

イメージ/レインボウ・ホログラムの作製と 白色光によるカラー再生像

高松信彦^{*1} 佐々木辰明^{*2} 飯塚昌之^{*3}

Trial Production of Image/Rainbow Type Holograms and Reconstructed Color Images by Means of White Light

Nobuhiko TAKAMATSU, Tatsuaki SASAKI, Masayuki IIZUKA

A unique characteristic of optical holography is an idea of recording the complete wave field, i. e., the amplitude and the phase of the light waves scattered by an object. Holograms are recorded on a flat photosensitive materials, but produce a three-dimensional image when they are illuminated with monochromatic light or white light. A two-step rainbow holographic process of Benton has done a major improvement in the area of arts and displays.

In this study, a simplified technology of image and rainbow type color holograms for displays is reviewed with a practical optical setups, and the characteristics of reconstructed images in color, i. e, visual appearance of color holograms capable of reconstructing a bright, sharp, and chromatic image are discussed when illuminated with white light.

1. まえがき

ホログラフィーは立体写真作製法、あるいは複素振幅波面の記録・再生技法などと呼ばれている。ある物体を透過または反射した物体波（物体光）に参照波（参照光）を加えて干渉させ、この干渉パターンを感光材料に記録させたものを「ホログラム」という。もとの物体が2次元あるいは3次元であっても、ホログラムから完全に対象物体が再生されるので、ホログラムには物体についての情報、すなわち振幅と位相が同時に記録されている。また、白色光再生ホログラムでは、レーザー光

の代わりに、太陽光や白熱電球のような連続スペクトルを有する光源により簡便にもとの物体が再生される。最近、岡田らは円筒形あるいは円錐形の鏡を使用して広い視野角を有するホログラムを試作するための光学系を提案した⁽¹⁾。

形状だけでなく色も再現するように作製された「ホログラム」は、一般的に「カラー・ホログラム」と呼ばれる。このホログラムを作製するためにはR（赤）、G（緑）、B（青）の3色のレーザーを使用する。記録の段階では、モノクロの感光材料に各波長の光により多重露光して干渉縞を記録、現像してホログラムを作製する。再生の段階では、3色のレーザーを使用してホログラムを照明すると、それぞれの対応する色の光でできた干渉縞からカラーの再生画像が観察される⁽²⁾。単一露光により厚みのある感光材料に干渉縞を記録した

*1 本学大学院電子工学専攻

*2 株式会社クロステレビ

*3 本学電子工学科, 教授
1994年8月3日受理

「リップマン・ホログラム」では、ホログラムに波長選択性があるために通常の白色光源で照明しても、簡便にカラー画像が観察可能となる。

本研究では、ベントンの提案した「レインボウ・ホログラム」の作製と再生に関する数式的な定式化を試みる⁽³⁾。フレネルホログラム作製用のコヒーレント光学系を工夫して、イメージおよびレインボウホログラムを作製する。白色光源によるカラー再生画像の特徴と問題点を画像劣化の観点から考察する。

2. 白色光再生ホログラムの種類と特徴

白色光再生ホログラムでは、レーザ光、解像度の高い感光材料、ある工夫をした光学系等を使用してホログラムを作製する。再生の段階では、連続スペクトルを有する白色光源を使用してホログラムを照明すると、簡便にカラー画像が観察可能となる。代表的な白色光再生ホログラムの名称と主たる特徴は、下記のとおりである⁽⁴⁾。

(a) 「リップマン・ホログラム」

厚い乳材を塗布した感光材料を使用し、物体光と参照光をそれぞれ感光材料の表と裏から入射させて干渉パターンを記憶させる。白色光源により再生像が観察される。

(b) 「レインボウ・ホログラム」

アメリカのベントンが提案した方法で、2段階のホログラム作製過程が必要である。まず、物体光と参照光により、通常のホログラム（マスターホログラムと呼ばれる）を作製する。このマスターホログラムの前面に水平の狭いスリットを置いて、物体光（最初に使用した参照光と逆方向の光を使用、すなわち共役光によって第2ステップの物体光とする）と参照光により感光材料上に干渉パターンを記録させて第2のホログラム（レインボウ・ホログラム）を作製する。再生する際には、レーザ光のかわりに太陽光や白熱電球のような白色光源が使用できる。

(c) 「イメージ・ホログラム」

物体と感光材料の間にレンズを使用して物体光を構成し、参照光とともに干渉縞を感光材料に記録したホログラムを作製する。この場合、参照光

がなければ普通の写真撮影に相当して、2次元の強度（明るさと色）分布が感光材料上に記録される。参照光が加わると、対象物体からの振幅と位相成分を有する干渉縞（パターン）が記録されるので、ホログラムが作製できる。このホログラムを白色光で再生すると、波長により異なった方向に回折光が射出するので、見る方向により異なった色の像が見える。

(d) 「ホログラフィック・ステレオグラム」

大きな対象物体をいろいろな方向から写真撮影後、特別の光学系を使用してホログラムを合成する方法である。特殊な光学系により合成されたホログラムを円筒形に丸め、円筒内部に置いた白色光で再生する。再生する際には、視差の影響はないので物体の形状は変わらず、像の色だけが変化して見える。

表-1はホログラムの分類と種類に関連して、その特徴を比較して示す。回折方式による光学系の配置、露光方式、感光材料と処理技法、再生方式、電磁波源による分類等が可能である。

