

タイトル	多色光照射によるフラクタルスペckル：計算機シミュレーション
著者	魚住，純
引用	工学研究：北海学園大学大学院工学研究科紀要，8：63-74
発行日	2008-09-28

多色光照射によるフラクタルスペックル — 計算機シミュレーション —

魚 住 純*

Fractal speckles produced by polychromatic illumination
— Computer simulation —

Jun Uozumi*

1. はじめに

粗面物体をコヒーレント光で照射すると、その反射光あるいは透過光による回折場や像領域には、スペックルと呼ばれるランダムな干渉パターンが生じる。このとき、照射光の強度分布として、指数を $-D$ とする光軸からの距離 r のべき関数形を用いると、そのフラウンホーファー回折領域、あるいはレンズによるフーリエ変換面には、フラクタル的性質を持つスペックルが生じることが知られている¹⁾。また、粗面の像領域に同様のスペックルを生成することが可能であることも示されている²⁾。このようなフラクタルスペックルについては、単一波長のレーザ光照射による実験およびそれを想定した計算機シミュレーションが行われ、理論の検証が行われている³⁻⁵⁾。

フラクタルスペックルは、通常のスペックルに比べて極めて長い空間相関特性を持っており、平均的スペックル径を定めることができない。このことは、広い範囲にわたって異なるスケールを持つスペックルの重ね合わせによって構成されていると見なすこともできる。このため、特にフラクタル次元の高いスペックルでは、強度が高い領域と低い領域が分離し、強度が極めて低い領域、すなわち、ボイドが生じる。ボイドの存在は、フラクタルスペックルを計測等に応用する場合に、その領域に対応する物体領域の情報が欠落する要因となる可能性がある。

この問題への一つの対処法として、統計的に相関のない複数のフラクタルスペックルを用いる方

法が考えられる。すなわち、ある領域が一つのスペックルにおいてボイドであったとしても、それとは無相関の別のスペックルにおいて非ボイド領域であるならば、これら2つのスペックルを併用することで、欠落した情報を補うことができる。互いに無相関のスペックルを3つ以上利用すれば、状況はさらに改善する。

統計的に相関のないスペックルを生成するには、いくつかの方法が考えられるが、ここでは、入射光の波長を変える方法について検討する。スペックルは、一般に照射光の波長が変わると強度が変化し、変化前後の2つのスペックルは、その波長差が大きいほど相関が低下するいわゆるデコリレーションを生ずる。この現象を利用する方法である。

複数の波長や連続スペクトルを持つ光で粗面物体を照射した場合でも、照射光が十分な空間的コヒーレンスを持つならば、スペックルは発生し、光源のスペクトル分布に応じたカラフルなスペックルとなる。このような多色光スペックルについては、光源のスペクトル計測や物体の粗さ計測等への応用などを目的に、理論的および実験的な手法による多くの研究がなされてきた⁶⁻⁹⁾。

多色光スペックルは、使用する光源の制約から、実験によってその統計的特性を確認するのはあまり容易ではない。これに対し、計算機シミュレーションを用いると、所望のスペクトル分布の光源による多色光スペックルをカラーグラフィックスとして生成することができる。本研究は、このような観点から、多色光照射によるフラクタルス

* 北海学園大学大学院工学研究科電子情報工学専攻

Graduate School of Engineering (Electronics and Information Eng.), Hokkai-Gakuen University

ペックルの波長間デコリレーション特性を、円形開口によって生じる通常の多色光スペックルと比較しながら、計算機シミュレーションにより調べることが目的としている。

スペックルの研究においては、これまでも計算機シミュレーションが多く用いられてきたが、その多くは数値的データの統計的解析を目的としており、多色光スペックルをカラー画像として可視化する試みはあまり例がない。しかし、カラー画像化した多色光スペックルは、その定性的特性を直接視覚に訴える利点を有しており、理論的に既知の現象を、容易には実験のできない条件下においても、目に見えるパターンとして確認することが可能である。本研究は、このような視点から、スペックルにおける計算機シミュレーションの役割を考察することもその目的としている。

2. スペックルの生成と波長依存性

2.1 回折領域

スペックルを観測する領域として、粗面物体のフラウンホーファー回折領域および像領域を考え、そのための光学系として図1(a)および(b)を仮定する。

図1(a)では、物体面 P_1 にある粗面 S の直前あるいは直後に開口 A を置く。これは、開口の振幅透過率に等しい複素振幅を持つ照射光により粗面 S を照射することと等価である。粗面物体として、簡単のため、スリガラスのような透過物体を考える。その表面の微細な形状を高さ関数 $h(x_0, y_0)$ で表すと、この粗面物体による複素振幅透過率は、物体による吸収がなく、照射光が粗面に垂直に入射することを仮定して、

$$\begin{aligned} T(x_0, y_0) &= \exp[i\phi(x_0, y_0)] \\ &= \exp[ik(n-1)h(x_0, y_0)] \end{aligned} \quad (1)$$

と書ける。ただし、 $\phi(x_0, y_0)$ はこの粗面による位相変調関数、 $k=2\pi/\lambda$ は波数、 λ は入射光の波長、 n は透過物体の屈折率であり、 (x_0, y_0) は物体面の座標である。関数 $h(x_0, y_0)$ は確率過程であり、その統計的性質は、厳密には確率密度によって記述されるが、多くの場合、標準偏差 σ_h などで表現される表面粗さが重要となる。このとき、変調位相 $\phi(x_0, y_0)$ の標準偏差は $\sigma_\phi = k(n-1)\sigma_h$ となる。

簡単のため、入射光を振幅1の一様なコヒーレント光とすると、粗面および開口を透過した直後の光波の複素振幅は、開口 A の振幅透過率を $A(x_0, y_0)$ として、

$$U_0(x_0, y_0) = A(x_0, y_0) T(x_0, y_0) \quad (2)$$

となる。この光波 U_0 の回折波 $V(x, y)$ を距離 z のフラウンホーファー回折領域に置かれた観測面 P_2 で観測する。したがって、複素振幅 $V(x, y)$ は、

$$\begin{aligned} V(x, y) &= \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right] \\ &\times \iint U_0(x_0, y_0) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda z}(xx_0 + yy_0)} dx_0 dy_0 \end{aligned} \quad (3)$$

と表される¹⁰⁾。このような回折領域で観測されるスペックルを、以下簡単のため回折面スペックルと呼ぶ。

スペックルの生成過程における波長の影響は、式(1)および(3)に見ることができる。まず、式(1)の $T(x_0, y_0)$ は、波数 k を介して波長に依存しており、高さ関数 $h(x, y)$ が同じでも、波長が異なれば、その光が受ける位相変調 $\phi(x_0, y_0)$ は変化する。

また、式(3)では、積分の前の二つの指数関数は、スペックル強度には影響を与えないので無視して構わないが、積分の前の $1/\lambda$ 、および積分の中のフーリエ変換核に波長依存性がある。後者は、空

