



Title	レーザースペックル研究の展開
Author(s)	朝倉, 利光; 魚住, 純
Citation	電子科学研究, 4, 3-12
Issue Date	1997-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24368
Type	departmental bulletin paper
File Information	4_P3-12.pdf



レーザースペckル研究の展開

光システム計測研究分野 朝倉利光, 魚住純

粗面などのランダムな媒質によってレーザー光が散乱されると、その散乱光中にスペckルと呼ばれるきらきら輝く明暗の斑点模様が観察される。スペckルに関する研究は、スペckルがレーザーを使った結像などにおけるノイズとなることから当初はその除去を目的として始められた。その後、次第にスペckルが物体や光学系に関する情報を運ぶ担い手であることが明らかになるにつれて、レーザーによる光計測や光情報処理を目的とする研究へと展開し、状況に応じて様々な様相を呈するスペckルの性質が明らかにされてきた。ここでは、スペckルの基礎的性質に関する研究の展開を光システム計測研究分野における研究を中心に概説する。

1. はじめに

1.1 スペckル研究の発展

レーザー光のようなコヒーレントな光で、紙や壁などの粗面を照射し、その反射光や透過光を観察した場合、図1(a)に示すようなきらきら輝く明暗の斑点模様を見ることができる。このような斑点模様はスペckルパターンあるいは単にスペckルと呼ばれ、またこのような模様を作る現象はスペckル現象と呼ばれ、レーザーの出現直後からその性質に関する研究が本格的に始められた。

上記の現象はレーザー光が粗物体でランダムに散乱され、各点からの散乱波が観察面の各点で重なり合わさって生じるランダムな干渉現象である。このような光の散乱現象は特に新しいものではなく、古くはNewton^[1]の時代から虹や夕焼けなどの日常生活に見られるいろいろな現象として物理学の領域で観察され研究されてきた。この現象に対する最初の注目すべき研究はExner^[2]によって行われた。彼は水滴や曇った窓ガラスや霜がついた窓ガラス越しに遠くの光源を眺めたとき、図1(b)のような中心部分から外側に延びる放射状繊維構造を観察した。彼はこの観察において、中間に赤色フィルターを入れた場合には、この放射状繊維構造が図1(a)のごとき細かい明暗模様の粒状構造になることを確かめた。von Laue^[2-5]はランダム位相に関するRayleighの理論を使って、最初にこの放射

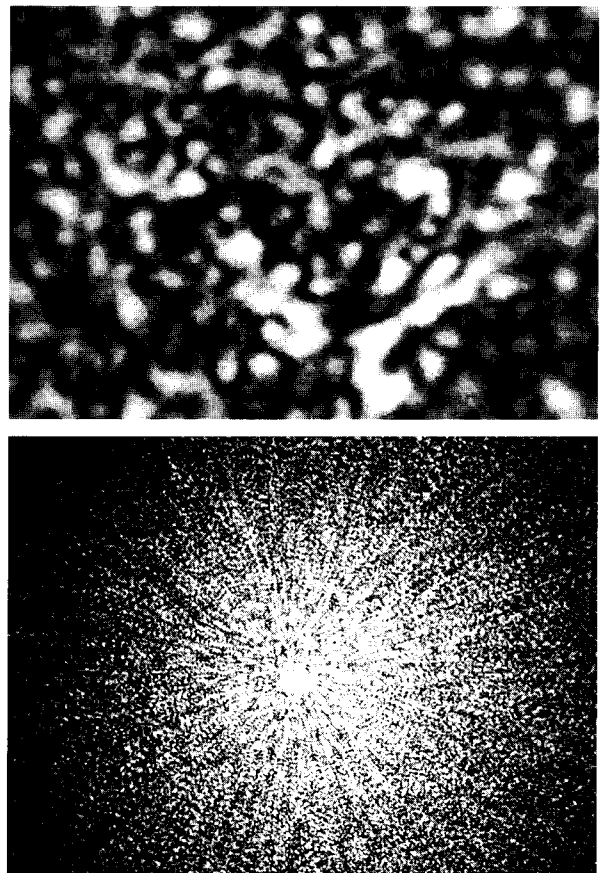


図1 (a)コヒーレント光(単色光)による回折界に生じるスペckルパターン。(b)回折界に生じる多色光スペckルパターン(この放射状繊維構造は実際には色づいて見える)。

状及び粒状構造の理論的考察を行った。彼はアークランプとプリズムを用いた実験を行い、このような現象は古典的な波動光学では説明できないと考えた。しかし、de Haas^[6] はナトリウムランプを、Buchwald^[7] はスペクトル幅を制御した光源と水銀の線スペクトルを用いた実験を行い、単色に近い光源では粒状構造（図1(a)）を、十分に単色でない光源では放射状構造（図1(b)）をとることを確かめた。Raman^[8] も十分に単色な光を用いて明暗の斑点模様を観察すると共に、この現象をランダムに配置された粒子からの回折波の干渉として解釈した。上記の研究からかなり遅れて、Ramachandran^[9] は明暗の斑点模様の強度分布に関する理論的考察を行い、近年のスペックル理論研究の基礎となる部分の研究を行った。

以上のような過去の研究はあったものの、スペックル現象に関する本格的な研究は1960年のレーザーの開発によってもたらされた。すなわち、レーザーの開発によるコヒーレント光の出現によって、スペックル現象は容易に観察され、かつレーザーを使った実験において種々の問題を起した。特に当初は、レーザー光を用いて物体を観察するとき、その像に重畳する明暗模様は観察像において大きな障害となった。そこで、

この明暗の雑音を除去するという目的から、スペックルの性質とその除去法に関する研究が行われた。しかし、1970年頃からようやくスペックル現象そのものの本質的な物理的特性が研究の対象となり、Goodman^[10]、Dainty^[11]、朝倉^[12] らを中心として基礎研究が多く進展し、現在ではスペックルに関する研究は統計光学の中で一大分野を形成するまでになっている。

1.2 スペックルとコヒーレンス

統計光学の中で、スペックル以外の一大分野として光のコヒーレンスに関する研究がある。スペックル現象は光波のランダムな干渉現象であることから、その研究はコヒーレンス理論が基礎になっている。したがって、スペックルとコヒーレンスの間にはさまざまな類似点や相違点があり、特に両者の本質的な違いに注意しなければならない。

