

手法の最適化による、高精度なLEDカラービニングの達成

マシアス・ホー

ビニング(ランク分け)はLEDの製造に欠かせない工程である。本稿では、ビニング処理の精度を改善するための手法について説明する。高精度なビニング処理は、安定した色と明るさを示すSSL製品の開発につながる可能性がある。

高度な用途向けのLEDは、測色および測光仕様が厳密に定められたランクに分類されて販売されている。LED照明(SSL:solid state lighting)製品の開発者は、ビニング工程によるLEDの仕様定義を基に、安定した色と明るさ(全光束)を持つランプや照明器具を提供している。ビニングはコストと時間のかかる工程だが、LEDメーカーにとっては必須の処理である。本稿では、最適な分類につながるビニング手法を紹介する。

LED、ひいてはLED照明製品で必要な品質を達成するには、製造工程における正確で高精度な測定と分類が、絶対的に不可欠である。独インスツルメント・システムズ社(Instrument Systems <http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/led/index.html>)は、計測器の改良と並行して手法の最適化について詳細な調査を実施し、LED製造のビニング精度を改善するためのLEDメーカー向けの指針をまとめた。以下では特に、LEDにおける急峻な変動と緩やかなドリフトの影響を抑える方法について説明する。

測定の同等性と再現性

LED(または、一般的には被試験デバイス[DUT: device under test])の光学特性は、製造工程において、ハンドラと呼ばれる仕分けシステムに組み込まれ

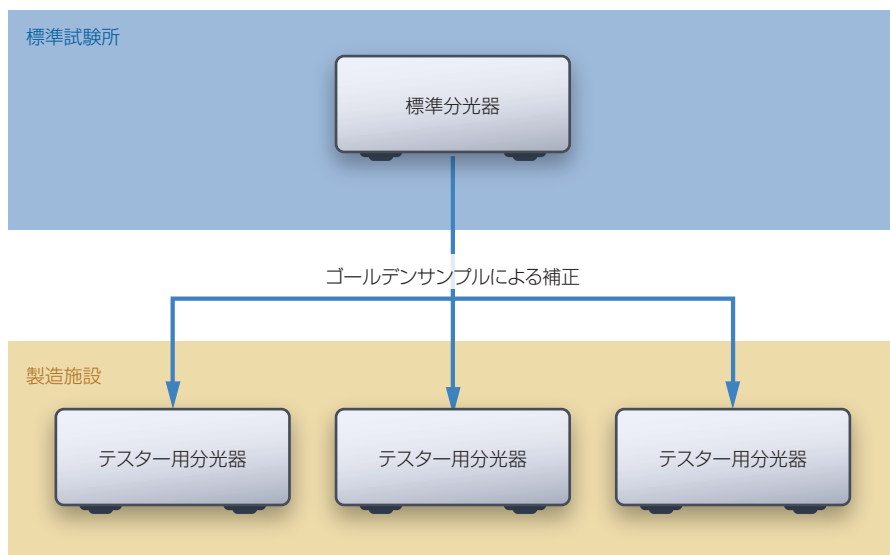


図1 LED製造試験用の光学測定システムは初期校正に加えて、ゴールデンサンプルと呼ばれる基準LEDを用いた、標準試験所で定められた基準値への調整を定期的に行うことで、補正をする。

た電気・光学テスターを用いて判定される。光学測定値の微調整は、ゴールデンサンプルと呼ばれる1つ以上の標準光源を用いて行われる。このような標準光源は、標準試験所において、正確かつ高精度に値付けされたものである。

ビニングは、次の原則に従って行われる。DUTは、あるランクに割り当てられ、その後の販売に向けて同一ランクに仕分けられる。各テスターは、標準試験所への次の補正が行われるまで、適切なビニング仕様を維持できるだけの安定性を備えている必要がある。つまり、統計的および系統的な測定誤差は十分に低くなければならない。製造ラインにおけるテスターはすべて、

同一また同等の試験所基準値に沿う必要がある(図1)。複数の製造サイトが存在する場合は、試験所基準値に基づき、互いに整合させ、必要に応じて調整を加えなければならない。