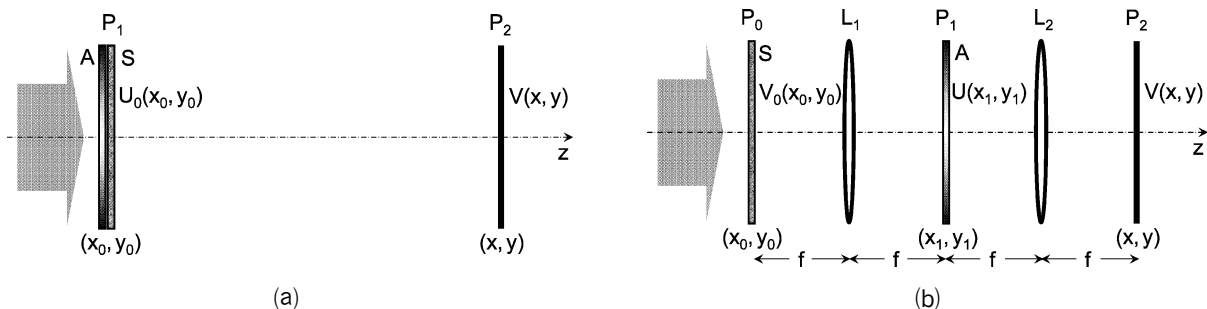


図1 粗面物体の(a)フラウンホーファー回折領域、および(b)像領域でスペックルを観測する光学系

間周波数

$$\xi = \frac{x}{\lambda z}, \eta = \frac{y}{\lambda z} \quad (4)$$

の波長依存性であり、フーリエ変換を FFT を用いて計算する場合には、計算の直接の結果である空間周波数の関数としてのパターンを、空間座標 (x, y) の関数に変換する際に、波長による座標の伸縮を考慮に入れる必要があることを意味している。

2.2 像領域

図 1 (b) は、粗面の像領域においてスペックルを観測する光学系である。以下、このスペックルを像面スペックルと呼ぶ。この光学系では、式(1)の振幅透過率を持つ粗面 S を面 P_0 に置くことで、粗面直後の光波 $V_0(x_0, y_0)$ がレンズ L_1 によってフーリエ変換され、スペクトル面 P_1 にフーリエスペクトルに相当する複素振幅を生ずる。それが、 P_1 に置かれた振幅透過率 $A(x_1, y_1)$ の開口 A を通過した後、レンズ L_2 によって再度フーリエ変換され、像面 P_2 に複素振幅 $V(x, y)$ を生ずる。

像面スペックルの波長依存性は、式(1)によるものが支配的であると考えられる。結像の過程における 2 つのフーリエ変換のうち、レンズ L_1 によるフーリエ変換は、粗面が十分粗い場合、すなわちスペキュラー成分がない場合には、面 P_1 に一様ランダムなスペックルを形成する。この状態は、面 P_1 にランダムな振幅変調と位相変調を持つスクリーンがあることと等価であり、この回折における波長依存性は結果に大きな影響を与えない。一方、開口 A を通過後のレンズ L_2 によるフーリエ変換は、開口 A によって決まる点像広がり関数 (PSF) を規定し、この PSF の広がり関数が式(3)の場合と同様に、波長に比例した伸縮を起こす。しかし、回折領域の場合には、パターン全体にわたる光軸を中心とする大規模なパターンの拡大が生じるのに対し、PSF の波長依存性は、局所的かつシフト不変であることから、その影響は限定的であると考えられる。したがって、本シミュレーションでは、PSF の波長依存性を無視し、像面スペックルの場合には、式(1)の波長依存性のみを考慮することとした。

3. 多色光スペックルの可視化

多色光照射によるスペックルをカラー画像とし

て可視化するには、照射光の波長スペクトルに基づいて発色する散乱パターンを何らかの表色系を用いて表現し、適切なカラー画像データを生成する必要がある。

計算機で通常扱われるカラー画像は、フルカラー画像あるいはトゥルーカラー画像と呼ばれる一画素が 8×3 ビットの RGB 画像である。これは、RGB 表色系に基づくものである。ところが、国際照明委員会 (CIE) が定めた RGB 表色系は、3 つの波長 700.0 nm (赤色: R), 546.1 nm (緑色: G), 435.8 nm (青色: B) の波長色を 3 原色とするものであるのに対し、CRT や液晶ディスプレイなどの表示機器ではこの波長色を実現できず、機器毎に代替色を使っている。すなわち、RGB 表色系は事実上デバイス依存的な表色系であり、カラー画像の正確な表現法としては適切ではない。このため、本シミュレーションでは、実在しない虚色を 3 原色とし、デバイス依存的な表色系である XYZ 表色系を使ってシミュレーションを行い、それを最後に RGB 表色系に変換して表示する方法を用いる。XYZ 表色系のデータとしてカラー画像を作成しておけば、必要に応じてそれを具体的な機器に依存した RGB 表色系、あるいは印刷用の CMYK 表色系に変換することにより、最適な色表現が可能となるためである。このような、XYZ 表色系を介した色管理は、カラーマネジメントと呼ばれる。ただし、本論文に掲載するカラー画像は、生成した XYZ 表色系のデータを便宜上 CIE の RGB 表色系に変換し、それをフルカラーの EPS ファイルに出力したものを印刷の工程にかける方法を用いており、正確なカラーマネジメントにはなっていない。

なお、XYZ 表色系には、目に色を提示する際の視野角の違いに基づく 2° 視野表色系と 10° 視野表色系があり、前者を XYZ、後者を $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ と表記する。本シミュレーションでは、散乱パターンが比較的広い範囲に広がることから、 $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系を用いることとし、簡単のためこれを単に XYZ 表色系と表記している。

カラー画像データの生成方法を次に示す。いま、エネルギースペクトル $P(\lambda)$ を持つ光があるとき、XYZ 表色系におけるこの光の色の三刺激値 X, Y, Z は、 $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系の等色関数 $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ を用いて

$$\begin{aligned} X &= \int P(\lambda)x(\lambda)d\lambda \\ Y &= \int P(\lambda)y(\lambda)d\lambda \\ Z &= \int P(\lambda)z(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

と表される¹¹⁾. この XYZ 表色系の三刺激値から RGB 表色系の三刺激値 R, G, B への変換式は, RGB 表色系から XYZ 表色系への変換行列

$$W = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1302 \\ 1.0002 & 4.5907 & 0.0600 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \quad (6)$$

を用いて,

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = W^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41844 & -0.15866 & -0.08283 \\ -0.09117 & 0.25242 & 0.01570 \\ 0.00092 & -0.00255 & 0.17858 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

で与えられる¹¹⁾. したがって, シミュレーションにより, 観測面の画素 (i, j) の強度スペクトル $P_{ij}(\lambda)$ が求まれば, その $P_{ij}(\lambda)$ に対して, 式(5)および(7)を適用することで, その画素の RGB 三刺激値が算出され, これを全ての画素について行えば画像全体の CIE の RGB フルカラー画像が得られる. また, 特定の表示装置に適合した RGB 画像とする場合には, 式(6)の変換行列 W として装置固有のものを用いればよい. ただし, 同時に, 装置のガンマ特性にも注意を払う必要がある.

4. シミュレーション手順

シミュレーションでは, MATLAB を用いて, 以下の考え方によりプログラム作成を行った. 粗面, フーリエ面, 観測面等の複素振幅および強度分布は, いずれも大きさ 1024×1024 の 2 次元配列 (行列) とした. 粗面の高さ関数 $h(x_0, y_0)$ は, 無相関の正規乱数行列とし, その標準偏差を粗さ σ_h とした. 物体はスリガラスを想定し, 屈折率を $n=1.5$ とした. したがって, 光路長に基づく実効的な表面粗さは $(n-1)\sigma_h=0.5\sigma_h$ となる.

開口 A は, 通常のスペックルにおいては, 半径 40 画素の円形開口とした. また, フラクタルスペックルでは, べき関数の原点での発散を避けるため,

$$A(x_0, y_0) = \left[1 + \left(\frac{r_0}{R} \right)^2 \right]^{-D/4} \quad (8)$$

の近似を用い, パラメータ R を 0.1 とした. ただし, $r_0 = (x_0^2 + y_0^2)^{1/2}$ である. この式は, $r_0 \gg R$ において $A \propto r_0^{-D/2}$ のべき関数に漸近し, したがって, 強度透過率は $A \propto r_0^{-D}$ となる. D は, 生成するスペックルのフラクタル性を特徴づける重要なパラメータで, 以下, 簡単のため, 単にべき指数と呼ぶことにする.

