

# 光学

## 第8章 ホログラフィー

黒田和男

### 1 はじめに

光記録には、写真フィルムや最近では半導体撮像素子などが用いられる。これらの媒体には、光の強度分布を記録することができる(写真法)。ところが光は本来波であるから、強度だけではなく、位相情報も持っている\*1。写真法では、位相情報が抜け落ちてしまうのである。しかし、光の複素振幅を直接記録する手段はない。1948年にD. Gaborは写真法を用いて光の振幅を記録する巧妙な方法を発明した。光をそのまま記録するのではなく、補助の光(参照波)を重ねて、干渉縞を記録し、後にこれを読み出す。干渉縞には位相情報が書き込まれているから、強度と位相の両方を同時に記録できるのである。彼はこれを、接頭語 holo=whole または complete をつけて、完全な記録という意味で holography と名付けた\*2。本章では、ホログラフィーについて述べる。

### 2 ホログラフィーの原理

ホログラフィーとは、記録したい光波の振幅と位相を、補助の波(参照光)と干渉させ、干渉縞として記録し、回折現象を利用して記録した光波を再生する技術である。干渉縞を記録したものをホログラムという。最も簡単なホログラムは、二つの平面波が作る干渉縞を記録したものである。第7章で述べたように、波長 $\lambda$ 、交差角 $2\theta$ の平面波が干渉すると、格子間隔 $\Lambda = \lambda/2 \sin \theta$ の干渉縞が形成される。これをフィルムに記録すると、格子間隔 $\Lambda$ の回折格子が作られる。干渉する平面波の一方を物体光、もう一方を参照光と呼ぼう。ホログラムに参照光を当てると、回折格子によって回折される。回折角は $2\theta$ となるから、回折波は記録に用いた物体光と同じ方向に進む平面波になる、すなわち、物体光が光波として再生されたのである。

ホログラム記録の光学系を図3の示す。レーザー光をビームスプリッター(BS)で二つに分ける。一方は、レンズで広げて物体を照明する。物体で反射された物体光(Obj)がホログラム(H)を照らす。もう一方の光もレンズで広げ、参照光(Sig)とする。物体光と参照光の干渉で生じた干渉縞を感光材料(ホログラム)に記録する。原理的には参照光は任意の波面を持つ光波で構わない。実際には、参照光としては、平面波または球面波が用いられることが多い。次に再生では、記録に使ったのと同じ参照光でホログラムに照射すると、波の回折効果により物体光が再生される(図4)。

この過程を式で表すと次のようになる。物体光の複素振幅を $u_o$ 、参照光を $u_r$ とする。ホログラムには、干

\*1 光にはさらに偏光の情報もある。

\*2 Gaborの最初の発明では、電子顕微鏡にこの技術を適用し、分解能を飛躍的に高めようという目的があった。電子線ホログラフィーは日立製作所の外村博士により実現した。

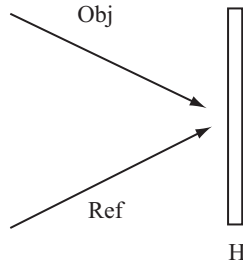


図1 2 光束の干渉

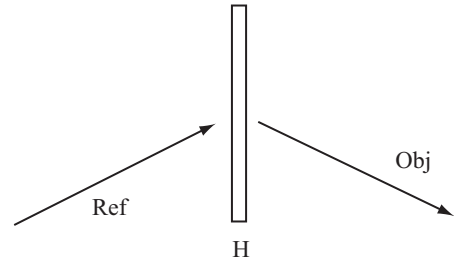


図2 回折格子による回折

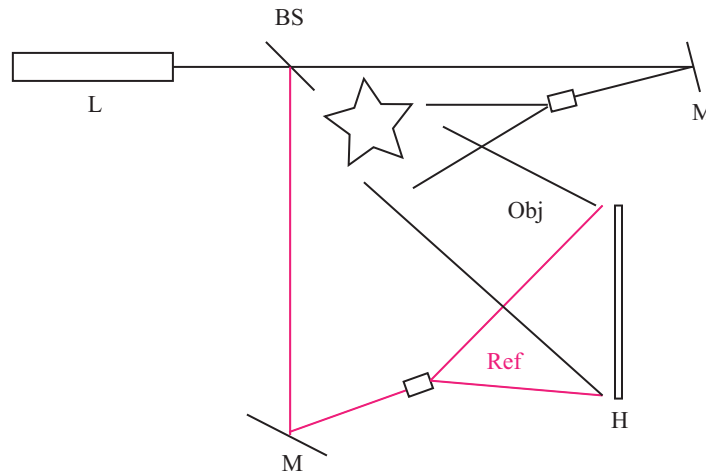


図3 ホログラムの記録

干涉縞の強度分布

$$I = |u_o + u_r|^2 = |u_o|^2 + |u_r|^2 + u_o u_r^* + u_o^* u_r \quad (1)$$

が記録される。ホログラムの振幅透過率  $t$  は記録された干涉縞の強度に比例するとする。よって

$$t = t_0 + \alpha I = t_0 + \alpha |u_o|^2 + \alpha |u_r|^2 + \alpha u_o u_r^* + \alpha u_o^* u_r \quad (2)$$

