



可視光半導体レーザー応用コンソーシアムガイドライン
スペックルに関するガイドライン 第2版

2019年3月31日



目次

1	目的と適用範囲	4
1.1	目的	4
1.2	適用範囲	4
2	用語	5
2.1	デバイスと方式	5
2.2	スペックルの種類	5
3	単色スペックルコントラストの測定方法	10
3.1	概論	10
3.2	スペックル測定器の構成	11
4	狭線幅のスペクトルを持つ光源の光学測定	12
4.1	半導体レーザーのスペクトル特性	12
4.2	狭線幅スペクトルの測光/測色測定の精度に関する注意点	12
5	カラースペックルの測定方法	17
5.1	概論	17
5.2	カラースペックルの測定方法	19
6	スペックルの許容度	22
付録 1.	カラースペックルの定式化	23



参考文献 26



1 目的と適用範囲

1.1 目的

このガイドラインは、可視光応用製品のスペックル特性に関する用語と評価方法の標準に関し記載し、公正な性能評価による製品の普及を目的とする。

1.2 適用範囲

このガイドラインは、可視光のコヒーレント(もしくは部分的コヒーレント)光源によって発生するスペックルの用語とその評価方法に関する。



2 用語

ここでは、スペックルに関する用語を定義する。

なお、国際標準としての定義は、次の文書を参照すること。

IEC 62906-1-2 Laser display devices - Part 1-2: Vocabulary and letter symbols (2015年7月16日発行)

<https://webstore.iec.ch/publication/22908>

2.1 デバイスと方式

2.1.1 レーザーディスプレイデバイス

laser display device

LDD

誘導放出光を発光するレーザーを用いたディスプレイデバイス

2.1.2 レーザー照明

laser lighting

誘導放出光を発光するレーザーを用いた照明装置もしくは照明方式

2.2 スペックルの種類

2.2.1 スペックル

speckle

網膜を含むセンサ面上で(部分的)コヒーレント光の干渉の結果発生する不規則な空間変調イメージ

2.2.2 スペックルパターン

speckle pattern

スペックルの照度分布パターン

2.2.3 非結像系スペックル

objective speckle

結像系を含まない光学センサ系で観測されるスペックル

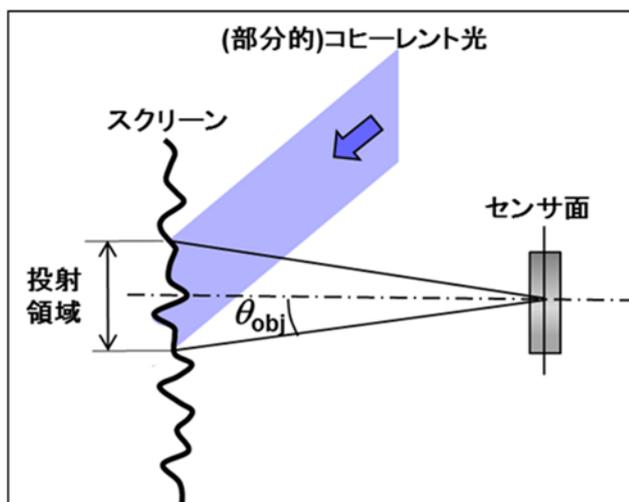


図2.1 非結像系スペックル

2.2.4 結像系スペックル

subjective speckle

結像系を含む光学センサ系で観測されるスペックル

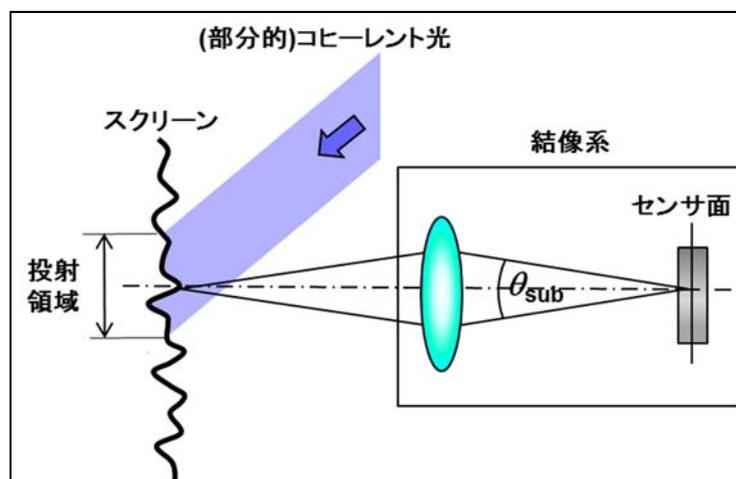


図2.2 結像系スペックル

2.2.5 スクリーンスペックル

screen speckle

スクリーン上の拡散/散乱光を原因とする結像系スペックル

(応用において、一般的に評価しようとするスペックルである。サイズが小さく、眼の位置が動けば変化する。)

2.2.6 投射スペックル

projected speckle

スクリーン投射前に投射光学系で発生して、スクリーンに投射されるスペックル
(投射光学系での干渉パターンであるためサイズが粗いケースが多く、眼の位置が動いても固定して見える。)

2.2.7 ファイバースペックル

speckle

投射光学系のファイバーで発生する投射スペックル

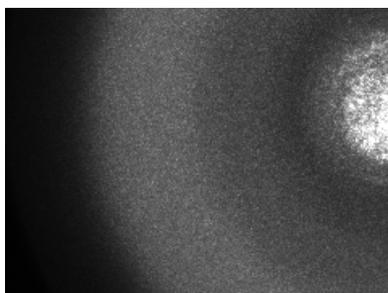


図2.3 ファイバースペックルパターン(ファイバー: MMF)が乗ったスクリーンスペックルの観測例

2.2.8 単色スペックル

monochromatic speckle

光源が単色(もしくは準単色)の場合のスペックル

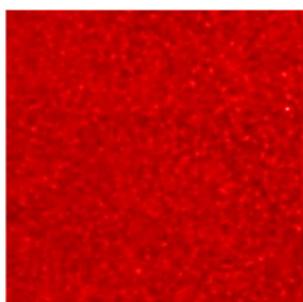


図2.4 単色スペックルパターン

2.2.9 スペックルコントラスト(比)

speckle contrast (ratio)

