

研究

銀塩ホログラムの粒状性に起因するノイズの角度特性

土田 恵一*・関根 征士**・大河 正志**・羽賀 泰男*・三田 元仁***

* 長岡工業高等専門学校電気工学科 〒940 長岡市西片貝町 888

** 新潟大学工学部電気電子工学科 〒950-21 新潟市五十嵐2の町 8050

*** 新潟職業訓練短期大学校 〒957 新発田市新富町 1-7-21

(1994年1月31日受付, 1994年8月29日受理)

Angular Characteristic of Film Grain Noise in Bleached Phase Hologram

Keiichi TSUCHIDA,* Seishi SEKINE,** Masashi OHKAWA,** Yasuo HAGA*
and Motohito MITA***

* Department of Electrical Engineering, Nagaoka College of Technology,
888, Nishikatakai-machi, Nagaoka 940

** Faculty of Engineering, Niigata University,
8050, Ikarashi Ninocho, Niigata 950-21

*** Department of Information Engineering, Niigata Polytechnic College,
1-7-21, Sintomichou, Shibata 957

(Received January 31, 1994; Accepted August 29, 1994)

An investigation of film grain noise in bleached phase hologram is reported. The noise is caused by scattered light from grain and is refracted by emulsion-air boundary. Angular distributions of noise were calculated by Mie scattering theory and Fresnel's formulation. The calculated angular distributions of noise were compared with measured angular distributions. The measurement was made in wide range (10° – 170°) of angle between direction of incident beam and that of observation. The incident beams were two orthogonally polarized beams. Light sources for the measurement were He-Ne laser and Ar laser. The result indicates that characteristics of the noise are explained in term of the scattering, the refraction of boundary, diffused light from photographic plate and diffracted light from speckle recorded on emulsion.

1. はじめに

光の波面を記録・再生する技術であるホログラフィは光情報検索メモリー、光インターフェネクション素子としてその応用が期待されている。その記録材料の中で銀塩乾板はホログラムの作成に広く用いられている。なぜならば銀塩乾板は他の記録材料に比べて感度が高い、可視波長域のレーザーに適する、性能が安定している、入手しやすいといった特長があるためである。

しかし、露光後、現像・漂白処理を施した銀塩乾板は、乳剤層中に周囲と屈折率の異なる銀塩粒子^{*1}を含む。こ

の粒子が入射光を散乱するため、粒状性に起因するノイズを生じる。粒状性に起因するノイズはホログラフィにおける再生像の品質を劣化させる。

銀塩ホログラムの粒状性に起因するノイズについてはすでに多くの先駆者によって研究がなされている¹⁻⁵。彼らの研究により様々なノイズの測定方法、評価方法が提案され、ノイズは粒子が入射光を散乱することにより生じることがわかっている。しかし、銀塩粒子による散乱光の角度特性と実際にホログラムから生じるノイズの角度特性の関係を説明した研究は、著者らが調べた範囲では見あたらない。そこで本研究では銀塩粒子から生じる散乱光の角度特性と、測定したノイズの角度特性の対応関係を明らかにした。さらに、銀塩ホログラムのノイズ発生機構についても考察した。

*1 漂白後の粒子の成分は漂白法により異なり、ハロゲン化銀以外の物質を含む。本論文では、ハロゲン化銀のほかに銀の錯体等を含む粒子も銀塩粒子と呼ぶ。

まず理論では、粒子による散乱が Mie 散乱に従うものとして、その角度特性を計算した。さらに、これまで注目されていない銀塩乾板と空気の境界面での屈折現象を考慮して、ノイズの角度特性を求めた。

一方、実験では入射光の進行方向と観測方向のなす角度 θ_t を 10° から 170° まで変化させ、広い範囲に対するノイズを測定した。測定では入射光の光源として He-Ne レーザー(波長 633 nm)と Ar レーザー(波長 515 nm)を用い、入射光の偏光方向には互いに直交する p 偏光と s 偏光を用いた。また測定する試料には粒径の異なる 3 種類の乾板を使用した。

ノイズの角度特性の理論値と測定値を比較した結果、同一波長・同一偏光の場合、理論値と測定値の角度特性は最小値を得る角度が一致した。また、入射光の偏光方向が異なる場合、あるいは入射光の波長が異なる場合も、理論値と測定値の大小関係が一致した。