まず、光のコヒーレンスを考えてみよう。図2に示すように、自然放射の過程にしたがう熱的光源に対してコヒーレンスを考える。ここで光源を形成する原子や分子は、個々にエネルギー遷移を行い各遷移エネルギーに対応する波長をもって独立に光を放出する。放出された光はそれぞれ非常に短い波長で伝播し、それ

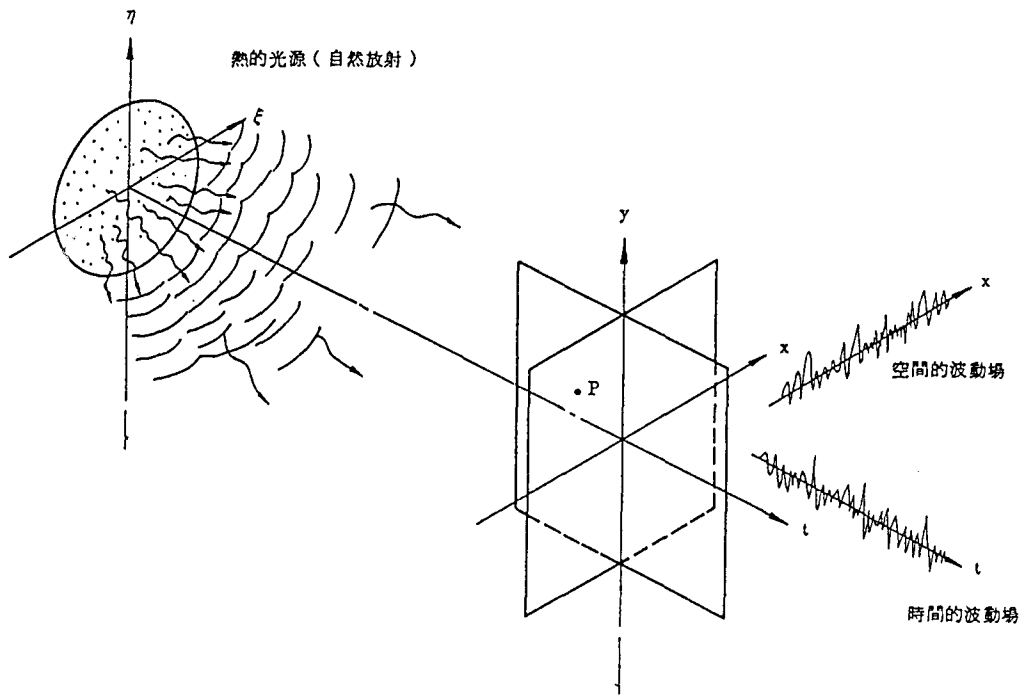


図2 コヒーレンス現象.

らの重ね合わせとして観測場の空間（例えばP点）に光の波動場が形成される。ある時間における空間の各点における光の波動場は、各点での重ね合わせの条件が異なるために各点で異なる空間的にランダムな波動場を形成する。また、各点での波動場は、光源の放射過程から時間と共にランダムに変動する。すなわち、実際に観測される光の波動場は、時空間で変動するランダム現象、すなわちゆらぎ現象となる。この時空間のゆらぎ現象は、光の高い周波数で変動するため、それに追従できる光検出器が存在せず、観測は不可能である。この時空間で変動する光の波動場の統計的特性を、光源との関係で論じるのがコヒーレンスである。

一方スペックルの場合には、図3に示すように、ある粗物体にコヒーレントな光を照射し、物体から得られる散乱光によって形成される波動場を考える。粗物体上の微小な各凹凸（あるいは散乱体）は、個々独自に光を散乱する。散乱された光は球面波状に伝播し、あらゆる光が観測場の各点（例えばP点）で重なり合う。このとき、粗物体の凹凸に従って散乱される光の位相が異なるため、各点での重ね合わせの状態により波動は強め合ったり弱め合ったりする。この結果として、

明暗の斑点模様が生じスペックルと呼ばれる。このスペックルは、物体が静止していれば静止状態（静的スペックル）となるが、物体が運動すれば運動状態（動的スペックル）をとる。この静的及び動的スペックルは、散乱物体との関係で生じるため観測可能である。このように、スペックル現象に関する研究は、照射される物体との関係で生じる散乱場のランダムな波動場の統計的特性を論じるものである。表1に、スペックルとコヒーレンスの相違点を記す。