例えば、レインボウ・ホログラムの場合、フレネル・ホログラムの一種で、通常オフライン（オフアクシス）形式の光学系で作製される。また、単一露光を別の感光材料上に2回実行することによりホログラムを作製し、平面ホログラムで振幅ホログラムとして干渉パターンを記録している。再生方式としては透過形のホログラムで、白色光によって再生されるのでカラーホログラムに分類される。さらに、He-Neレーザー光源によりホログラムを作製するので可視光線（光）ホログラムに分類される。

3. 代表的なカラーホログラム技法

3.1 レインボウ・ホログラム技法と光学系

ホログラフィー技法は、光の干渉と回折という現象をきわめて巧みに利用した光情報処理技術の一つである。

図-1はベントンが提案したレインボウ・ホログラム作製と再生過程に関する光学系である。第1ステップとしてマスター・ホログラムを作製する。第2ステップでは、マスター・ホログラムの前面

表-1 ホログラムの種類と特徴*

分類項目とホログラムの種類	特 徴
1. (A) 回折光学系の配置 フレネル・ホログラム フランホーファー・ホログラム フーリエ変換・ホログラム イメージ・ホログラム <hr/> (B) 光学系の配置 インライン・ホログラム オフライン・ホログラム	通常のホログラム作製 物体と感光材料(ホログラム面)の距離が無限大, 物体に依存する回折像 物体と感光材料(ホログラム面)間にレンズを使用, フランホーファー・ホログラムの一種, 複素振幅空間フィルターとして, マッチト・フィルターリングに応用 2ステップ法により 「レインボウ・ホログラム」を作製 <hr/> 回折像の分離が困難 回折像の分離が容易
2. 露光方式 単一露光 多重露光	通常のホログラム作製 2重露光: 干渉測定への応用
3. 感光材料と処理技法 (A) 平面ホログラム 体積ホログラム <hr/> (B) 振幅ホログラム 位相ホログラム	通常のホログラム 「リップマン・ホログラム」, 乳剤が厚い場合 <hr/> 通常のホログラム 回折効率の向上
4. 再生方式 (A) 透過形ホログラム 反射形ホログラム <hr/> (B) モノクロホログラム カラーホログラム	通常のホログラムで虚像を観察 「レインボウ・ホログラム」の場合には, ホログラム面上で実像を観察 「エンボス・ホログラム」 <hr/> 通常のホログラムでレーザー光で再生 レーザ光あるいは白色光で再生 (a) リップマンホログラム (b) レインボウホログラム (c) イメージホログラム (d) ホログラフィックステレオグラム
5. 電磁波源による分類 可視光線(光)ホログラム X線ホログラム 電子線ホログラム マイクロ波ホログラム 超音波ホログラム 計算機合成ホログラム	レーザ光でホログラムを作製・再生 感光材料に代わる材料を使用して記録 同 上 同 上 同 上 振幅と位相に相当する成分を計算し描図, 写真縮小してレーザー光でスクリーン上に実像を再生

* ホログラムの分類に関しては, 作製手段, 機能, 用途・目的等により必ずしも統一されていない。

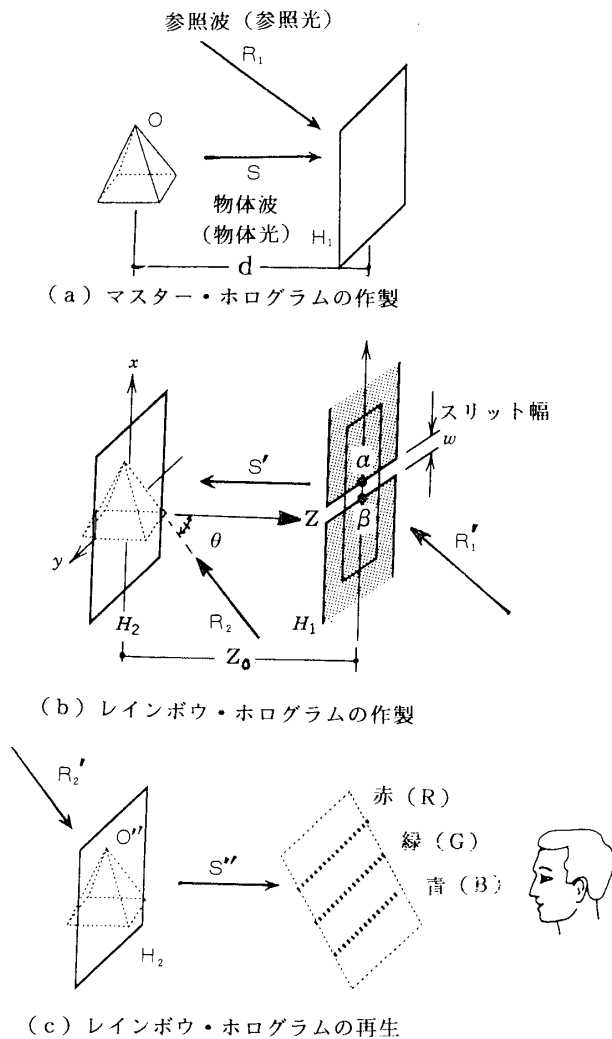


図-1 レインボウ・ホログラムの作製と再生手順

に幅 w の水平スリットを設置して、ホログラムを作製する。このホログラムは通常レインボウ・ホログラムと呼ばれる。再生過程では、白色透過光によりレインボウ・ホログラムを照らすことにより、ホログラム面上にレインボウカラーを有する実像が観察できる。

