

研究

ディスプレイ・ホログラフィのセンシトメトリー (第II報)

リップマンホログラムについて

三位 信夫・酒井 朋子・彦坂 和夫・和田しのぶ・久下 謙一

千葉大学工学部画像工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1988年1月28日受理)

Sensitometry for Display Holography (II)

On Lippmann Holograms

Nobuo MII, Tomoko SAKAI, Kazuo HIKOSAKA,
Shinobu WADA and Ken-ichi KUGEDepartment of Image Science and Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Chiba 260

The sensitometric method to determine the exposure required to produce a good bleached Lippmann hologram was considered. From the relationship of the density on the characteristic curve corresponding to the exposure against the diffraction efficiency and/or against the signal-to-noise ratio of holograms, the density at which the diffraction efficiency and the signal-to-noise ratio were the closest to each peak value was found to be about 1.2 above the general fog density. The result suggests that the holographic exposure index to make a clear bleached Lippmann hologram can be determined on the basis of the exposure E in $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ for the density of 1.2 above the general fog density on the characteristic curve and may be defined as $1000/E$.

1. ま え が き

感度が高いことと簡便さの点で有利な銀塩感光材料を用いて、画質のよい、つまり高い回折効率とSN比をもったディスプレイ用ホログラムを作るには、感光材料と現像処理液、現像処理条件の組合せによって決まる、適正露光量で記録する必要がある。

前報¹⁾では、従来試行錯誤で求めていたこの適正露光量を、センシトメトリーによって求める方法について検討し、透過型ホログラムの場合、振幅型、位相型を問わず、写真特性曲線上のカブリ濃度+ベース濃度から上の正味の写真濃度値が0.65のところを、感度測定点にとるとよいことを示した。したがって、透過型ホログラムを記録する場合、この感度測定点に対応する露光量が適正となる。

本報では、引き続きリップマンホログラムを記録する場合について、同様な検討を行なったので、その結果について報告する。

2. 実験方法

感光材料: Agfa-Gevaert Holotest 8E75HD 乾板を使用した。

記録: He-Ne レーザーを用いて、Fig. 1 に示すシングルビームホログラム光学系(二光束挟角180度)で、MgOを厚さ1mmにくん着させた標準白色の拡散反射板(20×50mm)を露光量を変えて記録(記録乾板は40×40mm)した。

現像処理: 標準的なKodak D-19 現像液²⁾、ハロゲン化銀溶剤をまったく含まないPAAP 現像液³⁾、タンニン現像液のCW-C²⁾、ハロゲン化銀溶剤を多量に含む特殊な現像液GP-8⁵⁾の4種のタイプのまったく異なる現像液(いずれも20°C)を用いて、時間を変えて(Table 1 参照) 現像したのち、停止(Kodak SB-1²⁾にて20°C, 1min)、定着(Kodak F-5²⁾にて20°C, 10min)した。つづいて水洗(流水にて5min)、自然乾燥して、振幅型ホログラムに仕上げた。

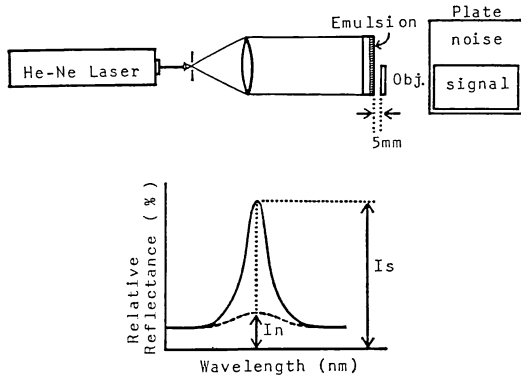


Fig. 1 Optical arrangement for recording holograms and determinations of their relative diffraction efficiency (η) and relative signal-to-noise ratio (S/N).