しかし、 $10^\circ < \theta_t < 30^\circ$ と $150^\circ < \theta_t < 170^\circ$ におけるノイズの角度特性は、散乱現象では説明できない。そこで、銀塩乾板における散乱光を含まない反射光の角度特性を測定した。その結果から、 $10^\circ < \theta_t < 30^\circ$ と $150^\circ < \theta_t < 170^\circ$ の範囲におけるノイズの角度特性は、銀塩乾板のガラス基盤と乳剤層により生じる拡散光と、露光時に形成されるスペックルに依存することがわかった。

2. 粒状性に起因するノイズの発生機構

2.1 ホログラフィ用銀塩乾板

まず、ホログラフィに広く用いられている銀塩乾板の構成について説明する。銀塩乾板は乳剤層と基板からなる。乳剤層はゼラチンに銀塩粒子を密に分散したものである。

銀塩乾板の銀塩粒子は、次に記す性質を持つことが知られている⁶⁾。同種の乳剤層について銀塩粒子の大きさは一定でない。また、銀塩乾板の解像度が高くなるに従って粒径が細かくなり、単位面積当たりの粒子数が増加する。銀塩粒子の粒径分布および単位面積当たりの粒子数は乾板の種類により異なり、個々の乾板に対する粒径分布および単位面積当たりの粒子数を測定することは

困難である。本研究では、実験により粒径および粒子数とノイズ光強度の関係を明らかにするため、3種類の乾板についてノイズの測定をした。また、漂白後の粒径分布は、Akagi ら⁷⁾によるホログラムの電子顕微鏡写真より、平均粒径を μ として標準偏差 $\mu/2$ の正規分布により近似されると仮定した。

ノイズの角度特性を考察する上で銀塩乾板の乳剤層、基板、そして漂白後の銀塩粒子の屈折率が重要となる。本研究で用いた銀塩乾板の諸特性を Table 1 に示す⁸⁾。乳剤とガラスの屈折率は浸液法⁹⁾により測定した値である。また、本研究で用いた漂白法により生じる銀塩粒子の屈折率は、浸液法により測定した結果、2.2 であった。

2.2 銀塩粒子による散乱光強度の角度特性

前節で述べたように、光の散乱媒体となる乳剤層中における銀塩粒子の粒径は一定でないことが知られている。粒径と粒径分布は散乱光の角度特性を求める際の重要なパラメータの一つである。ここでは数値解析の簡単化のため、散乱を生じる粒子はすべて球形であり、粒径分布は正規分布に従うと仮定する。半径 a の粒子から距離 r だけ離れた点における散乱光強度は、入射光の偏光により異なり次のようになる¹⁰⁾。入射光の電界ベクトルの振動方向が測定面(入射光の進行方向と観測点を含む面)に垂直な場合(s 偏光)、散乱角 θ 方向の散乱光強度 $I_s(\theta)$ は

$$I_s(\theta) = \int_0^{\infty} N(a) I_{os} i_s(\alpha, m, \theta) / k^2 r^2 da \quad (1)$$

と表される。同様に入射光の電界ベクトルの振動方向が測定面に平行な場合(p 偏光)、散乱光強度 $I_p(\theta)$ は

$$I_p(\theta) = \int_0^{\infty} N(a) I_{op} i_p(\alpha, m, \theta) / k^2 r^2 da \quad (2)$$

と表される。ここで i_s, i_p は共に強度関数で、パラメータはサイズパラメータ $\alpha = 2\pi a/\lambda$ 、銀塩粒子の乳剤に対する相対屈折率 $m = m_g/m_e$ 、散乱角 θ である。 λ は入射光の波長、 m_g は漂白後の粒子の屈折率、 m_e は乳剤の屈折率、 I_{os} は s 偏光の入射光強度、 I_{op} は p 偏光の入射光強度、 k は波数である。 $N(a)$ は散乱を生じる銀塩粒子

Table 1 Characteristics of photographic plates.

