



## リップマンホログラム再生像の鮮明化の試み

久保田 敏弘

京都工芸繊維大学工業短期大学部写真工学科 〒606 京都市左京区松ヶ崎橋上町

(1986年12月18日受理)

### An Attempt to Get a Sharp Reconstructed Image of Lippmann Hologram

Toshihiro KUBOTA

Department of Photographic Technology, Kyoto Institute of Technology,  
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606

The numerical analysis and experimental results are presented for the image blur of a Lippmann hologram. The image blur is analyzed using Fresnel-Kirchhoff diffraction integral and coupled wave theory, and the methods to get a sharp reconstructed images are discussed. The experimental results for the Lippmann hologram recorded in a swelled emulsion using an appropriate solution are presented as an attempt to get the sharp images.

#### 1. はじめに

最近の銀塩乳剤とその処理法の進歩により、リップマンホログラムの回折効率は向上し、きわめて明るい再生像が得られるようになった。そのため、ホログラフィック・ディスプレイの手段として、また光学素子としてリップマンホログラムはさらに重要になってきているが、その機能をより高めるためには、再生像の鮮明化について改めて検討しなければならない時期にきている。

白色光で再生されたリップマンホログラムの再生像のぼけは、使用する記録材料の厚み、記録光学系の配置、および再生照明光源の大きさに依存する。本論文では、このぼけについて解析するとともに、鮮明な像を得るための一つの試みとして、膨潤された乳剤にリップマンホログラムを記録し波長選択性を向上させる方法について報告する。

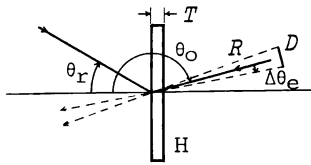
適当な溶液を用いて膨潤した乳剤にホログラムを記録したときの再生特性については Biedermann らによって最初に研究され、透過型ホログラムについて詳しく報告されている<sup>1,2)</sup>。われわれは市販の 8E75HD 乳剤を用いて実験を行ない、膨潤のための溶液、リップマンホログラムの再生特性、および長期保存についての検討を行った。

#### 2. 再生像のぼけ

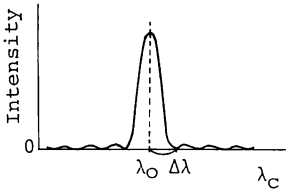
リップマンホログラムの再生像は、主として二つの原因により不鮮明になる。一つは再生波長が単一でなく幅をもつことにより、再生光の方向が拡がるためである。これについては辻内らが解析している<sup>3)</sup>。他は、再生の際の照明光源が大きさをもちことにより、照明方向に拡がりが生ずるためである。この二つの効果が加え合わさって再生像のぼけの大きさが決まる。以下にそれぞれの要因による再生像のぼけについて概観したのち、ぼけを小さくするための方法を検討する。現実の記録材料を考慮すれば、厚み方向に対する現象の不均一性もぼけの原因となるが、ここではふれない。

##### 2.1 再生波長の拡がりによるぼけ

Fig. 1(a) に示されるように、厚さ  $T$  の記録材料に波長  $\lambda_0$ 、参照光および物体光の入射角を空気中でそれぞれ  $\theta_0, \theta_1$  でリップマンホログラム  $H$  を記録した場合を考える。このホログラムを参照光と同じ方向から波長  $\lambda_c$  で再生すれば、再生光の強度と方向は  $\lambda_c$  とともに変化する。このふるまいについては Kogelnik の導いた結合波理論<sup>4)</sup> によって解析できるが、見通しをよくするためまずフレネル・キルヒホッフの回折積分から求める。再生光強度の波長依存性(波長選択性)は記録時と再生

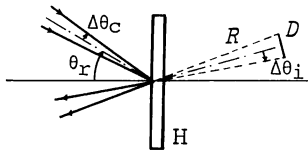


(a)



(b)

**Fig. 1** Image blur due to the change of reconstructed wavelength in Lippmann hologram. (a) Recording geometry. (b) Wavelength selectivity.