C_s

単色スペックルの代表的評価指数

単色スペックルパターンの標準偏差(σ)の平均値(\bar{I})との比で定義する。

$$C_s = \frac{\sigma}{\bar{I}}$$

2.2.10 カラースペックル

color speckle

光源が多色の場合のスペックル



図2.5 カラースペックルパターン

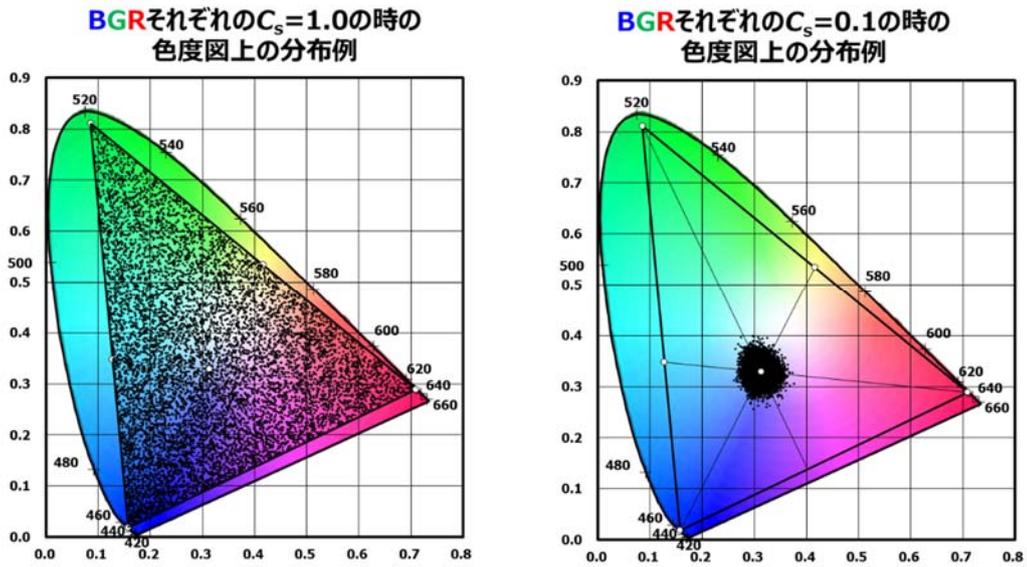


図2.6 カラースペックルの色空間(CIE 1931)での分布例

3 単色スペックルコントラストの測定方法

3.1 概論

ディスプレイと照明におけるスペックルは、人間が観測することを前提としている。人間の眼は結像系を持つため、結像スペックルの測定方法である。したがって、その測定装置は人間の眼と同等な結果が得られる必要がある。そのためには、測定装置は、人間の眼と等価な MTF (Modulation Transfer Function)を持つように設計されなければならない^{[1][2][3]}。

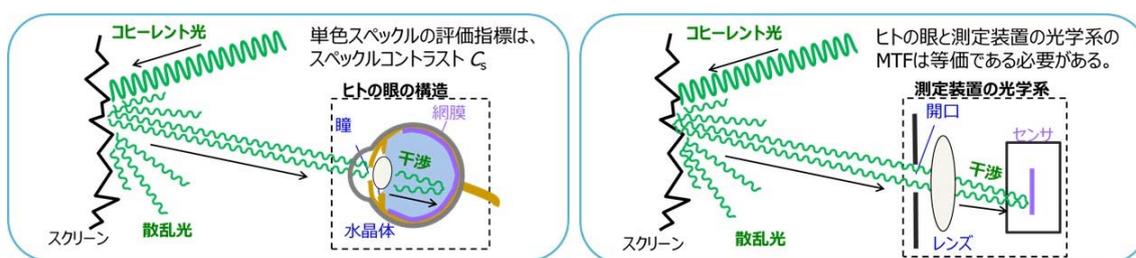


図3.1 人間の眼の結像系と測定装置の結像系

国際標準として、次の文書が発行されている。

IEC 62906-5-2 Laser display devices - Part 5-2: Optical measuring methods of speckle contrast (2016年6月7日発行)

<https://webstore.iec.ch/publication/25037>

単色スペックルの測定方法における、環境条件、暗室条件などは、IEC TC110 の電子ディスプレイデバイスの各種測定方法の文書に記載されているものと共通とする。また、測定における安全も IEC TC76 のレーザー安全に準拠する。たとえば、測定環境は、温度：25°C±3°C、湿度：25%～85%、気圧：86 kPa～106 kPaとし、異なる環境での測定の場合は、その条件を記録する。また、測定の安全に関しては、IEC 60825-1 の最新版に従う。

測定装置の型式や投射するスクリーンの型式を記録する。

測定装置は、仕様書に記載されている標準条件で駆動し、それ以外は条件を記録する。

評価対象の可視光応用装置の型式を記録する。可変な駆動条件は測定時の駆動条件を記載する。特に、レーザー光源の波長や駆動電流、変調条件(CW/パルス)等、スペックルコントラストに影響を与える条件に留意する。

各装置は十分安定してから測定する。

3.2 スペックル測定器の構成

単色スペックルの測定装置の構成を図 3.2 に示す。

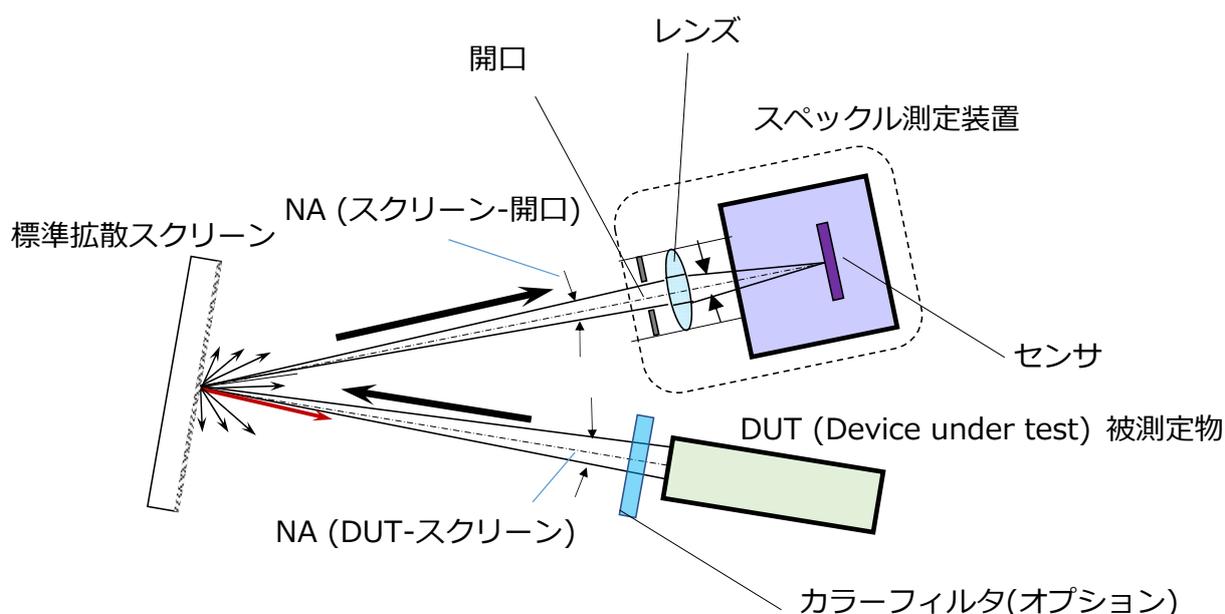


図3.2 単色スペックルの測定装置の構成

測定装置は、人間の眼のMTFをシミュレートしていることを確認する。また、較正されたものを用いる。

色フィルタは、光源によって必要な場合に使用する。

なお、測定方法の詳細は、次に示すIEC国際標準(IS)となっている。

IEC 62906-5-2 ED.10 Laser display devices -Part 5- 2 : Optical measuring methods of speckle contrast (2016年6月7日発行)

<https://webstore.iec.ch/publication/25037>

また、ファイバースペックルなどのバックグラウンド影響を分離する必要がある^[5]。

4 狭線幅のスペクトルを持つ光源の光学測定

4.1 半導体レーザーのスペクトル特性

可視光のディスプレイ/照明応用に用いる半導体レーザー(LD: Laser Diode)のスペクトルは、線幅が狭くコヒーレンシーの高いものから、マルチ縦モード発振して、実効的に数nmの範囲まで広がっているものまで様々である。特に、高出力用LDは、ストライプ幅も広く、高い電流密度で用いるので、横モードも縦モードも共にマルチモードで発振するのが普通である。

たとえば、InGaN/GaN系の青色LDのCW動作(DC動作)では、図4.1のように、しきい値直後では、単一(シングル)縦モードの狭い一本のスペクトル線幅で発振するが、駆動電流の上昇に伴い、マルチ縦モード発振する。

