

安全な動作のために必要となる、 正確な測定基準に基づく UV LED光源のキャリブレーション

バスティアン・エダー、ゼナン・コンヨージック

放射束に基づくUV-LEDのキャリブレーションの概念について説明し、重要性を増すUVスペクトル領域における測定基準を作成することのメリットを示す。

紫外線(UV)照射は、100～400nmの広い波長範囲をカバーし、ISO 21348規格に基づいて、UV-A、UV-B、UV-Cという主に3つの領域に分類される。315～400nmのUV-A領域の典型的な用途は、UV硬化またはUVインク印刷(<http://bit.ly/2LWDwy3>)である。280～315nmのUV-B領域の光源は主に、光線療法としての医療皮膚治療に用いられる。100～280nmのUV-C領域は、空気や水の殺菌に適用可能で、新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)などの病原体対策として、現在大いに注目を集めている。

照明業界では、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)のパンデミックが始まって以来、UV-C照射源の需要が高まっている(<https://bit.ly/3kq9wuR>)。255～265nmのUV-C照射は、新型コロナウイルスなどの微生物のDNAまたはRNAを不活性化させ、その複製と、他の細胞を活動的に感染させる能力を抑制するための非常に効果的な方法であるとして研究されている。調査的研究は続行中だが、一部の組織からは有望なデータが最近発表されている(<https://bit.ly/31u47Kv>)。

その特定の用途に合わせるために、UV照射源はすべて、その放射束とスペクトル分布に関して非常に正確に特

性評価する必要がある。これには、透光補正付きの高精度な分光放射計、ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)でコーティングされた積分球、UV波長領域A/B/Cのキャリブレーション基準からなる、特に感度が高く信頼性の高いUV測定装置が必要である。UV LEDのキャリブレーション基準の最も重要な機能は、UV積分球の放射束のモニタリングと特性評価である。これまでのところ、ドイツ物理工学研究所(Physikalisch-Technische Bundesanstalt、PTB:ドイツの国立計量機関)や、米国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technol-

ogy: NIST)といった、確立された国家標準機関からは、UV-BとUV-Cのスペクトル領域に対するそうした参照基準は提供されていない。

そこで独インストゥルメント・システムズ社は、独自のUVキャリブレーション基準を作成するための研究に着手した。すなわち、Advanced Calibration StandardsのACS-570-UVシリーズである(図1)。これらは、国立計量機関にトレース可能なUV A/B/C領域の放射束キャリブレーションを含む、温度安定化したUV-LEDキャリブレーション基準である。UV-ACSの放射束に対するトレーサビリティは、分光計結合光学系の放射照度に対する正確なキャリブレーションと、ゴニオフォトメーターによる統合的な測定によって実現されている。

キャリブレーションチェーン

高精度なスペクトル特性評価とキャリブレーションを行うには、図2の上列に示す、定められたキャリブレーションチェーン(青色)を適用する必要がある。各種国家計量標準機関(National Metrology Institute: NMI)は、国際単位系(SI)の国家標準を定めている。ここでは、カンデラや光出力の定義がそれに相当する。各国家機関の標準を定期的に比較することで、世界標準に対する一般的な品質チェックが可能である。NMIは、関心のある企業や機関に対して、キャリブレーション済みの参



図1 Advanced Calibration Standard (ACS)シリーズは、NMIにトレース可能なUV A/B/C領域における放射束キャリブレーションを用いて開発されている(画像と図はすべて、インストゥルメント・システムズ社提供)。

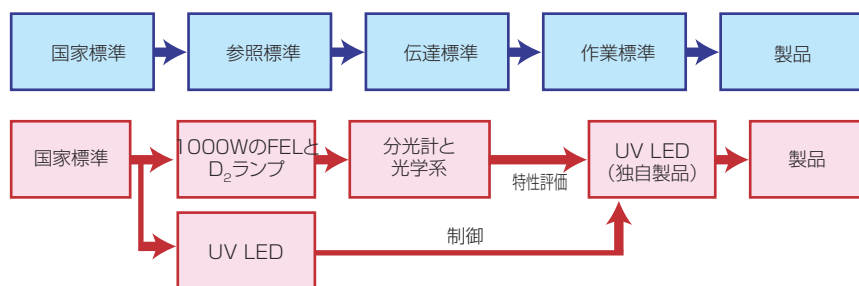


図2 NMI(青色)とインストゥルメント・システムズ社(赤色)のキャリブレーションチェーン。

照標準を作成している。これらの参照標準を基に、インストゥルメント・システムズ社などの企業は、キャリブレーション済みの伝達標準を作成する。伝達標準は、他の光源の測定や特性評価に用いられ、それがいわゆる作業標準となる。作業標準は、測定システムの工場キャリブレーションに用いられる。