同図(a)に示すように、対象物体 O のフレネル・ホログラム H_1 を、物体波 S と参照波 R_1 を用いて撮影する。同図(b)のように、このマスター・ホログラムに水平のスリットを重ねて、狭い水平部分だけを取り出す。同図(a)で使用した参照波 R_1 と反対方向の光、すなわち共役の参照波 R_1^* を照射すると元の物体波 S は反対方向に再生されて、新しい物体波 S' になる。この新しい物体波 S' と同じ方向からの参照波 R_2 により、元の位置に

設置した感光材料上に第2のホログラム H_2 を作製する。再生する場合には、同図(c)に示すようにホログラム H_2 を参照波 R_2 と反対方向の白色光 R_2' で照明する。ホログラム H_2 から回折した波 S'' は同図(b)での狭いスリットを有するマスター・ホログラムからの情報、すなわちホログラム H_2 上にレインボウカラーを示す対象物体の実像が観察される。この時、スペクトルの実像は、水平面からある角度だけ傾いた平面上に再生される。この平面は「アクロマティック平面」と呼ばれ、観察者の眼をこのスペクトルの適当な位置に置けば、眼の瞳は小さいので、スペクトルの狭い範囲しか眼に入らなくなって固有の色だけが再生される。眼の位置がアクロマティック平面から外れると、眼に入る光の波長は、ホログラムの上下の位置によって変化し、再生像はレインボウ（虹）カラーに変化して見える。結果として、再生像の形状は同じであるが、見掛けの大きさ（倍率）は変化する。

3.2 レインボウ・ホログラム作製と再生に関する定式化

(a) マスター・ホログラムの作製

ホログラム H_1 面上での物体波（物体光）および参照波（参照光）による複素振幅をおのおの S と R_1 とする。 H_1 面上での2つの波による干渉により、その強度式は次式で定義できる。

$$\begin{aligned} I_1 &= |S + R_1|^2 \\ &= (S + R_1)(S^* + R_1^*) \\ &= |S|^2 + |R_1|^2 + S \cdot R_1^* + S^* \cdot R_1 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、*：共役記号

$|\cdot|$ ：絶対値記号

H & D 曲線の線形領域で写真現像することにより、その振幅透過率、すなわちマスター・ホログラムの透過率は次式で表記できる。

$$\begin{aligned} T_1 &= k_1 \cdot I_1 \\ &= k_1 \cdot \{|S|^2 + |R_1|^2 + S \cdot R_1^* + S^* \cdot R_1\} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 k_1 ：定数

(b) レインボウ・ホログラムの作製

マスター・ホログラムの前面に幅 w のスリットを設置して、 $R_1^* = R_1^*$ による新しい物体波 S' と

参照波 R_2 により、ホログラム H_2 面上での干渉による強度は次式で定義できる。

$$\begin{aligned} I_2 &= |S' + R_2|^2 \\ &= |S'|^2 + |R_2|^2 + S' \cdot R_2^* + S'^* \cdot R_2 \\ &= |S|^2 + |S_{\alpha\beta}|^2 + |R_2|^2 + S_{\alpha\beta} R_2^* + R_2 S_{\alpha\beta}^* \\ &\quad + S(S_{\alpha\beta} + R_2) + S^*(S_{\alpha\beta}^* + R_2^*) \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 $S' = S^* + S_\alpha + S_\beta = S^* + S_{\alpha\beta}$

$$S'^* = S + S_\alpha^* + S_\beta^* = S + S_{\alpha\beta}^*$$

なお、スリット幅 $w \neq 0$ によるホログラム H_2 面上での複素振幅は、 δ 関数によるフレネル領域での回折を考慮して、次式で定式化できる⁽⁵⁾[図-1を参照]。

$$S_{\alpha\beta} = S_\alpha + S_\beta = \exp[-j\alpha] + \exp[-j\beta]$$

$$S_{\alpha\beta}^* = S_\alpha^* + S_\beta^* = \exp[j\alpha] + \exp[j\beta]$$

ここで、 $\alpha = (k/2z)(x - w/2)^2$

$$\beta = (k/2z)(x + w/2)^2$$

$k = 2\pi/\lambda$ (波数); λ : 波長

z : ホログラム H_1 と H_2 間の距離

もし、スリット幅 w が零の場合には、マスターホログラムからの新しい透過物体波 S' は存在しないことになり、レインボウホログラムは作製できない。また、スリット幅 w がマスターホログラムの幅と同じ大きさの場合には、イメージホログラム作製の光学系に等価であり、新しい透過物体波 $S' = S^*$ のみが存在する。

レインボウホログラムの振幅透過率は、マスターホログラムを作製する場合と同様に、感光材料および H & D 特性曲線に関する比例定数を考慮して次式で定式化できる。

$$\begin{aligned} T_2 &= k_2 \cdot I_2 \\ &= k_2 \{ |S|^2 + |S_{\alpha\beta}|^2 + |R_2|^2 \\ &\quad + S_{\alpha\beta} R_2^* + R_2 S_{\alpha\beta}^* \\ &\quad + S(S_{\alpha\beta} + R_2) + S^*(S_{\alpha\beta}^* + R_2^*) \} \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 k_2 : 定数