以下では、スペックルの基本的特性について述べたのち、近年積極的に行われてきたスペックルに関する基礎的な研究分野について紹介する。

表1 スペックルとコヒーレンスの相違点。

	スペックル現象	コヒーレンス現象
ゆらぎの原因	散乱物体	光源
ゆらぎ	空間的ゆらぎ 時空間的ゆらぎ	時空間的ゆらぎ
観測	可	不可

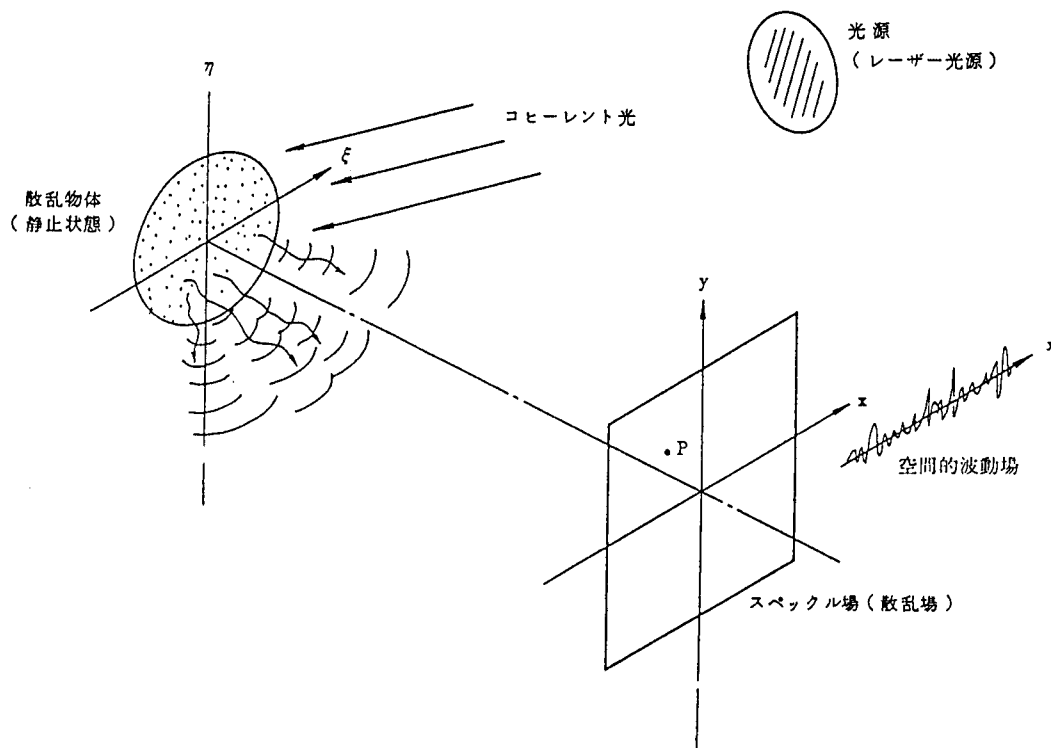


図3 スペックル現象。

2. スペックルの基本的性質

2.1 スペックルの形成

スペックル形成の仕組みを模式的に図4に示す。多くの物体表面は光の波長（約 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ）に比べて十分大きな凹凸をもっている。この粗面にレーザー光を照射すると、観測面上の任意の1点で観測される光の場は、粗面の異なる場所から反射されてきた、たくさんの光波が互いに干渉しあうことによって生じる（図4(a)）。これらの光波がもつ位相は、粗面の凹凸の不規則性を反映してランダムであるため、干渉の結果できる光の空間的な強度分布もランダムになる。こうして図1(a)のようなスペックルパターンが形成される。

スペックルは自由空間だけではなく、粗面をレンズで結像した像面にも現れる（図4(b)）。多くの場合、結像レンズは粗面の微細な凹凸を解像することができないため、粗面の隣りあった微小散乱領域が像面につくる点像の広がり関数は、ランダムな位相をもって重なりあう。この結果、自由空間と同様、像面にもスペックルが生じる。以上の議論は結像面に限らず、焦点をはずれた面においてもなりたつ。

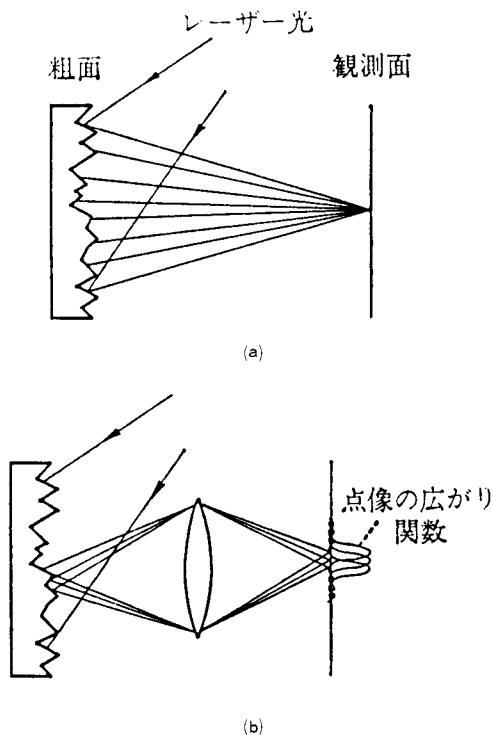


図4 スペックル形成の仕組み。

2.2 スペックルの1次統計

スペックルパターンの強度変動において、ある強度の光がどのくらいの割合で存在するかを調べることは、レーザーを用いた光学システムに現われるスペックルノイズの影響を知るうえで非常に大切である。また、スペックル場の位相分布は、スペックル干渉計において重要な意味をもつ。ここでは、もっとも典型的な場合について、スペックル強度および位相の確率密度関数を求める。

照明光として単色光を用い、ひとつの偏光成分のみを考えると、観測面上の1点 $\mathbf{x}=(x,y)$ における光の複素振幅 A は

$$A(\mathbf{x})=|A(\mathbf{x})|\exp[i\theta(\mathbf{x})] \quad (1)$$

と表わされる。先ほど述べたように、この複素振幅はたくさんの微小散乱領域からの光波が干渉しあった結果として与えられる。すなわち、

$$A(\mathbf{x})=\sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} a_k(\mathbf{x})=\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k|\exp(i\phi_k) \quad (2)$$

である。ここで、 $(1/\sqrt{N})a_k(\mathbf{x})$ は各光波の複素振幅、また N は観測点の光に寄与する散乱領域の数である。こうして得られる複素振幅 A の確率密度関数を求めるために、次の3つの条件を仮定する。(i)各光波の振幅と位相、さらには異なる光波どうしの振幅および位相は統計的に独立であること、(ii)各光波の位相は $(-\pi,\pi)$ で一様な確率分布をもつこと、および(iii) $N\gg 1$ であることである。以上の仮定は多くの場合、粗面が波長に比べて十分に粗ければ満たされる。このとき、複素振幅 A の実部 A_r と虚部 A_i の結合確率密度関数には中心極限定理が適用でき、

$$Pr_i(A_r, A_i)=\frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{A_r^2+A_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

となる。ただし、 σ は A_r および A_i の標準偏差である。(3)式は、足しあわされる光波の数が多いとき、スペックル場は平均値ゼロの円形複素ガウス統計に従うことを示している。

スペックル強度 I および位相 θ は、 A_r および A_i と

$$I=A_r^2+A_i^2, \theta=\tan^{-1}(A_i/A_r) \quad (4)$$

の関係がある。ランダム変数の変換法則を用いると、最終的に強度の確率密度関数は、

$$P_I(I) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right), \quad (I \geq 0) \quad (5)$$

となり、位相の確率密度関数は、

$$P_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \quad (-\pi \leq \theta \leq \pi) \quad (6)$$