複数の製造サイトにおいてカラービニング結果の同等性を維持することは、高度なスキルを要する課題であり、包括的な計量学を適用することによって達成できる。どのような同等性を達成するにも、標準試験所における非常に正確で高精度な光学測定が、その基本要件であり、LEDの試験所測定に対する確立された手順に従うことによって、その保証が得られる。しかし、製造ラインにおける光学的な試験や測定

の核心的な問題について、真の解決策を示す文献は存在しない。具体的には、次回の補正までの期間、次回の校正までの期間、そして製造サイト内で、ビンングのための再現性のある測定値をいかにして取得するかという問題である。この問題は、急峻な変動や緩やかなドリフトをどうすれば防ぐことができるか、また、一般的に適用される補正関数に対する適切な境界(しきい値)はどこかという問題につながる。

一般的な値変動の要因を、理論的および実験的アプローチに基づいて分析し、前述の課題の対策を定義した。その結果を、LED製造の手法と装置に関する指針としてまとめた。これに従うことで、個々のランク内と、順次にまたは並行して生成されるランク間の同等性を、大幅に改善することができる。

ビンング精度の改善

つまるところ、測定精度が低く不正確であれば、DUTは誤ったランクに仕分けられることになる。今回の調査では、技術と手法の根本原因に関する結論を導き出すための最初のステップとして、図2に示すように、問題を現象に応じて3つのランクに分類した。

A. 試験所基準値からの初期平均偏差。測定値が値からずれる理由は多数存在し、個々の要因がどのように寄与するかは一般的に不明である。そのため、経験に基づく「補正」が偏差に加えられることになり、測定の不確かさの度合いが増すことは避けられない。LED製造の実際の設定において、補正は一般的に、2つの自由パラメータによる線形フィットによって決定される。計測学的な観点からは、測定値と参照値の間の小さな偏差に対する正当な処置であるとみなすことができる。しかし、大きな偏

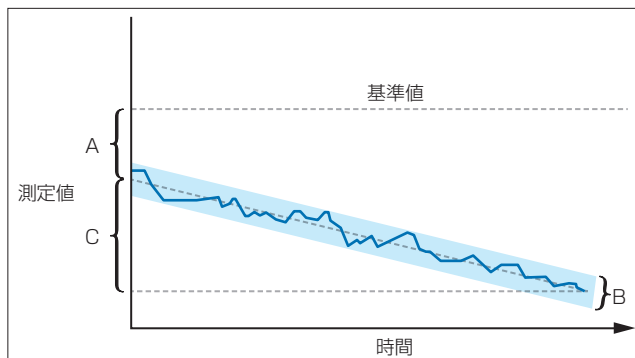


図2 LED製造における、次回の校正/補正が行われるまでの期間の光学測定結果を示したグラフ。基準値との不整合性は、現象に応じて次の3つに分類することができる。A: 基準値からの初期平均偏差、B: 急峻な変動、C: 緩やかなドリフト。

差に対してはこの方法ではうまくいかない場合が多い。ある1つの要因が偏差の最大要因となっている場合は特に、この方法は適さない。

補正をまったく行わずに済みますか、少なくとも誤りを含む可能性のある補正の影響を最小限に抑えるためには、偏差をできる限り小さく抑える必要がある。言い換えるならば、製造におけるDUTの測定は、最初から「実質的に正しく」なければならない。以下に、この現象の最も重要な要因に対処する2つの例を示す。

測定条件の影響

具体的な例を示すために、このセクションでは、LEDの発光円錐角度が130°であると仮定する。色度座標と光束の測定には、直径100mmの積分球を用いる。一般的な製造設定と同様に、DUTは、積分球開口中心の数ミリメートル手前に配置される。そうすれば単一の機械軸で実現することができるためだ。

LEDと球の間の距離が10mmの場合、118°の円錐の範囲内に照射された光だけが積分球に入射する。その範囲外に照射された光は積分球に収集されず、補正関数による補正が必要となる。この方法がうまくいくのは、範囲外照射が垂直照射に比例する場合のみだが、現実的にはそのようになることはない。

LEDの両側の蛍光体層に損傷があったり、厚さが均等でなかったりする場合、それに起因する照射光全体の赤色や青色のずれは、この補正において考慮されない(図3a)。またLEDデバイスによって、光学軸の向きや発光円錐の開口角が異なる場合にも誤差が生じる。

