルターを使わない方法が必要であることと、多種多様な分光分布を持つ光源の精密測定が必要であることに起因する。分光測定技術を用いて高精度測光を行う場合、分光光学系のある設定波長の分光応答度関数の絶対校正方法が大きな課題となる。一般に分光応答度関数を決定するためには波長可変な輝線光源 (波長可変レーザー) が必要である。

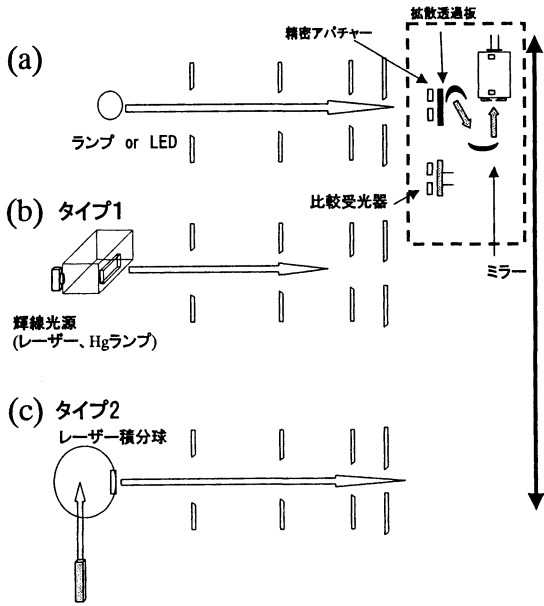


図6 分光光学系を用いた光度標準電球の光度絶対校正

表2 測定方法の比較表

測定方式	絶対検出器	校正用光源	被測定光源の分光分布
従来方式	$V(\lambda)$ 受光器	単色平行光発生装置	プランクの放射則分布のみ
Type1	分光光学系	レーザー, 輝線光源	複雑な分光分布にも対応
Type2	分光光学系	レーザー(最低2点)	プランクの放射則分布のみ

しかしながら、一般に波長可変レーザーは高価であり、また全波長領域の波長を用意することは困難である。そこでは本節では、波長可変レーザーを用いないで分光応答関数を決定する、2種類の分光測定に基づく新しい光度の具現方法を提案する。“Type1”はLEDなどのプランクの放射則からはずれた分布を持つ光源にも利用できる測定方法であり、“Type2”は光度測定の高精度化のための方法である。

分光光学系の構造(図6(a))ならびに、タイプごとに分光光学系に分光応答度を値付けする時のジオメトリー図(図6(b), 図6(c))を図6に示す。2つの方法とも基本的に同様な光学系を用いる。分光光学系はSi-PD, 分光器, 精密アパーチャ, 拡散透過板を含む光学系からなる。表2に現在の方式と2つの新しい光度具現方法の簡単な比較表を示す。

分光光学系を用いた絶対測定の研究例としてはNISTの行った金点の黒体炉の分光放射輝度を分光光学系を用いて測定し、金の定点温度を決定した研究がある³⁰⁾。本調査研究で提案をするType2はこの方法を測光量に当てはめたものである。

4.1 Type1: 全波長領域分光応答度近似タイプ

はじめにType1: 全波長領域分光応答度近似タイプについて述べる。これは極低温放射計にトレーサブルな高精度分光応答度標準を有する分光光学系(360-830nm)から、光度標準電球の分光分布を測定し、分光視感効率を数学的に演算するこ

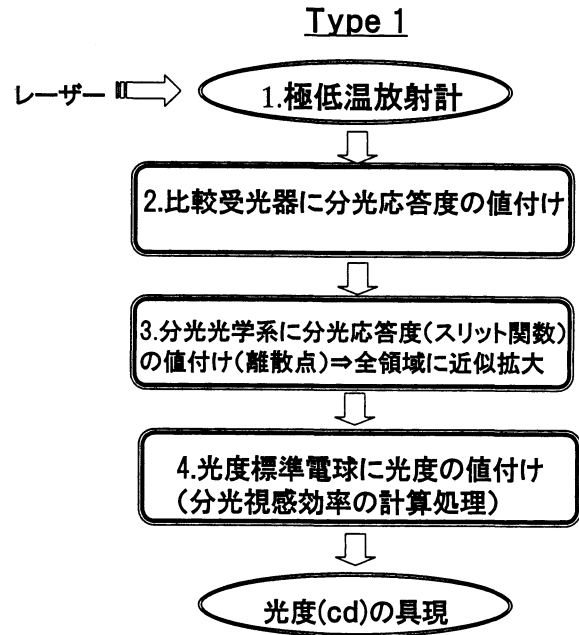


図7 分光光学系を用いた光度単位具現方式 (Type1)