となる。このホログラムを参照光  $u_r$  で照明すると、透過光の振幅は振幅透過率を掛けて

$$t u_r = (t_0 + \alpha |u_o|^2 + \alpha |u_r|^2) u_r + \alpha |u_r|^2 u_o + \alpha u_r^2 u_o^* \quad (3)$$

となる。はじめの3項をまとめた第1項は、参照光がそのままホログラムを通過した項である。第2項が物体光  $u_o$  に比例する回折光で、これが記録したホログラムを再生した項になっている。この回折光は、物体光を忠実に再生したものになっているから、あたかも物体が実在するかのように見える。この図から明らかなように、ホログラムを結像素子ととらえたときは、虚像ができることになる。

第3項は、回折格子による  $-1$  次の回折光に相当する項である。議論を簡単にするため、参照光はホログラムに垂直に入射する平面波であるとする。こうすると、ホログラム上で  $u_r$  は定数であるから、この項は、物体光の振幅の複素共役  $u_o^*$  に比例することになる。これは図5の  $Obj^*$  の位置に、物体の実像が再生される。ただし、こうして再生された実像は前後関係が逆転した裏返しの像になっている。図6は、読み出しの参照光として書き込みの参照光と逆向きに進む平面波を用い、ホログラムを裏から照明した場合の再生の様子を図示したものである。元々物体があった位置に実像が形成される。これを位相共役読み出しという。

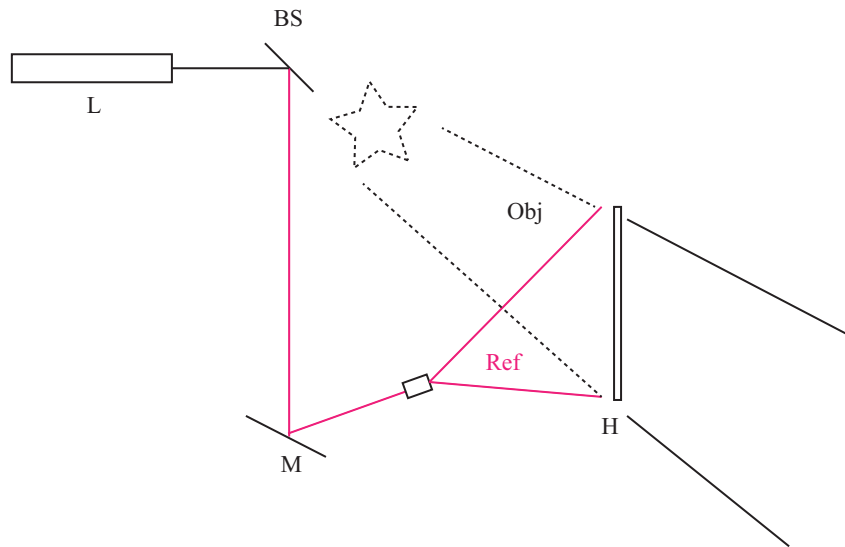


図4 ホログラムの再生

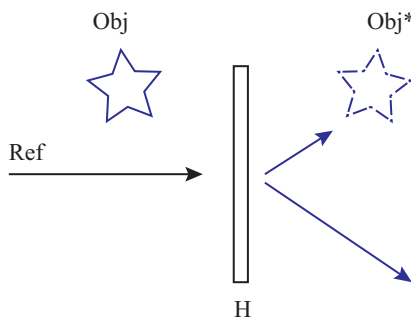


図5 実像再生

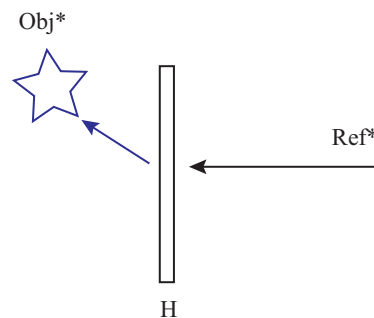


図6 ホログラムの位相共役読み出しによる実像再生

### 3 いろいろなホログラフィー

ホログラフィーはいろいろな観点から分類されるので、それを概観しよう。

#### 3.1 In line 型と Off axis 型

Gabor の最初の論文では、図 7 のように参照光と物体光を平行にホログラムに入射させた。この場合、物体としては光を通す透明物体を用いた。これを In line 型ホログラムとよぶ。これに対し図 8 のように、物体光と参照光が有限の角度で交差する配置を Off axis 型とよぶ。In line 型では、物体光と参照光が重なってしまうから実際には観測が難しい。Off axis 型はこの欠点を解決したものである。なぜ In line 型が用いられたかという、当時レーザーが存在せず、通常の光源を用いていたため干渉性が低く、Off axis 型では干渉縞が形成されなかったからである。レーザーが発明されて初めて Off axis 型でも干渉縞が形成されホログラムが記録できるようになった。