となる。(5)式より、スペックル強度は負指数分布に従うことがわかる。このことは、スペックルパターンは全体的に暗い部分が多いが、非常に明るい部分も存在していることを示している。さらに、(6)式はスペックルの位相がまったくランダムであることを示している。

スペックル強度の平均 $\langle I \rangle$ および標準偏差 σ_I は、

$$\langle I \rangle = 2\sigma^2, \quad \sigma_I = \langle I \rangle \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 $\langle \dots \rangle$ は同様な統計的性質をもつ粗面の集合平均を表わす。今、スペックルのコントラストを $C = \sigma_I / \langle I \rangle$ で定義すると、(7)式よりこれは1になる。このコントラスト1のスペックルは十分発達したスペックルと呼ばれる。すなわち、このような発達したスペックルの1次統計は粗面に問わず常に同じであるため、粗面の微細構造に関する情報は得られない。このことは逆に、測定物体の微視的構造の違いを無視できることを示しており、計測を行ううえで非常に都合の良い性質であるといえる。

2.3 スペックルの2次統計

スペックルパターンの空間的構造の細かさを調べるためには、スペックル強度分布の自己相関関数を知る必要がある。観測面上の強度分布 $I(\mathbf{x})$ の自己相関関数は、スペックル場に円形複素ガウス統計を仮定すると、

$$\langle I(\mathbf{x}_1)I(\mathbf{x}_2) \rangle = \langle I(\mathbf{x}_1) \rangle \langle I(\mathbf{x}_2) \rangle + \langle A^*(\mathbf{x}_1)A(\mathbf{x}_2) \rangle^2 \quad (8)$$

で与えられる。ここで、 $\langle I(\mathbf{x}_1) \rangle = \langle A^*(\mathbf{x}_1)A(\mathbf{x}_1) \rangle$ 、 $\langle I(\mathbf{x}_2) \rangle = \langle A^*(\mathbf{x}_2)A(\mathbf{x}_2) \rangle$ である。すなわち、強度の自己相関関数は複素振幅の自己相関関数で完全に記述される。いま、粗面の微小構造が照明領域に比べて十分小さいと仮定すると、

$$\langle A^*(\mathbf{x}_1)A(\mathbf{x}_2) \rangle = \int \int_{-\infty}^{\infty} |E(\mathbf{u})|^2 T^*(\mathbf{u}, \mathbf{x}_1) T(\mathbf{u}, \mathbf{x}_2) d^2\mathbf{u} \quad (9)$$

がなりたつ。ただし、 $E(\mathbf{u})$ は粗面における照明光の複素振幅分布、 $T(\mathbf{u}, \mathbf{x})$ は粗面から観測面までの伝播関数あるいはインパルスレスポンス関数、 x は比例係数である。(9)式を(8)式に代入することにより、任意の光学系で生じるスペックルパターンの自己相関関数が計算できる。

具体例として、自由伝播系および結像光学系で観察されるスペックルを考える。伝播関数にフレネル回折近似を適用すると、自由空間におけるスペックルパターンの自己相関関数は、

$$\langle I(\mathbf{x})I(\mathbf{x}+\mathbf{X}) \rangle = \langle I \rangle + \left| \iint_{-\infty}^{\infty} |E(\mathbf{u})|^2 \times \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda R} \mathbf{u} \cdot \mathbf{X}\right) d^2\mathbf{u} \right|^2 \quad (10)$$

となる。ここで、 λ は光の波長、 R は粗面から観測面までの距離、 $\mathbf{X} = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$ 、 $\langle I \rangle = \langle I(\mathbf{x}_1) \rangle = \langle I(\mathbf{x}_2) \rangle$ である。(10)式は、平均強度に対応する第1項と、強度のゆらぎ成分 $\Delta I = I - \langle I \rangle$ の相関に対応する第2項よりなっている。スペックル粒子の平均径は、第2項の空間的な広がり、すなわち照明光の強度分布をフーリエ変換したときの広がり幅で決まる。このことから、照明領域を広げるほど、細かいスペックルパターンが得られることがわかる。ひとつのレンズよりなる結像光学系におけるスペックルパターンの自己相関関数は、照明光の強度分布が一様であるとする ($|E(\mathbf{u})|^2 = 1$)、

$$\langle I(\mathbf{x})I(\mathbf{x}+\mathbf{X}) \rangle = \langle I \rangle + \left| \iint_{-\infty}^{\infty} |P(\mathbf{x})|^2 \times \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda d_i} \mathbf{x} \cdot \mathbf{X}\right) d^2\mathbf{x} \right|^2 \quad (11)$$

で与えられる。ここで、 $P(\mathbf{x})$ はレンズの瞳関数、 d_i はレンズから観測面までの距離である。(11)式より、像領域における平均スペックル径は、レンズ瞳の強度透過率分布をフーリエ変換したときの広がり幅で与えられることがわかる。また、このスペックル径はレンズから観測面までの距離にのみ依存し、粗面に焦点が合っているかどうかには無関係である。このことは、スペックル径が観測面における点像の広がりには必ずしも対応しないことを示しており興味深い。どちらの光学系においても、スペックルパターンの細かさは、そのパターン上の1点に到達する光線の広がり角で決定される。

3. 種々のスペックルとその性質

3.1 未発達なスペックル

2.2節で述べた十分に発達したスペックルが発生するための3つの条件(i)~(iii)のいずれかが満たされないとき、スペックルはもはやゼロ平均円形複素ガウス統計には従わなくなる。

まずはじめに、観測点において干渉する光波の位相が $(-\pi, \pi)$ の一様分布に従わない場合を考える。このような状況は、波長に比べて粗さの小さな粗面からの散乱などにおいて生じる。このとき、スペックル場の平均値はゼロではなくなり、図5のようなコントラストの低いスペックルが観察される。このようなスペックルは未発達なスペックルと呼ばれ、コントラストが粗面の粗さに依存することから、粗面の粗さの測定への応用を目的にその統計的特性について精力的な研究が行われている^[13-18]。

結像光学系に生じる未発達なスペックルでは、焦点面におけるコントラスト C が焦点面の前後に比べて小さくなる現象が生じる^[19]。この現象の発見により、 A_r と A_i の標準偏差 σ_r 、 σ_i が等しくない状態、すなわち非円形複素ガウス統計の存在が明らかとなった^[20]。図6に示すように、スペックルの非円形統計は像面近傍以外にも自由伝播系の光軸付近などにも現れる。