この問題は、全光束を測定することによってしか修正できない。この理想的な状態に近づけるための最小要件は、積分球の入口とDUTの間の距離を最小限にすることである。さらなる改善を得るには、入口の内側に直接DUTを自動配置し、 2π ジオメトリを構成するとよい。このような試験設定用に、LED製造向けに最適化された積分球を用意することができる。これらの積分球は、埃を防護するためのガラス製ドームを備えている。これによって、繊細な測定アダプタに埃が混入するのを防ぎつつ、特殊なハンドラを用いてLEDを積分球半径の内部に直接配置することができる(図3b)。

技術的な限界とコストの制約によって、製造設定における測定条件を、試験所に対する推奨事項に合わせて完全に標準化することはできない。これらの推奨事項は、測定と校正の不確かさに関する複数の国際規格で定められている(<http://bit.ly/1oVEsUY>)。

ずれをさらに縮小するには、標準試験所における測定条件を、製造施設に

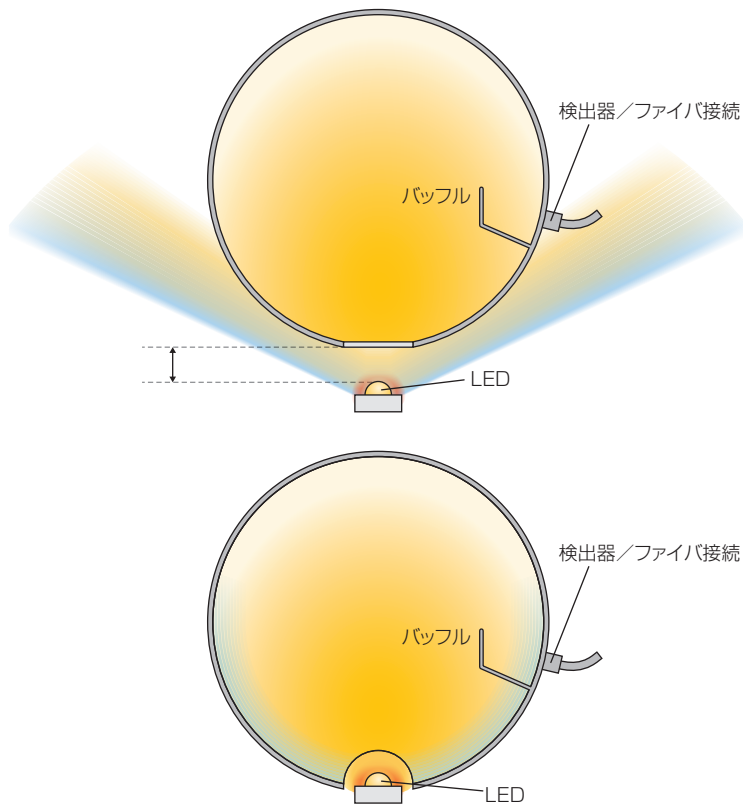


図3 LEDから照射される光束の一部のみが積分球に収集される場合、一般的には補正不可能な偏差が、光学測定値に生じる(a)。LEDを積分球内側に自動配置することが、偏差に対する解決策である(b)。(b)の図に示したLED製造用の積分球は、ドーム型の埃よけが開口に設けられており、推奨されたとおりにLEDが配置できるようになっている。

おけるその後の条件と一致させることも必要になる。そうすれば、経験則に基づいて補正することのできない他の偏差を回避することができる。例えば、試験所における光束と色度の測定で推奨される4 π ジオメトリは、製造環境においては実用的とは言えない。このジオメトリでは、DUTは積分球の中心に配置される。したがって、すべての測定システムの校正を、2 π ジオメトリに設計する必要がある。

校正の影響

再現性のあるビンニング結果を得るには正確な絶対値測定が重要であることは、1つ前の測定条件に関するセクションで述べたとおりである。加えて、製品ラインにおいて光学計測器(一般的

にはCCDアレイ搭載分光器)に対して誤った校正が行われれば、再現性が低下する原因となる。校正が不正確である場合は、試験所基準値を得るために、測定値を大きく補正することが必要になる。しかし、経験則に基づいて定められた補正関数の正当性は、それぞれのケースごとに、偏差の要因と、被試験デバイスの光学特性の分布に依存する。そのため、補正後の結果は概して、疑わしい値となる。