Plate	Emulsion thickness (μm)	Grain size (nm)	Index of emulsion	Index of glass	Resolution limit (mm ⁻¹)
10 E 75	7	90	1.53	1.49	3000
649 F	15	60	1.53	1.49	>3000
8 E 75 HD	7	35	1.53	1.49	>3000

の粒径分布を示しており、半径に対する粒径分布は正規分布により近似されると仮定する。 Q を乳剤層における単位体積あたりの粒子数、 A を入射光の断面積、 t を乳剤層の厚さ、 μ を平均粒径、 σ を粒径分布の標準偏差として $N(a)$ は

$$N(a) = QAt / (\sqrt{2\pi}\sigma) \cdot \exp\{-(a-\mu)^2/(2\sigma^2)\} \quad (3)$$

と表される。ここで QAt は散乱を生じる全粒子数を示す。

上式(1)および(2)に示した散乱光強度の角度特性は、入射光の波長に対する粒径の比、銀塩粒子の乳剤に対する相対屈折率、散乱を生じる粒子の粒径分布により異なる。これらのパラメータが変化した場合における散乱光強度の角度特性について述べる。

散乱光強度の角度特性と平均粒径 μ の関係を Fig. 1 に示す。Fig. 1 から平均粒径が小さい場合、散乱光の分布は $\theta=90^\circ$ に対して前後対称である。平均粒径が大きくなるに従って、 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ の範囲における散乱光強度が増加し、散乱角 θ で積分した全散乱光強度は著しく増加する。そのため、ホログラフィ用銀塩乾板では、平均粒径が 2 倍になると、全散乱光強度は 10 倍以上になる。

次に散乱光強度の角度特性と粒子の乳剤に対する相対屈折率 m の関係を Fig. 2 に示す。Fig. 2 から m が増加するに従って、散乱光強度は増加することがわかる。しかし、Fig. 1 と Fig. 2 を比較すれば、 m の差異による全散乱光強度の増減は、平均粒径 μ の差異による全散乱光強度の増減に比べ、小さいことがわかる。かつ m が変化しても散乱光強度の角度分布特性はほとんど変化しないことがわかる。

次に、散乱光強度の角度特性と粒径分布を近似した正規分布の標準偏差 σ の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 3 か

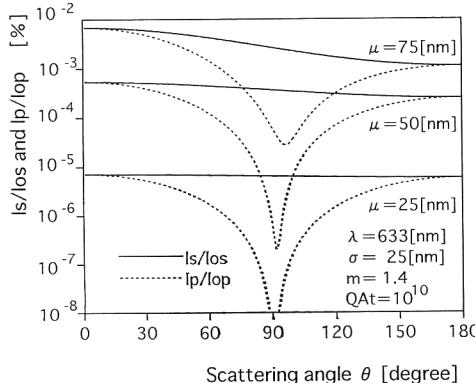


Fig. 1 Angular distributions of intensity of scattered light for different mean radius of grains.

ら、分布の標準偏差 σ が大きくなるに従って散乱光強度が著しく増加することがわかる。この理由は、 σ が大きくなると、粒径の大きい粒子による散乱光強度が強くなるためである。したがって、粒子の平均粒径が小さく、かつ粒径分布の標準偏差が小さい銀塩乾板を用いるほど、粒子による散乱光強度は減少すると予想される。

また式(1)～(3)から、散乱光強度は乳剤層中に含まれる単位体積当たりの粒子数 Q に比例することがわかる。しかし、2.1 節に示すように、銀塩乾板における銀塩粒子の単位体積あたりの粒子数は粒径が小さくなるに従って多くなる。そのため散乱光強度については、銀塩粒子の粒径と粒子数の関係を考察する必要がある。

2.3 銀塩乾板と空気の境界面による散乱光の変化

散乱光を生じる乳剤層の屈折率はガラス基板の屈折率とほぼ等しく、空気の屈折率より大きい。そのため、散

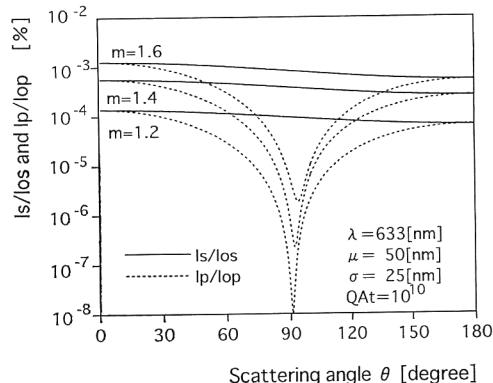


Fig. 2 Angular distributions of intensity function of scattered light for different indices of grains.

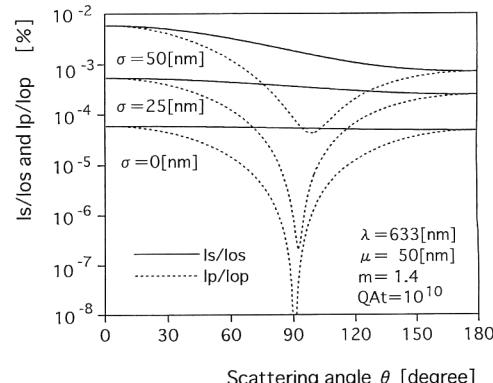


Fig. 3 Angular distributions of intensity function of scattered light for different standard deviation of grains.