とによる測光単位を導く方法である。この時、分光光学系の応答関数を近似的に可視波長全域で求めるため、分光分布がプランクの放射則から異なっている光源の測定や複雑なスペクトルにも適用ができる。このためLEDなどの次世代光源に関しても絶大な効果を発揮することが期待できる。図7にこの原理を用いて光度を具現化する場合の測定方式を示す。測定手順は、大きく4つに分けることができる。

1. 極低温放射計による放射束の絶対測定：
極低温放射計を用いてレーザーの絶対放射束 ϕ を決定する。
2. 比較受光器への分光応答度値付け：
放射束 ϕ の校正されたレーザー光路上に、極低温放射計の代わりに比較受光器を設置することにより、レーザー波長点 λ_i における比較受光器の分光応答度 $S'(\lambda_i)$ (A/W) を求める。そして離散的波長点でもとめた比較受光器の分光応答度 $S'(\lambda_i)$ をモデル関数によって、可視全波長における分光応答度 $S'(\lambda)$ (A/W) に拡大する。
3. 分光光学系に分光応答度の値付け：
比較受光器を用いて輝線光源発生装置 (レーザー光, 水銀ランプ, ネオンランプなど) から出射される輝線光の強度 $E'(\lambda_i)$ を測定する(図6(b)参照)。つぎに同様な光を用いて、分光光学系の分光応答度を評価する(図6(b)参照)。この時、分光光学系の分光器の設定波長 Λ における応答 $R'(\Lambda)$ は一般的に次式で表現できる^{31),32)}。

$$R'(\Lambda) = \int_0^\infty \eta(\lambda) s(\lambda) g(\lambda, \Lambda) E'(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

ここで $\eta(\lambda)$ は分光光学系の分光効率, $s(\lambda)$ は受光器の分光応答度 (A/W), $g(\lambda, \Lambda)$ は分光器の波長選択特性を示すための関数 (スリット関数) であり, これら 3 つを合わせたものが分光光学系の応答度関数 $Z(\lambda, \Lambda)$ (A/W) となる. この分光光学系の応答度関数を評価することが分光光学系の絶対校正である. この分光光学系の応答度関数を正確に求めるためには, 一般に分光器の設定波長を固定して, 入射の波長を変化させる必要 (直接法³¹⁾⁻³³⁾ があるが, これには波長可変レーザーを用いる必要があるため, 本調査研究では入射波長を固定し分光器の設定波長を変化させる方法 (間接法³¹⁾⁻³³⁾ で説明を行う. 輝線 $E'(\lambda_i)$ のようなシャープなスペクトルの場合,

$$R'(\Lambda_m) = Z(\lambda_i, \Lambda_m) E(\lambda_i) \quad (5)$$

となり, 分光光学系の応答度の形状 (分光器の設定波長 (Λ_m) , 入射光の波長 (λ_i) における) がそのまま積分されずに, 応答として現れる. $E(\lambda_i)$ の絶対量を別の測定により求めることにより, $Z(\lambda_i, \Lambda_m)$ を求めることができる. そして, 設定波長 Λ にわたる一連の応答の値を分光器の波長掃引により求めれば, $Z(\lambda, \Lambda)$ の関数を得ることができる. ここで, 入射波長 λ_i を固定し設定波長 Λ を掃引することによって求めた分光光学系の応答度関数 $Z(\lambda_i, \Lambda)$ と, 設定波長を Λ_m に固定し入射波長 λ を変化させて求めた分光光学系の応答度関数 $Z(\lambda, \Lambda_m)$ を同じと仮定する. この仮定により, 分光光学系の設定波長 Λ_m における分光光学系の応答度関数 $Z(\lambda, \Lambda_m)$ を求めることが出来る. 上記の方法を全ての輝線スペクトルについて行い, 出来るだけたくさんの分光器の設定波長 Λ_m における分光光学系の応答度関数 $Z(\lambda, \Lambda_m)$ (A/W) を求める. 求めることの出来ない波長の分光光学系の応答度関数は, 前後の波長における分光光学系の応答度関数を使いモデル計算を行い, 可視波長領域に拡大する. 精密アパーチャーの面積で割ることにより, 分光光学系の分光放射照度応答度関数 $Z_v(\lambda, \Lambda_m)$ ($A \cdot m^2/W$) を得る.

