HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ

学校法人北海学園 北 海 学 園 大 学 北 海 斎 科 大 学

タイトル	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
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 ることを目的としている.

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、

$$T(x_0, y_0) = \exp[i\phi(x_0, y_0)] \\ = \exp[ik(n-1)h(x_0, y_0)]$$
(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、

$$U_0(x_0, y_0) = A(x_0, y_0) T(x_0, y_0)$$
(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,

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

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/λ,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

$$\xi = \frac{x}{\lambda z}, \ \eta = \frac{y}{\lambda z} \tag{4}$$

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Poに置くことで、 粗面直後の光波 $V_0(x_0,y_0)$ がレンズL1によって フーリエ変換され、スペクトル面P1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、 P1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L2によって再度フーリエ変換 され、像面P2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L1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 P₁ に一 様ランダムなスペックルを形成する.この状態は, 面 P₁ 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 L₂ 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 プレー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ディペンデントな表色系 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、デバイスインディ ペンデントな表色系である 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、カラーマネー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、正確なカラーマネー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

$$X = \int P(\lambda)x(\lambda)d\lambda$$

$$Y = \int P(\lambda)y(\lambda)d\lambda$$
 (5)

$$Z = \int P(\lambda)z(\lambda)d\lambda$$

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

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

を用いて,

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

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、

$$A(x_0, y_0) = \left[1 + \left(\frac{\gamma_0}{R}\right)^2\right]^{-D/4}$$
(8)

の近似を用い,パラメータ $R \ge 0.1$ 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 $\lambda_0=400$ 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 λ = 400nm 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 σ_h =0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 μ 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 $\leq \Delta\lambda \leq$ 300nm 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、 $\sigma_h=0.25\mu m$ 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、 $\sigma_h=0.25\mu m$ 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 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、 $\lambda_r = 636$ nm、 $\lambda_g =$ 536nm, λ_b=442nm 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 μ m とした場合である. 屈 折率が 1.5 のガラスでは, σ_h=0.25μm の実効的粗 さは $0.125 \mu m$ 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、 $\sigma_h = 1 \mu m$ の場合であり、実効的粗さ がん 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



(a) $\sigma_h = 0.25 \mu m$

(b) $\sigma_h = 1 \mu m$ 図4 白色レーザ光と円形開口による回折面スペックル



図5 白色レーザ光と円形開口による像面スペックル



(a) σ_h=0.25µm
 (b) σ_h=1µm
 (c) σ_h=4µm
 図 6 白色レーザ光とべき則開口による回折面スペックル.べき指数はD=1.8



(a) σ_h=0.25µm
 (b) σ_h=1µm
 (c) σ_h=4µm
 図7 白色レーザ光とべき則開口による像面スペックル.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、 $\sigma_h = 4 \mu m$ の十分粗い状態であり、3 つの波長によるスペック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/ λ 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ックル である. σ_h が 0.25 μ 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 スペックルとなっている.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ック ル粒が一部重畳し、元の波長成分にはない黄色や 青緑のスペックルが比較的多く見られる.また、 波長間のスペックルの形状変化が小さいことか ら、スペックルの粒状性は依然高い. $\sigma_h=4\mu m$ 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ックル形状が大きく変 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、像面スペックルでは、回折面ス ペックルの場合と異なり、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、 σ_h = (a) 0.25, (b) 1, (c) 4 μ 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 タルスペックルである。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キュ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 れたスペックルが生じている。スペックルの形状



(a) $\sigma_h = 0.25 \,\mu m$

(b) σ_h=1μm図 8 連続広帯域光と円形開口による回折面スペックル



(b) $\sigma_h = 1 \mu m$ 図 9 連続広帯域光と円形開口による像面スペックル

連続広帯域元と円形用口による该面スペックル

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)の場合は、 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.

(c) $\sigma_h = 4 \mu m$

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 ンティニュウム光を使うことにより、高輝度の レーザ光として連続スペクトル光を利用できるも



(a) D=1.2
 (b) D=1.5
 (c) D=1.8
 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σ_h=1µm

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。

 $\sigma_h = 4 \mu m$ 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 ファイ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 $\sigma_h=1\mu$ 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, $\sigma_h=1\mu$ mの粗面を用い, ベ 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, $\sigma_h=4\mu$ 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 $\sigma_h = 4\mu$ 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、強度クラスタやボイドがほぼ消 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, $\sigma_h \ge D$ 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.



 (d) D=1.2
 (e) D=1.5
 (f) D=1.8

 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、σ_h=(a)-(c) 1μm, (d)-(f) 4μm

8. コントラスト

多色光スペックルでは,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

$$C = \sigma_I / \langle I \rangle \tag{9}$$

が低下することが知られている。ただし, o₁ は強度の標準偏差であり、く・>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 スペックルのコントラストを、スペクトルの波長 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 $\leq \lambda \leq$ 700nmのスペクトル光によるスペックルが、 $\sigma_h =$ 1 μ m では比較的良好なスペックル粒状性を残し、 $\sigma_h = 4\mu$ 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ッ クルの場合について、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、 $\sigma_h=1\mu$ 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≈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、スペックル場の最小スペックル径は 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 ⊿λ の増加 とともにコントラストが低下しており,互いに相 関のないスペックル成分が多数重畳することで, ボ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ックルとべき則開口 によるフラクタルスペックルの場合について、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 $400 \le \lambda \le 700$ nmの連続広帯域光を照射 した場合に生じる多色光スペックルを、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 照射光のスペクトル幅に対する像面スペックルのコントラスト.(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、離散的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ー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 を表する。

【参考文献】

- 1) K. Uno, J. Uozumi and T. Asakura: Correlation properties of speckles produced by diffractalilluminated 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.
- 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.
- 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.
- 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