**Fig. 2** Image blur due to the size of illuminating light source.

時の間に厚さ  $T$  が変化しないとすれば、再生光強度は **Fig. 1(b)** のようにブラッグ波長  $\lambda_0$  を中心に sinc 関数の 2 乗で変化する。再生光強度が最大の位置から最初にゼロになるまでの範囲の波長の光が再生に寄与するとし、その波長幅を  $\Delta\lambda$  とすれば、 $\Delta\lambda$  は近似的に

$$\Delta\lambda = \lambda_0^2 / T(n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_r}) \quad (1)$$

で与えられる<sup>3)</sup>。ただし、 $n$  はホログラムの平均屈折率であり、簡単のため  $\theta_0 = 180^\circ$  とした。この波長変化に伴う再生光の角度変化  $\Delta\theta_e$  は

$$\Delta\theta_e = -\sin \theta_r \cdot \Delta\lambda / \lambda_0 \quad (2)$$

となる。ホログラムから距離  $R$  だけ離れた点物体を記録した場合、点像のぼけの大きさ  $D$  は、参照光と物体光を含む面内で

$$D = 2R |\Delta\theta_e| \quad (3)$$

となる。

### 2.2 再生照明光源の拡がりによるぼけ

**Fig. 2** に示されるように、再生照明光源の拡がりを、ホログラム面より見込んだ半角を  $\Delta\theta_c$  とし、それによる再生光の角度変化を  $\Delta\theta_i$  とすれば、それらの間の関係

は  $\theta_0 = 180^\circ$  として

$$\Delta\theta_i = -\cos \theta_r \cdot \Delta\theta_c \quad (4)$$

で与えられる。これによる再生像のぼけは、再生波長の拡がりの場合と同様に

$$D = 2R |\Delta\theta_i| \quad (5)$$

となる。

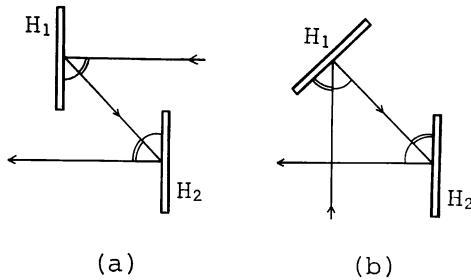
### 2.3 ぼけを小さくする方法

式(1)~(5)から、再生像のぼけを小さくするかなくすための方法が導きだされる。それらをまとめると次のようになる。

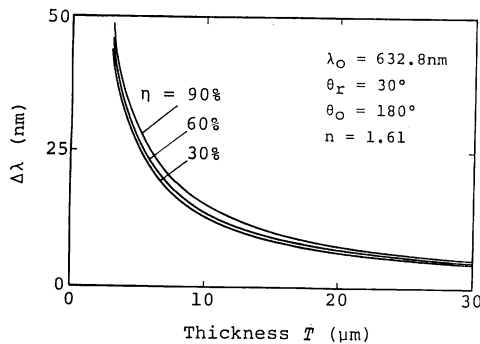
- (1) イメージホログラムにする ( $R \rightarrow 0$ ).
- (2) 再生光の角度分散を小さくする ( $\Delta\theta_c \rightarrow 0$ ).
  - (a) ホログラムに平行に干渉縞を記録する
  - (b) 複数のホログラムを組み合わせる
- (3) 再生光の波長分散を小さくする ( $\Delta\lambda \rightarrow 0$ ).
  - (a) 単色光で再生する
  - (b) 厚いホログラムにする
- (4) 再生照明光源のみかけの大きさを小さくする ( $\Delta\theta_c \rightarrow 0$ ).