さて、(i)および(iii)の条件が満たされる限りは、(2)式において中心極限定理が適用でき、 A_r と A_i は最も一般的な結合ガウス確率密度関数

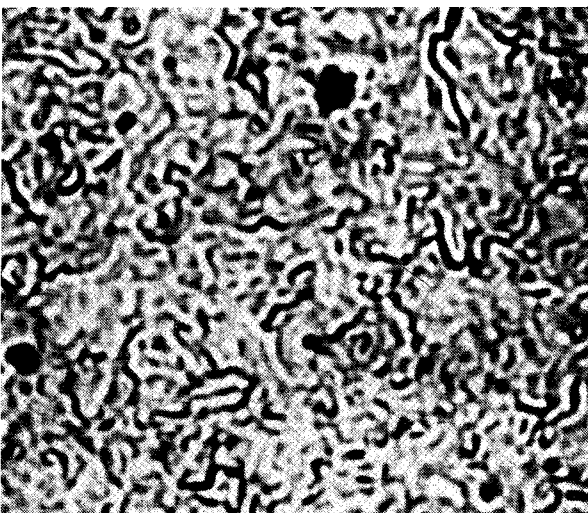


図5 粗さの小さな粗面の像面に生じた未発達なスペックルパターン。

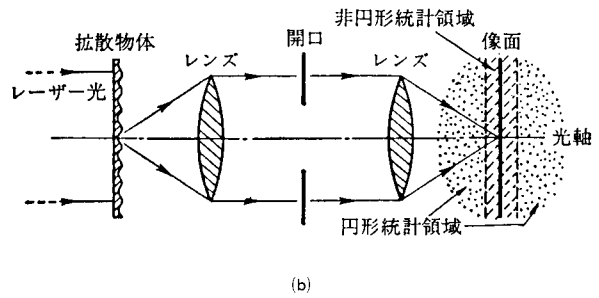
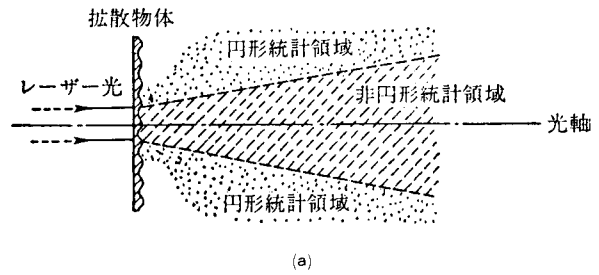


図6 (a)結像系、および(b)回折場においてガウスのスペックル場の円形統計と非円形統計が現れる領域。

$$P_{r,i}(A_r, A_i) = \frac{1}{2\pi\sigma_r\sigma_i(1-\rho^2)^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{(1-\rho^2)}\right. \\ \left. \times \left(\frac{A_r^2}{\sigma_r^2} - \frac{2\rho\Delta A_r\Delta A_i}{\sigma_r\sigma_i} + \frac{\Delta A_i^2}{\sigma_i^2} \right) \right] \quad (12)$$

に従う。ただし $\Delta A_r = A_r - \langle A_r \rangle$ 、 $\Delta A_i = A_i - \langle A_i \rangle$ であり、また ρ は A_r と A_i の相関係数である。(12)式に従うスペックルはガウスのスペックルと呼ばれる。ここで、さらに(ii)の条件が成り立つときには、 $\langle A \rangle = 0$ 、 $\sigma_r = \sigma_i = \sigma$ 、 $\rho = 0$ (ゼロ平均円形統計) となり、(12)式は(3)式になる。(12)式で表される一般的なガウスのスペックルの統計的振舞いは、結合確率密度関数の等密度線として定義される等確率密度楕円を導入することにより、明確かつ簡便に表示することができる^[21]。一例として、像面スペックルの等確率密度楕円が粗面の粗さによって変化するように図7に示す。粗さの増加に伴い、非ゼロ平均非円形統計からゼロ平均円形統計へと変化の様子がよくわかる。

ガウスのスペックルの統計的特性については、位相の確率密度^[21,22]や偏光特性^[23]などについても詳しい解析と実験が行われている。

3.2 非ガウスのスペックル

観測面に寄与する統計的に独立な散乱領域の数 N が

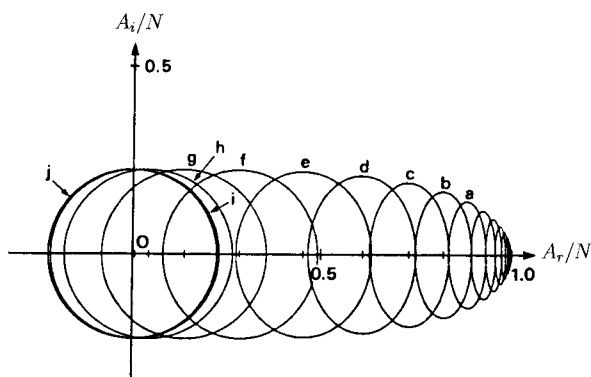


図7 像面スペックルの複素振幅の等確率密度楕円の粗面の粗さに対する変化。a から j まで粗さが増加するに従い、楕円の円形性が増すとともに平均値が零に近づく。これは、スペックル場が非ゼロ平均非円形統計からゼロ平均円形統計へ遷移することを表している。

少ない場合、光波の重ね合わせにおいて中心極限定理が適用できず、スペックル場の A_r と A_i はもはや結合ガウス統計には従わない。このようなスペックルは非ガウスのスペックルと呼ばれ、粗面の相関長と同程度の大きさのレーザービームで粗面を照射した場合の自由伝播系、または粗面の相関長と同程度の解像力を持つ結像光学系の結像面などにおいて見ることができる。非ガウスのスペックルの際だった特徴は、粗面の粗さが増加するに従って C が 1 を越えて増大する現象である(図8)^[24,25]。これは、ガウスのスペックルでは C が 1 に飽和することと対照的である。この大きな強度ゆらぎは、場がガウス統計に収束しない状態では観測点ごとの N の値や散乱波の振幅の違いがスペックル