4. 光度標準電球への光度の値付け:

次に分光光学系の応答度関数が絶対校正された分光光学系を用いて光度標準電球の分光放射照度を測定する. 得られる設定波長 Λ_m における応答 $R(\Lambda_m)$ は, 光度標準電球の分光放射照度を $P(\lambda)$ とすると

$$R(\Lambda_m) = \int_0^\infty P(\lambda) Z_v(\lambda, \Lambda_m) d\lambda \quad (6)$$

となる. ここで分光光学系で行う測定は実際には分光器の設定波長 Λ の飛び飛びの値 Λ_m ごとの値であるため, 全領域 (360nm-830nm) での応答曲線は

$$\sum_{m=360nm}^{830} R(\Lambda_m) \Delta\Lambda = \sum_{m=360nm}^{830} \int_0^\infty P(\lambda) Z_v(\lambda, \Lambda_m) d\lambda \Delta\Lambda_m$$

と積分表示から区分求積表示に近似できる. この時の区

分求積範囲は360-830nmとしているが, 実際には迷光の影響などを考え区分求積範囲の拡大または迷光除去用のフィルターを入れる必要がある. また分光光学系の分光放射照度応答度関数も区分求積表示になるため式(7)の右辺は

$$\sum_{m=360nm}^{830} R(\Lambda_m) \Delta\Lambda = \sum_{m=360nm}^{830} \sum_{i=360nm}^{830} P(\lambda_i) Z_v(\lambda_i, \Lambda_m) \Delta\lambda \Delta\Lambda \quad (7)$$

となる. 式(7)の右辺は $i \times m$ の行列 Z_{im} になっている. よって式(7)から行列 Z_{im} の逆行列 $Z^{-1}(\lambda_i, \Lambda_m)$ (Z_{im} は正則行列とする.) を計算することによって³⁴⁾, 光度標準電球の分光放射照度は

$$\sum_{m=360nm}^{830} P(\lambda_i) = 1/\Delta\lambda \sum_{m=360nm}^{830} \sum_{i=360nm}^{830} Z_v^{-1}(\lambda_i, \Lambda_m) R(\Lambda_m) \quad (8)$$

となる. そして, (8) で得られた値に対して分光視感効率: $V(\lambda)$ を数学的に演算することにより, 照度が求められる (式(1)). つぎに光度標準電球と分光光学系との間の測定距離 l (m) を正確に測ることにより, 式(2)の逆2乗の法則を用いて, 光度標準電球の光度 I (cd) が求められる. しかしながら実際問題として, 式(7)の右辺の逆行列 $Z^{-1}(\lambda_i, \Lambda_m)$ を解くことは非常に困難であり, 解が正しく求められない可能性がある. そこで近似として, 光度標準電球のように可視域で比較的な滑らかな分布を持つならば, 式(7)は

$$\sum_{m=360nm}^{830} R(\Lambda_m) \Delta\Lambda = \sum_{m=360nm}^{830} \bar{P}(\Lambda_m) \sum_{i=360nm}^{830} Z_v(\lambda_i, \Lambda_m) \Delta\lambda \Delta\Lambda \quad (9)$$

と近似できる. ここで $\bar{P}(\Lambda_m)$ は分光光学系の設定波長 Λ_m で観測される平均的広がり $\Lambda_m \pm \Delta\Lambda_m$ をもつ分光放射照度であり,

$$\sum_{m=360nm}^{830} \bar{P}(\Lambda_m) \Delta\Lambda = \frac{\sum_{m=360}^{830} R(\Lambda_m) \Delta\Lambda}{\sum_{i=360}^{830} Z_v(\lambda_i, \Lambda_m) \Delta\lambda \Delta\Lambda} \quad (10)$$

上記の式(10)のように分光光学系の設定波長 Λ_m における分光応答度関数の総応答度で応答値 $R(\Lambda_m)$ を割ることにより求めることが出来る. そして以降, 前述した手順と同様に光度標準電球の光度 I (cd) が求められる. この近似計算による測定誤差は光度標準電球のような比較的な滑らかな分布を持つ場合小さい.