(1)のようにイメージホログラムにする方法は通常行なわれているが、積極的にぼけを小さくできず、記録できる物体の奥行きが制限される。

(2)の方法を満足する一つの解は、式(2)からわかるように干渉縞をホログラム面に平行に記録することである。このとき再生光の方向は波長に依存せず像はぼけない。しかし、再生像を観察するとき、再生照明光によるホログラム面での正反射光が再生像に重なってしまう。これを避けるために、ホログラム面に薄いプリズムを貼り付ける方法が考えられる<sup>3)</sup>。もう一つの解は、(b)のように、たとえば2枚のホログラムを使って再生光の波長分散を補償することである。第一のホログラム(ホログラム格子)からの再生光を第二のホログラムの再生照明光とし、それぞれの再生光の波長による角度変化が打ち消し合うような配置にすればよい。透過型ホログラムの場合については、すでに achromatic image formation の手段として知られているが<sup>5,6)</sup>、この方法をリップマンホログラムに適用すれば、原理的に波長選択性が優れているため、波長変化による奥行き方向の結像位置の変化も少なく鮮明な像が得られる。具体的には **Fig. 3** に示されるような配置例によって実現できる。なお、 $H_2$  としてリップマンホログラムの代りに透過型ホログラムにしても、再生像のぼけを少なくする方法として有効である。また、 $H_2$  から再生される波面に収差が発生する場合、その収差波面に共役な波面を発生させるように



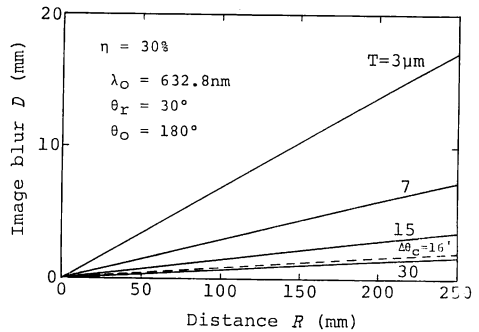
**Fig. 3** Two examples of the wavelength dispersion compensation for Lippmann hologram by combination of the two holograms.  $H_1$ , hologram grating;  $H_2$ , hologram.



**Fig. 4** Bandwidth of the reconstructed wavelength as a function of the hologram thickness for three values of the diffraction efficiency.

$H_1$  を作製すれば、鮮明でしかも収差の除かれた再生像を得ることができる。

(3)を実現する一つの方法は、(a)のように波長幅の狭いスペクトルをもつような光源で再生することである。ホログラムを使ったヘッドアップディスプレイ装置では、この方法により再生像のぼけを少なくしている。他の方法は、式(1)からわかるようにホログラムを厚くし波長選択性をよくすることである。ただし、式(1)で与えられる波長幅  $\Delta\lambda$  は回折効率がゼロの極限の場合である。結合波理論によれば位相ホログラムでは回折効率の増大とともにこの波長幅  $\Delta\lambda$  は増すことが知られている。具体的な例として  $\theta_r = 30^\circ$ ,  $\theta_o = 180^\circ$ ,  $\lambda_o = 632.8 \text{ nm}$ , ホログラムの平均屈折率  $n = 1.61$  としたとき、再生波長幅のホログラム厚さ依存性を回折効率をパラメータとして図示すれば **Fig. 4** のようになる。式(3)から計算されるぼけの大きさと再生像点の距離の関係を回折効率 30% を例にとり図示したのが **Fig. 5** の実線である。ぼけの大きさはホログラムの厚みが増すに従って減少することがわかる。参照光の角度を  $30^\circ$  より大きくすれば、ぼけはさらに大きくなる。



**Fig. 5** Image blur as a function of image distance for various hologram thickness (solid line) and for illumination with the sun (dashed line).

一方、再生照明光源の拡がりによるぼけに対しては、(1)の方法のほかに(4)の方法が有効である。再生照明光源の一つの典型的な例として太陽があるが、これでホログラムを再生した場合の光源サイズによるぼけの大きさを **Fig. 5** の破線で示した。太陽の場合視半径  $\Delta\theta_o = 16'$  であり、これは 1 m の距離から 8 mm の大きさの光源で再生した場合に相当する。人工的な光源は拡がり角をこれより小さくすることは可能である。

リップマンホログラム用記録材料として最もよく使われている乳剤は Holotest 8E 75 HD であり、厚みは公称  $7 \mu\text{m}$  である。この乳剤にリップマンホログラムを記録した場合、**Fig. 5** の典型的な例からもわかるように、再生像のぼけは再生照明光源の拡がりによる寄与よりも、再生波長の拡がりによる寄与のほうが 3.5 倍程度大きい。したがって、厚いホログラムにより再生波長の拡がりを小さくできれば、より鮮明な像が得られることが期待できる。ただし、Hariharan が指摘しているように<sup>7)</sup>、再生像の明るさに関しては再生波長幅が狭くなるほど暗くなるため、必要以上にホログラムを厚くすることは現実的ではない。重クロム酸ゼラチンの場合、自作のため膜の厚みはある程度自由に制御できる。しかし、市販の銀塩乳剤の場合は厚みが限られてしまう。この市販の乳剤を利用して比較的手軽に厚いホログラムを得る方法は、適当な溶液を使用して記録時および再生時に乳剤を膨潤させることである。