漂白処理: これらの振幅型ホログラムを、臭素ガス(室温)⁹⁾で白色化時間+2min 漂白後1昼夜放置、あるいは水洗(5min)後パラベンゾキノン漂白液 PBQ-1⁷⁾で20°C、白色化時間+30s 漂白して流水水洗(5min)したのち自然乾燥し、位相型ホログラムに仕上げた。

相対回折効率(η)と相対SN比の測定: 島津デジタル自記分光光度計 UV-220 に積分球付属装置を付け、MgO 標準白色板からの散乱反射光に対する試料ホログラムの拡散反射板記録部分の散乱反射回折光の比 I_s と、同じく試料ホログラムの拡散反射板未記録部分の散乱反射回折光の比 I_n より、次式で求めた。

$$\eta = I_s \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$S/N = (I_s - I_n) / I_n \quad (2)$$

センチメートル: He-Ne レーザービームをレンズと空間フィルタで拡げ、中央と端との強度比が20%以内になる拡大した光束を用いてステップウェッジを通して乾板に露光を与え、これを非漂白ホログラムとまったく同じ条件で現像処理した後、写真濃度計(さくら濃度計 PDA-65)で赤フィルター(内蔵の644nmを透過する $\Delta\lambda \approx 10$ nm の干渉フィルター)透過光を用いて写真濃度を測定した。なお、拡大した光束の中央と端の強度差による露光量の違いの問題は、あらかじめ強度分布を求めておいた定位置にステップウェッジをセットし、補正することによって除去した。また、露光の際に JIS III型センチメートルの光源に干渉フィルターをかけて使用することも試みた。

3. 非漂白ホログラムのための感度測定点

ホログラムの回折効率は、干渉縞の平均露光量と空間

周波数と visibility の関数となる^{8,9)}ので、感光材料、記録光学系、現像処理条件を固定した場合の回折効率は、干渉縞の平均露光量の関数となる。また、感光材料、記録光学系、現像処理条件を固定した場合のノイズ⁹⁾は、非線形ノイズと相互変調ノイズが主となるので、SN 比もまた干渉縞の平均露光量の関数となる。

同一現像液・現像時間ごとに露光量を変えて記録した非漂白ホログラムの回折効率、SN 比と、そのそれぞれの露光量から写真特性曲線(以後特性曲線と略す)上で求めた写真濃度の関係は、GP-8 で現像した場合を除き、

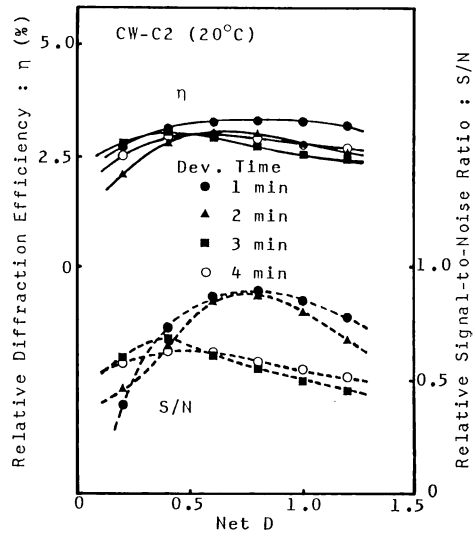


Fig. 2 Net optical density vs relative diffraction efficiency and relative S/N of unbleached holograms developed in CW-C2.

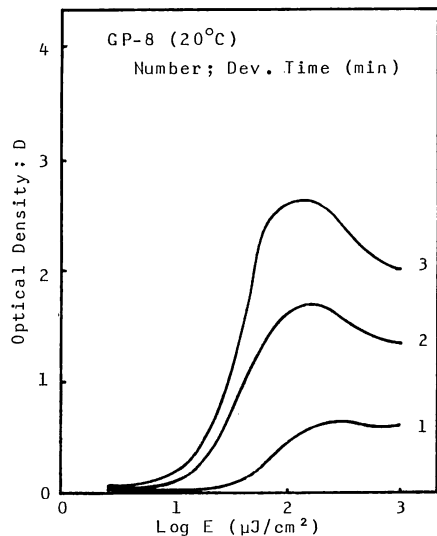


Fig. 3 Characteristic curves developed in GP-8.