(c) レインボウ・ホログラムの再生

レインボウ・ホログラム作製時の参照波 R_2 と共役な参照波 $R_2' = R_2^*$ によりホログラム面 H_2 を照明する。ホログラム面からの回折波 S'' は次式で定式化できる。

$$S'' = R_2' \cdot T_2$$

$$\begin{aligned} &= k_2 \cdot R_2' \{ |S|^2 + |S_{\alpha\beta}|^2 + |R_2|^2 \\ &\quad + S_{\alpha\beta} R_2^* + R_2 S_{\alpha\beta}^* \\ &\quad + S(S_{\alpha\beta} + R_2) + S^*(S_{\alpha\beta}^* + R_2^*) \} \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、 R_2' が単色光の場合: $R_2' = R_2^*$

もし、白色透過光 R_2' により、レインボウ・ホログラムを照明すると、 H_2 で回折した光 S'' はマスター・ホログラムの1部分をスリットで切り出した像、すなわちスリット幅 w に依存する実像: $k_2 \cdot R_2' \cdot S \cdot (S_{\alpha\beta} + R_2)$ が H_2 面上にレインボウ・カラーで観察される。

4. カラーホログラムの作製と白色光による再生像

4.1 実際的なホログラム作製の光学系

図-2 は一般的な3次元物体のホログラムを作製するためのフレネル光学系である。He-Ne レーザ光源からでた光はミラーM1で反射後、ビームスプリッター(ハーフミラー)BSで2つの光路: 物体光と参照光に分離する。物体光と参照光との強度比を1:4~5程度に調整するため参照光路中に灰色フィルターFを挿入する。ミラーM3で反射後、顕微鏡用の対物レンズと平凸レンズを組み合わせる平行光を作る。一方、物体光はミラーM2で反射後、顕微鏡用の対物レンズによって発散光を作り、対象物体にあてる。対象物体からの反射光が最終的な物体光となり、参照光と干渉させてホログラムを作製する。なお、物体光と参照光の光路長は、ホログラムを作製用に使用するレーザ光源の可干渉距離内に設定する。

図-3 は図-2 のフレネル光学系で作製したフレネルホログラムとその光学系の一部を変更して、イメージホログラムを作製するための光学系である。ビームスプリッターBSで2つの光路に分離された光はミラーM3で反射後、顕微鏡用の対物レンズと平凸レンズを組み合わせる平行光を作る。この平行光は物体光に相当し、フレネルホログラムの裏面から透過光を作る。この透過光が最終的な物体光となり、新しいホログラム感光材料の前面上で、参照光と干渉させてイメージホログラムを作製する。なお、図-3の光学系では、フレネルホログラムを裏返すことにより、図-2の光

