

光源色の精密評価のためのアレイ式分光放射計の応答非直線性評価技術



田辺 稔

たなべみのる

Email: tanabe-m@aist.go.jp

産業技術総合研究所

計量標準総合センター

物理計測標準研究部門

光放射標準研究グループ

主任研究員

2010年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月産業技術総合研究所入所。レーザーパワーの絶対値評価や光センサーの応答非直線性の精密評価を実施しております。特に、光センサーの性能向上を目指し、その応答非直線性の波長依存性の解明研究に力をいれています。今後、このような技術開発をもとにして、レーザーを用いた計測器の普及、省エネ化、低価格化に貢献できるような精密計測や技術研究開発に取り組みたいと考えています。

共同研究者

神門 賢二（産総研）、

部 洋司（産総研）

LED やレーザーを用いた光源の色を正確に評価するためには、アレイ式分光放射計の広範囲な入射光パワーに対する出力の比（直線性）評価が重要です。本研究では、高安定なレーザー光源と光パワー重ね合わせ法を組み合わせたアレイ式分光放射計の応答非直線性評価システムを開発し、これまで困難であった低い光パワー領域の応答非直線性を評価可能としました。この技術を用いることで、LED やレーザーを用いたディスプレイ等で、広い光パワー領域での出力補正ができ、これらの製品の精密な光源色評価に貢献できます。

はじめに

CCD アレイセンサーなどを検出器としたアレイ式分光放射計は、光源の分光分布を短時間で測定できるため、測光・放射測定の分野で広く使用されています。近年では、LED や赤・緑・青のレーザーダイオードをベースにした光源の分光分布の精密評価や、それら光源の放射量や測光量の校正、色度の精密評価などにも用いられています。

アレイ式分光放射計を用いて、精密に光源の色評価を行うためには、アレイ式分光放射計の動作の安定性、波長精度、波長分解能、分光感度等が重要な評価要素になりますが、特に重要な要素として、広範囲な入射光パワーに対する出力の比が一定である「直線性」が挙げられます。光源色の測定では、測定対象光源の相対分光分布を正しく求めることが重要であるため、アレイ式分光放射計の応答非直線性の評価が不可欠です。ほとんどのアレイ式分光放射計は、その応答が入射する光パワーに依存して非直線性を示すため、広範囲な光パワーレベルに対して補正を行う必要があります。応答非直線性の補正方法としては、JIS 規格[1]に記載されている、測光ベンチを利用して光源と受光器の距離を変動させる方法や、複数の光源や複数の開口を切り替える方法がありますが、これらの方法では、広範囲な光パワーでの測定や、低いパワーレベルでの応答非直線性測定が困難という問題があります。

本稿では、上記の技術的課題を解決するための、広範囲な光パワーレベルに対して、再現性の良い高精度な応答非直線性の評価方法の開発[2]について紹介します。さらに、その応答非直線性が、LED やレーザーダイオードで構成される光源の色度と与える影響について定量的に評価した結果についても紹介します。

アレイ式分光放射計の応答非直線性評価システムの開発

図1に、開発した光パワー重ね合わせ法に基づくアレイ式分光放射計の応答非直

線性測定システムを示します。このシステムでは、単一波長測定が可能なこと、4桁超の光パワーを確保できること、測定における迷光の影響を抑制できるメリットを考慮し、CW 半導体レーザーを光源として選択しました。高精度評価を実現するため、使用したレーザーは、温度調整機能を取り付け、光パワーの安定性を0.03%/時間を達成しています。また、レーザーの偏光や空間的な可干渉性の影響を抑制するため拡散板とスペckルリデュースャを使用しました。

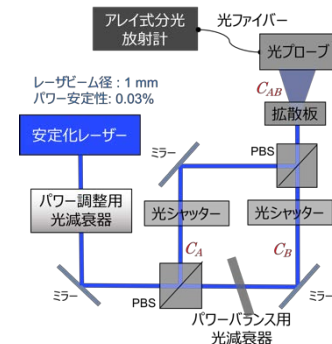


図1 アレイ式分光放射計の応答非直線性評価システム

応答非直線性の測定と評価の手順は以下の通りです。レーザーパワーを光減衰器にて任意のパワーに設定します。偏光ビームスプリッター(PBS)で C_A と C_B の2経路に分岐させ、それぞれの経路で光パワーが同じになるように光減衰器で調整します。このような光学配置で、二つの光路に配置している光シャッターを開き、アレイ式分光放射計の出力値 R_{AB} を取得します。それぞれの光シャッターを開閉して、各光路における出力値 R_A と R_B を取得します。この取得した出力から、 R_{AB} の直線性係数を以下の式で導出します。

$$LF(1) = R_{AB} / (R_A + R_B)$$

上記の式から LF が1になった時、その測定パワーにおいて応答の直線性があると言えます。次に、アレイ式分光放射計の出

力値が R_{AB} の 1/2 となるように光パワーの調整を行い、同様の方法で各光経路における出力値を取得し、直線性係数 $LF(2)$ を導出します。さらに、 R_{AB} の 1/4、1/8...と約 1/2 毎となるように光パワー調整を行った後に、各光経路における出力値を取得し、それぞれの出力値における直線性係数を求めます。最終的に、これらの直線性係数を以下の式を用いて重ね合わせることで、応答非直線係数 $NL(n)$ を導出します。

$$NL(n) = 1/[LF(1) \times LF(2) \times \dots \times LF(1) \times LF(n)]$$

この方法は自己校正法であり、光減衰器を用いて光パワーを 1/2、1/4、1/8、1/16...と調整することで、分光放射計の飽和レベルから暗電流レベルまでの広い範囲における応答非直線性を評価することができます。