いずれにしても、一般に、10nm以上のスペクトル半値幅を持つLED等の従来光源と比べて、桁違いに狭いスペクトル線幅を持つ。

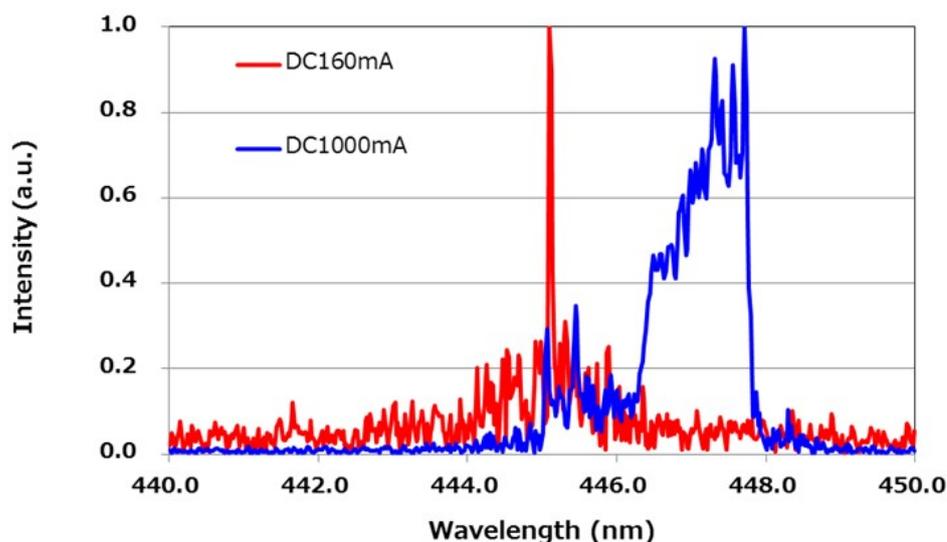


図4.1 青色LDのスペクトルの一例

4.2 狭線幅スペクトルの測光/測色測定に関する注意点

可視光のディスプレイ/照明応用では、一般に、測光/測色測定が基本となる。しかし、従来の光源は広いスペクトルを対象としているため、使用するスペクトルの精度は、せいぜい1nm程度である。スペクトルの分光評価装置の精度も同様である。

CIEで定義されている色空間における、等色関数なども、1nm刻みのデータが一般的である。測定されたスペクトルデータと等色関数を掛け合わせて色度等を求める。

したがって、精度の高い測定には、内挿して、0.1nm以下の精度のデータテーブルを準備する必要がある。また、スペクトル測定においても、光スペアナなどの精度の高い装置で測定したスペクトルデ

ータが必要となる。

中心波長455nmの線スペクトルの形状をローレンツ型(Lorentzian)と仮定し、上記のように0.01nm間隔のデータで、等色関数に掛け合わせ、半値幅(FWHM)をパラメータとして、CIE1931の色度図にプロットしたのが、図4.2である。この図より、半値幅の広がりとともに、色度座標は波長軌跡の内側に移動することが分かる。

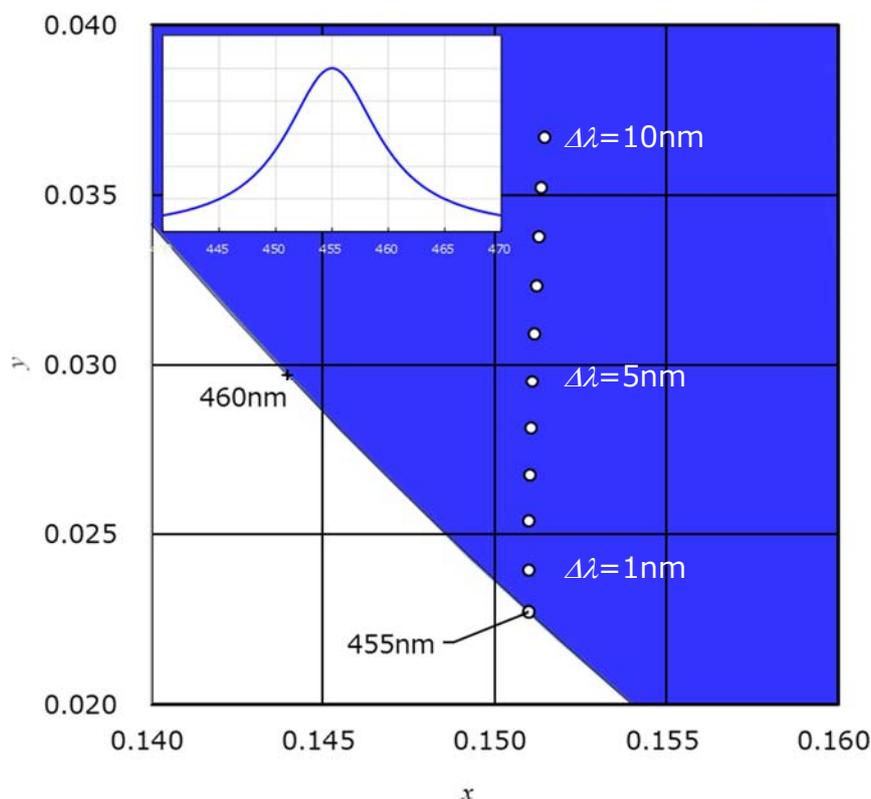


図4.1 ローレンツ型線スペクトルの半値幅と色度の関係

このローレンツ型スペクトルの例は、本ガイドラインの第1版に示されたものであるが、実際のスペクトルの裾は、このように大きく広がらない。

しきい値以下の自然放出光は、スペクトルの裾は広いが、指向性が小さいので、現実的にビームとして利用されない。実際、図4.1の高い電流領域のスペクトルの例のように、3nm程度の範囲の中に光エネルギーが集中して裾が広がっていない。この第2版では、現実的なスペクトルに関して、最近の研究の成果を基に修正する。

同じく455nmに中心波長を持ち、左右対称で一樣な矩形スペクトルを仮定して半値幅(矩形幅)を変化させて、CIE 1931の色度を図4.2にプロットした。裾が広がっているローレンツ型スペクトルの場合と比較すると、スペクトルに裾がない場合の色度の変化は一桁以上小さく、色度座標の小数点以下三桁目以下の範囲に収まっている。