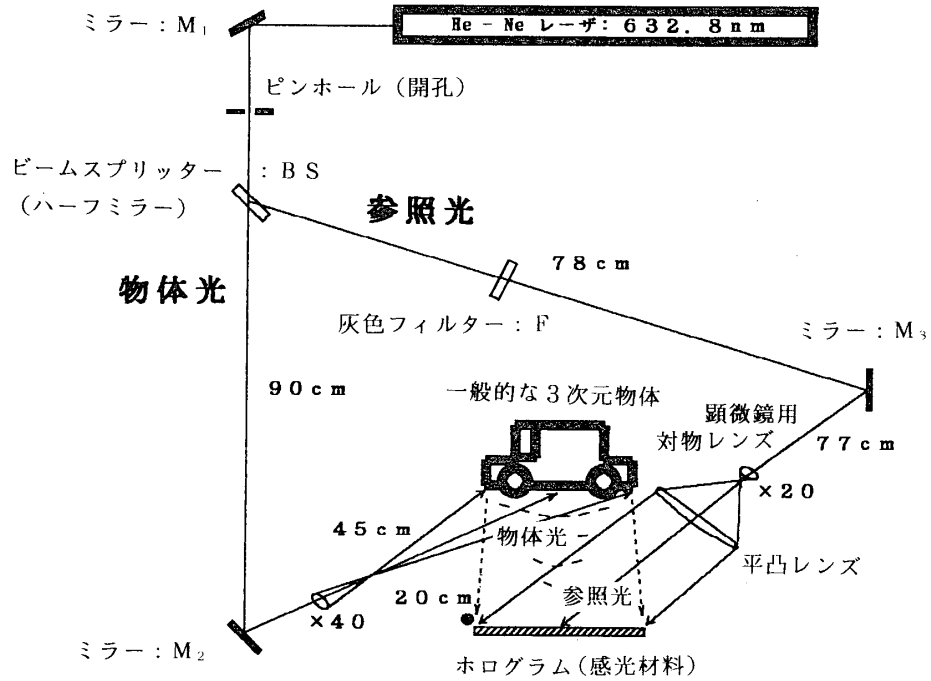


図-2 3次元物体のホログラムを作製するためのフレネル光学系

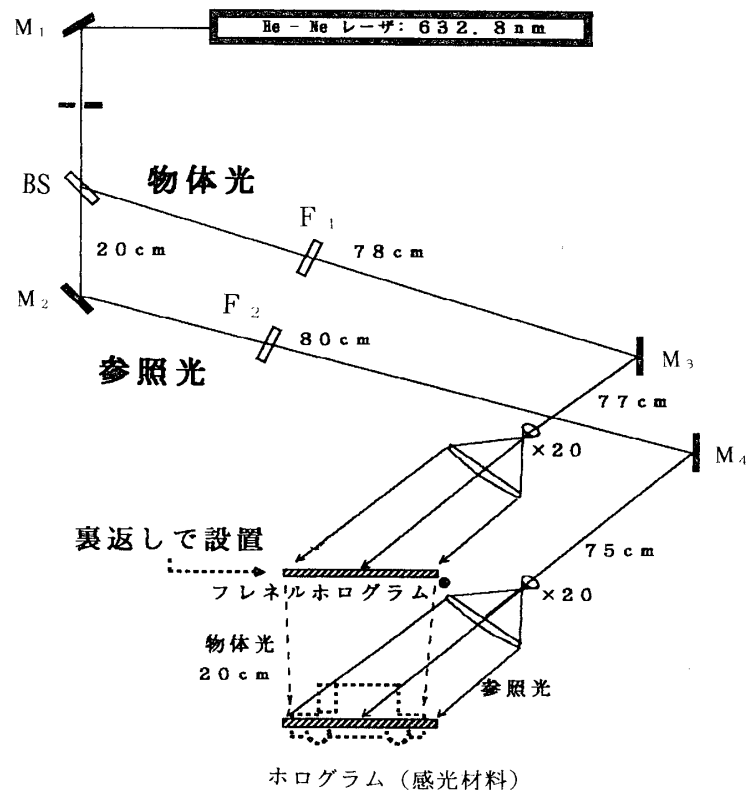


図-3 イメージ・ホログラムを作製するための光学系

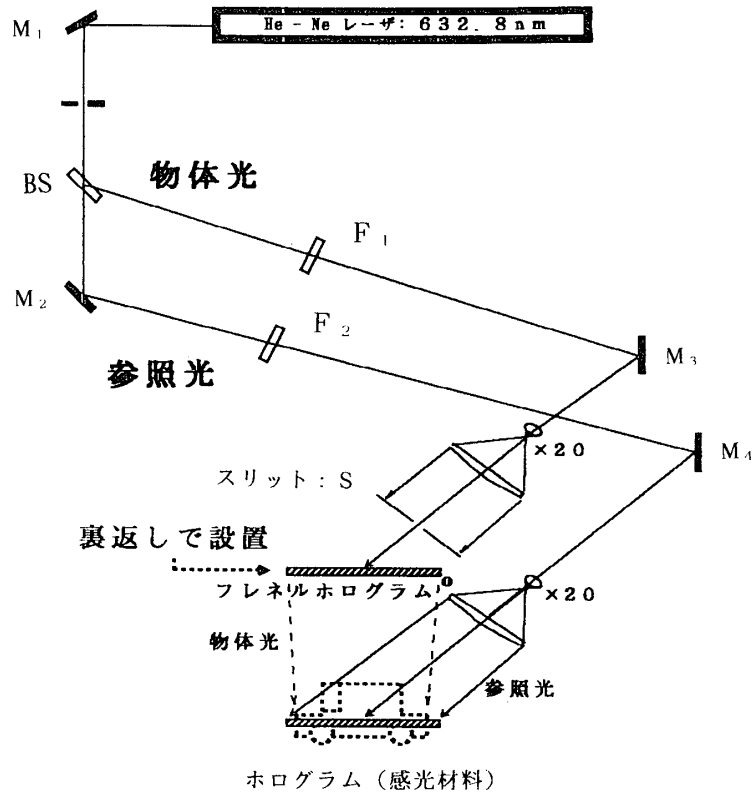


図-4 レインボウ・ホログラムを作製するための光学系

学系における共役な物体光を実現させている。

図-4 は図-2 のフレネル光学系で作製したフレネルホログラムと図-3 のイメージホログラムを作製するための物体光の光路中に“水平のスリット S”を挿入することにより、レインボウホログラムを作製するための光学系である。白色光でカラー再生像を観察するためのイメージホログラムおよびレインボウホログラムを作製するためには、“マスターホログラム”と呼ばれるフレネルホログラムを予め作製しておく必要がある。フレネルホログラムの干渉パターンの記録状態、すなわち画質や回折効率等がイメージホログラムおよびレインボウホログラムを作製する際に種々の影響をおよぼすことが予想される。