図 2 に、波長 405 nm、530 nm、660 nm のレーザーと上記の重ね合わせ法を用いて取得した 2 台のアレイ式分光放射計の応答非直線性の評価結果を示します。いずれのアレイ式分光放射計の露光時間は 20 ms に設定しました。図において、応答非直線係数 $NL(n) = 1$ は、応答が直線であることを示しています。図中のエラーバーは、直線性係数を評価するために分光放射計の信号を計測した時の標準偏差を示しています。非常に低い光パワーレベルの測定では、分光放射計の暗電流の揺らぎと光パワー変動の影響が問題となりますが、高安定なレーザーと重ね合わせ法を使用することにより、この暗電流付近の信号領域でも、全てのレーザー波長において、応答非直線性を再現性良く取得することに成功しました。さらに、アレイ式分光放射計 A で最大 3.5 %、分光放射計 B では最大 24 %もの応答非直線性を示すこと、機器の違いにより全く異なる応答非直線性の特性を示すこと、可視域では応答非直線性の波長依存性が極めて小さいことを明らかにしました。

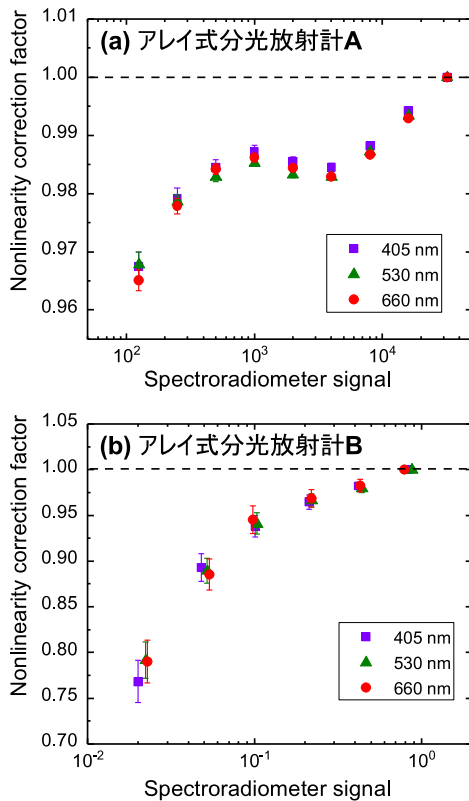


図 2 アレイ式分光放射計の応答非直線性評価結果

アレイ式分光放射計の応答非直線性による光源の色度座標の変化

アレイ式分光放射計の応答非直線性が、光源の色度座標の測定結果に及ぼす影響を定量的に評価するため、図 3 に示すように、相関色温度 3025 K と (x, y) 色度座標 (0.432, 0.397) である白色 LED 光源、また、この LED 光源と相関色温度と色度座標が等しい、赤・青・緑の 3 つの LED を用いた光源と赤・青・緑の 3 つのレーザーダイオード (LD) を用いた光源を仮想光源として選択し、その影響を評価しました。図 3 に示す光源において、アレイ式分光放射計の応答非直線性を補正した場合と補正しない場合のデータから計算した (x, y) 色度座標の差異を評価しました。2 台のアレイ式分光放射計の応答非直線性の評価結果を用いて求めた (x, y) 色度座標の差異 ($\Delta x, \Delta y$) を表 1 に示します。表からアレイ式分光放射計 A の応答非直線性による色度座標の差は、0.003 以下であるに対して、最大 24 % もの応答非直線を示すアレイ式分光放射計 B では、最大で x 色度座標で 0.016、 y 色度座標で 0.004 の差異があることが分かりました。特に、3 つの波長の LED やレーザーを加法混色した光源では、 x 色度座標がより大きく変化することが示されています。仮想光源として選択した 3 波長型光源の方式は、次世代の 8K ディスプレイや医療用ディスプレイ等に採用されつつあり、医療用ディスプレイでは、色度の正確さを 0.004 以下にする必要があるとされており [3]、アレイ式分光放射計 B のような大きな応答非直線性を有する機器を使用した場合、所望の色を実現できない可能性があります。本稿で紹介した評価技術を適応することで、ディスプレイなどの精密な色評価や制御が必要な分野でも、その出力値を適切に補正することが可能になります。

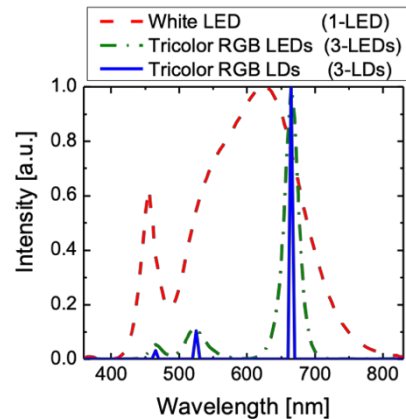


図 3 相関色温度 3025 K における光源の分光分布

表 1 アレイ式分光放射計の応答非直線性の補正有無による (x, y) 色度座標の差

分光放射計	白色 LED		3 つの LED		3 つの LD	
	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
A	0.001	0.000	0.001	-0.001	0.003	0.001
B	0.002	0.001	0.012	0.000	0.016	0.004

参考文献

- [1] JIS Z 8724-2015：色の測定方法－光源色 日本規格協会
- [2] 田辺稔、神門賢二 照明学会誌 101-6 pp. 219-222 (2017).
- [3] E. Samei et al., Med. Phys. 32, pp. 1205-1225 (2005).