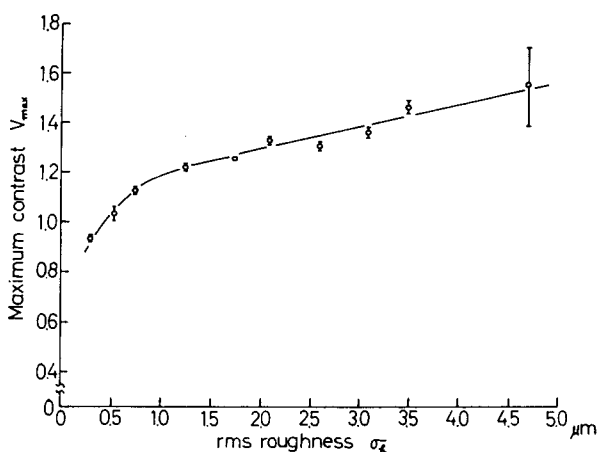


図8 粗面の粗さ σ_r に対する最大コントラスト V_{\max} の変化。ここで、最大コントラストは、 N の変化に対するコントラストの最大値を意味する。

場のゆらぎも反映することに起因している。

粗面の粗さが小さい場合には、非ガウスのスペックルも $C < 1$ の未発達なスペックルとなるが、そのスペックル強度の確率密度には未発達なガウスのスペックルと逆の非対称性が現れる^[26]。

3.3 部分的コヒーレント照射

散乱面を照射する光が空間的に部分的コヒーレントになると、生じるスペックルのコントラストは低下する^[27,28]。このようなスペックルを利用して照射光の空間的コヒーレンスを測定することができる^[29-31]。すなわち、粗面のフラウンホーファー回折場に生じるスペックルを写真フィルムに記録し、それをフーリエ変換光学系により周波数解析することにより、照射光の空間的コヒーレンス関数がスペックルのパワースペクトルとして直接観測することができる。この方法は、大気のゆらぎによってスペックル化した天体像から真の天体像の自己相関像を回復する方法である天体スペックル干渉法^[32,33]と同様の原理に基づくものであって、スペックルの応用の中でも最も成功を収めているものの一つである。

一方、照射光が時間的コヒーレンスの低い光、すなわち白色光や多色光であっても、空間的コヒーレンスが良好ならば、やはりスペックルが生じる。この場合、自由伝播系では図1(b)に示す放射状繊維構造が現れることは1.1節で述べたとおりである^[31,34]。また、結像面に生じるスペックルでは、波長によって光が「感じる」粗さが異なるためにスペックルの色分離が生じ、コントラストが低下する^[35]。この効果は粗面の粗さに依存するため、多色光・白色光スペックルのコントラストは波長より大きな表面粗さ測定に有効である^[16-18,36,37]。

3.4 スペックル強度和

スペックルどうしのコヒーレントな干渉は、複素平面での複素振幅の加算のステップ数 N が増加することに相当する。それゆえ、ガウスのスペックルどうしの干渉はやはりガウスのスペックルになる。これに対し、スペックルどうしのインコヒーレントな重ね合わせすなわち強度和(あるいは強度の積分)は、新たな統計を生ずる。スペックルの強度和は、3.3節で述べた部分的コヒーレント光によるスペックルや、互いに直交す

る偏光成分の重ね合わせ、有限な大きさの開口による検出、時間変動するスペックルの時間平均検出などにおいて生ずる。最も簡単な場合は、平均強度 $\langle I \rangle$ の等しい互いに統計的に独立な m 個の十分に発達したスペックルの強度 I_k の和 $I_t = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m I_k$ であって、これはガンマ分布

$$P_t(I_t) = \frac{(m/\langle I \rangle)^m I_t^{m-1} e^{-mI_t/\langle I \rangle}}{\Gamma(m)} \quad (13)$$

に従う^[10]。ただし、 $\Gamma(m)$ はガンマ関数である。 I_k が互いに統計的に独立ではない場合や、未発達なガウスのスペックルである場合についてもその強度和の統計が調べられている^[38,39]。スペックルの強度和は、一般にコントラストを低下させる。したがって、上に述べたようなスペックル強度和を生ずる状況は、いずれもスペックルの低減法として利用されている^[40,41]。

3.5 スペックルの動的特性

散乱物体が運動したり、光学系の特性が時間的に変動すると、スペックルも時間的に変動する。このような動的スペックルの特性は検出する領域に大きく依存する^[42-45]。最も簡単な場合として散乱物体が光軸に垂直に動く場合を考えよう。このとき、結像面におけるスペックルは、容易に想像されるように物体の像と同じ向きに並進運動をする。一方、自由伝播系では、並進運動に加えてスペックル粒が沸き立つように発生消滅を繰り返すボイリング運動が現れ、この2種類の運動の相対的大きさは、粗面の照射条件と検出位置に依存して変化する^[42-43]。

動的スペックルの解析には、強度の時空間相関関数 $\langle I(\mathbf{x}, t) I(\mathbf{x} + \mathbf{X}, t + \tau) \rangle$ を用いる。粗面を単色のガウスビームで照射する場合には、

$$\langle I(\mathbf{x}, t) I(\mathbf{x} + \mathbf{X}, t + \tau) \rangle / \langle I \rangle^2 = \frac{1}{1 + \exp\left[-\frac{(\tau - \tau_d)^2}{\tau_c^2}\right]} \exp\left(-\frac{|\mathbf{X}|^2}{X_c^2}\right) \quad (14)$$

を得る。ここで、 τ_c は $\mathbf{X} = 0$ における強度変動の相関時間、 τ_d は $\mathbf{X} \neq 0$ なる2つのスペックル強度の相互相関ピークの時間遅れ、 X_c はスペックルが相関を失うまでの移動距離を表す相関距離である。いま、平均スペックル径を ξ とすると、 $X_c \gg \xi$ ならば並進運動、また $X_c \sim \xi$ ならばボイリング運動が観測され、その他の場合にはこれら2つ成分を合わせ持つ運動が現れることになる。このほか、粗面の軸方向の動きや、微粒子懸濁