4.2 Type2: 光度標準電球の分光分布をプランクの放射則近似タイプ

つぎに Type2: 光度標準電球の分光分布をプランクの放射則近似タイプについて述べる. この方法は極低温放射計にト

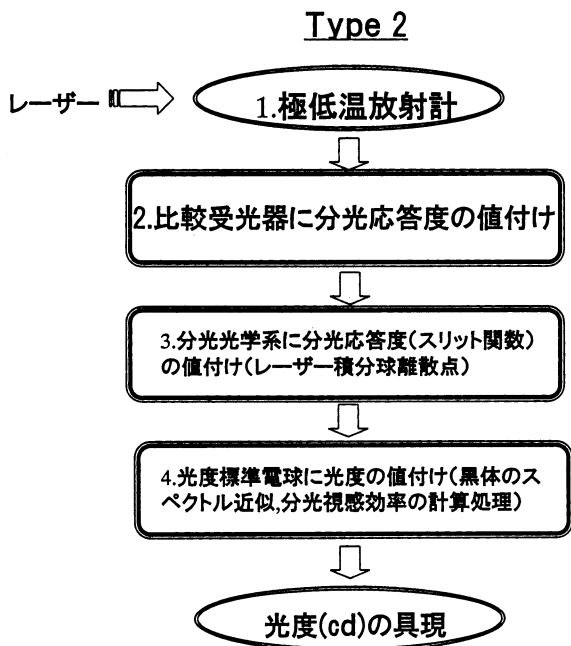


図8 分光光学系を用いた光度単位具現方式 (Type2)

レーザ可能な高精度分光応答度標準 (レーザー波長点) を有する分光光学系から、直接、光度標準電球のレーザー波長点での放射照度を測定し、光度標準電球の分光分布がプランクの放射則に従っていることを仮定することにより分光分布を求め、分光視感効率: $V(\lambda)$ を数学的に演算することにより光度を導く方法である。従来の方法、ならびに Type1 に比べて大幅に測定手順を省略でき、光度測定的大幅な高精度化が期待できる。図8にこの原理に基づいて光度を具現化する場合の測定方式を示す。測定手順は、大きく4つに分けることができる。

1. 極低温放射計による放射束の絶対測定:
極低温放射計を用いてレーザーの絶対放射束 ϕ を決定
2. 比較受光器への分光応答度の値付け:
放射束 ϕ の校正されたレーザー光路上に、極低温放射計の代わりに比較受光器を設置することにより、レーザー波長点 λ_i における比較受光器の分光応答度 $S'(\lambda_i)$ (A/W) を求める。そして離散的波長点で求めた比較受光器の分光応答度 $S'(\lambda_i)$ をモデル関数によって、可視全波長における分光応答度 $S'(\lambda)$ (A/W) に拡大する。
3. 分光光学系への分光応答度の値付け:
精密アパーチャーのついている比較受光器でレーザー積分球からの均一光源の放射照度 $E'(\lambda_i)$ を測定する。つぎに同様の均一光源を用いて、分光光学系の分光応答度を評価する (図6(c)参照)。この時、分光器の設定波長 Λ における応答 $R'(\Lambda)$ は一般的に式(4)で表現できる。レーザー $E'(\lambda_i)$ のようなシャープなスペクトルの場合、式(5)と同様に

$$R'(\Lambda_m) = Z(\lambda_i, \Lambda_m) \cdot E'(\lambda_i) \quad (11)$$

となり、分光光学系の応答度の形状 (分光器の設定波長 (Λ_m) 、入射光の波長 (λ_i) における) がそのまま積分されずに、応答として現れる。Type1の輝線の場合と同じように、入射波長 λ_i を固定し設定波長 Λ を掃引することによって求めた分光光学系の分光放射照度応答度関数 $Z_v(\lambda_i, \Lambda)$ と、設定波長を Λ_m に固定し入射波長 λ を変化させて求めた分光光学系の分光放射照度応答度関数 $Z_v(\lambda, \Lambda_m)$ を同じと仮定する。この仮定により、分光光学系の設定波長 Λ_m における分光光学系の分光放射照度応答度関数 $Z_v(\lambda, \Lambda_m)$ を求める。上記の方法をいくつかのレーザー波長点について行う。この時、レーザー波長点は最低2点必要であり、短波長領域、長波長領域で測定するのが望ましい。

4. 光度標準電球への光度の値付け:

次に分光光学系の分光放射照度応答度関数が絶対校正された分光光学系を用いて光度標準電球の分光放射照度を測定する。この時得られる設定波長 Λ_m における応答 $R(\Lambda_m)$ は、光度標準電球の分光放射照度 $P(\lambda)$ とすると式(6)で表せる。ここで光度標準電球の分光放射照度 $P(\lambda)$ はプランクの放射則と一致していると仮定する (可視領域) と、プランクの放射則の分光放射照度は、

$$P(\lambda) = \frac{A/\lambda^5}{(e^{c/\lambda T} - 1)} \quad (12)$$

で表せるので (ここで A は定数、 T は分布温度、 c は放射の第2定数)、これにより、設定波長 Λ_m における応答 $R(\Lambda_m)$ は、

$$R(\Lambda_m) = \int_0^\infty \frac{A/\lambda^5}{(e^{c/\lambda T} - 1)} Z_v(\lambda, \Lambda_m) d\lambda \quad (13)$$

となる。分光光学系で行う測定は実際には分光器の設定波長 Λ の飛び飛びの値 Λ_m ごとの値であるため、式(13)は式(7)で示されるような区分球積の形で示される。

$$R(\Lambda_m) = \sum_{m=360nm}^{830} \frac{A/\lambda_i^5}{(e^{c/\lambda_i T} - 1)} Z_v(\lambda_i, \Lambda_m) \Delta\lambda_i \quad (14)$$

最低で2つのレーザー波長点における値があれば式(14)は数学的に解くことができ、光度標準電球の定数 A と、分布温度 T を求めることが出来る。これにより光度標準電球の分光放射照度 $P(\lambda)$ を求めることができる。これに分光視感効率を数学的に演算することにより照度が求められる (式(1))。最後に光度標準電球と分光光学系との間の測定距離 l (m) を正確に測ることにより、式(2)の逆2乗の法則を用いて、光度標準電球の光度 I (cd) が求められる。

5. 今後の方針

これまで述べてきた、分光光学系に基づく高精度測光方法の原理とその測定手順の検討結果、及び LED 等の次世代光源に対する測光技術の現状の現状調査の結果から、今後の課題並びに具体的な研究展開として、以下の内容を主に考慮しながら進めていく必要がある。

これまで述べたことは、文献などによる予想でしかない。そこで分光光学系を予備的に作成し、実際の不確かさ評価を行いながら改善し、問題点などを明らかにしていく必要がある。特に分光光学系に分光応答度を値付けする時の方法（直接法と間接法）の評価については十分に行う必要があると考える。この時 2 つの Type を提案したが、まずレーザー波長数点のみの分光応答度値付けに関する研究を行う。具体的にはまず分光光学系の構築とレーザー積分球の構築を行う必要がある。分光光学系で検討しなければいけない点としては分光器のスペック、集光光学系、光学台の移動システムなどの実際のスペック検討である。またレーザー積分球では積分球の設計やレーザーの強度安定化技術などが考えられる。上記の検討を行い実際の構築を行い、実際に分光応答度の値付け評価を行う。

6. まとめ

本調査研究では、SI 基本単位である光度単位と関連する測光量具現化方法に関して調査し、また LED 等の次世代光源に対する測光技術の現状と問題点に関して調査した。現在の産総研では極低温放射計の絶対応答度を基準とした $V(\lambda)$ 受光器により、光度・光束単位のトレーサビリティが構築されている。しかしながら今回の調査結果から、現在の方式ではこれ以上の高度化が非常に困難であることがわかる。更に次世代光源に対する測光技術の現状を調査する中で産業界では LED の標準化が強く望まれていることが明らかとなった。これらの調査結果により、現在の光放射・測光標準の課題は、光度などの基本単位の高度化と測光応用である LED 等の多様な光源への対応であることが示された。

この 2 つの課題を達成するためには、分光測定技術がひとつのキーアイテムになると考えられ、分光測定に基づく 2 つの新しい光度の具現方法を提案した。“Type1”は LED などのプランクの放射則からはずれた分布を持つ光源にも利用できる測定方法であり、“Type2”は光度測定の高精度化のための方法である。各方法とも分光光学系の分光応答度値付け高精度化への鍵だと考えられる。このため第 5 節で述べたように、分光光学系の予備構築を行い実際の不確かさ評価を行いながら問題点などを明らかにしていく必要がある。また本研究調査では波長可変レーザーを用いて行うことを想定していないが、高度化を目指すならば、検討しなければいけない課題（手法）である。

7. 謝 辞

本調査研究を行うにあたり、ご指導頂いた光放射標準研究室の齊藤一朗室長に厚く御礼申し上げます。また、光放射標準研究室員の皆様には、お忙しい中ことあるごとに有益なご助言を頂き、大変お世話になりましたことを心より感謝します。

