

# 情報化社会における映像の役割（Ⅲ）

— ホログラフィー —

藤 井 英 子

### **The Role of Images on the Information Society (III) Holography ———**

The role of photographic images contained densely informations on the information society has been regarded as of major importance nowadays. Photographic images, however, have showed basically only the amplitude of light relate the informations on light and dark of the object, and the images are two dimensional.

On the other hand, holography is the photographic technique based on the new principle, and it is able to reproduce three dimensional image of the object. Because of, holography record not only amplitude but also phase of the light reflected from the object, and the phase gives the information on the position of the object.

On the mechanism of holography, hologram is the photographic plate recorded the diffraction image of the object as interference fringes, and this interference fringes can be observed as three dimensional image of the object by illumination with light. In general, camera with lense dose not need for making hologram.

The progress of holography depended on the development of layser which have the character as superior coherent light. Layser is essential for the preparation of hologram, but the images recorded in holograms are able to observe by illumination with layser or usual white light according to the specification of holographic system.

There are some different type of holography, and they are classified according to different specifications on the recording method and on the quality of illuminant light for image reproducing. The holography reproduced three dimensional color images from the holograms by illumination with usual incandescent light are named white light holography.

Utilization of white light holography system is rapidly extending in the field of commercial and artistical actions. Recently, practical use of holography as a new imaging media is widely proceeding in the field of science, technology and social culture.

On this report, the mechanism and function of layser and holography were described from the historical and technical standpoint, and also the present and future in holography was reviewed as a new imaging media.

## 1. まえがき

前報では、ハロゲン化銀を感光媒体とする写真画像について、感光理論、画像形成プロセス及び画像の特性を述べた。さらに写真画像の評価と写真画像のもつ情報量についても論じた。そのなかで述べたように、写真画像の質的向上と画像形成時間の著しい短縮とあいまって、情報量の飛躍的増大を可能にした。このことは科学的にも文化的にも、政治や経済の分野までも情報化社会の進歩に大きな貢献をもたらした。

しかし従来の写真画像は、原理的に被写体の光強度の分布状態をある一断面的に記録するに過ぎない、言い換えると、物体の明暗情報に関係する光の振幅を記録するだけの二次元情報に過ぎない。また写真像はレンズを通して結像させる暗箱（カメラ）を用いてのみ被写体像を記録できる。これに対して、レーザー光を用いて被写体の回折像を干渉縞として写真乾板上に記録し、現像後この干渉縞を照明して元の被写体像を三次元的に再生する写真術、すなわちホログラフィーが発明され、その技術が確立されてから新しい画像応用分野が開拓された。このホログラフィー写真術は、従来の写真術とは原理的に全く異なる。即ち、ホログラフィーは被写体からの光の振幅のみでなく位相をも記録できる。位相は被写体の位置を表わす情報をもっているから、ホログラフィーは被写体の複素振幅分布を奥行きも含めて三次元的に記録することができる。従ってホログラフィーの撮影にはカメラレンズを必要としない。

ホログラフィーは今や新しい画像応用分野としてコンピューターの大容量メモリーの開発や芸術的三次元カラー画像のディスプレイなど情報化社会の新しいメディアとしての実用化が進んでいる。そこで本報ではホログラフィーを中心に新画像情報の現状と将来を展望する。

## 2. ホログラフィー

### 2.1. ホログラフィーの歴史

ホログラフィー (holography) は、ハンガリー生れの物理学者 D. Gabor が1948年英国で考案した一種の写真技術である<sup>1)</sup>。当時彼は電子顕微鏡の分解能を向上させる目的で、電子レンズの不完全さによる像の劣化を補償する方法を提案した。即ち、ブラッグの回折顕微鏡の方法から物体の像をそのまま記録するのでなく、物体の光の乱れを干渉縞にして記録する方法である。彼はこの方法を物体からの光の状態をすべて記録できるという意味でギリシャ語の“holos (完全な)”と“gram (記録したもの)”を合わせて“hologram (ホログラム)”と名付けた。またこのようにして記録・再生する技術を写真技術との関連から“holography”と呼んだ。

この方法によると、レンズが無くても結像でき、しかも電子線やX線などの波長の短い放射線でホログラムを撮り、それを可視光で再生して見ると拡大像が得られることからX線顕微鏡の実現につながる技術として大きな期待がもたれた。しかし当時は理論的根拠となった位相のそろった干渉像を得るための光源がなく、せいぜい水銀灯の光ぐらいでは再生のとき二重像が現れるなど数々の欠点があり良質の像が得られなかったが、改良に多くの努力が続けられていった。

1960年に T. H. Maiman<sup>2)</sup> によるルビーレーザーの開発、引続いて干渉性のすぐれたガスレーザーの実用化、で欠点の一つであった光源の問題が解決した。さらに1962年 E. N. Leith と J. Upatnieks<sup>3)</sup> が今一つの欠点であった再生像の二重像を分離する方法と、被写体が不透明物体でも記録・再生できる方法を発見した。続いて翌63年両者は光源に He-Ne レーザーを使ってすぐれた像を得た<sup>4)</sup>。これをきっかけにして、原理的には正しいが実用にはならない技術とされたホログラフィーが基礎理論の確立と

ともに新しい応用技術の開発へと目ざましい発展を遂げた。

ホログラフィーは新しい光源としてその用途開拓を探索していたレーザーの最適応用分野となり、光学関係のみでなくエレクトロニクス工学分野の技術者にとっても極めて興味深い研究対象となり、関連分野の技術開発がその成果を競うに至った。ホログラフィーも白色ホログラフィーに続いてマルチプレックスホログラフィーへと発展してホログラフィックディスプレイが実用期に入り、さらにホログラムのコピーの普及化も進んで印刷メディアとして利用される時期を迎えた。最近ではホログラフィーの応用分野が大体定まって、実用化技術の質的向上に精力が向けられている<sup>5)</sup>。最初に記した D.Gabor にはホログラフィーの発明の功績に対して1971年度ノーベル物理学賞が授与された。

## 2.2. レーザー光の原理と特徴

先に述べたように、原理的には正しいが、絶対実用にならない技術、といわれたホログラフィーが三次元画像ディスプレイとして実用化されたのは、新しい光源としてレーザー光が開発され、その特性を利用したからである。従ってまずレーザー光についての概要を把握しておくことがホログラフィーを理解する前提となる。

レーザー (LASER) とは Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (放射の誘導放射による光の増幅) という英語の頭文字を並べてつくられた語で、原子や分子の基本的性質を利用して光の増幅と発振を行うことである。

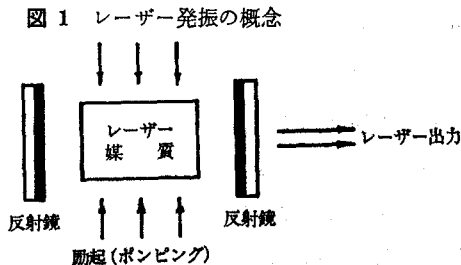


図 2 原子エネルギー準位

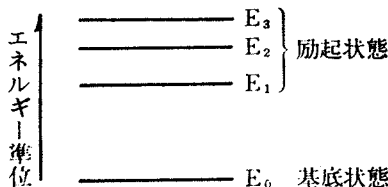
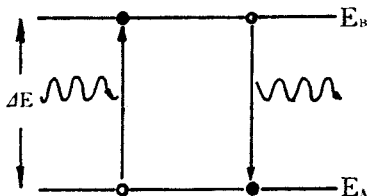


図 3 光の吸収と放射



レーザー光の発振は図 1 にその概念図を示すように、2 枚の反射鏡でできた共振器の中にレーザー媒質をおき、この媒質内の原子や分子を外部から与えるエネルギーで励起すると、その原子や分子のスペクトル線の周波数（振動数）でレーザー発振が起こる。

原子（分子）は図 2 に示すように、個々の原子に固有のエネルギー準位をもち、原子がそれらの状態の間を移動するとき光が放射されたり吸収されたりする。即ち図 3 で、エネルギー  $E_B$  の励起状態にある原子が低いエネルギー  $E_A$  の状態に遷移するときは両者のエネルギー差 ( $\Delta E$ ) に等しいエネルギー（振動数）をもつ光を放射する。逆に同じ振動数の光を吸収した原子のエネルギー準位は  $E_A$  から  $E_B$  に励起される。このとき、 $\Delta E$  は次式で表わされる。 $\Delta E = h\nu = hc/\lambda$  ここに、 $h$ ; プランクの常数 ( $6.6 \times 10^{-27}$  erg·sec),  $c$ ; 真空中の光の速度,  $\nu$ ; 光の振動数,  $\lambda$ ; 光の波長。

1917年、A. Einstein は高いエネルギー準位  $E_B$  にある原子がひとりで光を放射するだけでなく、それとほぼ同じ振動数の光が外から入射したときそれに共鳴して同じ振動数の光を出すことを発見した。このさい、励起された原子がひとりで光を出すことを自然放射 (natural radiation), 外部からの光に刺戟されて光を出すことを誘導放射 (induced radiation) という。通常、光の振動数の範囲内では自然放射が支配的である。レーザーはこの誘導放射を利用した光の発振器や増幅器であるが、1960年にレーザー発振実験が最初に成功するまでは一般にレーザーの実現は原理的に不可能であると考えられていた。その理由は、熱力学的平衡の理論からすべての