溶液の並進運動に対するスペックルの動的特性についても解析が行われている。このような動的スペックルの特性は、運動物体の速度測定や振動解析^[44,45]の他、物体の変位や変形の測定にも応用される^[46,47]。

生体にレーザー光を照射すると、組織内に浸透した光の一部は吸収されるが、残りは多重散乱を経て外部に放射され、スペックルパターンを形成する。生体によるスペックル（バイオスペックル）は、主として組織内の血流のために動的特性を示すことから、その時間変動特性から生体内の血流に関する情報を引き出すことができる。バイオスペックルによる血流計測は、イメージセンサーを使って皮膚血流を2次元的に求める皮膚血流画像化装置や眼底カメラに血流計を組み込んだ眼底血流測定装置として実用化されている^[48-50]。

3.6 その他のスペックル現象

これまで、粗面における単散乱によって生ずるスペックルを中心に述べてきたが、物体が多重散乱媒質である場合にもスペックルは生ずる。一般に、散乱回数が多きほど、発生するスペックルは散乱媒質の動きに対して敏感に変化する。しかし、通常の多重散乱媒質においては散乱回数を制御することは困難であるため、スペックルの動的特性の解析は複雑となる。これに対し、粗面から生じたスペックルが再び粗面によって散乱されて生じるスペックルドスペックル（speckled speckle）は、制御された多重散乱であるため解析が比較的容易であり、速度や粗さなどの計測への応用を目的として研究が行われている^[51,52]。さらに、より多くの散乱面による多重散乱についても、バルクの多重散乱媒質のモデルとしてその動的特性が調べられている^[53,54]。

多モード光ファイバーにレーザー光を入射すると、その出射光中にスペックル（ファイバースペックル）が観察される。これは、ファイバー中に励起された多くのモードが、互いに一定の位相関係を持たないことによるもので、ファイバー内での散乱などによるモード変換やファイバー間の接合における軸ずれなど、高次モードの発生する状況において顕著に見られる^[55,56]。ファイバースペックルは、光ファイバーセンサーにも応用されている^[57]。

最近、これまで議論されたことのない特異な特性を持つスペックル現象がいくつか報告されている。2節

で述べたように、ガウスのスペックルでは常に $C \leq 1$ であって、それゆえ $C > 1$ は非ガウスの統計の証であると考えられていた。ところが、ガウスのスペックルであっても、平均値の小さい非円形統計に従う場合には $1 < C \leq \sqrt{2}$ となることが最近明らかとなった^[58]。このようなスペックルは、例えば光軸に対して中心対称な透過率分布を持つ物体の遠方場に実際に現れる^[59]。

平均スペックル径よりも大きな空間相関を持つスペックルが見いだされている。そのようなスペックルは、たとえば円環スリットを通して照射した粗面の遠方場に現れる (図9)^[60]。

フラクタル媒質からの散乱によるスペックルも興味のある問題である。ランダムフラクタルからの散乱によって遠方場に生じるスペックルは、その平均強度が媒質のフラクタル次元によって決まるべき関数の形をとる。そのようなスペックル場がさらに非フラクタル的粗面によって散乱されると、べき空間相関を持つフラクタル的スペックル場が生じることが理論的に示されている^[61]。

4. おわりに

以上、様々な状況において生じる多様なスペックル現象について述べた。このようなスペックルの基礎的性質に基づいて、これまで表面粗さ測定、天体スペックル干渉法、スペックル干渉法、スペックル血流計などの多くの光技術が生み出されてきた^[62,63]。このように、スペックルは光計測・光情報処理などの光工学における重要な要素技術となっている。

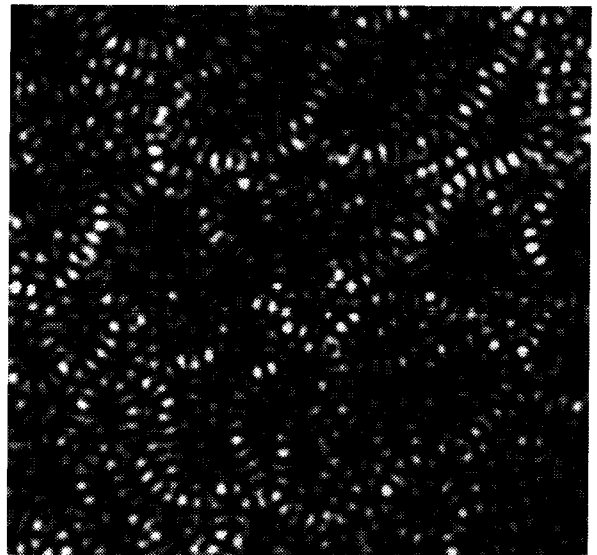


図9 円環スリットを使って粗面を照射したときに生じるスペックルクラスタ現象。

一方、スペックルの統計的特性の研究は、近年さらに複雑な多重散乱系における光散乱現象の解明へと大きな展開を見せており、コヒーレント後方散乱、光学的メモリー効果、非レーリー統計などの興味深い現象が次々と明らかとなりつつある^[64,65]。これらの現象は、単にランダムさの度合いが増すだけであると思われる多重散乱過程の中にも光学的に検出可能なある種の秩序が存在すること示すものであって、複雑な系の内部探索にも光学的手法が有効であることを示唆している。したがって、生体やフラクタルなどの内部構造を有する多重散乱系におけるスペックル・光散乱の研究の重要性は今後さらに増していくであろう。

【参考文献】

- [1] I. Newton: *Optics* (Dover Press, New York, 1952).
- [2] K. Exner: *Sitzunsber. Kaiserl. Akad. Wiss. (Wien)* **76**, 522 (1877).
- [3] M. von Laue: *Sitzunsber. Akad. Wiss. (Berlin)* **44**, 1144 (1914).
- [4] M. von Laue: *Mitt. Physik. Ges. (Zurich)* **18**, 90 (1916).
- [5] M. von Laue: *Ber. Deut. Phys. Ges.* **19**, 19 (1917).
- [6] W.J. de Haas: *Koninklighe. Acad. van Wetenschager (Amsterdam)* **20**, 1278 (1918).
- [7] E. Buchwald: *Ber. Deut. Phys. Ges.* **21**, 492 (1919).
- [8] C.V. Raman: *Phil. Mag.* **38**, 568 (1919).
- [9] G.N. Ramachandran: *Proc. Indian Acad. Sci. A* **18**, 190 (1943).
- [10] J.W. Goodman: *Laser Speckle and Related Phenomena*, ed. J.C. Dainty (Springer, Heidelberg, 1975) pp. 9-76.
- [11] J.C. Dainty: *Progress in Optics, Vol. 14*, ed. E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1976) pp. 1-46.
- [12] T. Okamoto and T. Asakura: *Progress in Optics, Vol.*