図2の下列(赤色)は、インストゥルメント・システムズ社の特性評価チェーンである。NMI(PTBなど)は、キャリブレーション済みの1000WのFELハロゲンランプ、重水素(D₂)ランプ、UV LEDを、インストゥルメント・システムズ社に提供する。すべての標準は、定められた距離における放射照度E(W/m²)に基づいてキャリブレーションされる。FELとD₂ランプによって、分光放射計とそれに接続された光学系を、分光的かつ絶対的にキャリブレーションすることにより、伝達標準として定義することができる。

伝達標準に基づいて、他の光源(UV-ACSなど)を特性評価し、新しい作業標準として設定することができる。PTBの3つめのキャリブレーション済み放射標準(UV LED)は、制御ユニットとして用いられる。このダブル制御体系により、自社製品の品質管理と特性評価プロセスにこの標準を利用する顧客に対し、最大限の精度を保証する。

高精度測定に関する考察

通常は、異なる波長と範囲における複数の(作業)標準が提供される。適用光源の多くは、製造時の制御測定のための可視光光源である。しかし今注目されているのは、標準ピーク波長が280nm(UV-C)、305nm(UV-B)、365nm(UVA)のUV LED標準の特性評価である(図3)。任意の種類のカリブレーションに対し、光源の特性評価では、次の要件を満たすことが不可欠である。

- ・波長ドリフトが小さいこと
- ・出力ドリフトが小さいこと
- ・機械的インタフェースが安定していること
- ・環境的負荷に対して堅牢であること

複数の用途に対して光源の品質を保証するには、社内認定試験(長期的な光学特性評価、熱、湿度、機械的試験など)が必要である。正確で再現可能な結果を得るには、光源だけでなく、計量装置や周辺装置もこれらの要件を満たす必要がある。例えば、UV強化された分光放射計は、UV領域の正確なスペクトルパワー測定に必須である。

迷光補正は、分光放射計の測定の不確かさを最小限に抑えるために必要である。これは、さまざまな波長で狭い(1nm未満)スペクトル線を放射する、チューナブル光源で実現することがで

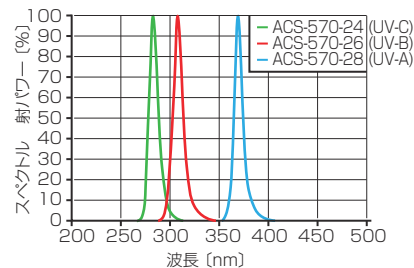


図3 ACSシリーズにおけるUV LEDキャリブレーション基準の標準スペクトル。半値全幅(full width at half maximum: FWHM)は約±3nm。

きる。UV強化された分光放射計に対しては、光源の出力波長を210nm～850nmの範囲でステップ単位でチューニングし、分光放射計でそれを測定する。これにより、マルチオーダーまたは内部散乱光を検出して、数値補正することができる。

高精度測定のための他の装置としては、光学結合ユニットがある。UV強化された光ファイバ束に接続された特殊な拡散素子が、UV用途に対して用いられる。拡散素子は、検出における均質性を保証し、ファイバ束は、柔軟な取り扱いと高出力スループットを可能にする。ただし、このユニットは、放射束(W)ではなく放射照度(W/m²)によって特性評価される。その測定「スポット」が、限られた寸法の拡散素子によって定義されるためである。

UVの放射束の測定

積分球を使用して、光の全出力パワー、すなわちワット単位の放射束を測定するというのが、一般的な方法である。積分球の内壁には、反射率を高くするために(0.95以上)、硫酸バリウム(BaSO₄)またはPTFEが使用される。残念ながら、どちらの材料もUV領域における問題を抱えている。BaSO₄の反射率は、波長が短いほど低く、積分球のスループットを低下させる。