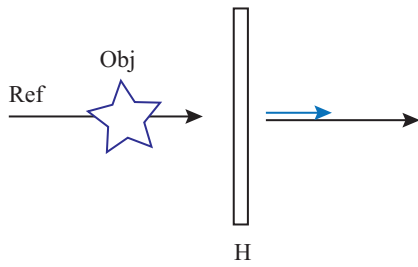


図7 In line型ホログラム

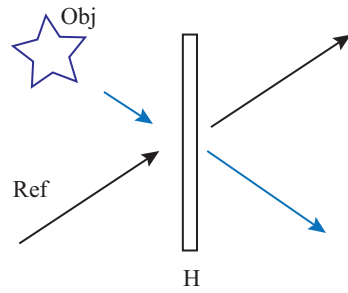


図8 Off axis型ホログラム

### 3.2 記録光学系による分類

図3のように、物体で反射され回折(フレネル回折)された光を物体光とするホログラムをフレネルホログラムという。

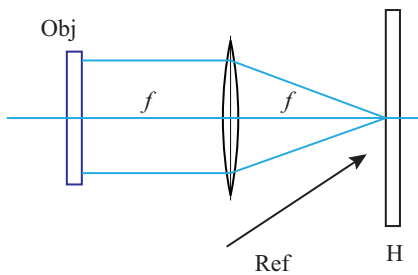


図9 フーリエ変換ホログラム

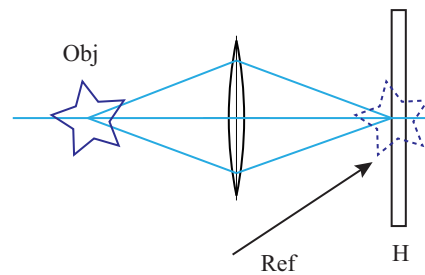


図10 イメージホログラム

## 4 白色光再生ホログラフィー

太陽やランプからの自然光(白色光)はレーザーと比べると、スペクトルが広く、点光源でもない。ホログラムは格子による光の回折を利用するので、波長が違ったり、光線の方向が違えば、回折波の方向が変わり、像は元の物体と異なる位置に異なる大きさで再生されることになる。自然光で再生するとこのようにずれた像が重なるので、像はぼける。レーザーを使わずに自然光でホログラムを再生するためには、このぼけを最小限に抑える工夫が必要になる。白色光で再生できるホログラムにはイメージホログラム、リップマンホログラム、レインボーホログラムがある。

### 4.1 イメージホログラム

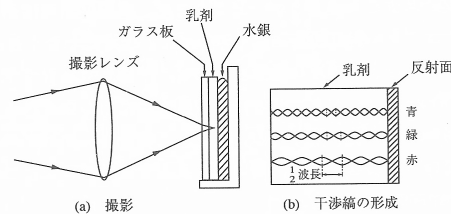
イメージホログラムは、ホログラム面上に物体の像を結び、その像と参照光が作る干渉縞を記録する方法である。ホログラム面上に像があるので、回折波の方向が変化しても像は変化しない。しかし、奥行きのある立体を記録すると、像がホログラム面から前後に飛び出さざるを得ないので、ぼけが生じる。イメージホログラムを撮るには次のような方法がある。

1. レンズを使って、ホログラム上に実像を形成する。
2. 一度マスターホログラムを製作する。これを実像再生し、これに第2のホログラムを重ね、記録する。
3. 物体をホログラムに密着させる。

## 4.2 リップマンホログラム

リップマンホログラム (Lippmann hologram) は物体波と参照波を記録媒体の表裏2面から対向入射させる反射型のホログラムで、上記イメージホログラムの製法2または3に当たる。大事なことは、ホログラムに厚みのある記録媒体を使うことである。これを体積型ホログラムといい、薄い記録材料を用いた平面型ホログラムと区別される。

マスターホログラムから実像を再生し、像を重ねてリップマンホログラムを置く (図 11)。ホログラムの裏から参照光を照明すると共役光と干渉して、干渉縞を形成する。干渉縞は記録媒体に層状に記録されるから、干渉フィルターと似た働きをし、ある特定の波長域にある光だけを選択的に反射するようになる。この分光作用のため、物体が前後に飛び出ても、ある程度ぼけが軽減され、奥行きのある立体を再生できる。