乱光は屈折率差のある銀塩乾板と空気の境界面を透過するとき、屈折による変化を受ける。

ホログラムを再生するための入射光の一部は、乳剤中の銀塩粒子により散乱された後、銀塩乾板と空気の境界面を透過する。このとき、散乱光の進行方向と振幅の変化は、ガラス基盤の屈折率が乳剤層の屈折率と等しいと仮定して、Snellの法則によって次のように表される¹¹⁾。

$$\sin \theta / \sin \theta_t = m_0 / m_e \quad (4)$$

ただし、 m_0 は空気の屈折率、 θ_t は入射光と観測方向のなす角である。また、このときの境界面の透過率は Fresnel の公式により計算することができ、散乱光の偏光が s 偏光のときには

$$T_s(\theta, \theta_t) = \{\sin(2\theta)\sin(2\theta_t)\} / \{\sin(\theta + \theta_t)\} \quad (5)$$

となり、同様に散乱光の偏光が p 偏光のとき

$$T_p(\theta, \theta_t) = \{\sin(2\theta)\sin(2\theta_t)\} / \{\sin(\theta + \theta_t)\cos(\theta - \theta_t)\} \quad (6)$$

となる。これらの式により計算した境界面の透過率を Fig. 4 に示す。この図から次のことがわかる。 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ の範囲について散乱角が 30° より小さい場合、境界面の影響は小さい。しかし散乱角が 30° から大きくなるに従い境界面の透過率が急激に減少していき、散乱角に比べて入射光と観測方向のなす角が大きくなる。さらに、散乱角が大きくなり境界面における臨界角を越えると、散乱光は境界面により乳剤層中へ全反射される。また $90^\circ < \theta < 180^\circ$ の範囲については散乱角が 150° から小さくなるに従い境界面の透過率が急激に減少していき、入射光と観測方向のなす角が小さくなる。さらに、散乱角が小さくなり境界面における臨界角を越えると、散乱

光は境界面により乳剤層中へ全反射される。

2.4 粒状性に起因するノイズ

銀塩粒子により生じた散乱光は銀塩乾板と空気の境界面により屈折する。本節では、散乱光強度の角度特性と境界面の屈折から粒状性に起因するノイズの角度特性を求め、その性質について述べる。入射光の偏光が s 偏光の場合、粒状性に起因するノイズ強度 $I_{s'}(\theta_t)$ は、式 (1), (5) から

$$I_{s'}(\theta_t) = I_s(\theta) T_s(\theta, \theta_t) \quad (7)$$

と表され、入射光の偏光が p 偏光の場合、粒状性に起因するノイズ強度 $I_{p'}(\theta_t)$ は、(2), (6) から

$$I_{p'}(\theta_t) = I_p(\theta) T_p(\theta, \theta_t) \quad (8)$$

と表される。式 (7), (8) により計算したノイズの角度特性の例を Fig. 5 に示す。この図から、ノイズの強度は入射光の偏光によらず $\theta_t = 90^\circ$ の点で最小値をとることがわかる。この理由は、 $\theta_t = 90^\circ$ 付近ではノイズの原因となる散乱光が基板と空気の境界面でほとんど乾板中へ反射され、ほんのわずかしか空気中に透過してこないためである。特に入射光が s 偏光の場合、散乱光強度は $\theta_t = 90^\circ$ の点で最小値をとらないが、ノイズ光強度は $\theta_t = 90^\circ$ の点で最小値をとる。

また s 偏光の入射光に対するノイズの強度は、p 偏光の入射光に対するノイズの強度よりも大きい。

3. 実験方法

3.1 銀塩乾板の露光

粒状性に起因するノイズは銀塩粒子による散乱光により生じる。そのため銀塩乾板にホログラムを記録しなくても、単に現像、定着、漂白を行うだけでノイズは生じる。本研究では粒状性に起因するノイズだけを測定するため、測定に用いる銀塩乾板を均一に露光した。He-Ne

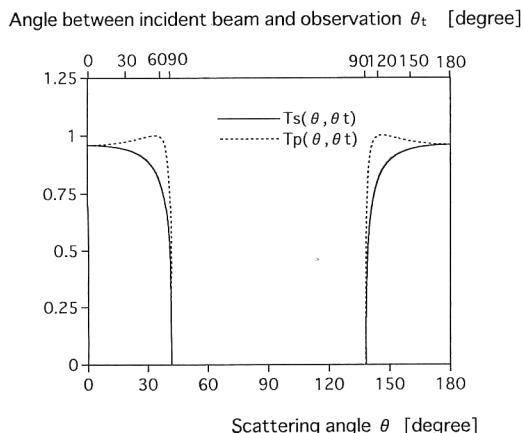


Fig. 4 Trancemittivity as a function scattering angle and angle between incident beam and observation.