以下に、8E 75 HD 乳剤を使用した場合について、膨潤効果、ホログラムの再生特性、長期保存などに関する実験結果を示す。

### 3. 実験結果

#### 3.1 乳剤の膨潤

乳剤を膨潤させるために使用する溶液は、乳剤を必要

**Table 1** Thickness of swelled emulsion ( $\mu\text{m}$ )

Time (h)	Solution				
	Water	Glycerin 50%	Ethylene glycol	Triethanolamine	
				2 %	10%
1	15.6	14.7	9.3	18.2	19.0
3	15.7	14.9	10.6	18.7	19.8
6	15.5	15.3	14.0	19.2	20.3

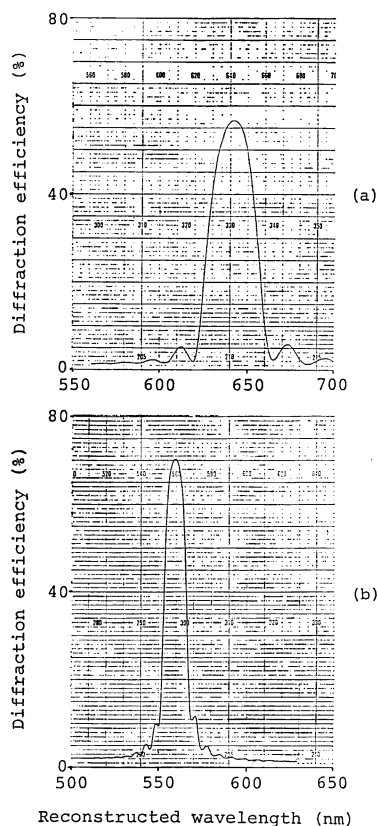
Original thickness is  $6.6 \mu\text{m}$ .

量膨潤させると同時に感度の低下をもたらさないものでなければならない。適当と思われる4種類の水溶液に対する8E75HD乳剤の膨潤効果をTable 1に示す。厚みの測定は、乳剤の端面を切断し接眼測微尺付の顕微鏡で直接観察しながら行った。膨潤前の厚みはタリステップを用いて測定した結果  $6.6 \mu\text{m}$  であった。乳剤は最初の数分間に大きく膨潤する。トリエタノールアミンの10%水溶液の場合、3時間後の厚みは元の厚みの3倍になる。以下の実験ではこの条件で膨潤された乳剤を用いた。

He-Neレーザー(波長  $632.8 \text{ nm}$ ) を使いこの乳剤にリップマンホログラム格子を記録した。参照光、物体光ともに平行光で、物体光は乳剤側からその面に垂直 ( $\theta_o = 180^\circ$ ) に、参照光はガラス基板側から  $\theta_r = 30^\circ$  で入射させた。ビーム比はほぼ1である。ガラス板で作られたindex matching cell 内に10%のトリエタノールアミン水溶液を入れ乳剤を膨潤し、露光を行なった。露光された乳剤はCookeらによって提案されたCW-C2現像、PBQ-2漂白処理<sup>8)</sup>に多少の変更を加えて処理した。作製されたホログラムを適当な水溶液で再膨潤し、ガラス板で乳剤面をカバーした状態で分光光度計MPS-5000(島津製作所製)により再生特性を測定した。

### 3.2 再生特性

分光光度計によって得られた典型的な測定例をFig. 6に示す。横軸は再生波長、縦軸は散乱成分を含む回折効率を示す。Fig. 6(a)は膨潤しない通常のホログラムの場合である。露光量は  $0.5 \text{ mJ/cm}^2$ 、回折効率の最大値は散乱成分を除いた正味の値で56%である。バンド幅  $2\Delta\lambda$  は  $46 \text{ nm}$  であり、この値は結合波理論より求めた値とほぼ一致している。(b)は水で膨潤した場合である。最大回折効率は69%に達し、膨潤しない場合に比べて2割程度高くなっている。この理由は以下のように考えられる。現像処理においてタンニング効果の強い現像、漂白液を使っているため、露光された部分は露光されない部分に比べてより硬膜されている。そのため、水