物質は外部からの光を吸収し、これが誘導放射を打ち消す作用をすることになり誘導放射より吸収の方が必ず強くなるからである。従ってレーザーを発振させるためにはレーザー媒質を熱力学的平衡でない状態にする必要があった。

原子や分子はそれぞれ定まった数多くのエネルギー単位をもっているが、熱平衡状態にある物質では、原子はできるだけエネルギーの低い状態に集まろうとするボルツマンの分布則に従って、エネルギーが最低の状態にある場合原子数が最大で、エネルギーが高くなるほど原子数は減少する(図4)。このような状態分布の原子群に光が入射すると誘導放射より吸収の方が多く起こるので入射光は弱められる。しかし放電管内のプラズマや強力な光放射をうけた物質では熱力学的平衡が破れて低エネルギー単位の原子が励起されて高エネルギー単位の原子数が低エネルギー単位の原子数より多くなる状態ができる。この状態を負温度の状態または反転分布状態

図4 熱平衡状態

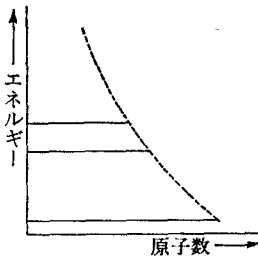


図5 反転分布状態

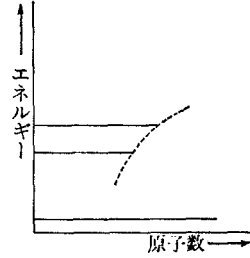
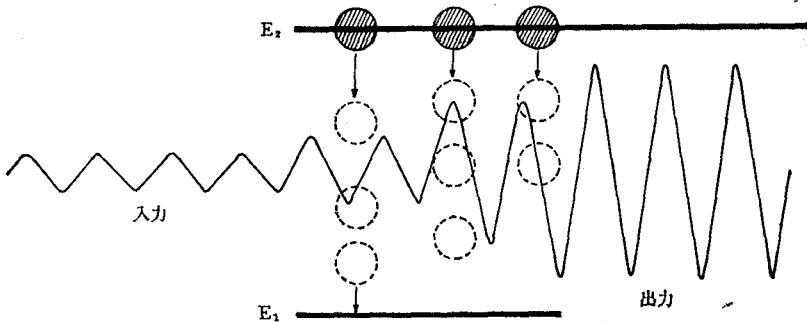


図6 反転分布における光の増幅作用



(図5)という。反転分布状態では誘導放射が吸収よりも盛んに起こり、通常の物質が光を吸収するのとちょうど反対の過程、即ち、弱い光を入射すると強い光が出るという光の増幅作用が起こる(図6)。これがレーザー作用である。

レーザー媒質のなかの原子が外部からエネルギーを与えられ高い準位に励起されて(これをポンピングとよぶ)反転分布状態になっていると、はじめに自然放射された光が鏡で反射されてレーザー媒質を通りぬけるときに増幅され、次の反対側の鏡で反射されてレーザー媒質で増幅される。この過程を繰り返すと光は $10^4 \sim 10^9$ 倍にも強められる。しかし光を増幅したレーザー媒質内の励起原子数は次第に減少してくる、そこで光の強さがある限界点でつり合い、一定の振幅をもつ定常的な光の振動を維持するようになる、これがレーザー発振である。ポンピングの仕方はレーザー発振器の種類(後述)によって異なり、ガスレーザーでは放電管内に発生したプラズマ中で加速された自由電子が原子と衝突して励起準位にあげる、このとき電子のもつ運動エネルギーが原子の内部に移る。固体レーザーでは、エネルギー準位差に相当する周波数を含む光を照射する方法で、光ポンピングとよばれる。半導体レーザーでは半導体の  $p-n$  接合に直流電流を流し、少数キャリアを多量に注入して上位レベルの数を増すもので、電流ポンピングともよばれる。化学レーザーでは化学反応を起こすときに反転分布を実現させる。いずれの場合でも、反転分布を達成し得るためには上位レベルの寿命が比較的長く、下位レベルは短いような場合で物質固有の性質を利用することになる。こうして、2枚の反射鏡の間にレーザー発振が起こったとき、一方の鏡の構造を、たとえば誘電体の多層薄膜をもつ反射鏡にして、ある程度の光を透過できる(透過率約1%)ようにしておけばレーザー光を外部にとり出すことができる。

さて、とり出されたレーザー光は、通常の光源から放射される光と比べると著しくきわだった特徴をそなえている、言いかえると今まで求め得べくして求め得なかった理想的な光であると言える。その特徴を通常の光と



比較して概説する。

通常の白熱灯や放電灯から発する光は自然放射光で原子からの不規則な発光の集合体であり、波長は紫外から赤外まで可視域を含んで分布している。また光源から空間の全方向に拡散して行く。このことは、光が波長の短い電磁波であることは周知でありながら波動光学的に光の干渉や回折を実際に観察することの困難な原因となっていた。これに対してレーザー光は発光機構が理論的に構成され制御された光波である。レーザー光は一点から1波長(単波長)しか放射しない、発振波長は装置によって紫外から赤外域まで選ぶことができる、極めて規則正しい正弦波形をもつ光波である。このような光波は非常に干渉しやすく、物理学的にコヒーレント光とよばれる。レーザー光のコヒーレンシ (coherency) には2つの機能がある。その1つは、単色性にすぐれ非常に周波数幅の狭い光である(時間的コヒーレンス)。最良の低圧ガスランプの単一スペクトル線の光でも普通  $10^8$  MHz の周波数バンドに広がっているが、ガスレーザー光では 1 MHz 以内の幅に抑えられる。次は、レーザー光は平行度の高い指向性にすぐれた光束が得られ、遠方までほとんど拡散することなく伝播される(空間的コヒーレンス)。

通常光から空間的コヒーレントな光波を得るためには極めて小さなピンホールを用い(図7(a)) また時間的コヒーレントな光波を得るためには色

図 7(a) 通常光から空間的コヒーレントな光を得る

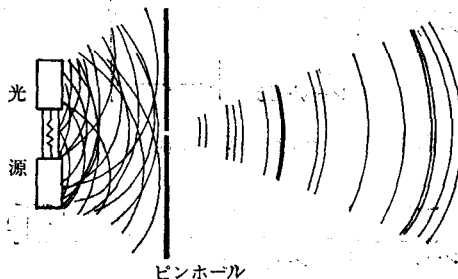


図 7 (b) 通常光から時間的コヒーレントな光を得る



(波長選別) フィルターを用いる (図 7 (b)) ことができるが、ピンホールやフィルターで光源からの出力のほとんどが吸収され極くわずかのエネルギーしかとり出せない。このように、コヒーレントなレーザー光はそのビームの断面にわたって波の位相がそろい鋭い指向性をもっているから、レンズ (望遠鏡を逆にした) 系で極めて小さい面積に集光できる (図 8 (a))。図で放射レーザー光の直径を  $D$ 、レーザー光の波長を  $\lambda$ 、レンズの焦点距離を  $f$  とすると、集光スポットの直径、 $d$  は次式(1)で表わされる。

$$d = 2.44 f \lambda / D \dots \dots \dots (1)$$

一例として、波長 600 nm、直径 5 mm のレーザービームを焦点距離 100 mm のレンズで集光すると、スポットの径は約  $2.9 \mu\text{m}$  となる。また集光点におけるエネルギー密度は発振出力に対して

図 8 (a) レーザーの集束

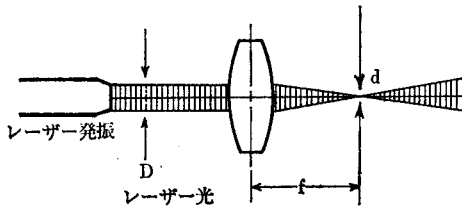
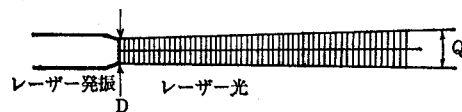


図 8 (b) レーザー光のすぐれた指向性



$$D^2 / (2.44 f \lambda / D)^2 \dots\dots\dots(2)$$

倍となる。即ち前の例を用い、レーザー光の発振出力を比較的弱い 1 mW とすると、集光点の出力は約 133 W/cm<sup>2</sup> となる。太陽光の地表面におけるエネルギー密度の約 0.1 W/cm<sup>2</sup> と比較するといかに大きい値かわかる。また、レーザー光の鋭い指向性はビームの拡散を防ぐ、図 8 (b) でビームの次第に広がる角度を  $\theta$  とすると、 $\theta$  は次式で表わされる。ここに

$$\theta \approx \lambda / D \dots\dots\dots(3)$$

$D$  はビームの直径である。例えば図 8 (a) の発振器の場合  $\theta \approx 1.2 \times 10^{-4}$  ラジアンとなる。従ってレーザービームが 100 m 飛んだとしても直径は 1.2 cm にしか広がらない。