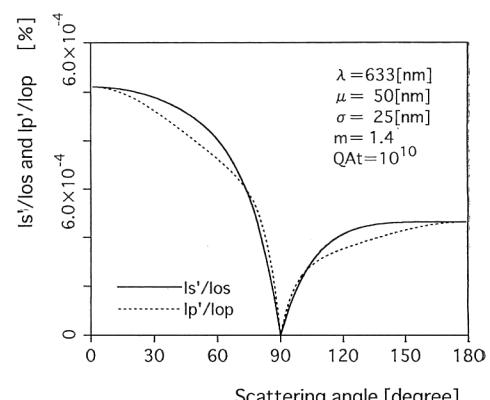


Fig. 5 Angular distributions of the noise.

レーザー光をレンズでコリメートし、銀塩乾板へ垂直に入射した。その際、不必要的回折光を除去するためピンホールを用いた。銀塩乾板におけるノイズ光強度に対する粒径および単位体積当たりの粒子数の依存性を調べるために、測定には粒径の異なる3種類の乾板 (Agfa-geveart社 10E75, 8E75HD, KODAK社 649F) を使用した。これらの銀塩乾板は振幅透過率が0.5となる露光量により露光した。各乾板の露光量はそれぞれ $3\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$, $5\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$, $60\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$ とした。このように露光した銀塩乾板はすべてKODAK社のD-19現像液を用いて20°Cで5分間現像した後、富士写真フィルム社のスーパークリフィックスで定着し、Potassium Ferricyanide and Potassium Bromide Bleach¹²⁾で漂白した。

3.2 ノイズの測定

前章の計算結果から明らかなように、ノイズは入射光と観測方向のなす角 θ_t について 0° から 180° まで分布する。そのため銀塩乾板のノイズ光強度の角度特性は θ_t について幅広い範囲で測定する必要がある。**Fig. 6**は測定に用いた光学系であり、 10° から 170° の範囲で θ_t を変化させることができる。漂白した銀塩乾板を試料台上に固定し、レーザー光を垂直に入射した。銀塩乾板とディテクタの距離を一定(40 cm)に保ちながらレーザー光とディテクタのなす角 θ_t を変化させてノイズを測定した。

また、ノイズの角度特性は入射光の偏光方向と波長により異なる。そこで、ノイズの角度特性の測定は、入射光の電界ベクトルの振動方向が測定面に関して垂直と水平の場合について行った。また、光源は波長の異なるHe-Neレーザー(波長633 nm)とArレーザー(波長515 nm)を用いた。入射光の偏光方向がs偏光の場合、ノイズ $\eta_s(\theta_t)$ は銀塩乾板への入射光強度 I_{os} に対するノイズ光強度 $I_{os}'(\theta_t)$ により

$$\eta_s(\theta_t) = I_{os}'(\theta_t)/I_{os} \times 100 [\%] \quad (9)$$

で表す。同様に入射光の偏光方向がp偏光の場合、ノイズ $\eta_p(\theta_t)$ は銀塩乾板への入射光強度 I_{op} に対するノイズ光強度 $I_{op}'(\theta_t)$ により

$$\eta_p(\theta_t) = I_{op}'(\theta_t)/I_{op} \times 100 [\%] \quad (10)$$

で表す。

4. ノイズの角度分布特性

3種類の乾板 10E75, 649F および 8E75HD に対するノイズ $\eta_s(\theta_t)$ と $\eta_p(\theta_t)$ をそれぞれ**Fig. 7, 8**および**9**に示す。He-Ne レーザーによるp偏光入射光強度 I_{op} に対する $\theta_t=60^\circ$ 方向のノイズ光強度 $I_{op}'(60^\circ)$ から式(6)により $I_p(\theta_t)$ を求め、その $I_p(\theta_t)$ から式(2), (3)により Q を推定した。なお、入射光のビーム径は0.8 mm、乳剤層の厚さはTable 1の値である。このようにして推定した10E75, 649F および 8E75HD の Q 値はそれぞれ 7.82×10^{12} 個/mm³, 2.65×10^{13} 個/mm³, および 1.47×10^{14} 個/mm³である。一般に、解像度の高い銀塩乾板ほど粒径が細かく、したがって単位面積あたりの粒子数が多い。推定した Q 値もこの関係に対応し