○ 図 3.4 リップマンの天然色写真

図 11 リップマンホログラム

体積型ホログラムでは、複数の物体を多重に記録し、参照光の当て方によって選択的に1枚を選び出して再生することができる。この性質を用い、例えば、動物の外観と骨格模型を多重記録し、視点を変えて、再生像を切り替えられるディスプレイが作れる。

## 4.3 レインボーホログラム

レインボーホログラムでは、記録時に水平のスリットを使い、重要でない縦方向の視差を犠牲にして白色再生を可能にする。

はじめに、記録したい物体のマスターホログラムを作成する。次にこのマスターホログラムを実像再生するが、ホログラムに細いスリットを重ね、開口部を通過する光だけで再生する (図 12)。この再生像をホログラムとして記録すればレインボーホログラムの出来上がる。このとき、干渉縞が水平に形成されるように参照光を照射する。レインボーホログラムを実像再生すると、マスターホログラムの位置にスリット開口部の像が形成される (図 12)。このスリットを通して、物体の像を見ることができる。白色光を使って再生すると、波長によってスリットの像の位置が変わるので、これが分光器の役割を果たす。スリットの像の位置に眼を持っていけば、単色のぼけのない像を見ることができる。

この方法では、左右には視差があるが (眼を左右に移動すると、隠れて見えなかった部分が見える)、上下

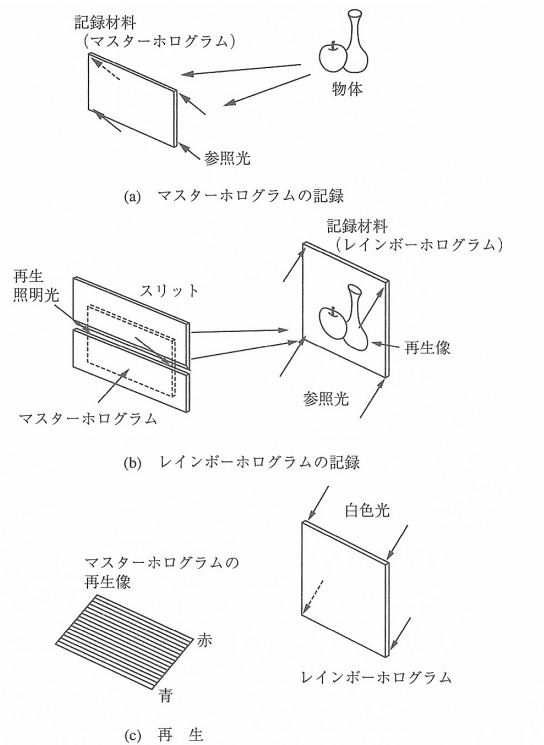


図 12 レインボーホログラムの再生。白色光で再生すると、スリットの開口部がスペクトルの順に上下にずれて形成される。

にはこの様な効果はない。事実、上下に眼を移動すると、虹のように色が変化します。これがレインボーホログラムと呼ばれる所以である。

#### 4.4 ホログラフィックステレオグラムとマルチプレックスホログラム

普通のカメラで、視点を変えて3次元物体の平面画像を多数撮る。この1コマ1コマを原画像として、縦に細長いホログラムを記録するが、ホログラム面上の各コマの位置を、原物体を撮った視点の位置に合わせる。これを、レーザーで再生すれば、両眼に視差の異なる画像が再生され、通常のステレオグラムと同じ原理で、立体画像が見える。

ホログラフィックステレオグラムは、再生にレーザーを必要とするが、白色再生するために、これをマスターホログラムとしてレインボーホログラムに仕上げる。ホログラムを円筒状に丸め、円筒を回転することにより、360度の視野を実現できる。また、ゆっくりした動きであれば、動画像を立体再生することも可能である。これはマルチプレックスホログラムと呼ばれている。

#### 4.5 グレーティングイメージ

デジタル画像のように、画像をちょっと粗めのピクセルの組み合わせで表現する。それぞれのピクセルを微小な回折格子で置き換えたものがグレーティングイメージである。一つ一つの回折格子の、ピッチや格子の方向を変えることにより、回折で色付いた画像を表示できる。照明の仕方や視点を変えると、異なる回折光が

眼に入るので、画像が微妙に変化する。厳密には、これはホログラムではないが、光の回折を利用するため、見たときの印象がホログラフィとよく似ている。このため、ホログラフィと同列に扱われている。

## 4.6 カラーホログラム

リップマンホログラムやレインボーホログラムには分光作用があるから、再生像の色はホログラム製作に用いたレーザー光の色に一致する。したがって、3原色のレーザー光を用いてホログラムを製作し、重ねて再生すれば、物体の色を再現できる。またリップマンホログラムでは、ホログラムを膨張収縮すれば、色を変えることができる。レインボーホログラムでは、単に観察位置を変えるだけで色が変わる。このような性質を利用し、一台のレーザーで、カラー化する試みもある。