さらにレーザー光は空間的に一点に集束できるだけでなく、Qスイッチ技術を用いて時間的にも集束できる。即ち、Qスイッチレーザーにおいて、反射鏡の反射率を極端に低くしてポンピングを開始すると、反射効率が悪いために通常のレーザー発振に比べて桁違いに大きい逆転分布が共振器内に発生する。この時点で急激に反射率を高めると、自然放射で発生した光は極端に大きい逆転分布の中を進行するので高エネルギー状態の原子と会合する確率が極めて大きくなり、急激に増幅されて原子のエネルギーとして蓄積した高エネルギーを一気に光として放射する。レーザー発振が起こると、高エネルギー状態の原子数は急激に減少して光にエネルギーの供給ができずレーザー発振は停止する。かくしてQスイッチレーザーでは原子に蓄積された高エネルギーが一瞬に放射される巨大な単発の光パルスが発生する。Qスイッチ発振の過程は数  $n$  sec ( $10^{-9}$  秒) の間に終了するが、光が反射鏡の間を往復して存在している時間(残響時間)が  $10^{-8}$  s 程度あるから巨大パルス (giant pulse) の時間幅は数十  $n$  sec 位で、このときに放射される尖頭の出力は数十 MW ( $10^6$  W) に達する。パルス発振については、レーザー光はモード\* 同期技術を用いてさらに短い時間、1 p sec ( $10^{-12}$  sec) の光パルスもつくれる。例えば、He-Ne レーザーでは  $6 \times 10^{-10}$  sec、ルビー・レーザーでは  $1.2 \times 10^{-11}$  sec のパルスがつくれる。

光の速度は  $3 \times 10^8$  m/sec であるが  $1 \mu\text{sec}$  では  $0.3$  mm しか進まない。いまひとつ、集束されたレーザー光の中の光電界は極めて強力であるから、通常の光では起こらない各種の非線形光学効果（光が弱いときは物質の光吸収は光の強さに比例するが、光が強力になると比例しなくなる現象）が起こる。この効果を利用すると、入射光の周波数を2, 3倍にして波長が  $1/2$  や  $1/3$  の短波長の光を発生したり、2つの入射光からの和の周波数や差の周波数を発生させることができる。

\* モードには横モード（共振器で鏡面上におけるレーザー特有のモードパターンおよびビームの太さ）と縦モード（共振器内部におけるモード分布、発振周波数スペクトル）とがある。

このように数々の特徴をもつレーザー光は、電波と考えるときはその周波数がマイクロ波の  $10^4$  倍以上もあるすぐれた波であり、また光の一種と考えると干渉性のよい、単色でかつ強力な極めて良質な光源と見なされる。この特徴が光学あるいは電波の分野で長年培われてきた技術を飛躍的に発展させ、また両技術の融合を可能にした新分野の技術開発に貢献してきた。その結果、地理的測量、科学及び工業計測、金属等加工、化学機器分析、映像ディスプレイ、光通信、さらに核融合装置へと多様な応用技術が開発され、実用化が進んでいる。

### 2.3. レーザーの種類と発振装置

T. H. Maiman が微量のクロムイオンを含むピンクルビーの単結晶を用いて、 $694.3$  nm の赤色パルスレーザー光の発振に成功したのは1960年6月であった。同じく12月、A. Javan らは He-Ne 混合気体を用いて波長  $1.15 \mu\text{m}$  など6本のスペクトル線で連続発振に成功し、本格的なレーザー光が生れた。61年Qスイッチ法の開発によって大出力の尖頭パワー光パルスが作られるなどレーザー光発振に関する理論や実験が前進し、62年の半導体レーザー発振の成功、63年レーザー光によるホログラフィー実験、64年炭酸ガスレーザー発振の報告、66年有機色素溶液を用いる色素レーザーの発振の成功とめざましい速さで開発が進められた。これにともなって、

表 1 レーザーの分類及び主なレーザーの種類と特徴など

分類	材料	ポンピング	種類	発振波長 ( $\mu\text{m}$ )	特徴	主な用途
ガスレーザー	原子、分子イオンの単一または混合気体	気体放電 電子ビーム 吸収	He-Ne	0.6328 1.15, 3.39	単色性が極めてよい小型、 取扱いやすい	ホログラフイー、計測、フ ァクシミリイー、光ディスク
			Ar	0.488, 0.5145 など約6本	波長安定性が高い。比較的 高出力、発振波が青～赤	ラマン分光計、プリンター、 ホログラフイー、医療
			CO <sub>2</sub>	10.6	高効率、大出力、遠赤外発 振、指向性がよい	レーザーメス、表面処理、 核融合
固体レーザー	イオンを含む 結晶 ガラスのよう な透明物質	光照射	ルビー	0.694	パルス発振、高出力	ホログラフイー、コアギユ レーター、ダイヤ加工
			ガラス	1.06	超高出力、単一パルス	ウエルダ、核融合
			YAG	1.06	高出力、連続またはパルス 発振	レーザーメス、IC加工
半導体レーザー	半導体	電力注入	Ga・Asなど	0.88~1.5	小型、コンパクト、連続ま たはパルス、直接変調、小 出力	ケーブル通信、光ディスク、 メモリ
化学レーザー	気体	化学反応	HF		小型、高出力	
色素レーザー	有機色素など	光照射	ローグミン6G 溶液など	波長可変	波長を連続的に変えること ができる	

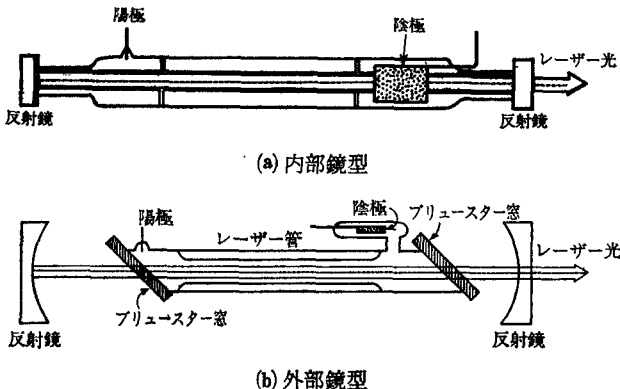
共振器の一方の鏡を回折格子にして発振させ波長を連続的に変化させる手法の確立，色素レーザーの連続発振の成功，レーザー光増幅器の発明と大出力パルスレーザーの実現など周辺技術の開発が一層の発展をもたらした。1970年代に花開いたレーザー技術はその後いろいろな思想と技術を吸収してますます大きく成長している。

現在，各方面に利用されている多種類のレーザーのうち，本報の主題であるホログラフィーへの利用を中心に，比較的良好に用いられるレーザーの概要を述べる。

まず，表1にレーザーの種類と代表例，それに主な特徴，発振波長，主用途などを一覧表で示す。

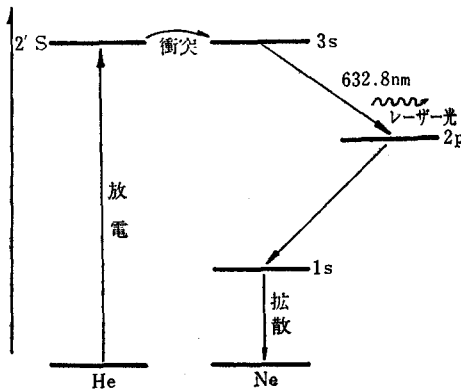
① ヘリウム-ネオン (He-Ne) レーザー——He と Ne の混合ガスを用いたこのレーザーは気体レーザーの中で最も歴史が古く，代表的なレーザーで，研究しつくされ，信頼性の高い製品が開発され，安価に入手できる。発振波長が可視域で，使用分野も広い。図9に発振装置の構成を示す。装置はレーザー発振をする気体を封入したレーザー管，反射鏡，放電用電極，などから構成される。図で(a)は反射鏡がレーザー管の両端に直接取り付けられ，封入した気体に直接に接している形式（内部鏡型という）で，(b)は反射鏡がレーザー管と別に設置されている形式（外部鏡型とい

図9 ヘリウム-ネオン (He-Ne) レーザー発振器の構成



う)で、レーザー管の両端のガラス窓は管軸に対してプリュースター角とよばれる角度で斜に取り付けられている。これによって紙面に垂直な面内で振動する光は反射され、紙面内で振動する光のみ過程する。(a)の場合はレーザー光の振動方向は反射鏡の異方性で決まり、モードごとに振動方向が異なる。反射鏡には、光学研磨した平面または凹面のガラス板に誘電体の多層膜を真空蒸着し、反射率を97~100%にしたものを用いる。レーザー管は熔融石英または硬質ガラス製で、長さは10cmから2m位までである。管中にはHeガス1mm, Neガス0.2mm程度封入されている。He-Neのエネルギー準位とレーザー光発振を図10に示す。レーザー管に数kVの直流電圧をかけ、気体放電を行うと、放電によって生じた電子が多く封入されているHe原子にまず衝突し、多数のHe原子を高エネルギー準位(2's)状態に励起する。この励起He原子は次にNeの原子と衝突し、Ne原子を高エネルギー準位(3s)に励起する。3s状態は寿命が長く(10<sup>-7</sup>sec)、寿命の短い(10<sup>-8</sup>sec)2p状態との間で逆転分布が生ずる。はじめ自然放射によって発生した光が反射鏡で反射され、何度も逆転分布の中を往復して増幅され、ついに632.8nmの赤色レーザー光の連続発振が起こる。He-Neレーザーの出力はレーザー管の長さで決まり、10μWから100mW程度である。発振波長はこの他に、1.15μmと3.39μmの波長