回折面スペックルのシミュレーションにおいては, 入射光のエネルギースペクトル $P(\lambda)$ を構成する各波長に対して, 上記の正規乱数行列から式(1)により複素振幅透過率 $T(x_0, y_0)$ を求め, 式(2)および(3)よりスペックル場の複素振幅 $V(x, y)$ を算出する. その際, フーリエ変換は FFT により行い, 式(3)の積分の前の 2 つの指数関数を無視する. 得られた複素振幅より $|V(x, y)|^2$ を求め, それに $\lambda_0=400\text{nm}$ を基準波長とする係数 $(\lambda_0/\lambda)^2$ を乗じることで, 積分前の係数 $1/\lambda$ を反映する.

また, FFT に際しては, 式(4)に示される空間周波数の波長依存性を考慮して, 基準波長 $\lambda_0=400\text{nm}$ に対する波長比に比例して, 画像の拡大を行う. その際, データのリサンプルが必要であり, 画素値の内挿による補間を行う. 得られた全波長の強度データから, 式(5)により XYZ 表色系の三刺激値を求め, さらに式(7)により RGB 表色系に変換する.

像面スペックルの場合は, 粗面の複素振幅透過率 $T(x_0, y_0)$ を粗面直後の複素振幅と見なし, それを FFT によりフーリエ変換して, スペクトル面で開口関数 $A(x_1, y_1)$ を掛けた後, 再度 FFT を行って, 像面での複素振幅 $V(x, y)$ を得る. 各波長について求めた強度 $I=|V|^2$ から, 同様に XYZ 表色系の三刺激値を求め, それを RGB 画像に変換する.

なお, 回折面, 像面のいずれにおいても, R, G, B の値が負になる場合は, 画像として表示できないため, それを 0 に置き換える. また, モニタ等のディスプレイ上には, この RGB 画像が表示されるが, 本論文の印刷用には MATLAB から EPS ファイルとして出力しており, その過程で RGB 画像が CMYK 画像に自動的に変換されている. 当然のことながら, CMYK による印刷色は RGB による発光型ディスプレイ上の色とは異なっている.

なお, 等色関数 $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ は, 1nm 刻み

の値を用いた¹²⁾。このため、離散波長および連続スペクトルのいずれの場合も、波長の精度を1nmとして計算を行った。

5. スペックルの波長間相関

異なる波長によるスペックルの統計的相関特性を調べるため、円形開口を用いたスペックル強度分布の波長間相関係数をシミュレーションにより求めた結果を図2(a), (b)に示す。図2(a)は回折面スペックル, (b)は像面スペックルの場合であり、粗さが $\sigma_h=0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8\mu\text{m}$ の場合について、550nmを中心として $\Delta\lambda$ 離れた2波長のスペックル間の強度相関係数を $0\leq\Delta\lambda\leq 300\text{nm}$ の範囲でプロットしている。ただし、回折面スペックルでは、波長による大きさの変化を除外して形状の変化のみを見るため、波長の増加によるパターンの拡大処理を行わずに計算している。2つ

の観測面でのスペックルは、 $\sigma_h=0.25\mu\text{m}$ の場合を除いて実質的に同じ相関特性、すなわち、波長差の増加とともに相関が低下するいわゆるデコリレーションの特性を示している。デコリレーションは、粗面粗さが大きくなるほど顕著になっている。これは、スペックルの波長間相関特性としてよく知られた現象であり、この原理に基づいて、多色光を用いて波長よりも大きな粗面粗さを測定する方法が開発されている^{8,9)}。なお、 $\sigma_h=0.25\mu\text{m}$ の場合において、回折面スペックルの方が像面スペックルよりも相関が高くなっているが、これは、後に図4(a)および図8(a)の説明において示すように、粗面によって散乱されないスペキュラー成分が光軸付近に生じ、それが相関を高める役割を果たしているためであると考えられる。