Fig. 2 に例示する CW-C2 現像の場合のようになり、回折効率, SN 比のピークは、いずれも特性曲線のカブリ濃度+ベース濃度から上の正味の写真濃度が 0.4~0.8 (以後カブリ上 0.4~0.8 の写真濃度と略し、図では Net D と示す) のところに来た。GP-8 で現像した場合のみは、Fig. 3 に示すような特性曲線となり、回折効率, SN 比と、それぞれの露光量から特性曲線上で求めた写真濃度の関係は、Fig. 4 に示すようになり、何らの法則性も認められなかった。

センシトメトリーの際の感度測定点の写真濃度は、取

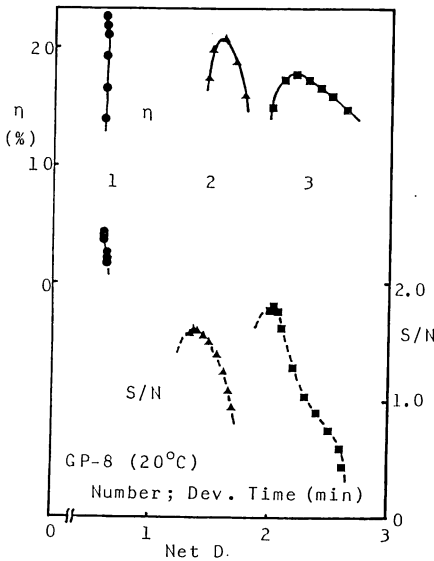


Fig. 4 Net optical density vs relative diffraction efficiency and relative S/N of unbleached holograms developed in GP-8.

Table 1 Holographic exposure index (HEI_R) determined.

Developer	Development time (min)	HEI_R
CW-C2 (20°C)	1	2.8
	2	4.6
	3	8.7
	4	11
D-19 (20°C)	2	7.1
	4	12
	6	20
	8	23
PAAP (20°C)	2	2.3
	4	2.9
	6	3.8

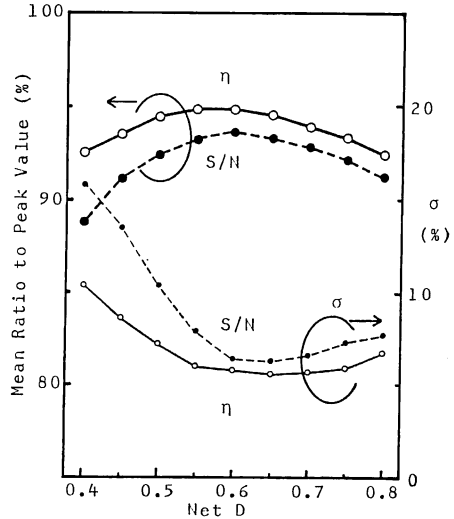


Fig. 5 Mean ratio to each peak value of relative diffraction efficiency and relative S/N of unbleached holograms and their standard deviation (σ) plotted vs net optical density.

扱い上あまり細かな値でないほうがよいので、0.05 または 0.1 刻みでとることとした。GP-8 で現像した場合以外について、同一現像液・現像時間ごとに、露光量を変えて記録した非漂白ホログラムの回折効率, SN 比と、それぞれの露光量から特性曲線上で求めた写真濃度の関係グラフより (つまり Fig. 2 のように求めた各曲線 1 本ごとに)、0.05 刻みでとった各写真濃度に対応する露光量のホログラムの回折効率, SN 比が、それぞれのグラフのピークの値の何 % になるかを求めた。こうして求めた現像液、現像時間の異なる 11 組 (Table 1 を参照) のデータを、0.05 刻みでとった写真濃度ごとに全平均値とその標準偏差 (σ) を求めてグラフにしたものが、Fig. 5 である。これをみると、特性曲線のカブリ上 0.60 の写真濃度のところに、回折効率, SN 比ともピーク値に最も近い値がくるのが認められる。

したがって、GP-8 で現像した場合以外の非漂白ホログラムの場合、特性曲線のカブリ上 0.60 の写真濃度のところを感度測定点にとるとよいことになる。しかし、これらの非漂白ホログラムは、回折効率の絶対値が小さすぎるので実用的ではない。一方、GP-8 で現像した非漂白ホログラムは、回折効率, SN 比ともに良好であるが、センシトメトリックな法則性が認められないことから、センシトメトリーによる適正露光量の決定は不可能であることがわかった。