上述の不確かさを最小限に抑えるには、校正が厳格な条件を満たす必要がある。これを達成するには、校正は図4に示すように、信頼できる一次基準(この場合は光源)に再トレース可能でなければならない。一次基準は、米国立標準技術研究所(NIST:National In-

stitute of Standards and Technology)やドイツの国家計量標準機関である物理工学研究所(PTB:Physikalisch-Technische Bundesanstalt)といった国立研究所で管理される。

校正を行うには、適切な設備と熟練した作業員が配備された校正試験室が必要である。長期間にわたって高い精度を維持するには、校正を繰り返さなければならない。特に、不可避な経時劣化の影響を受けてシステムコンポーネントに変化が生じる可能性があることを考えるとこれが必要である。各試験室で作業基準が基準値として維持されているかを監視することによってこれを確実に行うことができる(図5)。基準値が存在しない場合は、1年以内に再校正を行う必要がある。校正品質を保証するための方法の1つは、国際規格ISO 17025に準拠する社内の校正試験室、または校正サービス提供企業による認定を受けることである(前出のリンク参照)。

B. バラツキ。次は、(図2に示した)急峻な変動の問題について見ていこう。測定値の動的な変動は、ミリ秒から秒の時間スケールで確認されるもので、再現性の低下につながる。再現性とは、一定の試験条件下で繰り返される測定によって得られた結果集合の標準偏差である。結果は、試験条件によって左右される。したがって、測定の不確かさに関する規格に定められた再現性仕様に基づいて、計測器を比較する場合には、これを考慮に入れる必要がある(<http://bit.ly/1wyYFzI>)。

再現性は、例えばクラスの色度座標境界をどれだけ細かく合理的に定義できるかという点に大きな影響を与える。境界があまりにも細かく定義されていて再現性が得られない場合は、同

一の光学特性を持つLEDが異なるピンに分類されてしまう可能性が高くなる。市場トレンドとしては、各クラスをMac-Adamの楕円のわずか1~2ステップの範囲内とすることを求める方向にある。このトレンドに対応するには、非常に正確で再現性に優れた測定が不可欠である。

平均化処理は、貴重なタクトタイムを無駄にし、製造スループットを低下させるため、精度の改善には使用できない。この問題に対する唯一の解決策は、優れた再現性を備える計測器を使用することである。LED製造における高精度な測定に向けた基本要件を特定するために、測定値の動的な変動を引

き起こす重要な物理的要因として、次の2つを分析した。

熱ノイズの影響

計測器は常に環境ノイズにさらされる。このノイズが実際の信号に対して大きい場合は、精度が低下する。この問題は、計測器側でいくつかの対策を講じることによって、解決することができる。これについて、LED製造用の分光器の例を挙げて説明したいと思う。最初の対策は、本質的に低ノイズの検出器と、低ノイズの信号処理電子回路を使用することである。不可避な熱ノイズが残るが、こちらは検出器を能動的に冷却することによってさらに

低減することができる。インストルメント・システムズ社の経験からは、温度を-5℃未満に引き下げる必要があることが明らかとなっている(図6)。

オペレーター側では、検出器における信号を最大にすることによって、相対的なノイズレベルを引き下げることができる。信号レベルの飽和を防ぐために、DUTの放射特性に対応して、測定パラメータを調整する必要がある。製造スループットを最大限に高めるには、分光放射計の積分時間をできる限り抑える必要があるため、分光器の飽和に対して調整手段は2つしかない。つまり、分光器の中のデンシティーフィルタ(NDフィルタ)と、測定周辺機器(使用する積分球のサイズなど)である。適切な計測器を使用するとともに、オペレーターが適切な対策を講じることによって、ノイズを低減し、測定精度を高めることができる。また、測光および測色に基づく、よりきめ細やかなビンニングが可能になる。

機械的変動の影響

DUTの照射光は測定アダプタによって収集され、分光器に伝送する光ファイバに導かれる。光ファイバの導光特性は、校正において十分考慮されなければならない。しかしこの特性は、ファイバの位置が変わると変化するため、ハンドラの不可避な動きや振動によって、光信号のスループットとスペクトルに変化が生じる。したがって、これが測定値変動の要因となる。