つぎに、べき則開口を用いた像面スペックルについて、同様の特性を計算した結果を図3(a)に示す。図2との比較から分かるように、像面フラク

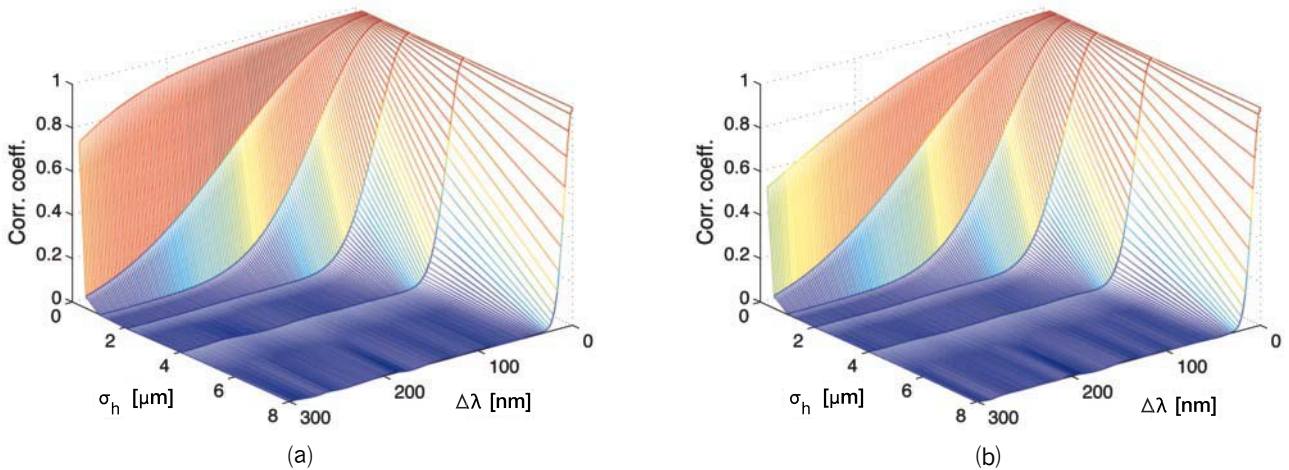


図2 円形開口による(a)回折面スペックル, および(b)像面スペックルの波長間強度相関係数の粗面粗さ依存性

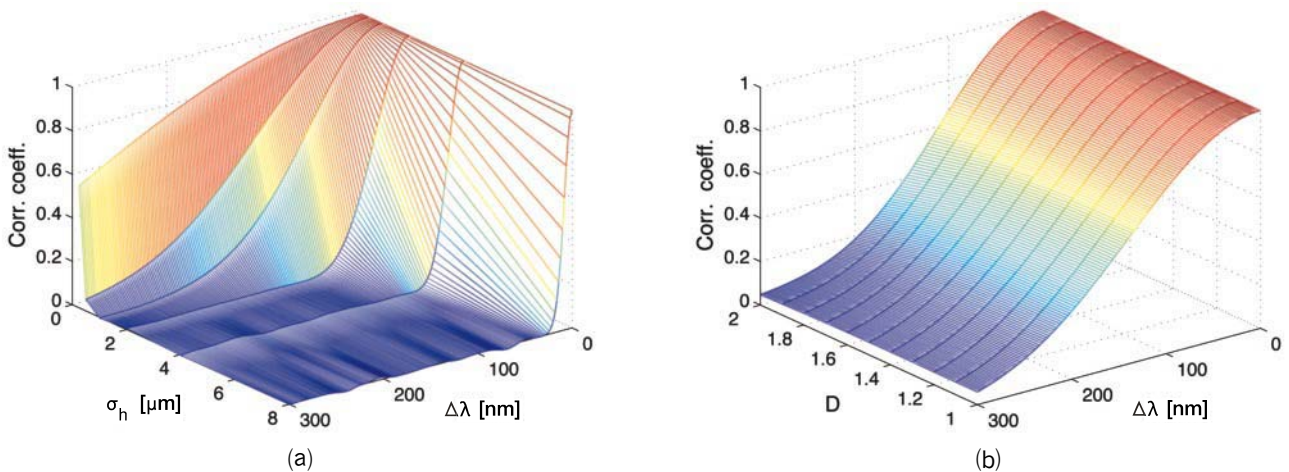


図3 べき則開口による像面スペックルの波長間強度相関係数の(a)粗面粗さ依存性, および(b)べき指数依存性

タルスペックルにおいても、円形開口による通常のスペックルの場合とほぼ同様の波長間相関特性を示しており、適切な波長の組み合わせを用いることで、統計的に相関のないスペックルを生成できることが分かる。また、そのような波長の組は、粗面粗さが大きいほど、波長差を小さくできることが分かる。一方、図3(b)に示すように、相関特性はべき指数 D には大きく依存しない。すなわち、いずれの D においても、波長間の相関はほぼ同様に振る舞うことが分かる。

6. 白色レーザー光照射

この節では、3つの異なる波長の光を発振する白色レーザーを光源とした場合に生成されるスペックルをシミュレートした結果を示す。このレーザーは、ホローカソード型 He-Cd レーザであり、赤 (635.5nm, 636.0nm)、緑 (533.7nm, 537.8nm)、青 (441.6nm) の3色を出力することから、白色レーザーとも呼ばれる。ここでは、用いる等色関数が

1nm 刻みであることから、 $\lambda_r=636\text{nm}$ 、 $\lambda_g=536\text{nm}$ 、 $\lambda_b=442\text{nm}$ の3波長を用いて計算を行った。シミュレーション結果を図4-7に示す。

6.1 円形開口

図4(a)-(c)は、円形開口を用い、表面粗さを $\sigma_h=(a)0.25$, (b)1, (c) $4\mu\text{m}$ とした場合である。屈折率が1.5のガラスでは、 $\sigma_h=0.25\mu\text{m}$ の実効的粗さは $0.125\mu\text{m}$ となり、 λ_g の約1/4に相当する。このため、図4(a)には散乱されない光、すなわち、スペキュラー光によるエアリーパターンが現れており、その周囲に散乱光によるスペックルが生じている。また、粗さが小さいために、3波長成分間の相関が高く、ほぼ同じ形のスペックル粒が、内側に青、外側に赤の順に並ぶ現象が生じている。

図4(b)は、 $\sigma_h=1\mu\text{m}$ の場合であり、実効的粗さが λ_g にほぼ等しいため、スペキュラー回折成分は消失している。 $\lambda_r-\lambda_g$ 、 $\lambda_g-\lambda_b$ 間の波長差はいずれも約100nmであり、図2(a)によれば、この粗さ

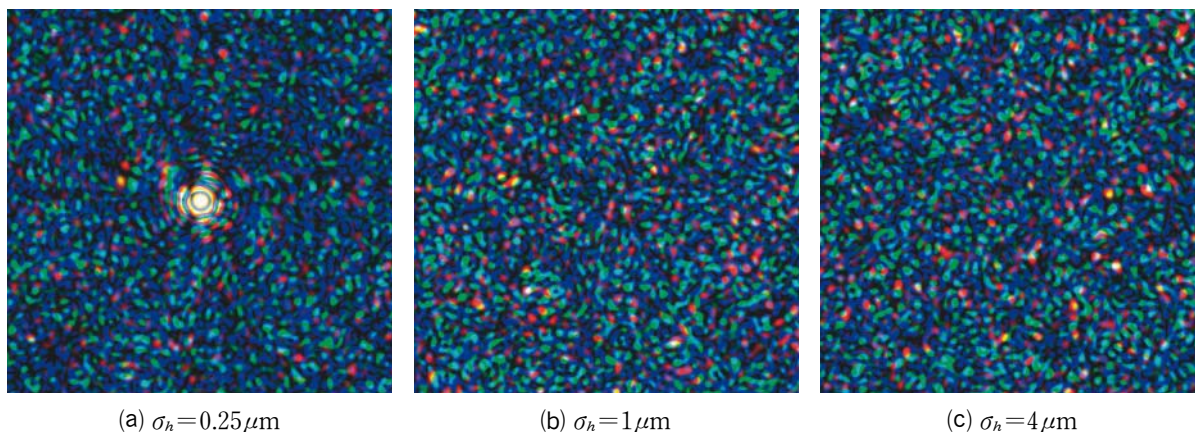


図4 白色レーザー光と円形開口による回折面スペックル

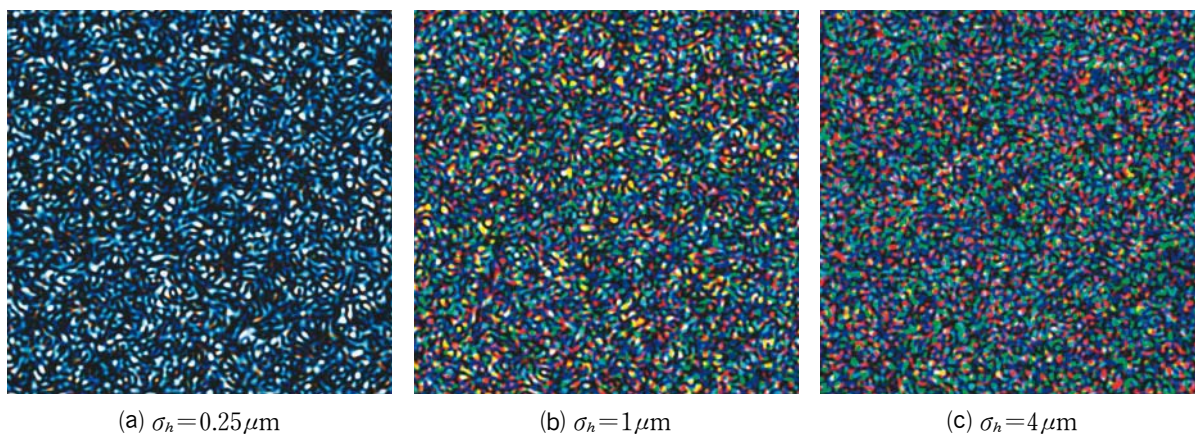
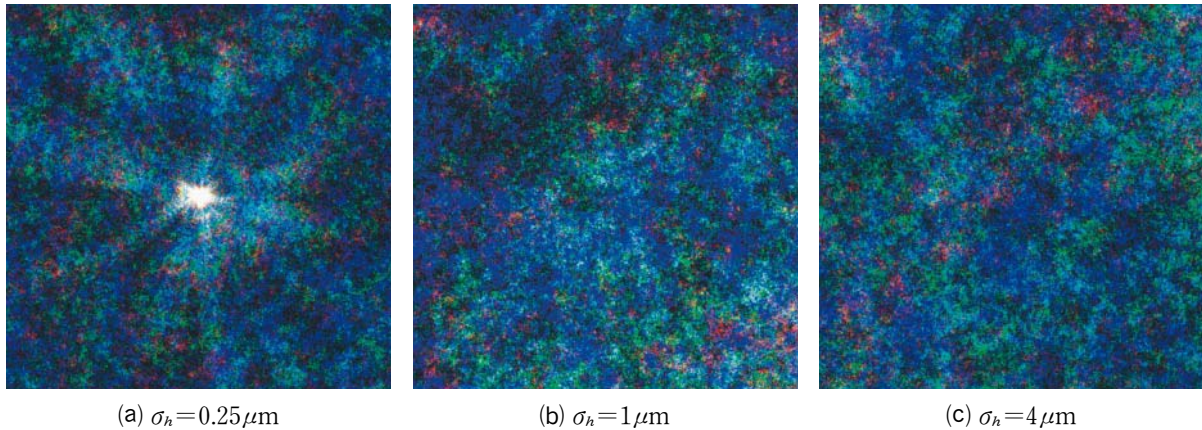
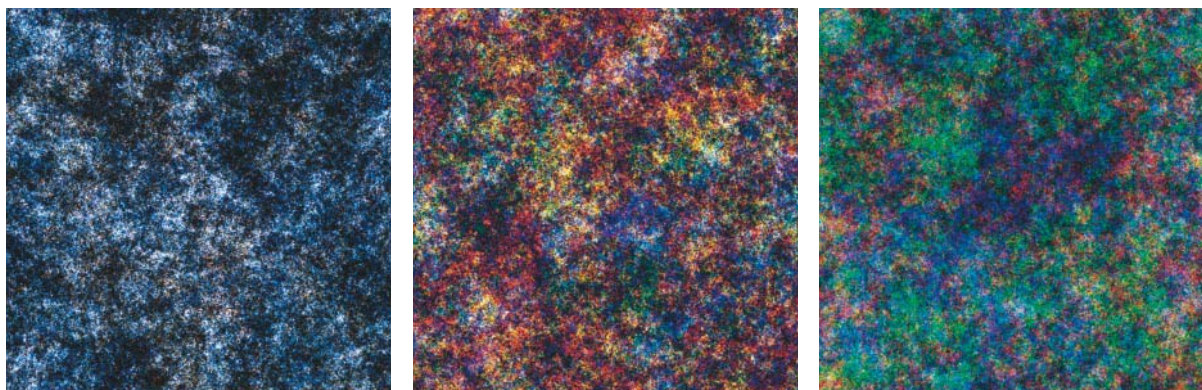