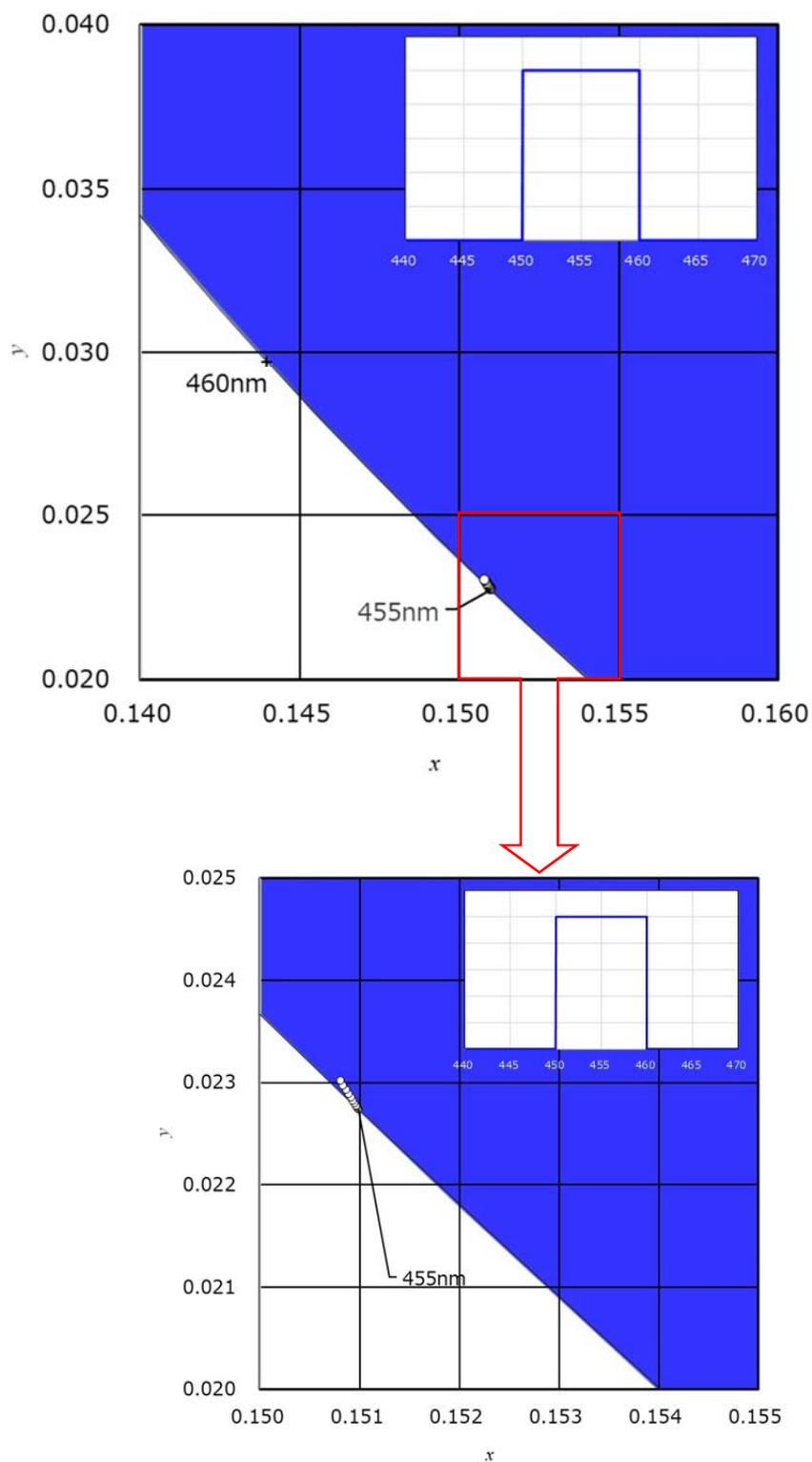


図4.2 矩形型スペクトルの半値幅と色度の関係

波長の小数点以下二桁目で完全な線スペクトルを仮定して、CIE 1931の色度(x, y)を計算し、 $\Delta x, \Delta y < 0.003$ を満たす波長精度を図4.3にプロットした。この波長精度は波長帯によって異なる。青と赤の領域では、1~2nm程度波長がずれても、色度は 3×10^{-3} 程度の誤差ですむ。緑の領域では、0.5nm程度の波長精度が必要となる。ただし、CIE1931の色度図では、垂直と水平の接線の位置で x と y に関する非対称性が大きくなって一方が発散するので注意が必要である。

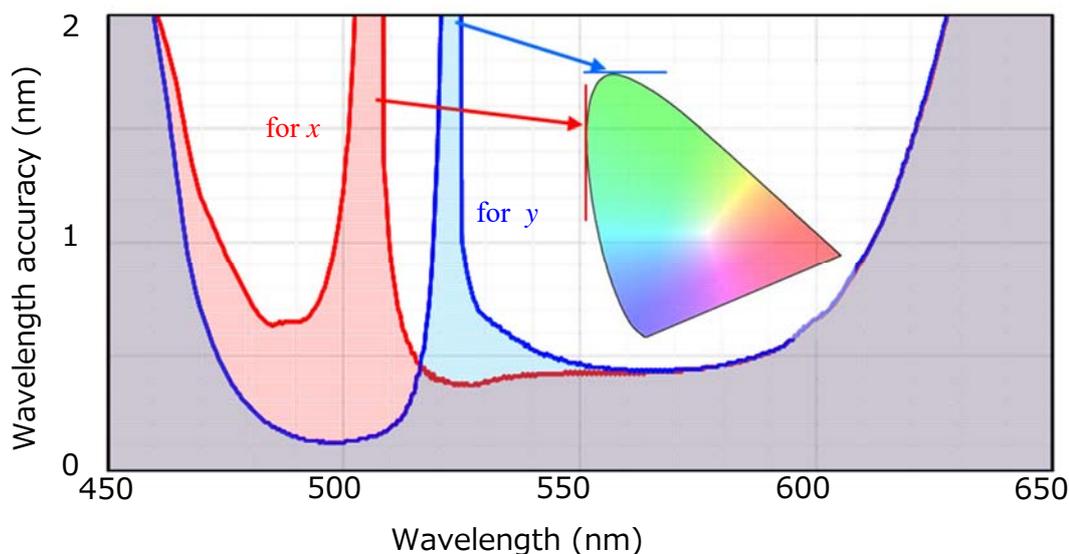


図4.3 $\Delta x, \Delta y < 0.003$ の色度精度が得られる波長精度の波長についてのプロット

マルチ縦モード発振するLDを複数用いた場合は、図4.4のように、矩形領域の中に多くの縦モードが分布する。縦モードが一様に分布していれば、図4.2のように中心波長で代表しても色度の誤差は極めて小さい。しかし、図4.4のように、様々な強度の縦モードが分布していると、スペクトル領域内でのパワー分布が生じる。そのため、重心波長(centroid wavelength: 次式)を用いた方が色度の誤差は小さくなる。

$$\lambda_c = \frac{\int \lambda S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda}$$

ただし、 λ は波長、 $S(\lambda)$ はスペクトルパワー密度である。

ピーク波長や中心波長で代表すると色度の誤差は大きくなる。図4.5は、ピーク波長で求めた色度と重心波長で求めた色度に関し、スペクトルから求めた真値の差を、様々なマルチ縦モードのスペクトルに対してプロットしたものである。ピーク波長は、スペクトルの中で比較的ランダムに分布するので色度誤差は大きくなる。一方、重心波長で代表すると色度誤差は非常に小さくなる^[8]。