**Fig. 6** Typical examples of wavelength selectivity of Lippmann hologram. (a) No swelling. (b) Swelling.

で膨潤したとき露光されない部分がより多く水を含み膨潤する。したがってこの部分の屈折率の低下が露光された部分のそれより大きく、屈折率の差が増大し回折効率が向上する。バンド幅は  $19 \text{ nm}$  であり膨潤しない場合の2.4分の1となっている。理論値は  $14 \text{ nm}$  であることから、膨潤が厚み方向に完全に一樣には行なわれないことを意味している。

再生像の写真の一例をFig. 7に示す。(a)は膨潤なし、(b)は膨潤した場合である。物体は解像力テストチ

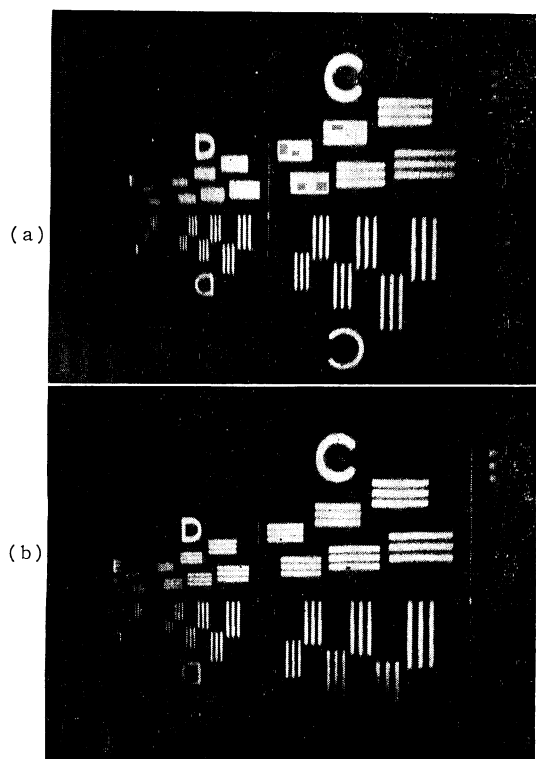


Fig. 7 Reconstructed images of test chart.  
(a) No swelling. (b) Swelling.

ャートの一部であり、それをホログラムから 52 mm 離れたところに置いた。再生照明光源は豆電球を使用し、光源の拡がりによるぼけの影響を極力小さくした。参照光は上のほうから入射している。横方向に長いチャートに注目したとき、(b)の再生像においてCの組は全て解像している。Dの組における最も粗い三本線チャートの一本の線幅が 0.4 mm であることを考えると、ほぼ予想通りの解像を示しているといえる。

膨潤したホログラムの散乱ノイズの程度を知るために、再生像の SN 比を測定した。物体として拡散反射する白色板を用い、それをホログラムから 50 mm 離して置いた。ホログラム面における参照光と物体光の強度比は 5:1 であった。現像処理し膨潤したホログラムを白色光源で再生し、再生像をレンズで結像しその結像面における強度をフォトマルで測定した。SN 比は再生像のない暗い部分の強度に対する再生像の明るい部分の強度の比で定義した<sup>9)</sup>。SN 比が最大になるところのホログラムの露光量は、ほぼ回折効率が最大になる露光量に一致している。測定の結果、エチレングリコールで膨潤したホログラムの場合 SN 比は 11、膨潤しない場合は 25 であった。したがって、SN 比は膨潤することにより約半

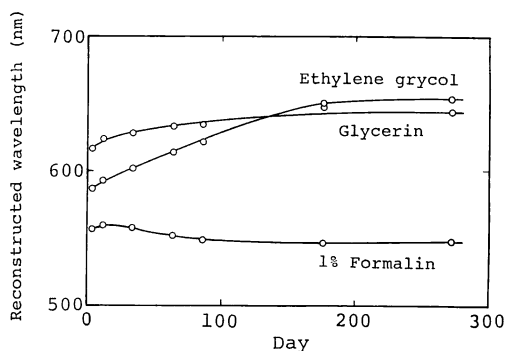


Fig. 8 Long term stability of the swelled holograms.