図10 HeとNeのエネルギー準位



でも発振させることができる。

② イオンレーザー——Ar, Kr, Ne, などの希ガスのイオンを用いたレーザーで、主に可視光域から紫外域にかけて、1 W 程度の高出力で連続発振する。このうち実用化が進んでいるのはアルゴン (Ar) イオンレーザーである。発振波長は青から緑の範囲で6本くらいあり、赤色波長で発振する He-Ne レーザーなどと組合せて、ホログラフィーやディスプレイの色画像の三原色に利用される。イオンレーザーでは一度イオン化したものをさらに励起するので数A以上の大電流を流して動作させる (He-Ne レーザーでは数十 mA でよい)。

③ 炭酸ガスレーザー——炭酸ガス分子の振動エネルギーを利用したレーザーで、 $10.6\mu\text{m}$  近くの多数の波長で発振する。この発振波長の長いのが特徴、またレーザー発振に必要なプラズマを作るための供給電力の一部がレーザー出力に変換されるさいの変換効率が、He-Ne レーザーの0.02%程度に比べ、10~30%と著しく高く、数十 kW から数 MW と大出力のものが得られる。この変換効率を高める研究の成果として、現在は  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , He の3種の混合ガスが通常用いられる。Q スイッチ、その他工夫された機構の採用で、パルスレーザーの尖頭出力の増幅をはかり、セラミックの穴あけやスクライビングに用いられる。

④ ルビーレーザー——固体レーザーの代表として、世界で最初に発振したレーザーである。固体はガスに比べると単位容積内に比較にならないほど多くの分子が存在するからレーザー動作をさせると巨大な出力が得られるが、連続動作では発熱するのでパルス動作である。ルビーレーザー発振器の構成を図11に示す。レーザーの本体は三価クロムイオン ( $\text{Cr}^{3+}$ ) を約 0.05 w% 含む淡いピンク色の酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) の人造単結晶である。ルビーレーザーで実際にレーザー発振を行うのは  $\text{Cr}^{3+}$  である。このルビー内の  $\text{Cr}^{3+}$  レーザー発振機構を図12に示す。基底状態から光ポンピングによって幅広い吸収帯に能率よく励起される。このエネルギー帯に属するイオンは非放射遷移で右の幅の狭いレベルに転移するが、この励



図 11 ルビーレーザー発振器の構成

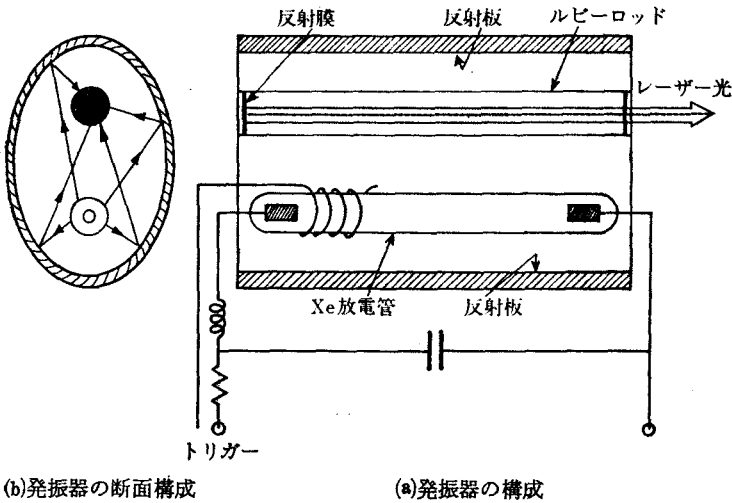
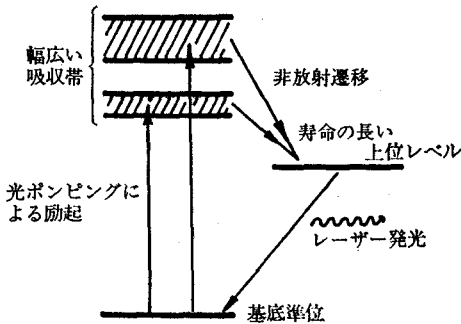
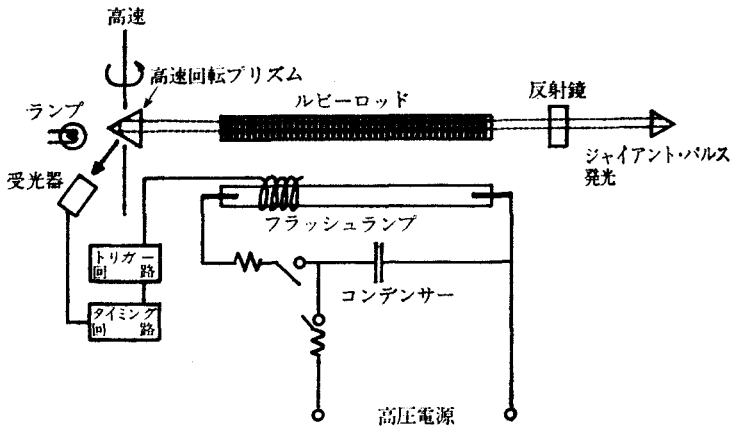


図 12 ルビーレーザー材料 ( $\text{Cr}^{3+}$ ) のレーザー発振動作



起状態の寿命は長く、基底状態との間に反転分布が達成され、レーザー発振を行う。ルビーレーザーは、しかし、三準位レーザーであるため、大きな反転分布を常時つくり出すような大きなポンピングを継続することが困難である。そこでキセノンフラッシュランプを1 m sec 位の発光時間で発光させ瞬間的にポンピングを行う。このためレーザー発振は連続的でなく、1~2 m sec の不規則パルスとなる。図11(a)の構成図で示す、ルビーの結晶は円筒状をしており、通常、直径は5~10 mm、長さ5~10 cmであ

図 13 回転プリズムQスイッチ方式のジャイアントパルスレーザーの構成



る。結晶の両端面は平行度が 20 秒以内、平面度が数 nm 程度に光学研磨されている。反射鏡は結晶の両端面に誘電体の多層膜を直接に蒸着して作られている。反射鏡はルビー本体とは別に両側に設けたものもある。ルビー本体とキセノン放電管をとりまく反射板は図11(b)にその断面を示すようにだ円形をなしており、本体と放電管がそれぞれ2つの焦点に位置してキセノンフラッシュ光が効率よく結晶体に集まるように工夫されている。このルビーレーザーは回転プリズムや可飽和色素\* によってQスイッチ動作をさせると、尖頭出力が数十 MW、継続時間が 30 n sec の単発のパルス光を発生する。この短時間、高出力発光が高速写真、高速度ホログラフイーや加工などに利用される。図13に回転プリズムQスイッチ方式を用いたジャイアントパルスレーザーの構成を示す。

\* たとえばクリプトシアノン色素(青色)を濃度  $10^{-4}$  mol 程度のアルコール溶液としてガラスセルに入れて用いる。ポンピングの初期には吸収によって発振を抑え、十分励起されたとき透明になってQスイッチの役目をする。その間隔は約  $1 \mu\text{sec}$  である。

⑤ ネオジウム-ヤグ (YAG) レーザー、及びネオジウム-ガラスレーザー——前者はイットリウム-アルミニウム-ガーネット ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) の単結晶にネオジウムの3価イオン( $\text{Nd}^{3+}$ )を添加したレーザーで発振は  $1.06 \mu\text{m}$  の赤外光。YAG レーザーは4準位レーザーであるため発振に必要な反転

分布が小さくてすむので、タングステンヨウ素ランプなどにより連続的にポンピングを行って、数十Wの出力で連続発振できる。また、YAG レーザーは出力側の反射鏡の内側に非線形結晶 ( $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ : 通称バナナ) を挿入し  $1.06\mu\text{m}$  の発振波長を  $0.53\mu\text{m}$  (緑色) に倍高調波に変調して用いる場合もある。後者はガラスに  $\text{Nd}^{3+}$  を添加したレーザーで、YAG と同様  $1.06\mu\text{m}$  の主としてパルス発振で使用する。このレーザーの特徴は結晶と異なり、ファイバー状の物まで作ることができ、その光学的均一性がすぐれている。

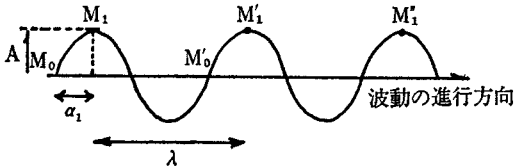
⑥ 半導体レーザー——固体レーザーの一種と考えられるが、他のレーザーが原子や分子のひとつひとつが持つエネルギー単位を利用しているのに対して、これは原子の集団がもつエネルギー単位を利用している点で異なる。即ち、半導体結晶は規則正しい形に並んだ多数の原子からなり、それらを全体として考えねばならないから、エネルギー単位は線よりも幅のあるバンドとして現われる。この半導体は電子と正孔の結合によって発振する。このレーザーは極めて小型、軽量にでき、チップで約  $0.5\text{mm}$  角、パッケージに収納した全体でも約  $20\text{mm}$  程度の大きさで、 $5\text{mW}$  以上の出力をもつものが開発されている。連続動作で長寿命をもつ。通信用として光線路の伝送損失の少ない長波長帯レーザー、あるいは光ディスクなどの普及形商品の光源として可視光領域を目指したものなどがある。