ファイバ位置に対する光伝送の依存性を低減するための技術的手法について、今回は深く触れない。実際には、個々のファイバではなくファイババンドルが使用される場合が多い。ファイババンドルにさらに設計上の対策を講じることによって、機械の動きと振動

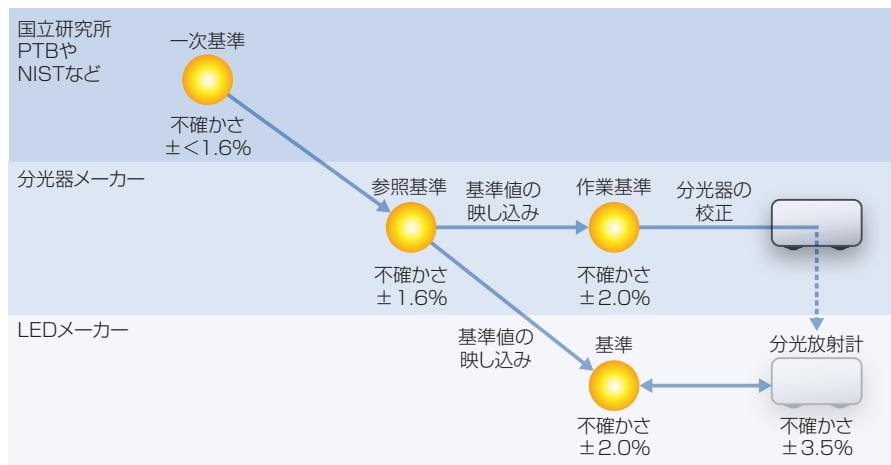


図4 LED製造における光学計測器の校正は、国家の一次測定標準にトレース可能でなければならない。そうすることで、計測器の正確さを保証することができる。



図5 ISO 17025に準拠する国家の一次基準にトレース可能な校正を備える、商用提供の実用標準は、白色LEDの基準として理想的であり、12時間で0.1%の安定性を備える光束を実現する。