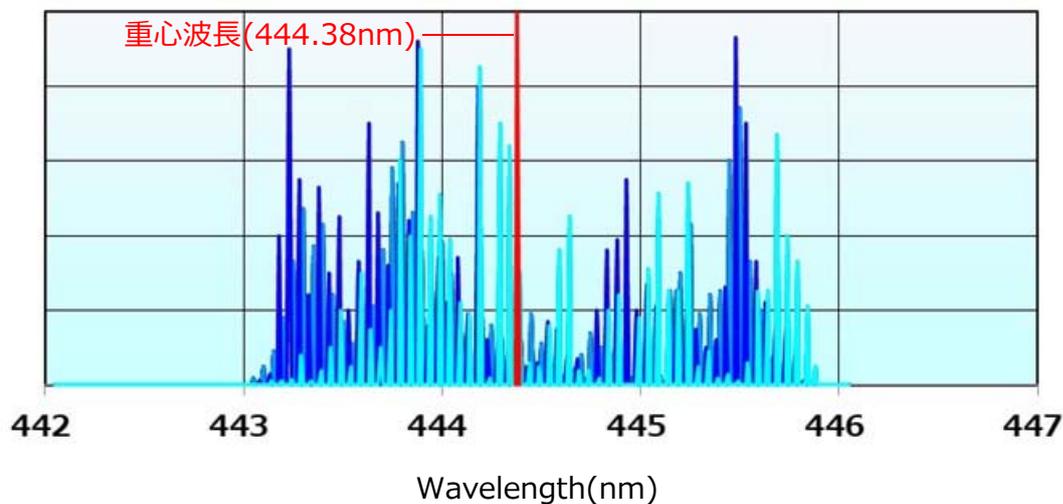


図4.4 複数のマルチ縦モードの分布

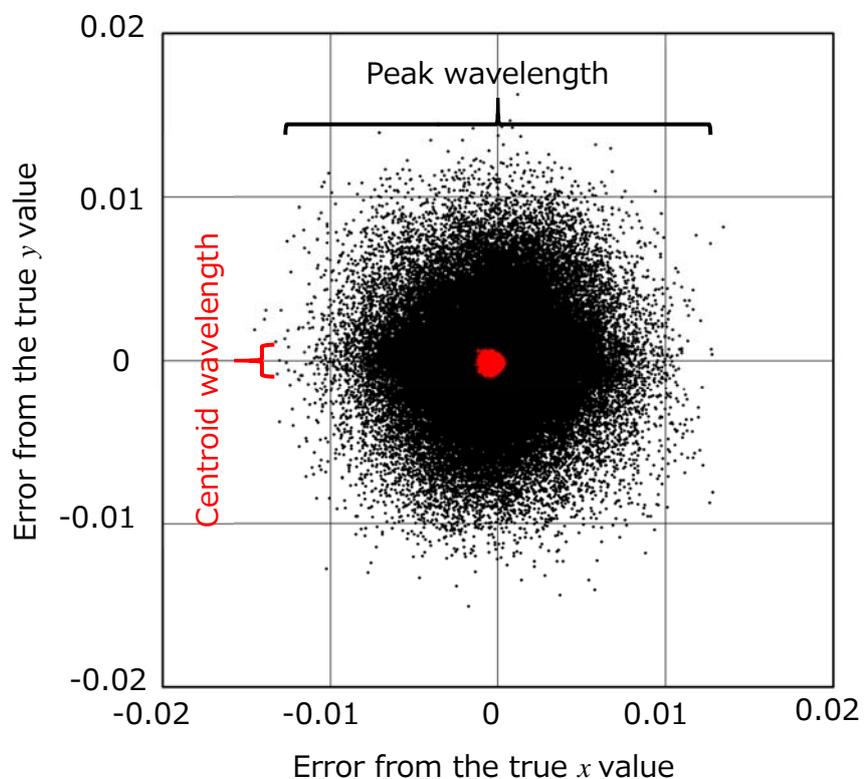


図4.5 重心波長とピーク波長を使った場合の色度誤差比較

5 カラースペックルの測定方法

5.1 概論

国際標準として、次の文書が発行されている。

IEC 62906-5-4 Laser display devices - Part 5-4: Optical measuring methods of colour speckle (2018 年 1 月 9 日発行)

<https://webstore.iec.ch/publication/26896>

カラースペックルは、RGB の単色スペックルの加法混色によって生じる。このイメージを図 5.1 に示す。

このカラースペックルの理論的な定式化を付録 1 に記載する^{[4][6]}。各色(RGB)の波長(スペクトル)と各色のパワー比の値が混色する際に必要なデータである。各色の単色スペックルコントラスト値(C_s 値)がわかれば、統計手法(Monte Carlo simulation)で色空間におけるスペックルの分布を計算することができる。

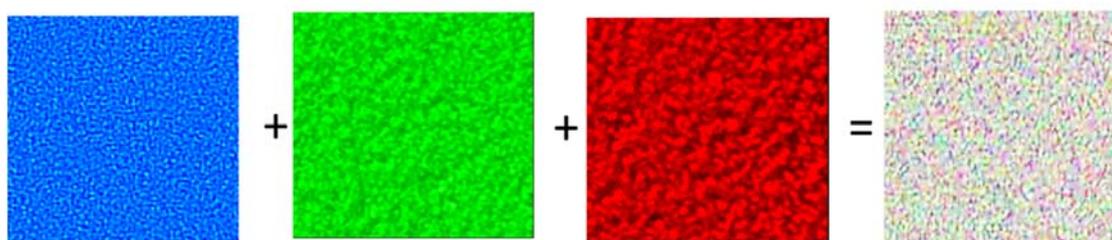


図 5.1 RGB 単色スペックルの加法混色(カラースペックル)

測色量として、カラースペックルの色度分布を色度図にプロットして、分散/共分散の値を求めることができる。測光量として、照度の分布は、ヒストグラムで表記できる。また、単色スペックルコントラスト値(C_s 値)と同様の定義で、照度(測光)のスペックルコントラスト値(C_{ps} 値)を求めることができる。RGB 各色のスペックルコントラスト $C_s=1.0, 0.5, 0.1$ について、それぞれ、図 5.2、5.3、5.4 に計算例を示す。

三次元の色空間である CIE Lab 空間を用いれば、色と明るさの両方を一度に表現できる。これを図 5.5 に示す。

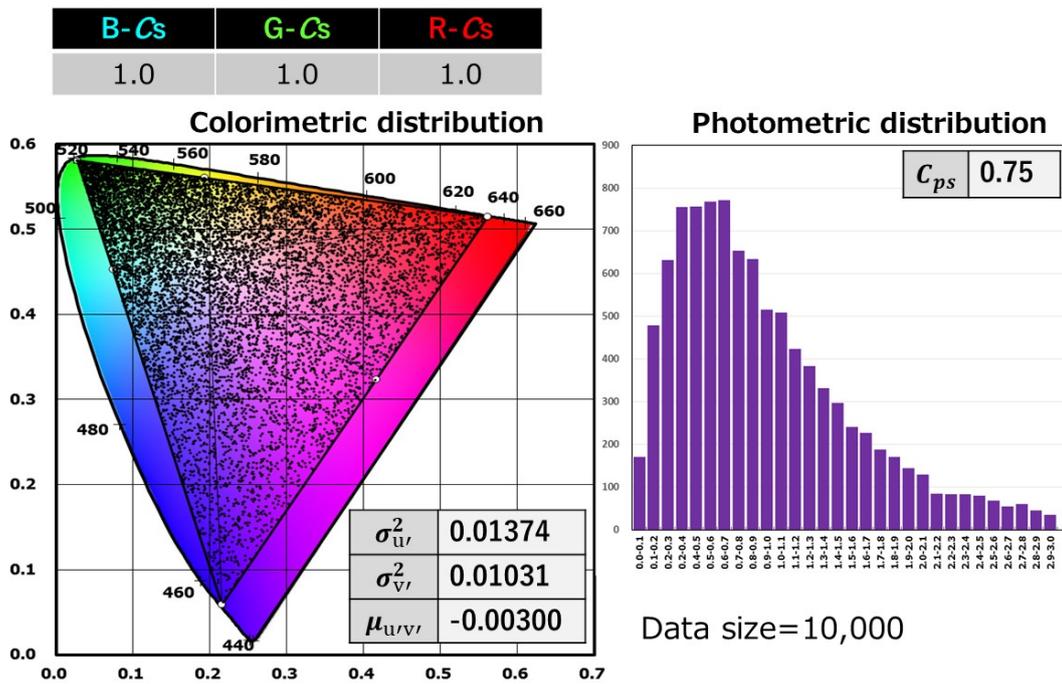


図5.2 カラースペックルの計算結果の例 (R、G、BのCs=1.0)