4. 漂白ホログラムのための感度測定点

振幅型ホログラムを漂白して位相型ホログラムに変換すると、GP-8 で現像した場合を除き、Fig. 6 に例示するようになり、回折効率が約1桁、SN 比が 3~6 倍向上し、それぞれのピークが高濃度側へシフトした。GP-8

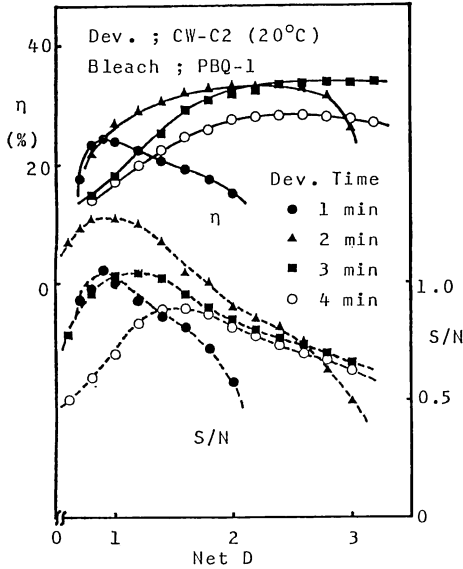


Fig. 6 Net optical density vs relative diffraction efficiency and relative S/N of bleached holograms developed in CW-C2

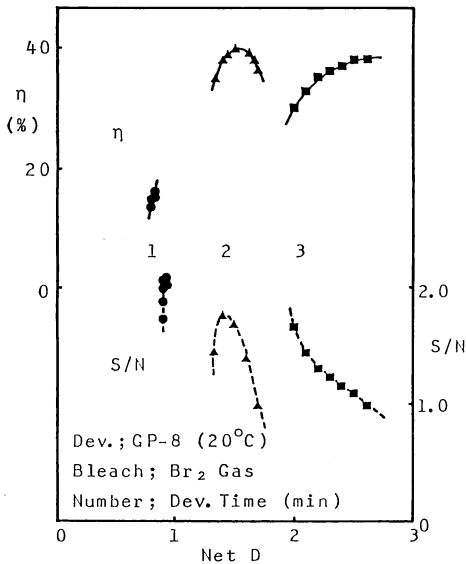


Fig. 7 Net optical density vs relative diffraction efficiency and relative S/N of bleached holograms developed in GP-8.

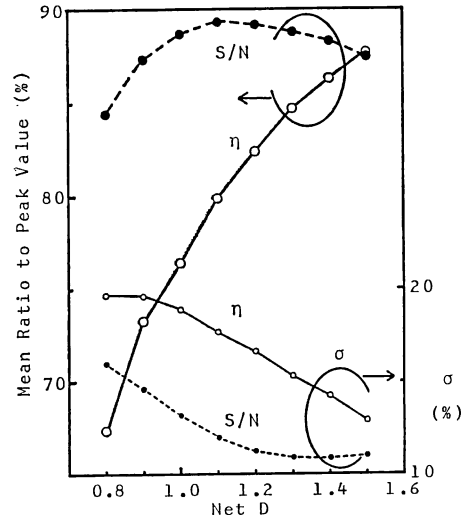


Fig. 8 Mean ratio to each peak value of relative diffraction efficiency and relative S/N of bleached holograms and their standard deviation plotted vs net optical density.

で現像した場合は、Fig. 7 に例示するように、回折効率、SN 比ならびにそれらのピーク位置のいずれもあまり変化せず、センシトメトリックな法則性も認められなかった。

非漂白ホログラムの場合と同様に、GP-8 で現像した場合以外について、同一現像液・現像時間・漂白方法ごとに0.1刻みでとった各写真濃度に対応する露光量のホログラムの回折効率、SN 比が、それぞれのピーク値の何%になるかを求め、得られた 22 組 (漂白方法を 2 通り用いたので非漂白ホログラムの場合の 2 倍) のデータを、0.1 刻みでとった写真濃度ごとにその全平均値と標準偏差を求めたものが、Fig. 8 である。これをみると、SN 比は、特性曲線のカブリ上 1.1~1.2 の写真濃度のところにピーク値に最も近い値がくるが、回折効率は、かなり高い写真濃度のところにピーク値に最も近い値がくるのが認められる。