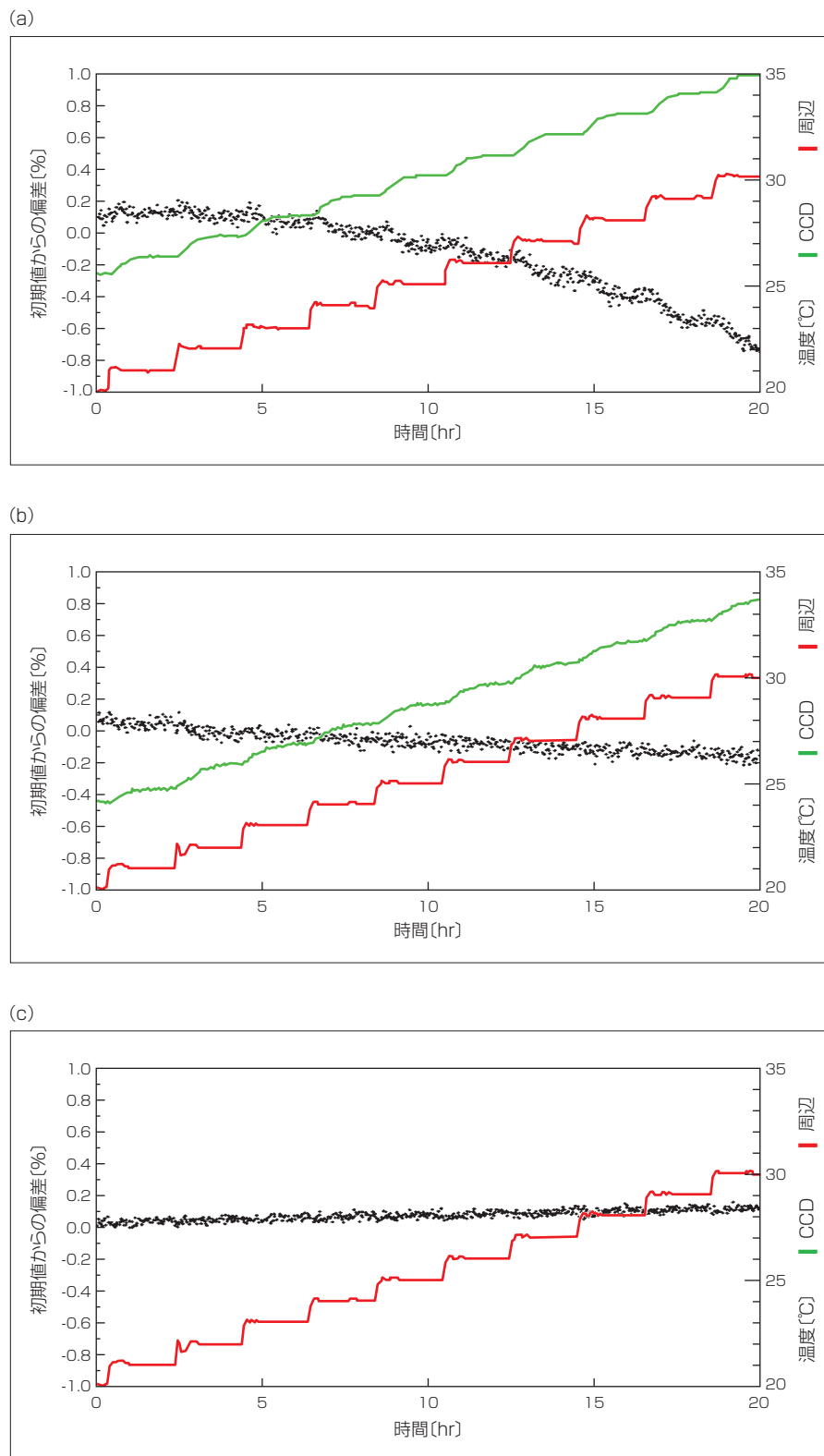


図6 異なる分光器の光束値のドリフトを比較するグラフ。分光器を一様に連続動作させたことで、検出器と信号処理回路の温度は周辺温度のみに依存している。周辺温度は、20時間にわたって20～30℃の範囲に維持した。安定性±0.2%の、温度安定化時の光束基準を参照値とした。試験した計測器は次のとおり。(a) 標準的な分光器(冷却なし、温度最適化部品なし)、(b) 分光器(冷却なし、温度最適化部品あり)、(c) 分光器(−10℃に冷却、温度最適化部品あり)。

に対する感度を抑えることができる。必ずそのような種類のファイバを使用する必要がある。

C. 長期ドリフト。製造ラインで得られた光学測定結果が毎日、標準試験所における分光器の結果で補正されるという場合でも、1日に1度の補正では、再現性に優れたビンングを実現するための十分な安定性は得られない。製造ラインにおける分光器の系統的誤差は、数分間または数時間のうちに変化していくため、測定結果は基準値から徐々にずれていく。

その要因は一般的に、分光器と測定環境に見つかっている。より頻繁に補正を行うには、試験システムの稼働を停止しなければならず、コストがかかってしまう。また、大きなドリフトが生じると、最終的には分光器の校正に問題が生じる。この変動は、適切な分光器を選択することによって防止しなければならない。ドリフトが生じる2つの最大要因について、以下で説明する。

検出器と信号処理回路の温度依存性

アレイ分光器に採用されている CCD 検出器と信号処理回路のノイズと温度の関係は、急峻な変動に関するセクションで既に説明したとおりである。環境ノイズは、振幅と周波数だけでなく、温度依存のオフセットにも特徴がある。信号処理回路の温度は、まず計測器の動作状態、次に周辺温度によって決まる。温度依存のオフセットによって、数時間の間でもビンング結果に変化が生じるため、異なる計測器による異なる時間における選別は、同じではなくなる(図6a)。

誤差の大きさは、主に検出器と信号処理回路の設計に依存する。したがって、最適化された部品を搭載する計測器を選択すれば、誤差を大きく低減す

ることができる(図6b)。加えて、計測器メーカーが、各部品に特化した補正アルゴリズムを採用すれば、残る影響を計算によって低減することが可能である。検出器の温度を安定化させることによって、影響をほぼ完全に除去できる。実際の設計では、ノイズ抑制のための能動的な冷却を、検出器温度の安定化に併用することができる(図6c)。