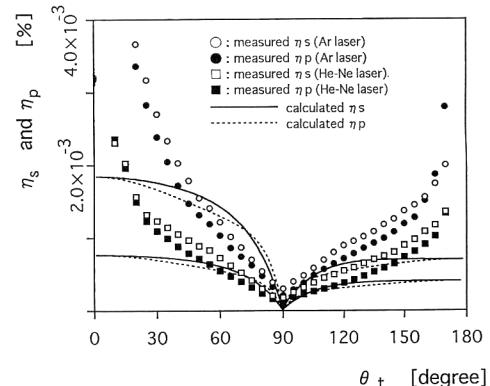


Fig. 7 Angular distributions of film grain noise (10E75).

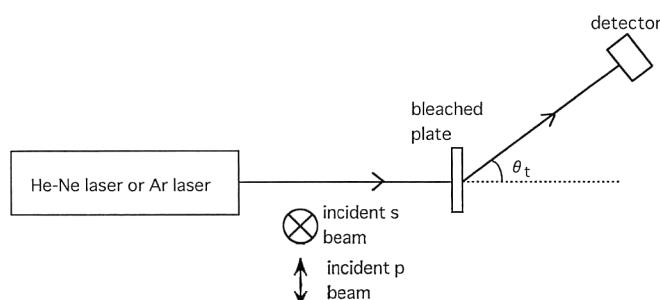


Fig. 6 Optical setup for measurement.

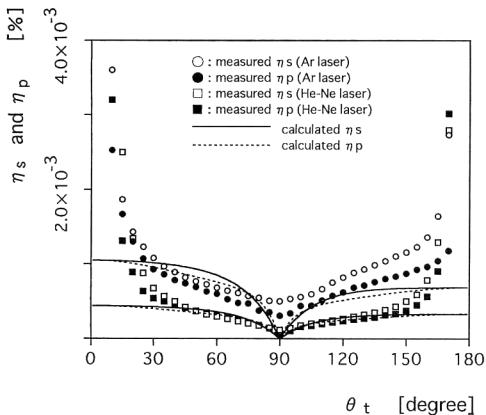


Fig. 8 Angular distributions of film grain noise (649 F).

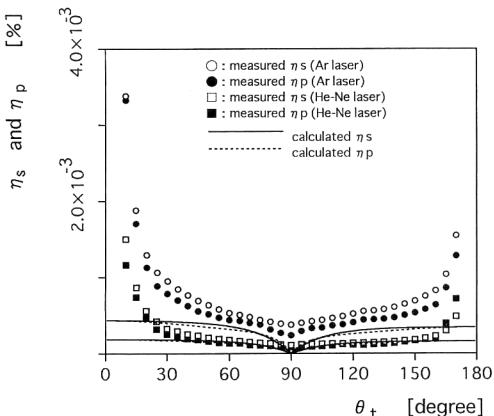


Fig. 9 Angular distributions of film grain noise (8 E 75 HD).

ている。

各銀塩乾板のノイズ光強度を Fig. 7, 8 および 9 に示す測定結果から比較すれば、ノイズの大小関係は 10 E 75 > 649 F > 8 E 75 HD である。銀塩乾板の平均粒径が小さいほど、散乱光を生じる粒子数は多くなるが、個々の粒子から生じる散乱光強度は減少する。粒径が小さい銀塩乾板ほどノイズは少ない事実から、粒径の大小による散乱光強度の相違は、粒子数の相違に比べてノイズ光強度に与える影響が大きいと言える。

さらに、Fig. 7, 8 および 9 に示すように、Ar レーザーを入射光に用いた場合のノイズは、He-Ne レーザーを用いた場合のノイズよりも大きい。この理由は、散乱光強度とサイズパラメータの関係により説明できる。銀塩粒子の径が波長に対して大きくなるに従い、散乱角 θ で積分した全散乱強度は増加する。そのため波長の短い光源を用いるほどノイズ光強度は増加する。