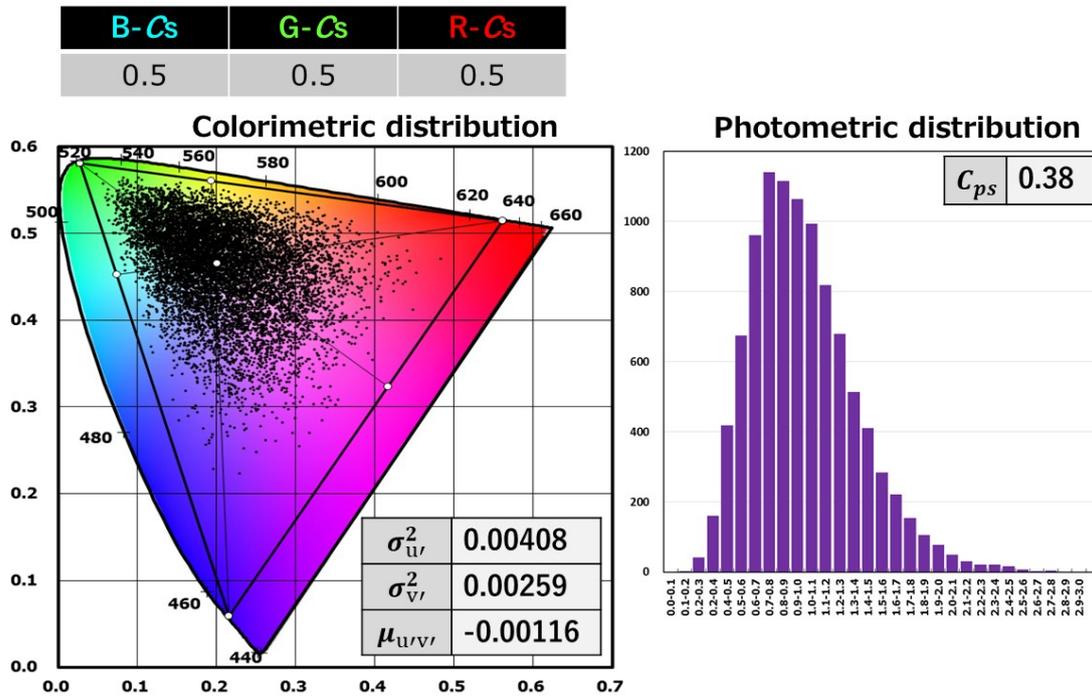


図5.3 カラースペックルの計算結果の例 (R、G、BのCs=0.5)

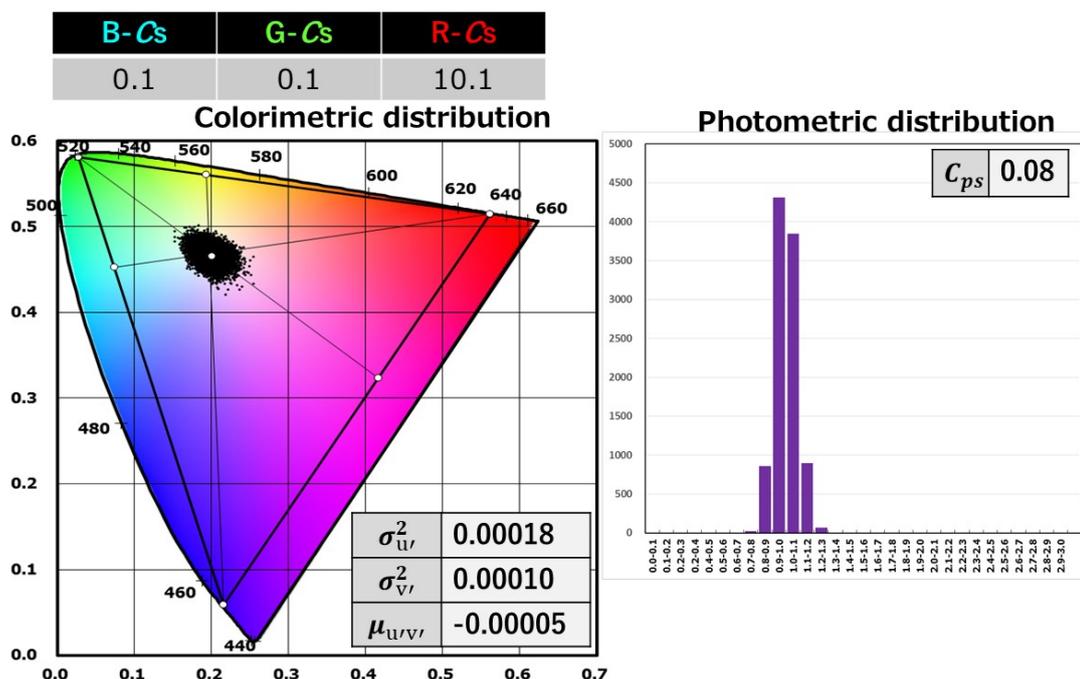


図5.4 カラースペックルの計算結果の例 (R、G、Bの $C_s=0.1$)

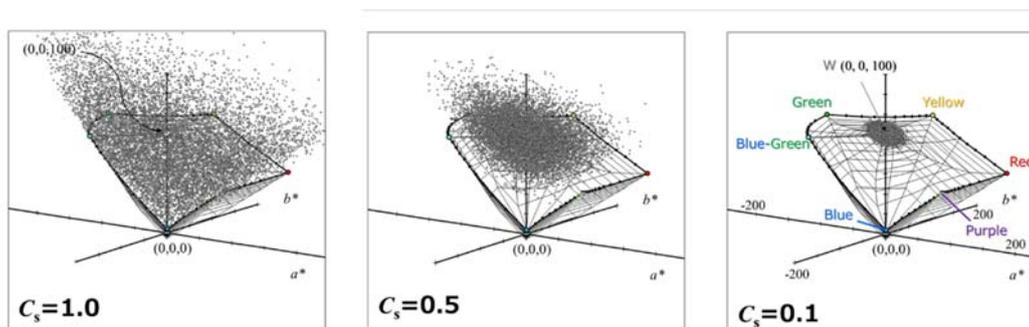


図5.5 カラースペックルの計算結果のCIELab空間表示

5.2 カラースペックルの測定方法

カラースペックルを測定するには、単色のスペックル測定機とRGBフィルタを用いる。RGBごとに単色のスペックルを測定し、そのあとで加法混色する。RGBフィルタを備えて自動で切り替え、さらにカラースペックルを加法混色により表示できるカラースペックルを表示できる装置が(株)オキサイドから販売されている。カラースペックル測定のセットアップを図5.6に示す。

一般的な色彩輝度計などで用いられているXYZフィルタを使う方法は、カラースペックルの測定に向

いていない。XYZフィルタは、一般的に広いスペクトルに対して最適化されており、レーザーのような狭いスペクトルに対しては誤差が大きい。また、同時に測定するために三板式でXYZに光路を分ける方式も装置内で干渉状態が変化して正しいスペックルの測定が困難である^[9]。