部品の機械的変形の影響

分光器の光路上の部品は、非常に高い精度で配置されており、検出器に照射される信号に多大な影響を及ぼす。機械的変形により光路に変化が生じると、大きな系統的誤差が生じる。変形は、材料が不適切であったり、部品が適切な位置に固定されていなかったりする場合や、温度変化や疲労によっても生じる。特に、温度変化や振動があると、数分間や数時間のうちにドリフトが生じる。

この種類の要因による影響は過小評価されがちだが、品質の低い分光器を使用する場合は、この影響によって、製造ライン間または単一の製造ライン内のビニング結果の相関関係が低下する。この問題に対処するためのさまざまな手法が存在し、そのほとんどは計測器メーカーが取り入れるべきものである。その対策としては、試験済みの適切な材料を使用すること、熟練した作業員が計測器を調整すること、製造工程全体を通して高い品質を確保することなどがある。LEDメーカーにできることはそれよりも小さいが、製造エリアの周辺温度を $\pm 3^{\circ}\text{C}$ の範囲内に確実に制御することによって、改善に少し貢献することができる。上述の品質要件を満たす分光器を使用する場合は、ハンドラの不可避な振動によって、試験や測定に問題が生じることはない。

表1 LEDビニングの改善に向けた対策

初期平均偏差の要因	対策
誤った校正	ISO 17025に準拠した校正手順
古い値に基づく校正	LED規格に基づくモニタリングによって、適時に再校正を行う
測定条件が最適ではない	CIEの推奨に基づいて、試験所と製造施設における測定条件を整合させる(2 π ジオメトリなど)
迷光	分光器に対し、適切な光学設計を適用する(LEDの迷光は0.05%未満)
ダイナミック測定レンジが低い	量子井戸が深い検出器を採用する(ダイナミックレンジを1000:1以上に)
急峻な変動の要因	
熱ノイズ	低ノイズの検出器を使用する。能動的な冷却($< -5^{\circ}\text{C}$)も追加すれば理想的(信号処理回路を含む)
分解能誤差	分解能を十分に小さくする(一般的に15ビット程度必要)
信号が低すぎる	検出器の信号レベルを上げる、NDフィルタなどによって調整する(飽和を避けること)
DUT点灯電源変動	電流が低い場合(μA 範囲)は、良好なメインフィルタを備え、測定時間が長い(NPLC:0.1~1)電源を使用する
ファイバの動きによる、導光に影響が生じる	波長域・絶対値において出力が一定になるように最適化された特殊なファイバを使用する
ハンドラに対する配置が異なる	正確なDUTの配置
緩やかなドリフトの要因	
検出器と信号処理電子部品の温度依存性	温度依存性が低くなるように最適化された検出器と信号処理電子部品を使用する。温度安定化機能を追加すれば理想的
光学部品の機械的変形	テスターメーカー:材料の品質保証、精密な組立と調整、品質管理 LEDメーカー:製造時の温度変動の抑制($\pm < 3^{\circ}\text{C}$)
光の影響を受ける材料の経時劣化	テスターメーカー:高品質部品の使用 LEDメーカー:定期的な補正、標準LEDでのモニタリング、硫酸バリウム再塗布

カラービニング試験システムのまとめと今後の展望

分光器に基づく、LED製造用テスターの正確さと精度は、並行して稼働する製造ライン間の同等性と、短中期的な再現性に密接に関連する。このいわゆるビニング精度に悪影響を及ぼす原因には、次の3つがある。

- ・ 補正の対象となる、試験所基準値からの平均偏差。すなわち測定システムの正確さ。
 - ・ 急峻な変動
 - ・ 緩やかなドリフト
- どの現象も、さまざまな物理的要因

によって生じる。LEDビニングを改善するための対策は上の表に示したとおりであり、これらの対策のいくつかについては、本稿の各セクションで詳しく説明した。これらの対策は分光器メーカーと製造工場のオペレーターを対象としたものである。

分光器などの高品質なツールを使用し、LED製造のどの工程において正確さと精度が重要になるかを詳しく理解し、高精度な測色および測光が、小さなビニング公差を実現するための鍵となる。それはまた、長期間にわたる優れた同等性の維持にもつながる。

著者紹介

マシアス・ホー (MATTHIAS HOEH)は、独インストゥルメント・システムズ社 (Instrument Systems GmbH, instrumentssystem.com) のプロダクトマネージャー。