⑦ 色素レーザー——色素レーザーは水、アルコール、あるいはアセトンにローダミン系などの有機色素を溶かした液をレーザー媒質とする。レーザー発振には、色素の励起単位での放射寿命が数  $\text{n sec}$  ～十数  $\text{n sec}$  程度と短いので発光時間が数十  $\text{n sec}$  と長いQスイッチルビーレーザーを用いるなど強力なポンピングが必要である。一般に色素のエネルギー単位は極めて複雑で、これに対応して一つの色素でも多くの波長で発振が起こる。色素を適当に混合して希望する可視波長の発振を得ることもできる<sup>6)</sup>、また発振装置の反射鏡の一方側(完全反射側)を回折格子におきかえ、格子の回転で発振波長を連続的に変化させることもできる。

## 2.4. 光の干渉 (interference) と回折 (diffraction)

光は一種の電磁波であって、空間を波動として伝わることは、光が干渉や回折を示す現象を観測できる精密な実験の結果確認された。光の波は基本的には水中を拡がって行く波紋と同じ要素で考えることができる。いま、図14で示すように、波動を簡単な正弦振動とすると、同心円上の各点はすべて一ぱん高い  $M_1$  の状態にある。 $M_1$  は波動の1周期  $M_0 \sim M_0'$  のなかで原点  $M_0$  からの隔たり  $\alpha_1$  を用い、これを位相とよぶ。図で横軸は波動進行方向に相当するので位相は波動の進路の長さで測れる。

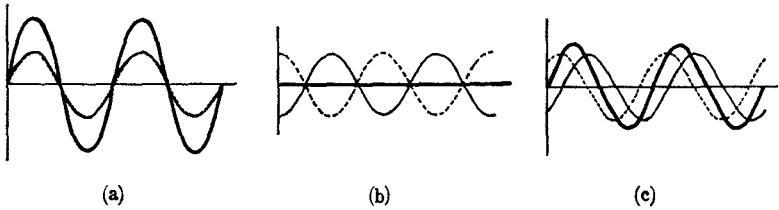
図 14 正弦振動



従って波紋は水面上で等しい位相をもつ点を連ねた一つの曲線と考えるとよく、これを波面とよぶ。波動は原点からすべての方向に一樣な速さで伝わるから、波動のエネルギーの進行方向は円形波面の半径の方向に相当し、どの進行方向も波面とは直角に交わる。光波でも同様で、光線の方に垂直に波面が生ずる。位相が  $\alpha_1$  の点は、1周期またはその整数倍だけ離れた点  $M_1'$ ,  $M_1''$  ……にもあり、これらの点では同じ性質の波動が得られる。即ち、水面には同じ位相にある波面が何本も同心円として見える。隣合った同じ位相の波面との間隔は波動の1周期分の進路の長さ、つまり1波長 ( $\lambda$ ) だけ離れている。また波動によって水面が持ち上げられる最大量  $A$  に相当するものを振幅といい、波動の作用の大きさを表わす重要な量である。振幅の自乗  $A^2$  は波動のエネルギー、光の場合にはその強さになる。

つぎに二つの同じ波長の光が同時に同じ空間を伝わる時、即ち互いに重なり合った場合を考える。図15において、同じ振幅をもつ実線で描いた光と破線で描いた光とが重なった場合の位相と振幅の変化の相互関係を示

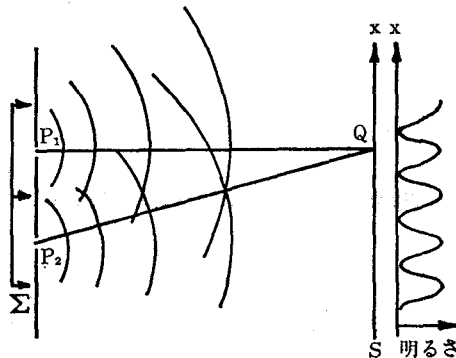
図 15 波面の合成



す。(a)は、両者の位相が重なったとき、即ち位相差  $\Delta=0$  のとき、合成された光（太線で描いた光）の振幅は両者の和になって光が強め合う。(b)は  $\Delta=\lambda/2$  のときで、振幅が互いに打ち消し合って0となり光としての作用がなくなる。(c)は、位相差が0と  $\lambda/2$  の中間にある場合で振幅は  $\Delta$  の値に応じて変化し、合成された光の強さは  $\Delta=0$  と  $\Delta=\lambda/2$  の間の値になる。このような現象を光の干渉という。

つぎに、2つの孔による干渉（ヤングの干渉）について簡単にのべる。図16において、2つの孔、 $P_1$  および  $P_2$  をもつ衝立に平面波  $\Sigma$  が当たった場合を考える。 $P_1$  および  $P_2$  から出る光はそれぞれの点が光源になったように、それぞれの点を中心とする球面波となってひろがって行き、スクリーン  $S$  上に到着する。その面上の一点  $Q$  をとって考えると、 $Q$  点における波動の位相は  $P_1$  からの光は  $P_1Q$ 、 $P_2$  からの光は  $P_2Q$  の長さによって決まるので2つの光の位相差  $\Delta$  は  $\Delta = \overline{P_1Q} - \overline{P_2Q}$  となり、 $\Delta$  が  $\lambda$  の整数倍に

図 16 ヤングの干渉(1)



なるところでは2つの光は同位相となるため互いに強め合って明るく、 $d$ が $\lambda/2$ の奇数倍となるところでは2つの光は弱め合い暗くなる。したがってQ点をS上で $x$ 方向に移動させると $d$ は $x$ に比例して変化するので、スクリーン上には黑白の等間隔の直線上の縞が生じる。これが干渉縞である。

日常われわれが目にする光は、既に述べた通り光源における原子エネルギーの低準位遷移による自然放射の結果である。この放射による光の波動は一種の減衰振動で、時間の経過とともに次第に衰弱して、ついに消える。この一つの波動の存在する時間  $dt$  は通常  $10^{-9} \sim 10^{-8}$  sec である。これを光の波連 ( $l_0$ ) という。光の速度  $C=3 \times 10^{10}$  cm/sec から、 $l_0=C \cdot dt=3 \sim 30$  cm の短い長さに過ぎない。光源は無数の原子が独立に勝手な時間に光を放出するから波連の位相は全くまちまちで、これらの光が重なれば一瞬干渉が起こっても波連のつづく  $dt$  時間内しか干渉縞は静止せず、次の瞬間には全く別の形の干渉縞に変わる。光の観察には長い時間の集積を必要とするから無数の異なった干渉縞が非常に速い速度で次々と表われて消えるのを平均して見ていることになり、結局干渉縞は見えない。しかし同じ光源から出た光を適当な方法で2つに分け、別々の路を通ったのち再びいっしょにすれば(図17)、たとえ波連は短くても2つの光路の長さの差がその波連の長さ  $l_0$  より短ければ、2つの光は同じ波連どうしで干渉するため、長い時間の平均をとっても干渉縞が見えるようになる。つまり同じ光源から出た光は干渉する光(前述したコヒーレント光)となる。

ここで再び2つの孔による干渉実験(ヤングの干渉)を考える。図18で、

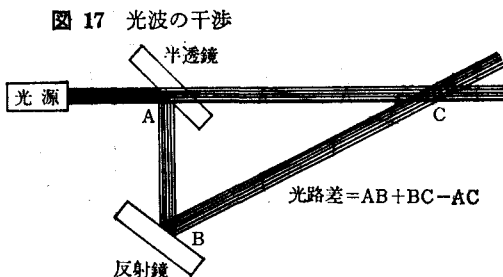
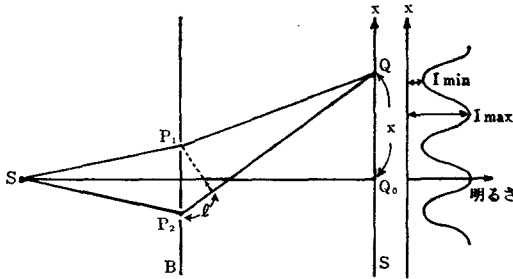


図 18 ヤングの干渉(2)



ついでにB上に2つの孔  $P_1$ ,  $P_2$  をあけ、これを単色の点光源Sで照明する。 $S_1$  から  $P_1$  および  $P_2$  までの距離が等しいとすると、 $P_1$ ,  $P_2$  には同一位相の光が到着する。 $P_1$  と  $P_2$  は新しい光源のように作用して同一位相の光を送り出すので、この面から適当に離れたついでにS上の点Qをとると  $l = \overline{QP_2} - \overline{QP_1}$  が2つの光の光路差となり、Q点が  $Q_0$  にあるときは  $l=0$  であるが、Qがついでに上を  $x$  だけ移動すると、 $l$  は  $x$  とともに増加し、S上にはほぼ等間隔直線状の縞ができる。しかしQが  $Q_0$  から遠ざかり  $x$  が大きくなると、干渉縞全体が暗くなると同時にコントラストもだんだん小さくなって、ついには干渉縞が生じなくなる。このような干渉縞のコントラストを、

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \dots\dots\dots(4)$$

と定義すると、 $V$  の大きさによって干渉縞のコントラスト、いいかえると干渉の起こる度合いを知ることができる。この干渉の度合いをコヒーレンスと呼ぶ。 $x$  が増加し、 $l$  が大きくなると  $V$  が低下し、 $l = l_0'$  のときついに  $V=0$  となる。この  $l_0'$  を可干渉距離といい、干渉縞が生ずるための最大光路差となる。この  $l_0'$  はまたその光の波連の長さ  $l_0$  にほぼ等しくなる。そこで、可干渉距離よりも光路差が小さければ、どのように波連が変化しても安定な定常波が生じ干渉が観察される。表2に示す種々の光源の可干渉距離から、レーザー光が干渉しやすいコヒーレント光であることがわかる。