図5 白色レーザー光と円形開口による像面スペックル

(a) $\sigma_h=0.25\mu\text{m}$ (b) $\sigma_h=1\mu\text{m}$ (c) $\sigma_h=4\mu\text{m}$ 図6 白色レーザー光とべき則開口による回折面スペckル. べき指数は $D=1.8$ (a) $\sigma_h=0.25\mu\text{m}$ (b) $\sigma_h=1\mu\text{m}$ (c) $\sigma_h=4\mu\text{m}$ 図7 白色レーザー光とべき則開口による像面スペckル. べき指数は $D=1.8$

の場合、波長間にはある程度の相関がある。しかし、図4(b)の画像にはそのような傾向は認められない。これは、長波長側のパターンが相対的に拡大することにより、少し波長間相関のある画像も視覚的に認識しづらくなっているためである。

図4(c)は、 $\sigma_h=4\mu\text{m}$ の十分粗い状態であり、3つの波長によるスペckルは完全に無相関状態にあるといえる。なお、図4(a)–(c)のパターンがいずれも全体に青みを帯びているのは、式(3)の右辺の係数 $1/\lambda$ により、長波長成分の強度が低下しているためである。

図5(a)–(c)は、円形開口による像面スペckルである。 σ_h が $0.25\mu\text{m}$ と小さい(a)では、波長間のデコリレーションが極めて小さく、色分離がほとんど生じないため、3色の混合により白色に近いスペckルとなっている。その4倍の粗さを持つ(b)では、波長間相関が低下するが、ある程度の相関が残っているため、異なる波長によるスペckル粒が一部重畳し、元の波長成分にはない黄色や青緑のスペckルが比較的多く見られる。また、

波長間のスペckルの形状変化が小さいことから、スペckルの粒状性は依然高い。 $\sigma_h=4\mu\text{m}$ の(c)では、波長成分間の相関は完全に消失しており、それによって波長間のスペckル形状が大きく変化するため、色分離が起きると同時に、粒状性が低下する。また、像面スペckルでは、回折面スペckルの場合と異なり、長波長側の強度が低下する現象は起きない。このため、図4のような青みの帯びた色彩にはなっていない。

6.2 べき則開口

図6(a)–(c)は、 $\sigma_h=(a)0.25, (b)1, (c)4\mu\text{m}$ の粗面にべき則開口を用いて回折面に生成したフラクタルスペckルである。べき則開口のべき指数は $D=1.8$ とした。円形開口の場合と同様に、粗さの小さい(a)では、べき則開口の回折パターンに相当するべき関数状のスペckラー成分が光軸上に現れており、その周囲に、青、緑、赤の順に拡大されたスペckルが生じている。スペckルの形状

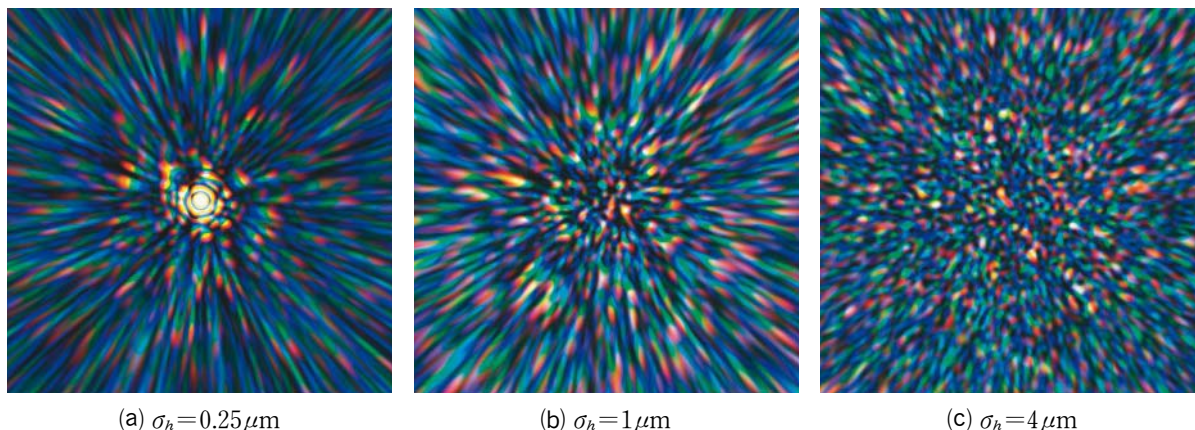
(a) $\sigma_h = 0.25 \mu\text{m}$ (b) $\sigma_h = 1 \mu\text{m}$ (c) $\sigma_h = 4 \mu\text{m}$