漂白ホログラムは、回折効率の絶対値が比較的高いので、SN 比を重視したうえで回折効率にも配慮すると、GP-8 で現像した場合以外の漂白ホログラムの場合、特性曲線のカブリ上 1.2 の写真濃度のところを感度測定点にとるとよいと結論される。ただし、GP-8 で現像した場合のみは、非漂白ホログラムの場合と同様に、センシトメトリーによる適正露光量の決定ができないことがわかった。

5. ホログラフィ露光指数の表示法

リップマンホログラムの場合、GP-8のような特殊現像液を用いる場合を除いて、漂白して位相型に仕上げる事が不可欠である。GP-8のような特殊現像液を使用する場合にはセンシトメトリが応用できないが、その他の場合のホログラフィ露光指数 (HEI_R) は、特性曲線のカブリ上 1.2 の写真濃度に対応する露光量 $E_{1.2}$ (単位は $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) より、次のように表示するとよい。すなわち

$$HEI_R = 1000/E_{1.2} \quad (3)$$

これによって求めた、実験に用いた現像液と現像時間の各組合せにおけるホログラフィ露光指数は、Table 1 に示すごとくである。

ホログラムの記録の際には、参照光と物体光の強度の和 I_E 、あるいはシングルビームホログラム光学系の場合にはレーザー光照射強度 I_L (単位はいずれも mW/cm^2) を測り、つぎの式に代入すると適正露光時間 t (単位は s) が求まる。

ダブルビームホログラムの場合

$$t = 1/(HEI_R \times I_E) \quad (4)$$

シングルビームホログラムの場合

$$t = 1/(1 + R(\lambda) \times T(\lambda))(HEI_R \times I_L) \quad (5)$$

ここで、 $R(\lambda)$ はレーザー光の波長 λ における被写体表面の反射率、 $T(\lambda)$ は同じく感光材料の透過率である。たとえば、この実験に用いた拡散反射板は $R_{(633)} = 0.96$ 、Agfa-Gevaert Holotest 8E75HD 乾板は $T_{(633)} = 0.64$ である。

6. センシトメーターによるセンシトメトリ露光

安定でかつ容易にセンシトメトリが行なえるように、JIS III型センシトメーターの光源に、He-Ne レーザー光の波長に近い光を透過する干渉フィルター・東芝 KL-63 ($\lambda = 626.0 \text{ nm}$) をかけて露光を行なうことを試みた。乾板には、前報¹⁾で用いた Kodak 131-01 と Agfa-Gevaert Holotest 10E75 も加えてテストを行なった。使用した干渉フィルターの分光透過率分布¹⁰⁾と、テストに用いた 3 種の乾板の分光感度分布¹¹⁾は、Fig. 9 に示すごとくである。

レーザーによる露光とセンシトメーターによる露光を行なった 2 枚の乾板を、まったく同一現像条件で現像した結果、Fig. 10 に例示するように、波長 626~633 nm の近辺で分光感度が比較的一定な Agfa-Gevaert Holotest 10E75 と 8E75HD の場合には、感度測定点を含む

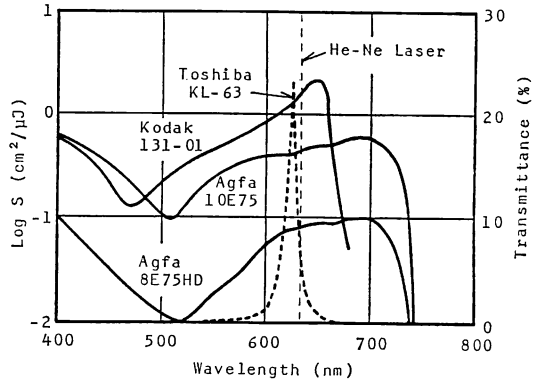


Fig. 9 Spectral sensitivity of plates and transmittance of Toshiba Filter KL-63.