Fig. 7, 8 および 9において測定したノイズの角度特性は、入射光の偏光にかかわらず、いずれも $\theta_t=90^\circ$ の点で最小値をとる。入射光が p 偏光の場合、散乱角 θ に対する散乱光強度は、 $\theta=90^\circ$ で最小値をとる。一方、入射光が s 偏光の場合、散乱光強度は、 $\theta=90^\circ$ で最小値をとらない。このような特性は、2.4 節に論じたノイズの角度分布特性と一致する。この事実から、ノイズの角度分布特性は粒子の散乱だけでは説明できず、散乱光が乾板と空気の境界面による屈折の影響を受けることを示している。

しかし、 $10^\circ < \theta_t < 30^\circ$ と $150^\circ < \theta_t < 170^\circ$ における範囲では、測定したノイズは理論値より著しく大きい。この $10^\circ < \theta_t < 30^\circ$ と $150^\circ < \theta_t < 170^\circ$ におけるノイズ光は、次の 3 つおりの原因により生じると予想される。

- 1) 銀塩粒子による散乱光；入射光の波長に比べ、著しく径の大きい粒子による散乱光は、 $\theta_t=0^\circ$ 付近の前方散乱光が著しく増加する。
- 2) 乳剤層またはガラス基盤による拡散光；乳剤層またはガラス基盤表面に微小な凹凸があると、透過光と反射光に拡散光が重畳される。
- 3) 露光時に形成されるスペックルによるノイズ光；銀塩乾板露光時に、光学素子の反射屈折により、レーザー光の波面は乱される。そのため、レーザー光は銀塩乾板上にスペックルを生じる。このスペックルは、露光時に乳剤層に記録され、現像・漂白処理により不規則なグレーティングとなる。入射光および反射光はこの不規則なグレーティングによりノイズ光を生じる。

しかし、3章に示す実験方法では、1)による散乱光と、2)による拡散光および3)によるノイズ光を独立に測定することが不可能である。そこで、本研究では、測定試料となる銀塩乾板表面に銀蒸着を施し、反射光の角度特性測定を行った。蒸着による銀薄膜の反射率を高く(95%以上)することにより、反射光の角度特性は1)の散乱光を含まない。また、漂白後の銀塩乾板表面は、露光量に応じた凹凸を生じることが知られている¹³⁾。そのため、銀塩乾板表面による反射光は、2)と3)によるノイズを含む。さらに2)と3)によるノイズ光の角度特性の差異を調べるために、乳剤層を取り去ったガラス基盤と露光を行わず単に現像、定着、漂白処理を行った銀塩乾板と比較した。

銀蒸着した銀塩乾板の反射光角度特性を Fig. 10 に示す。Fig. 10 から次のことがわかる。まず、すべての反射光強度は、 θ_t が 150° 以上になると、著しく増加する。

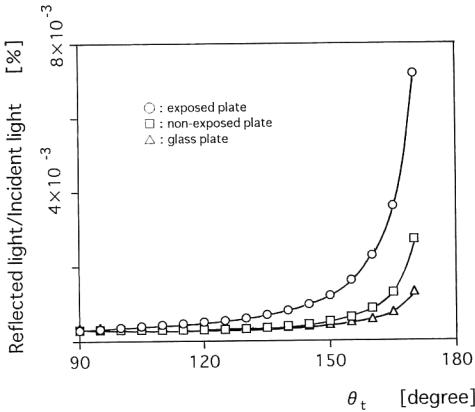


Fig. 10 Angular distributions of intensity of reflected light from surface of photographic plates (10 E 75).

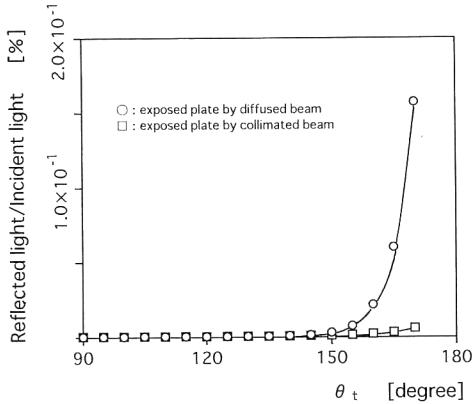


Fig. 11 Angular distribution of reflected light from surface of diffusely exposed plate (10 E 75).