図8 連続広帯域光と円形開口による回折面スペックル

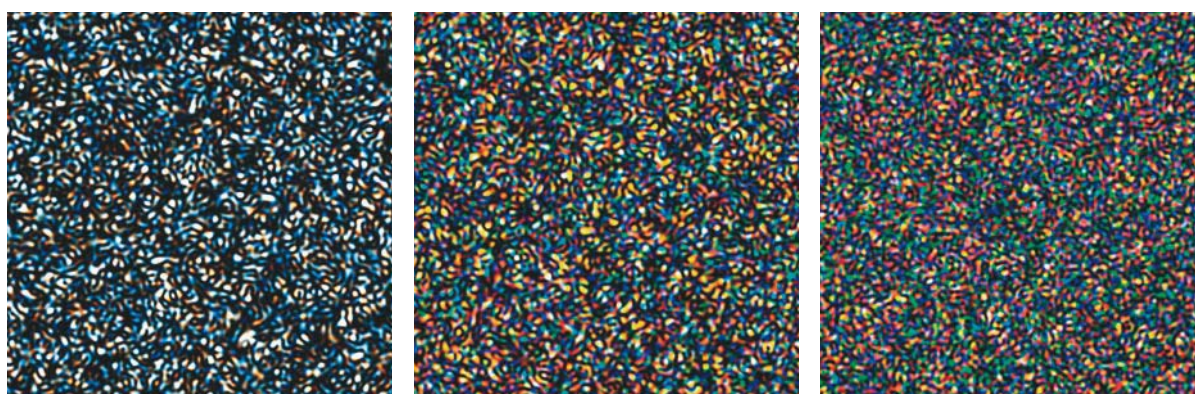
(a) $\sigma_h = 0.25 \mu\text{m}$ (b) $\sigma_h = 1 \mu\text{m}$ (c) $\sigma_h = 4 \mu\text{m}$

図9 連続広帯域光と円形開口による像面スペックル

は、フラクタルスペックルの特徴として、固有のスペックルサイズを持たず、微細なスペックル粒が随所に大小のクラスタを形成する様相を呈している。また、それによってボイドも散在している。

緑の波長と同程度の実効的粗さを持つ粗面の場合である図6(b)では、円形開口の場合と同様、スペックルの波長順の配列構造は一見では認識できない。さらに4倍の粗さを持つ図6(c)の場合、波長間のスペックルの統計的無相関性はより明確になっている。

図7(a)–(c)は、同様のべき則開口を用いて像面に形成したフラクタルスペックルであり、図5(a)–(c)の場合と同様の傾向が確認される。すなわち、波長に比べて粗さの小さい(a)は、波長間のデコリレーションが小さいために、白色のフラクタルスペックルに近いパターンとなっている。(b)では、デコリレーションによる色分離が生じているものの、残存する相関によりスペックルの部分的重畳が生じていることが、特に黄色の発色が多いことから分かる。十分粗さの大きい(c)では、3波

長によるスペックルは互いにほぼ無相関であり、強度のクラスタ部分やボイドが重畳するか否かは全くの確率的偶然によっている。その結果として、この図では、比較的良好に色分離が生じている。このため、色の違いを無視すれば、ボイドは相当程度消失している。

7. 連続広帯域光照射

つぎに、広帯域の連続スペクトル光を照射する場合について考える。スペックルパターンの形成には、空間的なコヒーレンスが必要である。空間的にコヒーレントな連続広帯域スペクトル光を得る方法として、キセノンアークランプなどの高輝度インコヒーレント光源の光をレンズにより集光し、ピンホールを用いて空間コヒーレンスを改善する古典的方法がある⁸⁾⁹⁾。これに対し、近年開発が進んでいる超広帯域高輝度光であるスーパーコンティニューム光を使うことにより、高輝度のレーザー光として連続スペクトル光を利用できるも

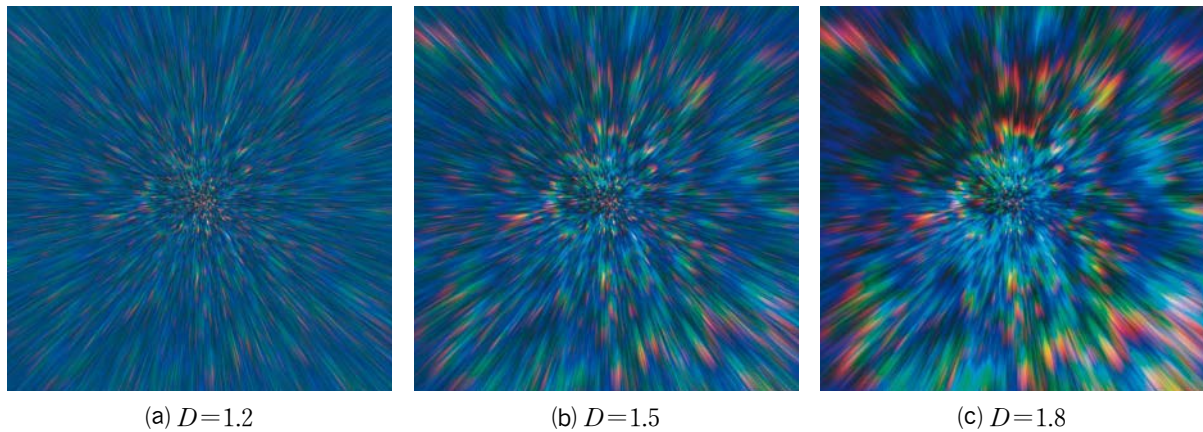


図 10 連続広帯域光とべき則開口による回折面スペックル。粗さは $\sigma_h=1\mu\text{m}$

のと考えられる。ここでは、そのような照射光を仮定して、可視光のほぼ全域である 400–700nm のフラットな連続スペクトルによるスペックルをシミュレートした。

7.1 円形開口

図 8(a)–(c)は、円形開口による回折面スペックルで、表面粗さの設定は図 4–7 と同じである。図 8(a)の中心部には、図 4(a)と同様のエアリーパターンが生じている。この両画像ではエアリーパターンやその周囲のスペックルがほぼ同じ形状になっているが、これは、本シミュレーションの全てのスペックル生成過程で、固定した種から生成した同一の乱数配列を散乱面として用いているためである。したがって、図 8(a)–(c)の画像の中の 3 波長成分だけを抽出したものが図 4(a)–(c)の対応する画像になるという関係になっている。このため、逆に、図 4(a)に見られる 3 色のスペックル粒の離散的な配置の間を連続スペクトルによって虹色に接続することにより、図 8(a)に見られる連続的な放射状構造になる。多色光によって回折面スペックルに生じるこの特徴的な構造は、放射状繊維構造と呼ばれている。

図 8(b)では、 σ_h の増加によってスペキュラー回折成分が消失するとともに、放射状繊維構造が少し弱くなっている。これは、粗さの増加によって、相関が維持される波長範囲が狭くなることによる。図 4(b)と図 8(b)の間にも、両図(a)と同様の対応関係があることから、図 4(b)単独では視認が難しい 3 波長間の相関関係が、図 8(b)との比較により、ある程度確認することができる。

$\sigma_h=4\mu\text{m}$ の図 8(c)では、さらに波長間デコリ

レーションが進み、繊維構造は周辺部にわずかに認められる程度にまで縮小している。

円形開口を用いて像領域に生成したスペックルを図 9(a)–(c)に示す。この図も、白色レーザー光による図 5(a)–(c)と、回折面スペックルの場合と同様の対応関係がある。したがって、図 9(a)のスペックルにおいては色分離が少なく、ほぼ白色のスペックルとなっていること、図 9(b)においては、黄色に発色しているスペックル粒が目立ち、粒状性が比較的はっきりとしていること、図 9(c)においては、色分離が進むと同時に、スペックルの粒状性が低下することなどは、いずれも図 5(a)–(c)の場合と同様に解釈することができる。ただし、当然のことながら、図 9(b)および(c)は、光源スペクトルの連続性から、図 5の対応する画像よりも多くの色彩を含んでいる。