4.2 白色光によるカラーホログラム再生像の見え方

図-5 は本研究でホログラム作製のために使用した 3 次元物体（ミニチュアカー）のカラー写真である。

図-6(a), (b) は図-2 のフレネル光学系により作

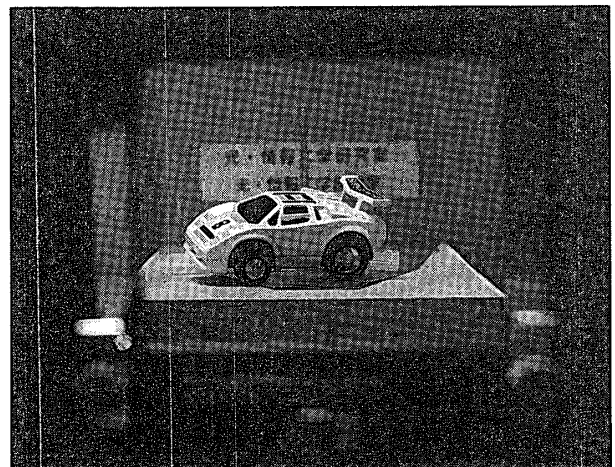


図-5 ホログラム作製のために使用した 3 次元物体（ミニチュアカー）

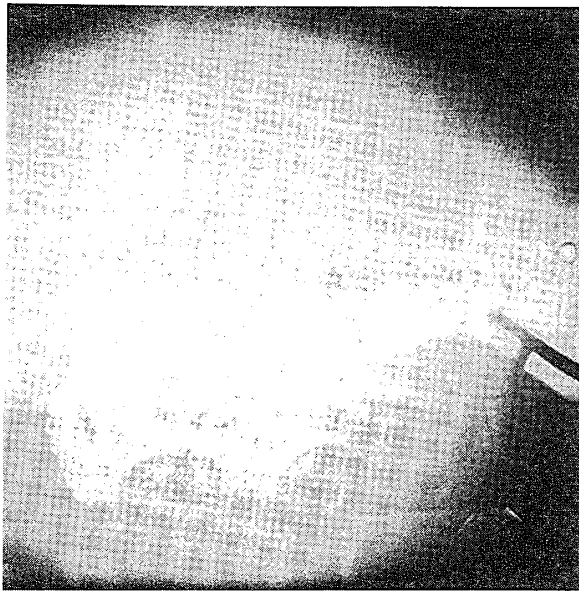
製したホログラムの再生像である。同図(a)は He-Ne レーザ光による再生像(虚像)で、拡散した平行なレーザ光束中に対象物体が白色に見える。同図(b)は共役再生光による再生像(スクリーン上での実像)である。同図(b)でも参照光を平行光束にしたので、ホログラムを裏返しにセットして反射光による再生像を観察・撮影している。対象物体の形状に歪みが認められる。

イメージホログラムやレインボウホログラムを作製する際には、図-2 のフレネル光学系により作製したホログラムをマスターホログラムとして、図-3 あるいは図-4 の光学系により、もう一度感光

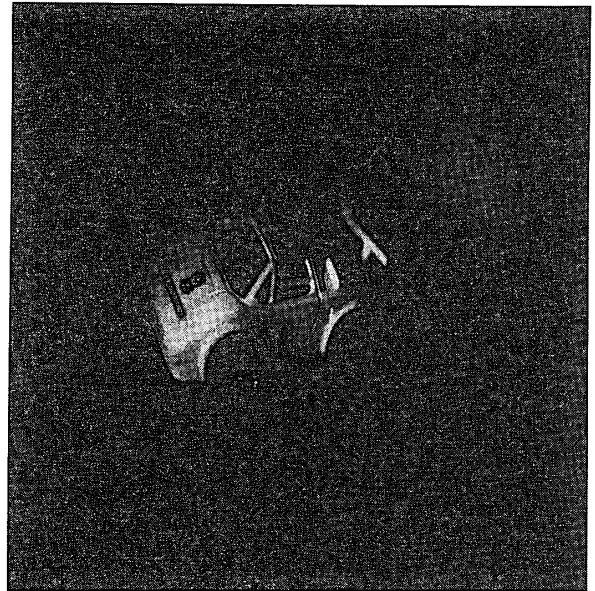
材料上にホログラム記録する必要がある。

図-7(a), (b)は図-3 のイメージホログラム光学系により作製したホログラムの白熱電球による再生像である。イメージホログラム作製する際にはスリットを使用していないため、再生像の見え方はホログラムに対して、光源と観察の位置、すなわち撮影状況により被写体の色や形状・様子が変化する。同図(a)は再生像の劣化した場合であり、同図(b)では再生像が全体的に明るくカラー表示されている。

図-8(a), (b)は図-4 のレインボウホログラム光学系により作製したホログラムを白熱電球により

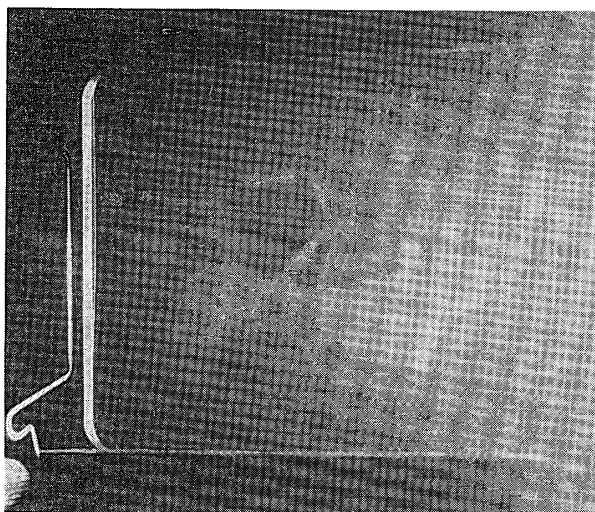


(a) 再生像(虚像)

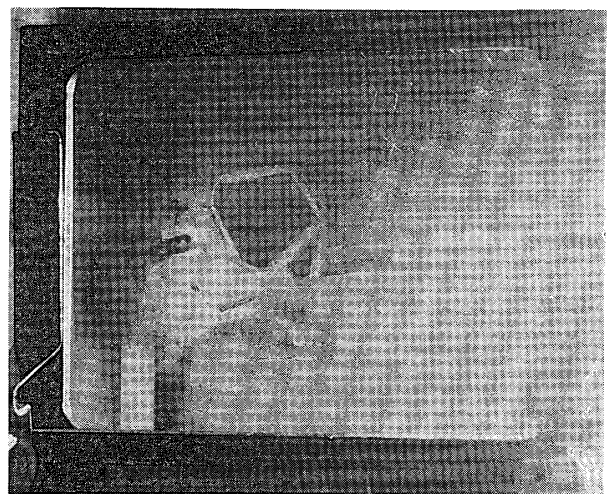


(b) 共役再生光によるスクリーン上での再生像(実像)