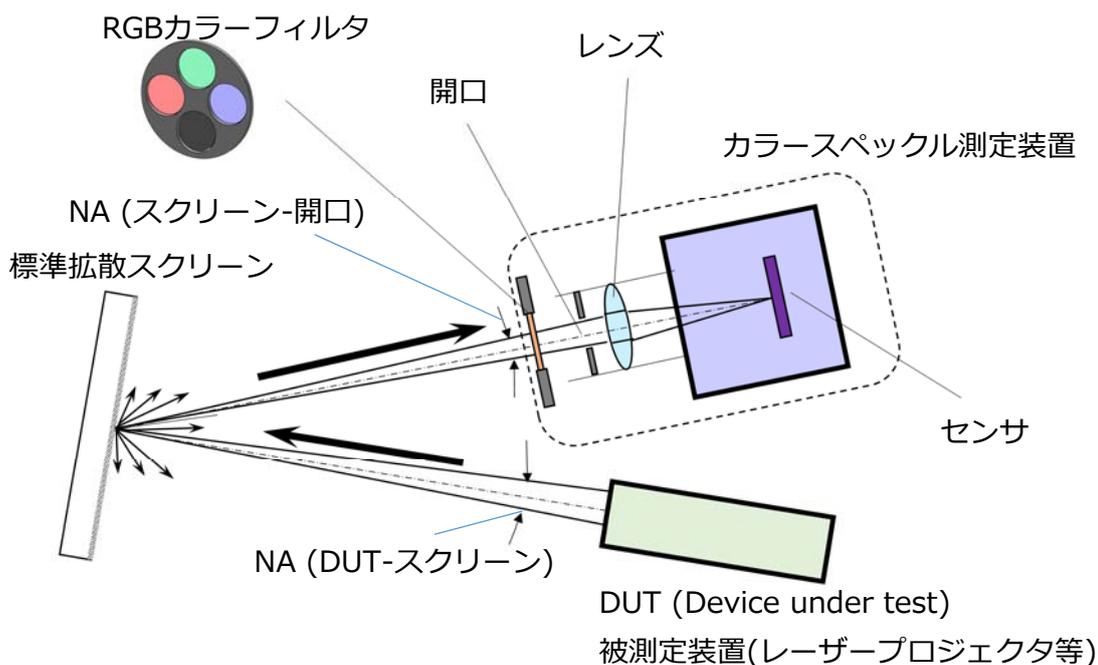


図5.6 カラースペックルの測定装置の構成

RGB単色のスペックル測定結果を加法混色して、元の白色(あるいは測定した色)の色度/照度の基準値に正確に戻すには、元の白色(あるいは測定した色)を正確に測定しておく必要がある。スクリーンに照射したあとではスペックルの影響で測定が難しくなる。したがって、スクリーン位置に波長/照度/パワー等の測定器を設置して直接測定する(図5.7)。RGBパワー比を測定する場合は、パワーメータの前に校正されたRGBフィルタを備える必要があるが、波長や照度の測定には不要である。

狭いスペクトル線幅のRGBレーザーの波長や照度(RGBパワー比)を正確に測定するには、最近開発された小型のRGBレーザーメータを用いるのが便利である^[8]。ただし、蛍光体などのスペクトル幅の広い光源とレーザーとのハイブリッド光源では、正確な測定には工夫が必要である。

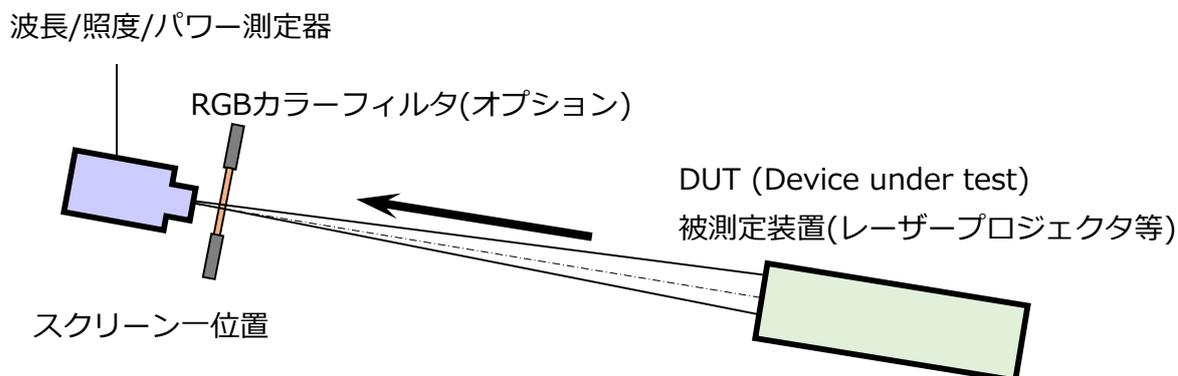


図5.7 波長/照度(RGBパワー比)の測定セットアップ

実際のカラースペックルの測定の条件は、3章の単色スペックルコントラストの測定方法と共通である。また、国際標準である IEC 62906-5-4 に従うようにする。

カラースペックルの測定プロセスは、次の通りである。

- 1) スクリーンに所定の色度(白色含む)の均一パターンを照射する。(均一パターンが得られない場合は、比較的均一な領域で測定し、あとで補正する)
- 2) 上記パターンの位置で、波長(スペクトル)、パワー比(照度)などを直接測定する。
- 3) スペックル測定装置の RGB フィルタを変えて、各色のスペックルデータを取得する。
- 4) 2)で得られた波長(スペクトル)と RGB パワー比を用い、3)で得られた RGB 各色のスペックルデータを加法混色する。(測定装置にカラースペックル用のソフトが搭載されている場合もある。)
- 5) カラースペックルの色度図上での分布と求め、分散/共分散等を計算する。
- 6) 照度の分布から測光学的スペックルコントラストを求める。
- 7) 報告書を作成する。



6 スペックルの許容度

スペックルの許容度は、各種応用によって異なることと、個人差も大きいいため確定することは難しい。しかしながら、主観評価を通して、品質等級の目安を明確にする研究は重要である。

一例として、NEDO (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の事業の一環として、クリーンデバイス社会実装推進事業「最先端可視光半導体レーザーデバイス応用に係る基盤整備」の事業において、フルフレーム方式のフロントプロジェクタの映像を用いて、RGBWのスペックルの主観評価 (被験者:13名)を実施した結果を示す。

被験者の1/3以上が、スペックルが見えたと回答した最小のスペックルコントラスト値は、下記の表のとおりであった。

表6.1 被験者の1/3以上が、スペックルが見えたと回答した最小のスペックルコントラスト値

色	1/3以上がスペックルを認識できるスペックルコントラスト値
R	5%
G	5%
B	8%

暫定的な目安として、上記の値以下であれば、フルフレーム方式の場合は許容されると考えられる。しかし、白色に関してもカラースペックルの主観評価により測定値との相関を取る必要がある。

また、走査型方式の用にレーザービームを直接スクリーン上でスキャンする方式でも、これとは別に主観評価をする必要がある。



付録1. カラースペックルの定式化

RGB それぞれの単色スペックルコントラスト値 C_s は次式で表される。

$$C_s = \frac{\sigma}{\langle E \rangle_T} \quad (1)$$

ただし、 E はスペックルの空間分布の網膜上の相対強度(照度)であり、 $\langle E \rangle_T$ は後述するスペックル確率密度関数の全平均値、 σ は分布の標準偏差である。

また、独立光源数を M と仮定するとスペックルの確率密度関数は、ガンマ関数を用いて次式で表現される。

$$p_M(E) = \frac{M^M E^{M-1}}{\Gamma(M) \langle E \rangle_T^M} \exp\left\{-\frac{ME}{\langle E \rangle_T}\right\} \quad (2)$$

ただし、 $\Gamma(M)$ はガンマ関数である。 M は個数難度で物理的には整数であるが、excelの関数は小数にも対応できる。したがって、Monte Carlo simulation の際は、便宜的に小数として使うことができるので、より実践的である。

式(2)を $\langle E \rangle_T / M = 1$ のように規格化すると、単色のスペックルコントラストの式(1)は、次のように表現できる。

$$C_s = \frac{\sqrt{M}}{\langle E \rangle_T} = \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (3)$$

上式を用いて確率密度関数の式(2)を C_s の関数として表すと次式を得る。

$$p(E) = \frac{E^{C_s^{-2}-1}}{\Gamma(C_s^{-2})} \exp(-E) \quad (4)$$

つまり、平均値で規格化したスペックルの強度分布の各点の振幅 E は、 C_s の関数として計算できる。この単純化した統計学的定式化は、放射測光(radiometry)に基づいている。これを測色(photometry/colorimetry)に適用する。

RGB の光源それぞれのスペクトルパワー分布を波長で積分した値を 1 として規格化する ($S_{B,G,R}(\lambda)=1$)。次に、RGB を合成して実現したい目標色度(白色色度の場合が多い)を決める。この目標色度を実現するために必要な RGB のパワー比、 $r_B : r_G : r_R$ (ただし、 $r_B + r_G + r_R = 1$) を計算する必要がある。