表 2 種々の光源の可干渉距離

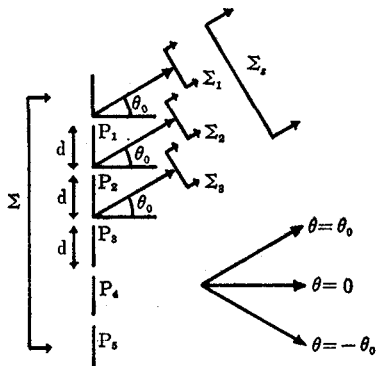
光源の種類	可干渉距離
白色光	1 μm
スペクトル光源	数cm~数10cm
気体レーザー	
シングルモード	3×10 <sup>7</sup> ~3×10 <sup>10</sup> cm
マルチモード	数10cm~数m
色素レーザー	数cm~数10cm(共振器の構成による)
固体レーザー	
シングルモード	3×10 <sup>4</sup> ~3×10 <sup>8</sup> cm
マルチモード	30~0.3cm

波動のもう一つの普遍的な性質は回折現象である。波動は細い隙間を通った後では次第に広がって行く。光の場合も同様な現象が起こる。この現象を図19で説明する。一定の小さい間隔  $d$  をおいて小さなすき間(スリット)  $P_1, P_2, \dots$  が多数並んでいる衝立を考え、これに平面波  $\Sigma$  が入射すると、それぞれのスリットへ入った光が射出するときには、前に述べたようにそれぞれのスリットを中心とする球面波となる。ここで  $P_1$  から出て入射光の進行方向と  $\theta_0$  の方向に射出する光を考えると、その光は  $\Sigma_1$  で表わされる小波面を生じ、同様に  $P_2, P_3, \dots$  から同じ方向の小波面  $\Sigma_2, \Sigma_3, \dots$  が射出する。今、もし次の関係式があるとする

$$d \sin \theta_0 = \lambda \dots\dots\dots(5)$$

と、 $\Sigma_2, \Sigma_3, \dots$  はそれぞれ1波長ずつ異なった同位相の小波面となるので

図 19 回折格子による回折

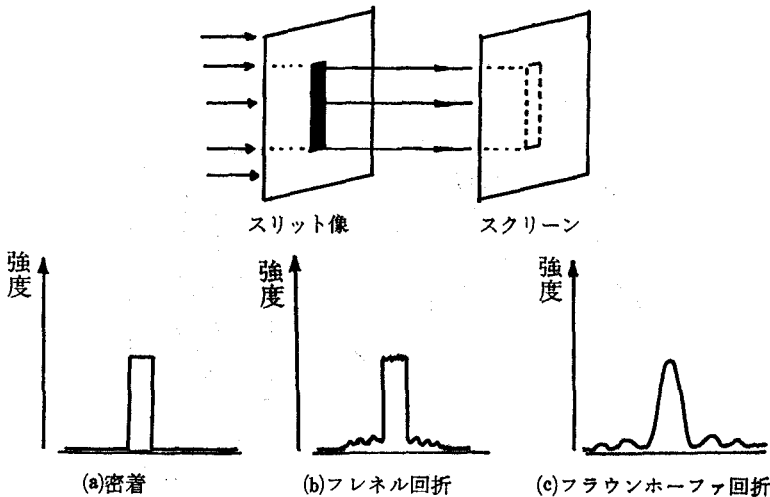




その波動としての性質は同じになり、 $\theta_0$  方向にはこれらの小波面が干渉して強め合い、一つの強力な射出波面  $\Sigma_0$  が形成される。 $\theta_0$  以外の方向については、それぞれの小波面は少しずつ異なった位相をもつので、これらが干渉する結果として生ずる光は  $\theta_0$  方向に比べて著しく弱く、ほとんど無視してもよくなる。これが光の回折と呼ばれる現象で、またこのような物体を回折格子 (diffraction grating) という。回折格子では  $\theta = \theta_0$  のほか、 $\theta = 0$ 、 $\theta = -\theta_0$  の角度でも同じように強い射出波面が得られ、 $\theta = 0$ 、 $\pm\theta_0$  の場合をそれぞれ 0 次、 $\pm 1$  次の回折光と呼んでいる。この角度は(5)式からわかるように、スリット間隔  $d$  と波長  $\lambda$  が決まれば自然に定まる。物体が回折格子のように、規則的ではなくても回折は起こる。この場合には、前に述べたような特定の方向に著しく強い回折光が出るのではなく、物体の構造に応じて種々の方向に種々の強さで回折光が得られるようになる。

いま、図20に示したように1つのスリットにコヒーレント光が入射した場合のスクリーン上の回折像のパターンとスリットからスクリーンまでの距離を考えると、図20(a)はスリットにスクリーンが密着した場合で、スリット像がそのまま生ずる。図20(b)は距離が比較的小さい場合で、像の周辺に

図 20 フレネル回折とフラウンホーファ回折



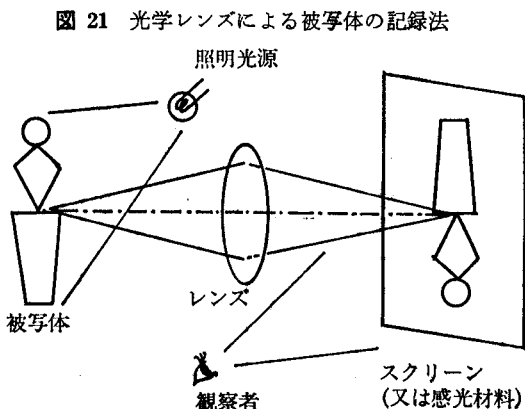
光の直進性だけでは説明できない強度分布が見られ、像周辺に少し歪んだ回折像が得られる。この回折現象がフレネル回折と呼ばれる。図20(c)は距離の長い場合で、スクリーン上にはスリットと全く異なった回折像が得られ、光の直進性が失われる。この現象はフラウンホーファ回折と呼ばれる。

## 2.5. ホログラフィーの特徴

ホログラフィーはレーザー光を用いる一種の写真術であるが、従来の光学的見地から見た写真技術とは根本的に異なる概念のもとに開発された技術である。そこでまず、従来の写真記録と比べてホログラフィーがどのような違いと特徴をもっているかを概説する。

前節で述べたように、光は時間的に振動しつつ空間を伝ばする電磁波の一種である。光は物体を通過したり、あるいは物体に当たって反射されると、その波動の状態（振幅と位相）が変化する。この光の変化によって、われわれは物体に関する情報を得る。即ち、光の振幅は物体の明暗に関する情報を、位相は物体の位置（距離や方向）に関する情報を示す。

従来の写真による記録では、図21に示すように物体からの光をレンズなどで感光材料上に結像させ、その像の光強度（振幅の自乗）の分布状態を

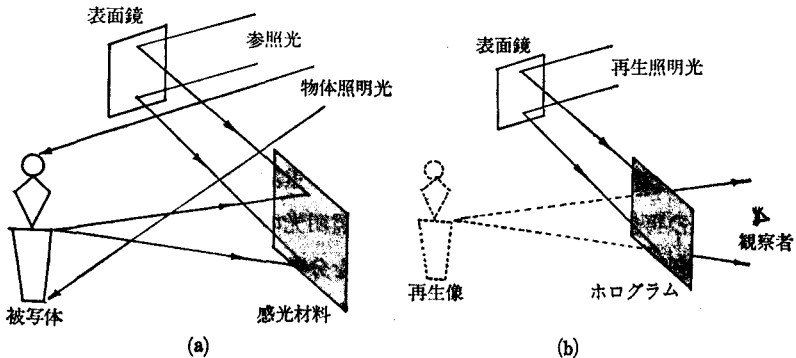


記録する。この方法では、物体像の振幅（明暗情報）はそのまま記録されるが、物体の位置などを表わす位相に関する振幅を感光材料に記録することはできない。つまり物体の位置を表わす情報は含まれないので立体感のない二次元（平面）的な像となって、物体を実際に観察した状態とは異なったものになってしまう。

これに対してホログラフィーでは、被写体である物体からの波の状態をほぼ完全に感光材料に記録する。即ち、感光材料が光の強度だけにしか感じない点は前者と同様であるが、ホログラフィーでは、物体からの光（物体光）と、同一光源（レーザー）から直接感光材料に達する光（参照光）とを干渉させ、干渉縞の強度分布を記録する（図22(a)）。この感光材料を現像処理したものがホログラムである。この強度分布には物体光の振幅のみでなく位相情報も含まれていることになる。

このホログラムを記録時の参照光と同じ波面の光（再生光）で照明すると、この光がホログラムを通過する際に、記録された干渉縞によって種々の方向に回折される。これらの回折光のなかには、前に記録された物体光と同じ振幅と位相をもつ波面が含まれている、従ってこれらがもとの物体の像を位置情報も含めて忠実に再生することができる（図22(b)）。このためホログラフィーでは、被写体が三次元物体であれば、三次元の像が忠実に再生される。