図-6 He-Ne レーザ光によるフレネルホログラムの再生像



(a) 劣化した再生像



(b) 明るいカラー像

図-7 イメージ・ホログラムの再生像(実像)

再生した場合である。図-7の場合と同様に再生像中にスペクトル色が確認できるが、レインボウホログラム作製時のスリットの影響でやや視域が狭くなっている。同図(a)は写真撮影の際に白熱電球をホログラム後方にセットしている。一方、同図(b)では、白熱電球の前面に小さな開孔をセットすることによって見掛けの発光面を減少させた場合で、同図(a)に比較してスペクトル色がはっきり表示されている。

図-9(a), (b)は白熱電球の一種であるハロゲン電球により、イメージおよびレインボウホログラムを再生した場合の一例である。イメージホログラムの場合でも明るいスペクトル色がレインボウホログラムの再生像と同様に観察・識別できる。

図-10(a), (b)は太陽光によりレインボウホロ

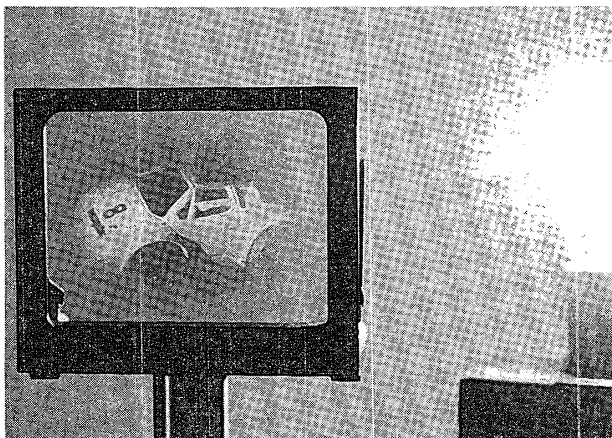
グラムを再生した場合の一例である。ホログラムに対して太陽光の位置が斜め上方向にあり、再生像を観察・撮影する際に仰角を変化させている。ホログラム面上のスペクトル色の順序が図-8の再生結果と反転している。

〈レインボウホログラム再生像の劣化⁽⁶⁾〉

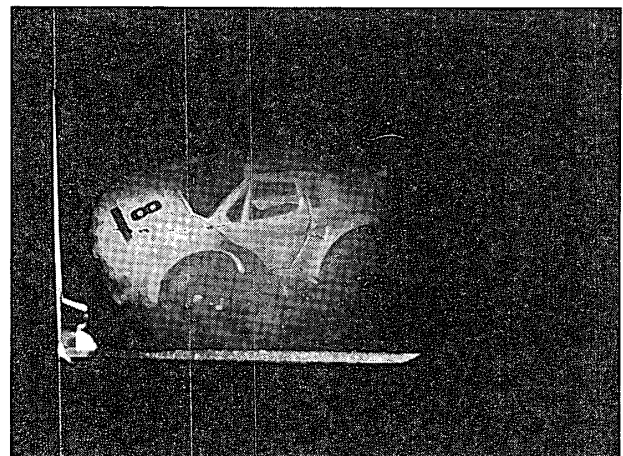
レインボウホログラム再生像の劣化の度合いは、レインボウホログラムを作製する際に使用したスリットの幅や光学系の幾何学的な配置、再生用白色光の大きさなどにより影響される。

レインボウホログラムが連続的なスペクトルを有する白色光で照明される場合、観察される波長の拡がり： $\Delta\lambda$ は次式で評価される [図-1を参照]。

$$\Delta\lambda = (\lambda / \sin \theta) \{ w / Z_0 + p / Z_0 \}$$

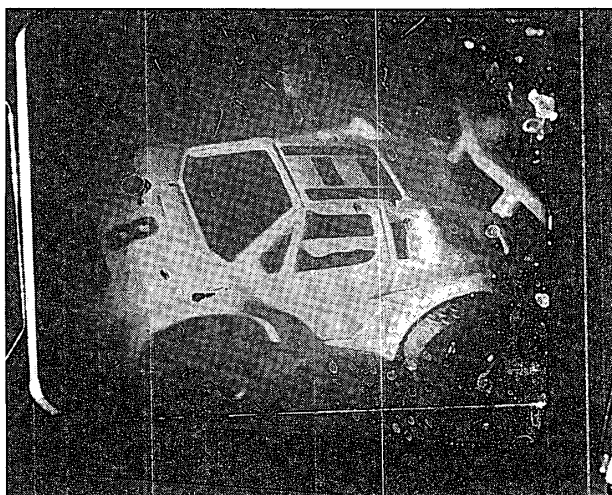


(a) ホログラムを直接的に照射



(b) 電球の前面に小さな円形の開孔部

図-8 白熱電球によるレインボウ・ホログラムの再生像 (実像)