参考文献

- 1) 社団法人照明学会編、光の計測マニュアル(日本理工出版会、1990)17-18.
- 2) 9e CGPM Compete Rendu, 54 (1948).
- 3) BIPM, Comptes rendus des sèances de la 16e Confèrence Gènèrale des Poids et Mesures, Paris, October, 1979.
- 4) 齊藤一朗; 測光・放射標準, 光学 36-3 (2003) 181-188.
- 5) CIE Compte Rendu, 67 (1924).
- 6) CIPM, Comitè Consultatif de Phtomsètrie et Radiomètric 10e Session (1982)
- 7) 国際照明用語集第 4 版(CIE/JCIE の出版) 01-22
- 8) 社団法人照明学会編、光の計測マニュアル(日本理工出版会、1990)10-16.
- 9) 齊藤一朗; トレーサブルな計測と国際比較 第 4 回 測光・放射測定, 計測と制御 40-10 (2001) 764-769.
- 10) G. Sauter, et al: PTB-Opt-62 (1999).
- 11) The Promise of Solid State Lighting for General Illumination: LEDs and OLEDs, co-sponsored by Department of Energy (BTS) and the Optoelectronics Industry Development Association (2002).
- 12) 田口常正; 白色 LED による 21 世紀のあかり, 照明学会誌 85-7 (2001) 496-501.
- 13) S. Nakamura and G. Fasol: The blue laser diodes (Springer 1997).
- 14) 向井孝志, 中村修二; 白色 LED および紫外 LED, 応用物理 68-2 (1999) 152-155.
- 15) 西郷健彦; LED 応用の最新動向, 電球工業会報 No455 (2003) 14-25.
- 16) E. Fred Schubert; Light-Emitting Diodes, (Cambridge University Press, 2003).
- 17) 河本康太郎; LED 光源測光における諸問題, 照明学会 85-4 (2002) 280-283.
- 18) CIE Technical Report Measurements of LEDs, CIE127 (1997).
- 19) 廣田泰輔; 照明用白色光源とその標準化, 照明学会誌 85-4 (2001) 270-283.
- 20) Miller. CC, Heimer, T, Zong, Y and Ohno. Y; Devlopement of LED Photometric Standards at NIST, Pceedings of 25th Session of the CIE (2003) D2-108-D2-111.

- 21) T. Nägele, R. Distl; Handbook of LED Metrology (Instrument Systems 1999).
- 22) Optical Radiation Metrology Program 2001-2004 (NPL).
- 23) 齊藤一朗, 三嶋泰雄; 発光ダイオードの測定方法(その1)-光度, 光束測定, 照明学会誌 **61**-2 (1977) 78-86.
- 24) 齊藤一朗, 三嶋泰雄; 発光ダイオードの測定方法(その2)-輝度測定, 照明学会誌 **61**-4 (1977) 207-209.
- 25) 齊藤一朗, 三嶋泰雄; 発光ダイオードの測定方法(その3)-赤外発光ダイオードの放射束の測定, 照明学会誌 **61**-5 (1977) 251-254.
- 26) EIJA 規格: EIJA ED-4911, 発光ダイオードの測定方法 (1993).
- 27) JIS C 5951, 光伝送用発光ダイオードの測定方法(表示用) (1989).
- 28) Kenichi Suzuki, et al; International Round Robin LED Photometry Test, Poceedings of 25th Session of the CIE (2003) D2-104-D2-107.
- 29) David H. Sliney; Direct Viewing of LEDs and the Photobiological Safety Standard, Poceedings of 25th Session of the CIE (2003) D6-48-D6-51.
- 30) Klaus D. Mielenz, Rober D. Saunders, Jr. and John B. Shumaker; Spectroradiometric Determination of the Freezing Temperature of Gold, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol **95** (1990) 49-67.
- 31) 社団法人照明学会編, 光の計測マニュアル(日本理工出版会, 1990)第7章.
- 32) Fred E. Nicodemus; Self-Study Manual on Optical Radiation Measurements, Chapter 7, NBS Technical Note 910-4, U. S. Government Printing Office, Washington DC (1979).
- 33) Robert D. Saunders, John B. Shumakes; Apparatus function of a prism-grating double monochromator, Applied Optics **25**-20 (1986) 3710-3714.
- 34) Fred E. Nicodemus; Self-Study Manual on Optical Radiation Measurements, Chapter 8, NBS Technical Note 910-4, U. S. Government Printing Office, Washington DC (1979).