図 22 ホログラフィーによる被写体の記録と像の再生の方法



ホログラフィーでは、物体から反射し、または物体を透過回折する波面を直接感光材料に記録してホログラムがつくられ、このホログラムを再び照明するだけでホログラム自身が結像素子の働きをして像をつくる。フレネルホログラムの場合においては、再生像の中の共役像（後で述べる）は実像である。このことは従来の写真術と異なって、まったくレンズを使用しないで像を結ばせることができる。しかも記録、再生の条件を適当に選べば、レンズのような収差が発しないこともホログラムのすぐれた点である。さらにX線や電子線などのように通常のガラスレンズを使用できない波長領域においてもホログラフィーによる結像作用を利用することができる。

ホログラフィーでは物体とホログラムとが通常離れているため、拡散物体であれば物体の任意の点からの情報はホログラムのほぼ全面にわたって記録される。いいかえると、レンズで結像する場合と異なり、物体からホログラム面まで伝ばする反射波または回折波を記録するので、物体上の一点とホログラム上の一点の間には対応性がないから物体上の一点の情報はホログラムの広い範囲にわたって記録される。このことはホログラム上のどの小さな範囲をとってみても像全体を再生できることを意味する。即ち、ホログラムを細片に分けても、その一片から像全体の再生が可能である。これは同時にホログラムの一部にきずや汚れの欠陥があっても再生像の質に影響が少ない。これらのことはホログラフィーが冗長度の高い記録法であるといえる。

ホログラフィーでは、ほぼ任意の位置に任意方向からの物体情報を記録できるため、物体光や参照光の方向などを適当に変えることにより、異なる多くの物体情報を一枚のホログラム上に多重記録できる。このようなホログラムの再生過程ではホログラムへの照明光の方向などを工夫することにより、任意の物体像の1つまたは各種を分離あるいは同時に再生することが可能である。この原理に基づいて黒白の乾板にカラー像の記録ができる。

一般の写真技術では、写真感光材料の乳剤層は薄くて平面性のよいことが鮮明な写真画像をつくる要素となるが、ホログラムでは乳剤層の厚みを三次元的に使って、より多くの情報の記録を可能にすることができる。さらにホログラムをサーモプラスチック材料やホトレジスト材料などに記録すれば、干渉縞を表面の凸凹の模様として記録できるため、レコードの複製のように簡単にホログラムを複製できることも利用面を拓げる特徴の1つである。

ホログラムに記録するときの参照光は、通常平面波または球面波であって情報は含まれていないが、参照光にもなんらかの物体の情報によって変調してやれば、再生の際に物体光のもつ情報と、参照光のもつ情報とを相互に変換することができる。例えば、Aの情報で変調した参照光を照射すればBが再生され、逆にBの情報で変調された参照光（物体光）を照射すればAが再生できる。

また、かなり専門的分野になるが、ホログラムは光波の複素振幅を記録したものといえるので、複素振幅フィルター、光学的マッチトフィルター、像の修正用フィルターなど、従来の光学素子を使用したのでは不可能だった分野への応用が可能である。例えば汚れやかすれのある指紋からでも充分の精度で指紋の同定が可能となったり<sup>7)</sup>、不鮮明な写真画像の鮮明化に利用できる<sup>8)</sup>。

以上述べた特徴はホログラフィーの長所であるが、また一方種々の欠点もある。即ち、ホログラフィーでは干渉縞を記録するために、レーザー光のようなコヒーレント光源が必要になる。通常の写真のように太陽光や電灯光など任意の光源は利用できない。光源は単色光であるから再生像は一般に単色で、実物とは異なった色に再生される。これと関連して被写体の色彩画像をカラー写真のように容易につくれない。ホログラム上に記録される干渉縞の間隔は非常に狭く、100~3,000本/mm程度の範囲の空間周波数をもっているため、一般写真用の100~250本/mm程度の解像力をもつ感光材料では記録できない。従ってホログラム用には特殊の超高解像力

をもつ写真感光材料が必要となる。ホログラムを撮るには、レーザー光以外の光を遮断するため暗室中で撮影する。また干渉縞を写真にするため、露光中に光の波長の半分 ( $0.3\mu\text{m}$ ) 程度の振動で撮影不能になるから、被写体が全く動かないことが要求される。そのため装置の防振が必要であるなど撮影装置や条件が厳しく制限される。このことから、立体ディスプレイの対象として興味ある建物や風景は直接撮影できない。

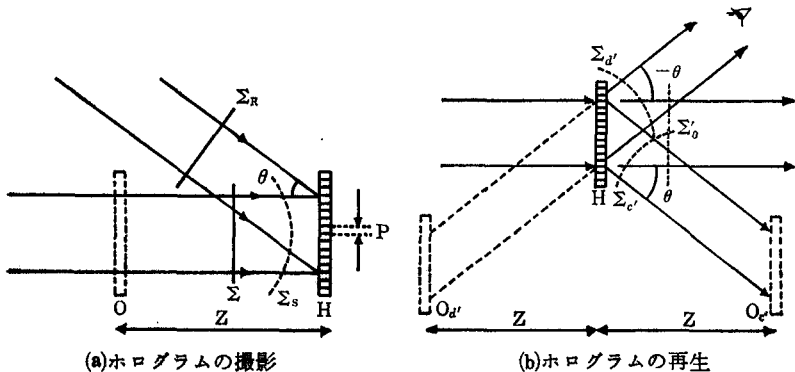
ホログラムを再生して結像させる場合、照明光の一部しか有効に利用されないで、明るいコントラストの高い像を再生するには出力の大きな光源（レーザー）が必要である。回折効率の悪いものではホログラム照明光の数%しか有効に利用されない。

ホログラフィーはこのような問題点をかかえているが、技術的には解決の進歩が著しく現在は多方面への応用が実現している。

## 2.6. ホログラフィーの原理

図23(a)に示すように<sup>9)</sup>、平面波  $\Sigma$  と他の一つの平面波  $\Sigma_R$  を角度  $\theta$  で交わせ、H面において乾板で受光する場合を考えてみる。いま簡単な場合をとって、 $\Sigma$  はH面に垂直に入射するとすれば、 $\Sigma$  と  $\Sigma_R$  の干渉によりH面には  $P=\lambda/\sin\theta$  のピッチをもつ等間隔直線上の干渉縞が記録される。

図 23 Leith & Upatnieks のホログラフィーの原理



この乾板を現像すれば一種の回折格子が得られ、これに波長 $\lambda$ の光を垂直に当てれば $\theta=0, \pm\theta$ の3方向に回折光が射出することは前述したとおりである。

つぎに $\Sigma$ の光路中に適当な位置に物体Oを置けば、Oによる回折のために $\Sigma$ は $\Sigma_s$ となり、H面における $\Sigma_s$ の振幅と位相の分布は $\Sigma$ とは変わってくる。 $\Sigma_s$ にはOの形や明暗に関する情報を含むようになるので、これを信号波面とよぶことにする。このような $\Sigma_s$ と一様な $\Sigma_R$ との干渉により振幅の変化は干渉縞の部分的なコントラストの変化となり、また位相が変化するH面で $\Sigma_R$ と $\Sigma_s$ が同位相になる位置が $\Sigma$ と $\Sigma_R$ の場合に比べ横にずれるため干渉縞も部分的に横移動がおり、ピッチ $P$ が部分的に変化することになる。このように一様な回折格子状の干渉縞にコントラストとピッチの変化が記録された乾板を物体Oのホログラムといい、一様な波面 $\Sigma_R$ を参照波面という。

つぎに図23(b)で示すように、ホログラムHに一様な光 $\Sigma_0$ を当てると、一部の光は0次回折光として直進して $\Sigma_0'$ となり、他の光は $\pm 1$ 次回折光となり、 $+\theta_0, -\theta_0$ の2方向へ分離して射出することは前述(図19)のとおりであるが、このとき干渉縞のコントラストの変化によって回折する光の振幅が変化し、またピッチの部分的変化により位相が変化するため $\pm 1$ 次回折光には振幅と位相の変化が起こる。その結果、 $-\theta$ 方向へ出る光 $\Sigma_d'$ は $\Sigma_s$ とまったく同じ形、また $+\theta$ 方向へ出る光 $\Sigma_0'$ は振幅成分は $\Sigma_s$ と同じであるが、位相成分の符号が変わり射出方向が $\Sigma_0'$ 方向に関して $\Sigma_d'$ と対称になって射出する。いかえると、ホログラムを照明することにより、信号波面 $\Sigma_s$ とまったく同じ形の波面 $\Sigma_d'$ が得られるわけで、これを波面再生とよんでいる。つまりホログラムには波面 $\Sigma_s$ そのものが記録されていて、必要に応じていつでも再生できるわけである。

再生された波面 $\Sigma_d'$ は、ホログラムHの後方Zにある物体から得られる信号波面 $\Sigma_s$ とまったく同じ形であるため、これはZの位置に物体Oと同じ形の虚像 $O_d'$ が生ずることを意味し、 $\Sigma_d'$ を目でうけるとホログラムの

後方に  $O_d'$  が浮んで見える。この  $O_d'$  を直接像とよんでいる。一方  $\Sigma_e'$  はホログラムに対し  $O_d'$  と対称の位置に実像  $O_e'$  を生じ、これを共役像とよんでいる。これは  $\Sigma_e'$  が  $\Sigma_s$  の位相成分の符号を変えた形、いわゆる複素共役となっているためである。共役像のできる位置に乾板またはスクリーンをおくと、 $O_e'$  を記録したり投影することができる。