この事実は θ_t が 150° 以上の反射光が 1) の銀塩粒子の散乱から生じないことを示している。次に反射光強度を比べると、通常露光 > 無露光 > ガラス基盤という大小関係になった。このことはガラス基盤の凹凸から拡散光が生じ、さらに乳剤層の凹凸による散乱光とスペックルによるノイズ光が加わることにより、反射光の角度分布が形成されることを示している。これらの原因により、入射光が銀塩乾板を透過するとき、ノイズ光は正透過方向に重畳する。同様に入射光が銀塩乾板により反射されるときも、ノイズ光は正反射方向に重畳される。そのため $10^\circ < \theta_t < 30^\circ$ と $150^\circ < \theta_t < 170^\circ$ におけるノイズ光強度は増加すると考えられる。

さらに露光時に形成されるスペックルによるノイズ光の影響を調べるために、拡散光により露光した銀塩乾板の反射光角度特性を調べた。拡散光による銀塩乾板の露光

は、3章に示した露光の光学系において、銀塩乾板の10 cm 手前にディフューザーを挿入して行った。このように露光した銀塩乾板と3章に示した光学系により均一な露光した銀塩乾板に銀蒸着を施し測定した反射光角度特性を Fig. 11 に示す。Fig. 11 からディフューザーを用いて露光した場合には $150^\circ < \theta_t < 170^\circ$ における反射光強度が著しく増加することがわかる。この理由は、ディフューザーによりスペックルが強調されたためと考えられる。この事実から、ホログラム記録時に、波面の乱れが少ない参照光を用いることにより、3)のノイズ光を低減できると考えられる。

5. まとめ

銀塩乾板の粒状性に起因するノイズの角度特性を調べた結果、銀塩ホログラムにおけるノイズの角度特性は、銀塩粒子による散乱光の角度特性と乾板と空気の境界面における屈折現象より説明できる。このことから、本研究はノイズの発生する機構を解明した。

- (1) ノイズの測定結果から、ノイズは粒径が細かく粒子数の多い銀塩乾板ほど少ないとわかった。この事実から、高い S/N 比あるいは幅広い角度にわたる角度多重の必要なホログラフィを用いるデバイスを作製するときには、平均粒径の小さい銀塩乾板ほどノイズの抑制に有効である。
- (2) 波長の長いレーザー光を用いるほどノイズは少ないことがわかった。光源の波長は乾板の感度や S/N 比等の様々な要素を考慮して決定されるが、S/N 比の向上には長波長ほど有効である。
- (3) $10^\circ < \theta_t < 30^\circ$ と $150^\circ < \theta_t < 170^\circ$ における範囲において、乳剤層およびガラス基盤による拡散光と、露光時に形成されるスペックルによるノイズ光強度は、銀塩粒子による散乱光に比べて、著しく強くなることがわかった。この露光時に形成されるスペックルによるノイズを低減するためには、ホログラム記録時に、波面の乱れが少ない参照光を用いることが有効である。

文 献

- 1) C. B. Burkhard: "Storage capacity of an optically formed spatial filter for character recognition," Appl. Opt., 6 (1967) 1359-1366.
- 2) J. H. Altman: "The measurement of rms granularity," Appl. Opt., 3 (1964) 35-38.
- 3) H. C. Schmitt, Jr. and J. H. Altman: "Method of measuring diffuse RMS granularity," Appl. Opt., 9 (1970) 871-874.
- 4) W. E. Lee and M. O. Greer: "Noise characteristics

- of photographic emulsions used for holography," J. Opt. Soc. Am., **61** (1971) 402-409.
- 5) R. J. Collier: *Optical Holography*, eds. C. B. Burkhardt and L. H. Lin (Academic Press, 1971) pp. 352-354.
- 6) J. C. Dainty and R. Shaw: *Image Science* (Academic Press, 1974) pp. 38-39.
- 7) M. Akagi, T. Kaneko and T. Ishiba: "Electron micrographs of hologram cross sections," Appl. Phys. Lett., **21** (1972) 93-95.
- 8) P. Hariharan: *Optical Holography* (Cambridge University Press, 1984) p. 90.
- 9) 塚井誠太郎: 偏光顕微鏡 (岩波書店, 1970) pp. 172-173.
- 10) M. Kerer: *The Scattering of Light* (Academic Press, 1969) pp. 39-50.
- 11) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon Press, 1975) pp. 36-51.
- 12) J. Upatnieks and C. Leonard: "Diffraction efficiency of bleached, photographically recorded interference patterns," Appl. Opt., **8** (1969) 85-89.
- 13) J. H. Altman: "Pure relief images on type 649-F plates," Appl. Opt., **5** (1966) 1689-1690.