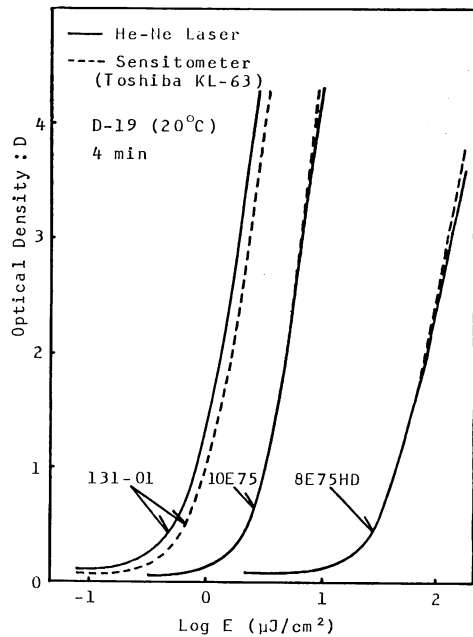


Fig. 10 Characteristic curves of plates exposed to He-Ne laser light and red filtered light.

低露光部で特性曲線の一致が認められた。しかし露光指数を求める際に関係のない高露光部では、レーザー露光による特性曲線が若干低い写真濃度となった。波長 626~633 nm の近辺で分光感度が大きく変化する Kodak 131-01 の場合には、633 nm と 626 nm の分光感度の相違にほぼ相当する特性曲線のズレが認められた (Fig. 10 参照) が、特性曲線を横軸に沿って平行移動させて低露光部を重ねると、他の 2 種の乾板の場合と同様に、高露光部でレーザーによる露光のものが若干低い写真濃度となった。これは、レーザーによる露光の際

にウェッジや乾板の界面での反射のために生じた干渉縞に、現像効果（エバーハード効果）がからんだためと考える。

7. ま と め

画質とくに SN 比のよいディスプレイ用リップマンホログラムを得るには、GP-8 のような特殊現像液で現像する場合を除いて、レーザーを光源としたセンチメートルによって得られた特性曲線のカブリ上 1.2 の写真濃度（レーザー光の色に近い干渉フィルター透過光を用いた拡散光濃度）に対応する露光量 E_R (単位は $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) で記録し、現像、定着、水洗後、漂白して位相型ホログラムに仕上げるとよいことがわかった。したがって、ホログラフィ露光指数 HEI_R は、 $1000/E_{1.2}$ で表示するとよいと結論された。

また、センチメートルの際の露光には、感光材料ごとにあらかじめチェックして、必要があれば感度測定点の露光量 $E_{1.2}$ に補正を施せば、一般の写真センチメートルの光源に、レーザー光の波長に近い光を透過する干渉フィルターをかけて使用することができることがわかった。

ただし、いずれの場合も相反則不軌に注意し、センチメートルの際の露光は、できるだけホログラフィ記録条件に近い条件（とくに露光時間）下で行なう必要がある。

る。なお、GP-8 のような特殊現像液を使用する場合には、センチメートルを応用することができないと結論された。

文 献

- 1) 三位信夫, 山内めぐみ, 丸山彰久, 風見 豊, 酒井朋子: "ディスプレイ・ホログラフィのセンチメートル—透過型ホログラムについて", 光学, **16** (1987) 444-449.
- 2) 笹井 明: 最新写真処方便覧 (写真工業出版社, 東京, 1983).
- 3) S. A. Benton: "Photographic materials and their handling," *Handbook of Optical Holography*, ed. H. J. Caulfield (Academic Press, New York, 1979) p. 358.
- 4) D. J. Cooke and A. A. Ward: "Reflection-hologram processing for high efficiency in silver-halide emulsions," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 934-941.
- 5) J. Růžek and P. Fiala: "Reflection holographic portraits," *Opt. Acta*, **26** (1979) 1957-1964.
- 6) A. Graube: "Advances in bleaching methods for photographically recorded holograms," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2942-2946.
- 7) N. J. Phillips, A. A. Ward, R. Cullen and D. Porter: "Advances in holographic bleaches," *Photogr. Sci. Eng.*, **24** (1980) 120-124.
- 8) 大上進吾: "ホログラフィ用感光材料", 応用物理, **38** (1969) 883-885.
- 9) 池上皓治: "ホログラム記録用銀塩感光材料の種類と現像・漂白処理法[1]", *O plus E*, No. 19 (1981) 79-86.
- 10) Agfa-Gevaert: NDT Division Technical Information, "NDT/Holography."
- 11) Eastman Kodak: Technical Data, "Kodak High Speed Holographic Film SO-253 (Ester Base)."