- 34, ed. E. Wolf (Elsevier Science, Amsterdam, 1995) pp. 183-248.
- [13] H. Fujii and T. Asakura: *Opt. Commun.* **11**, 35 (1974).
- [14] H. Fujii, T. Asakura and Y. Shindo: *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 1217 (1976).
- [15] H. Fujii, J. Uozumi and T. Asakura: *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 1222 (1976).
- [16] T. Asakura: *Speckle Metrology*, ed. R. K. Erf (Academic, London, 1978) pp. 11-49.
- [17] 魚住・朝倉：潤滑 **26**, 73 (1981).
- [18] 岡本・朝倉：O plus E **124**, 122 (1990).
- [19] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Opt. Commun.* **14**, 30 (1975).
- [20] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Optik* **45**, 65 (1976).
- [21] J. Uozumi and T. Asakura: *Opt. Quant. Electr.* **12**, 477 (1980).
- [22] H. Kadono and T. Asakura: *J. Opt. Soc. Am.* **A2**, 1787 (1985).
- [23] P.F. Steeger, T. Asakura, K. Zocha and A.F. Fercher: *J. Opt. Soc. Am.* **A1**, 677 (1984).
- [24] E. Jakeman and P.N. Pusey: *J. Phys.* **A8**, 369 (1975).
- [25] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Opt. Commun.* **25**, 315 (1978).
- [26] J. Uozumi and T. Asakura: *J. Opt. (Paris)* **12**, 177 (1981).
- [27] H. Fujii and T. Asakura: *Opt. Commun.* **12**, 32 (1974).
- [28] H. Fujii and T. Asakura: *J. Opt. (Paris)* **6**, 5 (1975).
- [29] T. Asakura, H. Fujii and K. Murata: *Opt. Acta* **19**, 273 (1972).
- [30] H. Fujii and T. Asakura: *Optik* **39**, 99 (1974).
- [31] H. Fujii and T. Asakura: *Optik* **39**, 284 (1974).
- [32] A. Labeyrie: *Astron. Astrophys.* **6**, 85 (1970).
- [33] J.C. Dainty: *Laser Speckles and Related Phenomena, 2nd edition*, ed. J.C. Dainty (Springer, Berlin, 1984) pp. 255-320.
- [34] 中川・朝倉：光学 **8**, 120 (1979).
- [35] K. Nakagawa and T. Asakura: *Opt. Commun.* **27**, 207 (1978).
- [36] G. Tribillon: *Opt. Commun.* **11**, 172 (1974).
- [37] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Optik* **49**, 445 (1978).
- [38] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Appl. Phys.* **14**, 183 (1977).
- [39] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Appl. Phys.* **17**, 159 (1978).
- [40] T.S. MacKechnie: *Laser Speckle and Related Phenomena, 2nd edition*, ed. J.C. Dainty (Springer, Berlin, 1984) pp. 123-170.
- [41] T. Iwai and T. Asakura: *Proc. IEEE* **84**, 765 (1996).
- [42] 高井・朝倉：レーザー研究 **8**, 476 (1980).
- [43] T. Asakura and N. Takai: *Appl. Phys.* **25**, 179 (1981).
- [44] 高井・朝倉：日本物理教育学会誌 **26**, 146 (1978).
- [45] N. Takai and T. Asakura: *Appl. Opt.* **17**, 3785 (1978).
- [46] A.E. Ennos: *Laser Speckle and Related Phenomena, 2nd edition*, ed. J.C. Dainty (Springer, Berlin, 1984) pp. 203-253.
- [47] N. Takai and T. Asakura: *Appl. Opt.* **24**, 660 (1985).
- [48] H. Fujii, T. Asakura, K. Nohira, Y. Shintomi and T. Ohura: *J. Japan. Soc. Laser Medicine* **4**, 41 (1984).
- [49] T. Asakura: *Anritsu News* **8**, 4 (1988).
- [50] 相津・朝倉：レーザー研究 **18**, 321 (1990).
- [51] D.L. Fried: *J. Opt. Soc. Am.* **71**, 914 (1981).
- [52] T. Okamoto and T. Asakura: *J. Mod. Opt.* **37**, 389 (1990).
- [53] T. Okamoto and T. Asakura: *Waves in Random Media* **1**, 391 (1991).
- [54] T. Okamoto and T. Asakura: *Waves in Random Media* **2**, 29 (1992).
- [55] M. Imai and T. Asakura: *Optik* **48**, 335 (1977).
- [56] T. Tsuji, T. Asakura and H. Fujii: *Opt. Quant. Electr.* **16**, 9 (1984).
- [57] H. Fujii, T. Asakura and T. Okamoto: *Opt. Commun.* **55**, 393 (1985).
- [58] J. Uozumi, K. Uno and T. Asakura: *Opt. Rev.* **2**, 174 (1995).
- [59] K. Uno, J. Uozumi and T. Asakura: *J. Mod. Opt.* **42**, 2017 (1995).
- [60] K. Uno, J. Uozumi and T. Asakura: *Opt. Commun.* **114**, 203 (1995).
- [61] J. Uozumi and T. Asakura: *Optical Storage and Retrieval — Memory, Neural Network, and Fractals*, ed. F.T.S. Yu and S. Jutamulia (Marcel Dekker, New York, 1996) pp. 283-320.
- [62] R.K. Erf (ed.): *Speckle Metrology* (Academic, London, 1978).
- [63] 岡本・朝倉：計測と制御 **32**, 667 (1993).
- [64] 岩井・岡本・朝倉：応用物理 **63**, 14 (1994).
- [65] 岡本・朝倉：レーザー研究 **23**, 657 (1995).