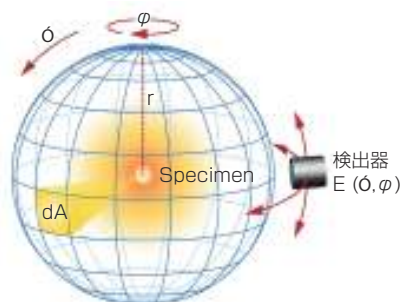


図4 ゴニオフォトメーターを使用して、 ϕ と θ の両方の角度で回転させることにより、LED光源の周囲に仮想的な球を作成する。

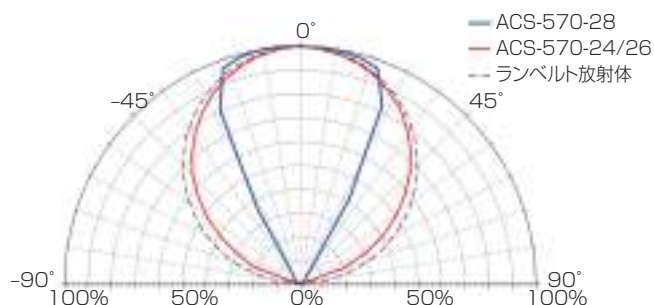


図5 3つのUV LEDキャリブレーション基準の放射パターンとランベルト放射体との比較。

PTFEの反射率は0.9以上だが、蛍光性がスループットに影響を与える。多くの機関や企業によって、蛍光性を最小限に抑えるための複数の取り組みが行われてきたが、持続的な成功は得られていない。

そこで、UV LEDの全体出力を測定するための別の方法を見つける必要がある。本稿で提案する方法は、ゴニオフォトメトリックなスペクトル測定に基づいている。ゴニオフォトメーターを使用して、図4に示すようにLED光源の周囲に仮想的な積分球を作成することができる。 θ ($0, \pi$)と ϕ ($-\pi/2, +\pi/2$)の2つの角度で、ターゲット(光源)をステップ単位で回転させる。分光放射計と光学系で構成される測定システムにより、特定の角度と距離における放射照度 $E(r_0, \phi, \theta)$ (単位: W/m^2)を測定する。距離は既知であるため、各角度における放射照度の測定値を数値積分することにより、光源の総出力パワーが得られる。ゴニオフォトメトリック測定のもう1つのメリットは、光源の放射角度も特性評価できることである(図5)。

ちなみに、ゴニオフォトメトリック測定は、積分球と比べて各光源に要する時間が長い。そのため、光学特性の長期的安定性を光源の基本要件に盛り込んだ(12時間で0.2%未満、100時間で1%未満)。

このシステムの信頼性の重要な側面は、 $E(r_0, \phi=0, \theta=0)$ における制御ポイントである。新しいUV LEDを特性評価する前に、PTBの標準UV LEDを制御ユニットとして使用することができる。このポイントの放射値は正確にわかっており、大きくずれている場合は、伝達標準の誤ったキャリブレーションや、ゴニオフォトメーター設定の失敗につながる。そこで、別のキャリブレーション基準によるダブルチェックが行われる。

3つのピーク波長に対して不確かさの総量を計算し、測定不確かさの値は以下のとおりとなった($k=2$)。

- ・UV-A (365nm) :2.0%
- ・UV-B (305nm) :3.5%
- ・UV-C (280nm) :4.5%

結論

標準を使用する複数の用途に対し、事前に測定デバイスの品質チェックを行い、安定した光源を使用して、複数の光源と制御測定を組み合わせることが必要である。本稿で紹介したACS UV基準の特性評価には、複数の高精度なステップが組み合わされている。

著者紹介

バスティアン・エダー博士(BASTIAN EDER)は、テストと計測を専門とする独インストゥルメント・システムズ社(Instrument Systems)の計測プロジェクトマネージャー、ゼナン・コンヨージック博士(DR. ĐENAN KONJHODŽIĆ)は、同社プロジェクトマネージャー。

URL: <https://www.instrumentsystems.com>

- ・すべての測定は、国家標準にトレース可能
- ・光源そのものは、キャリブレーションの長期的持続性を確保するために、光学特性、機械的試験、温度安定性に最大限の要件を課して製造されている
- ・スペクトル測定設定(UV分光計、光学結合ユニット、UVファイバ)は、蛍光性と迷光の影響を最小限に抑えることを目的に選定及び特性評価されている
- ・機械的設定(ゴニオメーター)は、試験対象デバイスの全体出力の特性だけでなく、角度特性の評価も可能
- ・個別にキャリブレーションした光源(どちらも国家標準にトレース可能な装置を使用)によるダブルチェックにより、最大限の信頼性と最小限の不確かさを実現

UV-ACSの測定不確かさは非常に低く($k=2$)、計量的に問題のない可視領域と同程度に低いため、UV-A、UV-B、UV-Cどちらの領域の放射束キャリブレーションに対する信頼できるリソースである。