CIE 1931 の色度座標、 x, y は次式で求められる。



$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (5)$$

三刺激値 X, Y, Z は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) \cdot \{r_B S_B(\lambda) + r_G S_G(\lambda) + r_R S_R(\lambda)\} d\lambda \\ Y &= \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) \cdot \{r_B S_B(\lambda) + r_G S_G(\lambda) + r_R S_R(\lambda)\} d\lambda \\ Z &= \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) \cdot \{r_B S_B(\lambda) + r_G S_G(\lambda) + r_R S_R(\lambda)\} d\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ は等色関数である。

目標色度 x, y は、RGB の規格化スペクトルパワー分布に RGB それぞれのパワー比を乗じた合成スペクトル分布、 $r_B S_B(\lambda) + r_G S_G(\lambda) + r_R S_R(\lambda)$ に等色関数を乗じて波長領域全体にわたって積分して三刺激値 X, Y, Z を求めて算出する。

逆に、与えられた合成目標色度から RGB のパワー比、 r_B, r_G, r_R を未知数として求めるには、そのパワー比を変化させて、目標色度に収束させる計算をする。二変数の収束計算による解法は時間がかかり、収束も安定しないことがある。早く確実に求めるために、色度図上で 2 段階のグラフ解法を用いた。この解法を図 A.1 を用いて説明する。例えば、緑点(G 点)から目標白色色度点 W を通る直線を引く。その延長が G 点の対面にある B-R ラインと交わる点を P 点とする。

まず、B-R ライン上の P 点の色度を実現する B と R のパワー比 $r_B : r_R$ を求める。この時、G のパワーはオフなので、 $r_G=0$ である。つまり、 $r_B + r_R=1$ となり、 r_B か r_R の一方を決めれば他方が決まるので、一変数の解法となる。B-R ライン上の色度を挟み込んで収束させれば良いので、数回のうちに収束する。

次に、G-P ライン上の白色点 W に注目して、 $r_B + r_R = r_{BR}$ と r_G の比を変化させて W 点でのパワー比を、挟み込みで収束させて求める。この時も $r_{BR} + r_G=1$ であり、一方を決めれば他方が決まるので、B-R ライン上の方法と同様に一変数の解法となる。ここで、 $r_B : r_R$ は、B-R ライン上の解法で求めてあるので、比例配分すれば、W の色度を実現する $r_B : r_G : r_R$ (ただし、 $r_B + r_G + r_R=1$)、つまり、各色のパワー比を求めることができる。なお、この手法は、B-G ライン、G-R ラインからスタートしても同じ結果が得られる。

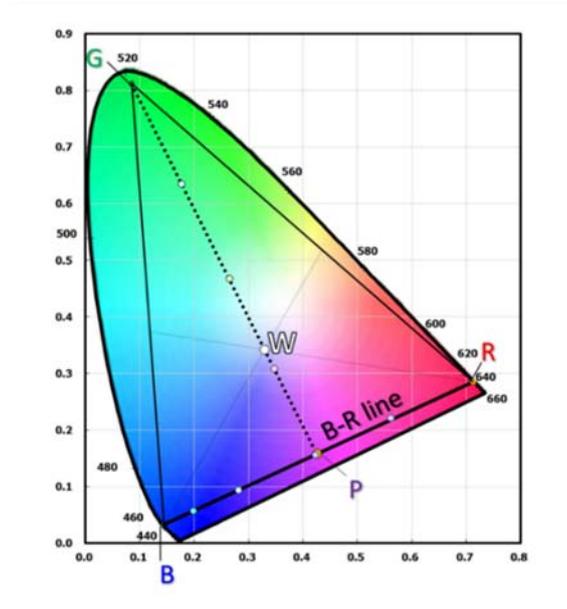


図 A.1 パワー比を求める方法を説明する色度図

各色の光源がインコヒーレントで、スペックルが無ければ、W 点の色度が実現されるが、各色がスペックルを持つと、人間の網膜上で空間的な強度ばらつきを生じる。つまり、パワー比 $r_B : r_G : r_R$ が一定ではなく、スペックルの大きさで変化する。したがって、白色の色度点を中心に別の色度点が発生する。空間的には、白色の画面の中に、別の色の細かな点が分布するように見える。

カラースペックルは、RGB 各色の単色スペックルの強度分布から計算により求めることができる。各色の光源の平均値のパワー比は、光源の駆動条件で一定に制御されているが、スペックルにより、ローカルにパワー自身の変動するモデルを用いる。つまり、 $r_B S_B(\lambda)$, $r_G S_G(\lambda)$, $r_R S_R(\lambda)$ の代わりに、 $r_B E_B S_B(\lambda)$, $r_G E_G S_G(\lambda)$, $r_R E_R S_R(\lambda)$ を用いる。平均値のときは、 $E_B = E_G = E_R = 1$ だが、スペックルがあると、その空間的なばらつきを示す変数とする。これは、式(4)の E と一致する。したがって、単色の E_B, E_G, E_R を式(4)にしたがって統計的に処理できる。また、式(4)は、各色の単色スペックルコントラスト C_s の関数なので、各色の C_s の値が決まれば、式(4)の逆関数を用い、 $p(E)$ を乱数発生させることで、 E の分布を再現することができる。この分布を色度 x, y に対応させるには、式(6)に E の要素を追加した次式を用いれば良い。

$$\begin{aligned}
 X &= \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) \cdot \{r_B E_B S_B(\lambda) + r_G E_G S_G(\lambda) + r_R E_R S_R(\lambda)\} d\lambda \\
 Y &= \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) \cdot \{r_B E_B S_B(\lambda) + r_G E_G S_G(\lambda) + r_R E_R S_R(\lambda)\} d\lambda \\
 Z &= \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) \cdot \{r_B E_B S_B(\lambda) + r_G E_G S_G(\lambda) + r_R E_R S_R(\lambda)\} d\lambda \quad (7)
 \end{aligned}$$



参考文献

本ガイドラインの内容に関し、参考になる文献をリストアップする。

(本文中で引用されていないものも含む。ただし、国際標準は本文中に示した。)

- [1] J. W. Goodman, “Speckle phenomena in optics”, Roberts and Company Publishers, Greenwood Village, CO, (2006)
- [2] S. Kubota, “Spatial coherence measurement of a scanning laser system and applicability of the Zernike’s approximation to the exit pupil on the scan mirror”, *Optical Review* **19** (6), 432-435 (2012)
- [3] K. Suzuki, T. Fukui, S. Kubota, Y. Furukawa, “Verification of speckle contrast measurement interrelation with observation distance”, *Optical Review* **21** (1), 94-97 (2014)
- [4] K. Kuroda, T. Ishikawa, M. Ayama, S. Kubota, “Color speckle”, *Optical Review* **21** (1), 83-89 (2014).
- [5] J. Kinoshita, H. Aizawa, A. Takamori, K. Yamamoto, H. Murata, K. Tojo, “Angular dependence of screen speckle and fiber speckle of coupled output of nine high power blue laser diodes through a multimode fiber”, *Optical Review* **23** (1), 121-132 (2016).
- [6] J. Kinoshita, H. Aizawa, A. Takamori, K. Yamamoto, H. Murata, K. Kuroda, “Color speckle evaluation using monochromatic speckle measurements”, 2016 SID Digest, **10.1** (2016).
- [7] 「解説 レーザー照明・ディスプレイ –究極の照明・ディスプレイを目指して」
(一社)日本光学会レーザーディスプレイ技術研究グループ企画、
黒田和男・山本和久 編、出版:(株)オプトロニクス社 (2016).
- [8] K. Hieda, T. Maruyama, T. Takesako, F. Narusawa, “New method suitable for measuring chromaticity and photometric quantity of laser displays”, *Optical Review* **25** (1), 175-180, (2018).
- [9] J. Kinoshita, K. Yamamoto, K. Kuroda, “Color speckle measurement errors using system with XYZ filters”, *Optical Review* **25** (1), 123-130, (2018).