(a) イメージ・ホログラム



(b) レインボウ・ホログラム

図-9 ハロゲン電球によるカラー再生像

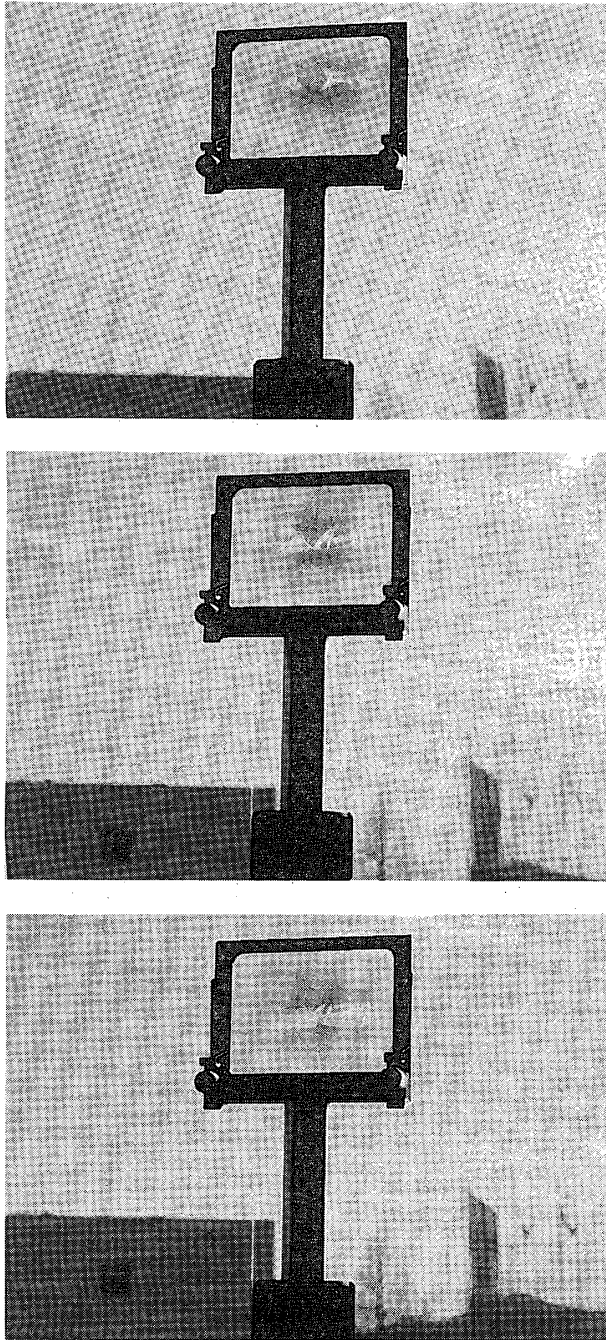


図-10 太陽光によるレインボウ・ホログラムの再生像（実像）の見え方の相違

ここで、 λ ：再生照明光の平均的な波長

w ：スリット幅， p ：瞳の直径

Z_0 ：マスターホログラムとレインボウホログラムとの距離

θ ：レインボウホログラムを作製する際の参照光と z 方向との角度

波長の相対的な拡がり： $\Delta\lambda/\lambda$ に起因する再生像の縦（ x 方向）劣化： Δx

$$\Delta X = d(\Delta\lambda/\lambda)\sin\theta \\ \approx d\{w/Z_0 + p/Z_0\}$$

ここで、 d ：マスターホログラムを作製する際の物体とホログラム面との距離

有限の大きさの白色光によりレインボウホログラムを照明するとき、角度的な拡がりによって再生像の角度的な劣化： $\Delta\Psi$

$$\Delta\Psi = d \times \Psi_s$$

ここで、 Ψ_s ：白色光の角度的な拡がり

スリットの幅 w がマスターホログラムとレインボウホログラムとの距離 d に比較してかなり狭い場合には、回折による再生像の縦（ x 方向）劣化： Δx_w

$$\Delta x_w = 2\lambda(Z_0 + d)/w$$

5. まとめ

簡便な光学系を使用して、一般的なフレネルホログラムを作製した。このホログラムをマスターホログラムとして、2種類のカラーホログラム：イメージホログラムとレインボウホログラムを作製し、その再生像の見え方をスリットの有無の観点から視覚的に比較検討した。イメージホログラムのカラー再生像に対して、レインボウホログラムのカラー再生像は全体的に明るく見える。また、観察の位置を上下方向に移動させることにより、再生像の視域が変化し被写体のスペクトル色の様子が変わることが確認された。

今後は R, G, B 単色光を使用して作製したカラーホログラムによる再生像の画質との比較、また白色光で再生した場合の像点の広がりや劣化状況に関する定量的な評価法についても考察したい。

参考文献

- 1) K. Okada, T. Ose and J. Tsujiuchi: Wide view angle hologram made with a cylindrical or a conical mirror, *Optics Communications*, Vol. 94 No. 5 (1992) pp. 321-325
- 2) 本田捷夫: 『ホログラフィのはなし』, 日刊工業新聞社, (昭和62年)
- 3) S. A. Benton: Hologram Reconstructions with Extended Incoherent Sources, *J. O. S. A.*, Vol. 59, No. 11 (1969) pp. 1545-1546.
- 4) 辻内順平: 『ホログラフイー』 完全な映像を求めて, 丸善株式会社 (平成5年)
- 5) Francis T. S. Yu and I. C. Khoo 『Principles of Optical Engineering』 John Wiley & Sons, (1990)
- 6) P. Hariharan: 『Optical Holography Principles, Techniques and Applications』, Cambridge University Press (1984)