7.2 べき則開口

図 10(a)–(c)は、連続スペクトルを用いて回折面にフラクタルスペックルを生成させた結果であり、開口 A のべきの指数を $D=(a)1.2, (b)1.5, (c)1.8$ としてある。べき則開口、あるいはべき則プロフィールを持つ照射光によるスペックル生成では、 $1 < D < 2$ の範囲においてスペックル強度がフラクタル性を示すことが知られており¹⁾、この範囲における代表的な 3 つの D 値をここで設定している。なお、生成されるスペックルのフラクタル次元は $D_s=2(D-1)$ で与えられる。したがって、この D の範囲に対して、その値は $0 < D_s < 2$ となる。

図 10(a)は、 $D=1.2$ と小さい値の場合であり、この値における単色光スペックル強度は、スペック

ルの次元 D_s が 0.4 と低く、フラクタル的構造があまり目立たない、粒径の極めて小さい通常のスペックルに近い状態である。したがって、この図は、図 8 (b)において、スペックル径を小さくしたものに近いことがわかる。

$D=1.5$ である図 10 (b)の場合は、強度のクラスタ化によって、強度の空間分布に若干の不均一性が生じている。 D が 1.8 と大きくなると、強度のクラスタ化が進み、高強度領域や低強度領域が顕著になる。図 10 (c)においても、この 2 種の領域が図の右下と左上にそれぞれ見られる。このため、放射状繊維構造もクラスタ化し、大きな不均一性が生じている。なお、図 6 (b)と図 10 (c)は、ともに $\sigma_h=1\mu\text{m}$, $D=1.8$ の場合であり、照射光のみが異なっている。したがって、この場合にも、後者に見られる放射状構造から、前者における 3 つの波長成分の対応関係を確認することができる。

像面スペックルの場合を図 11 (a)–(f)に示す。同図のうち、(a)–(c)は、 $\sigma_h=1\mu\text{m}$ の粗面を用い、べき指数を $D=(a) 1.2$, (b) 1.5, (c) 1.8 とした場合であり、(d)–(f)は、 $\sigma_h=4\mu\text{m}$ の粗面を用いて、べき指数を $D=(d) 1.2$, (e) 1.5, (f) 1.8 とした結果である。

(a)–(c)の系列では、べき指数の増加とともに、フラクタル的構造が発達し、強度クラスタが大きくなっているが、粗さがあまり大きくないことから、波長間のデコリレーションが小さく、図 5 (b)の場合と同様に、大小の強度クラスタが相当程度重畳している。白色スペクトルのうち、本来の黄色成分に加えて、赤成分と緑成分が重なることでも黄色味が生じることから、全体に赤黄色を帯びた色彩になっているものと思われる。一方、(d)–(f)の系列では、粗さが $\sigma_h=4\mu\text{m}$ と大きいことから、波長ごとの色分離が良く、多様な色彩が生じている。また、その分、色を無視した強度分布としては、平均化が進行し、強度クラスタやポイドがほぼ消失している。

この両系列間に見られるものと同様の傾向は、図 7 (b)および(c)の比較においても指摘した。実際、 σ_h と D のパラメータは、図 7 (b)と図 11 (c), および図 7 (c)と図 11 (f)の間でそれぞれ対応しており、同様の特性が確認できる。

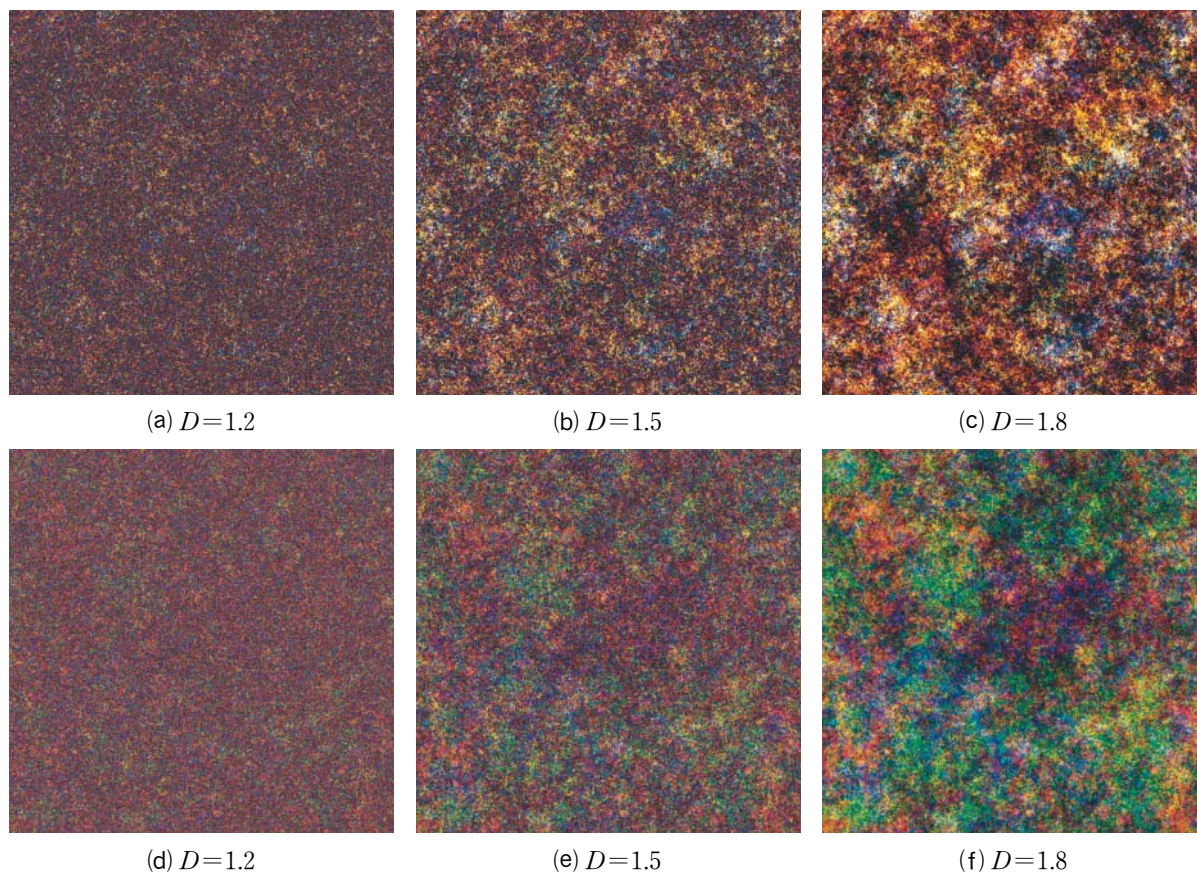


図 11 連続広帯域光とべき則開口による像面スペックル。粗さは、 $\sigma_h=(a)-(c) 1\mu\text{m}$, (d)–(f) $4\mu\text{m}$

8. コントラスト

多色光スペckルでは、粗さの増加や波長幅の増加によるデコリレーション効果により、空間的強度分布の変動係数に対応するコントラスト

$$C = \sigma_I / \langle I \rangle \quad (9)$$

が低下することが知られている。ただし、 σ_I は強度の標準偏差であり、 $\langle \cdot \rangle$ は空間平均を表す。

図 12 (a) に、連続広帯域光と円形開口による像面スペckルのコントラストを、スペckルの波長帯域 $\Delta\lambda$ と表面粗さ σ_h の関数としてプロットした。この図におけるコントラストの低下は、波長差 $\Delta\lambda$ の 2 つの波長間の相関係数を示す図 2 (b) の振る舞いを反映している。ただし、コントラストの $\Delta\lambda$ 依存性は、この波長幅内の全ての波長による寄与の総和であることから、 σ_h の増加によるコントラストの低下は、相関係数の曲線ほどには急激にはなっていない。この図により、本シミュレーションの連続広帯域光で仮定した $400 \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$ のスペckル光によるスペckルが、 $\sigma_h = 1 \mu\text{m}$ では比較的良好なスペckル粒状性を残し、 $\sigma_h = 4 \mu\text{m}$ の粗さでは強度の平均化が進んでいることが、コントラストの点から確認できる。