分になってしまうが、SN 比が 10 以上あり再生像の質としては十分であると思われる。

膨潤によって散乱が増えるのは回折効率が向上することと同様の理由によるものである。すなわち、膨潤によりゼラチンの平均屈折率が低下し銀塩の屈折率との差が増し、銀塩粒子とゼラチンの境界における反射が増えるためである。エチレングリコールの代りに水で膨潤した場合散乱は増え、逆にグリセリンの場合減る傾向を示す。

### 3.3 ホログラムの長期安定性

膨潤したホログラムについて、再生波長の長期間の変化を調べた。測定結果を Fig. 8 に示す。膨潤のための溶液として 1% ホルマリン水溶液、エチレングリコールおよびグリセリンの 3 種類を用いた。測定期間中、膨潤したホログラムは、ゼラチン層を密閉して保存する状態を実現するため、それぞれの溶液を満したシャーレに入れふたをして密閉した。このホログラムを通常の実験室の雰囲気中に置き、再生波長の変化のほか回折効率の変化、また焼出効果を測定した。

1% ホルマリン水溶液の場合、再生波長は初めわずかに長波長側に移動するが、その後ほぼ一定となる。水だけで膨潤した場合は、再生波長は日数とともに徐々に長波長側に移動する。したがってホルマリンは薬剤を硬膜する役目をすることは明らかである。一方、エチレングリコール、グリセリンで膨潤したホログラムの再生波長は、日がたつにつれてごくわずかつ長波長側に移動してゆく。約 6 カ月後飽和しほぼ一定となる。6 カ月後の再生波長は、1% ホルマリン溶液で 547 nm、エチレングリコールで 651 nm、グリセリンで 642 nm 程度である。

回折効率およびホログラムの透過率は長期間にわたりほとんど同じで、変化は認められなかった。

## 4. お わ り に

リップマンホログラムの再生像に関して、ぼけの原因と像の鮮明化の方法について検討した。また像を鮮明にするための一つの方法として、銀塩乳剤を適当な溶液で膨潤して厚くし波長選択性をよくする方法に注目し、それに関する実験を行なった。10% トリエタノールアミン水溶液を用いた場合、乳剤は元の厚さより3倍程度膨潤する。この乳剤にリップマンホログラムを記録し、波長選択性、SN比などの再生特性を測定し、また膨潤したホログラムの長期安定性を調べた。乳剤を膨潤する本方法は、波長選択性の向上により像の明るさが減少する傾向にはあるが、像を鮮明化する一つの簡便な方法である。

## 文 献

- 1) K. Biedermann, S.-I. Ragnarsson and P. Komlos: "Volume holograms in photographic emulsions of extended thickness," *Opt. Commun.*, **6** (1972) 205-209.
- 2) S.-I. Ragnarsson: "Holograms recorded in extremely thick photographic emulsions," *Opt. Commun.*, **14** (1975) 39-41.
- 3) 辻内順平, 金子隆司: "リップマン形ホログラムの分解能", *JOERA(光学工業技術研究組合)技術資料*, **7**, No. 16 (1971) 6-13.
- 4) H. Kogelnik: "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *Bell Syst. Tech. J.*, **48** (1969) 2909-2947.
- 5) C. B. Burckhardt: "Display of holograms in white light," *Bell Syst. Tech. J.*, **45** (1966) 1841-1844.
- 6) D. J. DeBitteto: "White-light viewing of surface holograms by simple dispersion compensation," *Appl. Phys. Lett.*, **9** (1966) 417-418.
- 7) P. Hariharan: "Volume-phase reflection holograms: The effect of hologram thickness on image luminance," *Opt. Acta*, **26** (1979) 1443-1447.
- 8) D. J. Cooke and A. A. Ward: "Reflection-hologram processing for high efficiency in silver-halide emulsions," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 934-941.
- 9) P. Hariharan: "Bleached reflection holograms," *Opt. Commun.*, **6** (1972) 377-379.