図 12 (b) は、べき則開口によるフラクタルスペckルの場合について、波長帯域幅 $\Delta\lambda$ とべき指数 D の関数としてコントラストをプロットしたものである。ただし、 $\sigma_h = 1 \mu\text{m}$ としてある。この図から、コントラストは D 依存性を示しており、 $D \approx 1.7$ において最大になることが分かる。べき則

開口では、粗面全体から光が散乱される設定であることから、スペckル場の最小スペckル径は極めて小さく、単一波長 $\Delta\lambda = 0$ の場合にもコントラストは 1 になっていない。特に、 D が小さい領域では、強度クラスタが未発達なため、この傾向が強い。 D が増加し、クラスタが発達するにつれて、強度変動が増大し、コントラストが増加する。しかし、 $D \geq 1.8$ でコントラストが減少する理由はあまり定かではない。 $D = 2$ の境界値に近づくことで、フラクタル性を次第に失うことも要因の一つである可能性がある。

いずれの D に対しても、波長帯域幅 $\Delta\lambda$ の増加とともにコントラストが低下しており、互いに相関のないスペckル成分が多数重畳することで、ポイド領域がふさがれ、コントラストが現象する傾向が読み取れる。

9. おわりに

円形開口による通常のスペckルとべき則開口によるフラクタルスペckルの場合について、3 原色に対応する 3 波長からなる白色レーザ光照射、および $400 \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$ の連続広帯域光を照射した場合に生じる多色光スペckルを、回折面および像面の 2 つの観測領域について、計算機シミュレーションにより求め、XYZ 表色系の等色関数に基づく RGB フルカラー画像として生成した。

回折面においては、連続広帯域光による放射状繊維構造を確認し、像面においては、波長デコリ

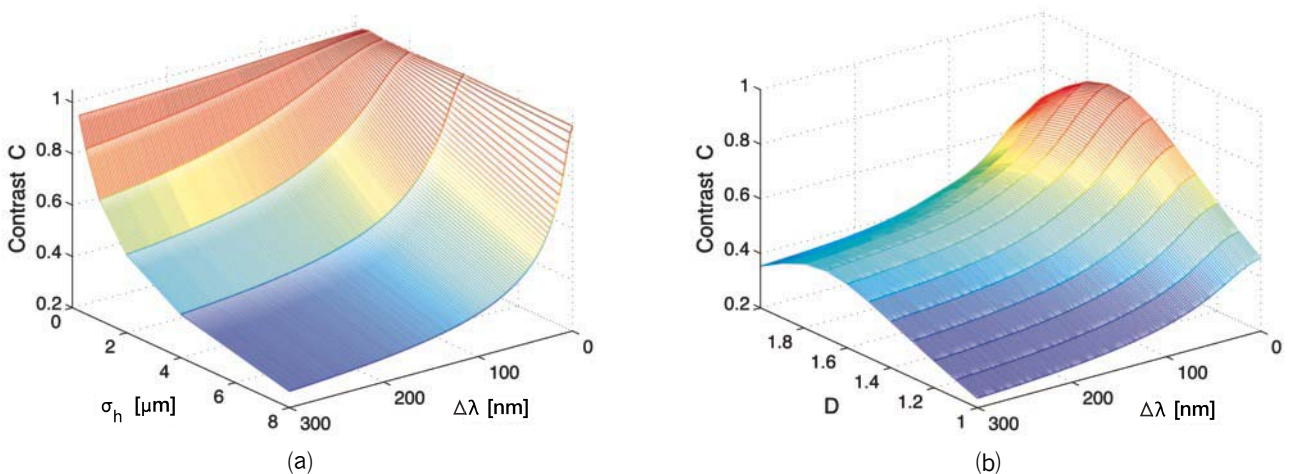


図 12 照射光のスペckル幅に対する像面スペckルのコントラスト。(a)円形開口を用いた場合の粗面粗さ依存性、(b)べき則開口を用いた場合のべき指数依存性

レーションによる空間的に一様に広がる色分離したスペックルを生成した。いずれも場合も、円形開口によるスペックルでは、過去の理論および実験により明らかにされてきた特性が再現され、用いたシミュレーション手法の妥当性が確認できた。一方、べき則開口によるフラクタルスペックルでは、基本的には通常のスペックルと同様の特性を示しつつも、べき指数に依存したフラクタルスペックル特有の散乱パターンが発生することが示された。特に、波長の変化によるフラクタルスペックルのデコリレーション特性は、べき指数には大きく依存しない一方、通常のスペックルと同様に、粗面粗さには大きく依存することが明らかとなり、統計的に無相関なスペックルを生成するための波長選定に関する有効な知見が得られた。

本研究では、離散のおよび連続的エネルギースペクトルを持つ多色光散乱パターンをフルカラー画像として表現することを試みた。その結果、統計的な特性を色彩の変化を含む視覚的に認識しやすい画像として表現できることが確認された。本研究では、生成したXYZ表色系から、フルカラー画像としてのRGB画像への変換、および印刷データ用にEPSファイルに出力する際のCMYKデータへの変換には、出力デバイスを考慮した扱いは行っていない。より正確なシミュレーション結果を得るためには、出力デバイスを考慮した正しいカラーマネジメントが必要であろう。

本研究は、一部学部4年生の卒業研究と連携して行った。関連するテーマを担当した斎藤泉、中澤佳則、間島浩文、鶴田太一の各君の協力に謝意を表す。

【参考文献】

- 1) K. Uno, J. Uozumi and T. Asakura: Correlation properties of speckles produced by diffractal-illuminated diffusers, *Opt. Commun.*, **124**, 1, 2, pp.16-22, 1996.
- 2) J. Uozumi: Fractality of the optical fields scattered by power-law-illuminated diffusers, *Proc. SPIE*, **4607**, pp.257-267, 2002.
- 3) J. Uozumi, M. Ibrahim and T. Asakura: Fractal Speckles, *Opt. Commun.*, **156**, 4-6, pp.350-358, 1998.
- 4) H. Funamizu and J. Uozumi: Generation of fractal speckles by means of a spatial light modulator, *Opt. Express*, **15**, 12, pp.7415-7422, 2007.
- 5) H. Funamizu and J. Uozumi: Multifractal analysis of speckle intensities produced by power-law illumination of diffusers, *J. Mod. Opt.*, **54**, 10-12, pp.1511-1528, 2007.
- 6) R. A. Sprague: Surface roughness measurement using white light speckle, *Appl. Opt.*, **11**, 12, pp.2811-2816, 1972.
- 7) G. Parry: Speckle patterns in partially coherent light, in *Laser Speckle and Related Phenomena*, ed. J. C. Dainty (Second Enlarged Edition), pp.77-122, Springer, Berlin, 1984.
- 8) K. Nakagawa and T. Asakura: Contrast dependence of white light image speckles on surface roughness, *Opt. Commun.*, **27**, 2, pp.207-213, 1978.
- 9) K. Nakagawa and T. Asakura: Average contrast of white-light image speckles patterns, *Optica Acta*, **26**, 8, pp.951-960, 1979.
- 10) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics, Third Edition*, Roberts, Englewood, 2005.
- 11) 大田 登：色彩工学，第2版，東京電機大学出版局，2001.
- 12) Colour and Vision Research Laboratories: Color matching functions, <http://www-cvrl.ucsd.edu/cmfs.htm>