このようなホログラムの記録方法は電気通信における搬送波の変調と比べられる。即ち、物体をおかないで得られる等間隔直線上の干涉縞は、空間的な搬送波であり、その周波数はピッチの逆数  $1/P$  で表わされる。これを空間周波数 (Spatial Frequency) とよび、単位長さ当たりの周期の数 (本/mm) で表わす。物体をおくと信号波面の振幅成分は干涉縞のコントラストの変化となるが、これはいわゆる振幅変調 (Amplitude Modulation) に相当する。また、位相成分は干涉縞の横振動となって搬送波の空間周波数を変化させるので、周波数変調 (Frequency Modulation) が実現される。このようなホログラムを再生させると、搬送波で構成された回折格子のコントラストの変化は再生光の強さを支配し、空間周波数の変化は再生光の方向を支配する。従ってホログラムは光の強さと同時にその方向まで記録していることになる。

## 2.7. ホログラフイーの分類

ホログラフイーは、ホログラムの記録方法、使用する感光材料や物体の種類、あるいは再生光の種類などでいろいろ分類されるが、表3にその一例として構成別による分類表を示す。

次に各分類区分とそれに属するホログラムの特徴を簡単に示す。

### (1) 物体と感光材料の位置関係 (記録時の波面の状態) による分類

① フレネルホログラム——物体と感光材料との距離が比較的短く、フレネル回折とみなせる回折光でホログラムを作成したもので、再生時もフレネル回折として取り扱える。冗長性があるのが特徴。

② フラウンホーフェホログラム——物体と感光材料との位置が等価的



表 3 ホログラムの分類の一例

コヒーレント光によるホログラム	二次元ホログラム	吸収形ホログラム	フレネルホログラム	透過物体ホログラム	非拡散性物体ホログラム
			フーリエ変換ホログラム	反射物体ホログラム	拡散性物体ホログラム
				レンズを用いるフーリエ変換ホログラム	
			レンズを用いないフーリエ変換ホログラム		
ホログラム	三次元ホログラム	位相形ホログラム			
		吸収係数の変化によってつくられたホログラム	透過形ホログラム	反射形ホログラム	
		屈折率の変化によってつくられたホログラム	透過形ホログラム		
			反射形ホログラム		

に無限大となるような回折光によってつくられるホログラムで、一般にレンズが用いられる。

③ フーリエ変換ホログラム——レンズを用いて感光材料面上に物体光の焦点を結び、光のフーリエ変換像をつくってホログラムを作成するもので、記録密度が極めて高く、光メモリーなどの応用がある。

④ レンズレスフーリエ変換ホログラム——レンズを用いないで等価的にフーリエ変換ホログラムをつくるもので、記録密度は③ほど高くない。

⑤ イメージホログラム——感光材料面上にレンズで被写体の実像を結ばせて記録するホログラムで、冗長性はないが、白色光で再生可能である。

(2) 感光材料による分類

① 二次元ホログラム——感光材料である写真乾板の乳剤層の厚みを無視して、干渉縞を平面的に記録するもの、または平面的り取り扱うことのできるホログラム。

② 三次元ホログラム (ボリュームホログラム、または体積ホログラム)——写真乾板の乳剤層の厚みを利用し、干渉縞を三次元的に記録するもので、カラーホログラフイーや白色光再生ホログラフイーにも応用される。

③ 吸収形ホログラム (振幅ホログラム) ——一般の写真感光材料を用

い、干渉縞を黑白の濃淡として記録するもので、再生のとき黒くなった部分で光が吸収され、損失となる。

④ 位相ホログラム——干渉縞を黑白の形で記録しないで、屈折率の変化などの光の位相差を与えるような形で記録したもので、吸収がないから比較的明るい再生像が得られる。マイクロメートルゼラチンホログラムなどがこれに属する。

⑤ 反射形ホログラム——干渉縞が写真板の乳剤層の厚さに平行に記録されたもので、再生はホログラムでの反射光で像がつくられる。白色光再生も可能で回折効率の極めてよいホログラムもある。

### (3) 被写体となる物体の種類による分類

① 透過物体ホログラム——スライド像など二次元的な被写体をホログラムに記録するもので、光情報処理などへ応用がある。

② 反射物体ホログラム——一般の三次元物体はすべて反射光を利用してホログラムが作られる。

③ 非拡散物体ホログラム——普通の三次元物体は拡散性であり、透過物体でも拡散板を使うことで得られる。拡散光を利用したホログラムであるから、拡散照射形ホログラムともいわれる。

### (4) 使用する光源の種類による分類

① コヒーレント光ホログラフイー——レーザー光を使用した一般のホログラフイーである。

② インコヒーレント光ホログラフイー——記録の過程でインコヒーレント光（通常の光）を使用して再生時にコヒーレント光を使用するものがある。実際には、物体で反射するインコヒーレント光を干渉計で2つに分け、再び写真乾板上で重ねて干渉縞を記録するものである。

③ パルスレーザーホログラフイー——ルビーレーザーのようなパルス光を使ってホログラムをつくるもので、再生時は一般に連続光が使用される。運動物体のホログラム作成などに応用される。

④ カラーホログラフイー——記録・再生ともに3色のレーザーを用い

るものと、再生時のみ白色光を用いるものがある。

⑤ 白色光再生ホログラフィー——一般に記録時にはレーザー光を使って、イメージホログラム、体積ホログラムをつくり、再生時に白色光を使用するもの。リップマン、イメージ、レインボウなどのタイプがこれに属する。

#### (5) 光以外の波源を用いたホログラフィー

これに属するものには、超音波を使用し大形物体や特殊な場所を対象とする、音波ホログラフィー、航空機から放射するマイクロ波で地形ホログラムをつくるマイクロ波ホログラフィーなどがある。さらにホログラム記録過程において物体光と参照光との合成による干渉縞の形をコンピューターで計算し、干渉縞の形を描き出させてホログラムをつくる。これをレーザー光で照明して再生像を得るコンピューターホログラフィー<sup>10)</sup>がある。これによると実在しない物体のホログラムも可能となる。

## 2.8. ホログラフィーの構成

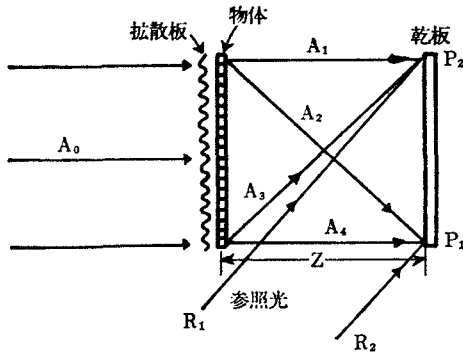
2.7.で述べたように、ホログラフィーはいろいろな種類に分類され、その特性もそれぞれ異なっている。しかしホログラフィーを作成するに当たって、種類が異なってもほとんど同じ構成で行えるものと、全く違った構成や方法で行わねばならないものがある。そこで現在実用化されているホログラフィーのなかで代表的なものを選んで、その構成と特徴を概説する。

まずホログラム作成技術の基礎となり、また応用面でも重要な意味をもつ二次元被写体ホログラフィー、つまりスライドのような奥行きのない空間情報を被写体としたホログラフィーを対象に、次のような分類に従って、それぞれの原理的構成を概説する。

### (1) 信号波面の形で区分したホログラフィーの構成

① フレネルホログラフィー(拡散照射ホログラフィー)——図24に示すように、物体と感光材料(以下乾板と記す)との間隔( $Z$ )が有限のと

図 24 フレネルホログラフィー（拡散照射ホログラフィー）



きは、乾板面まで到達する物体光の波面の状態が物体からのフレネル回折波として乾板上に記録される。このホログラフィーは、2.6.の原理の項でも述べたが、Gabor が考察し、Leith と Upatnieks が成功した最初のホログラフィーの方式である。

② フラウンホーファホログラム（フーリエ変換ホログラム）——①で、物体とホログラムの間隔 ( $Z$ ) が無限大になると、乾板面で得られる信号波面はフラウンホーファ回折波となる。このような波面を平行光を参照光としてホログラムをつくる方式である。実際には  $Z$  を無限大におけないので、一般にはレンズを用いて物体の位置を遠くしたり、点光源にした参照光を物体と等しい距離においたり（レンズレスフーリエ変換ホログラム）してホログラムをつくる（図25）。この条件では物体光の振幅分布のフーリエ変換に相当した記録方法になる。このホログラムを再生するとき、ホロ

図 25 フーリエ変換ホログラフィー

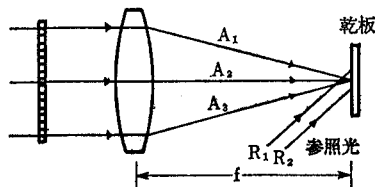
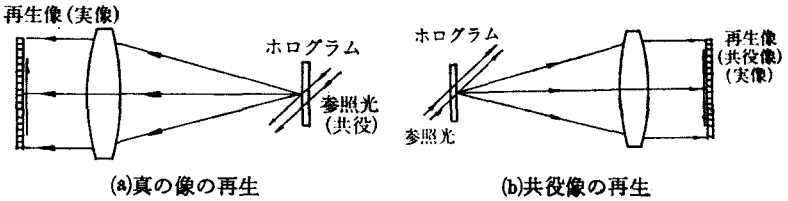


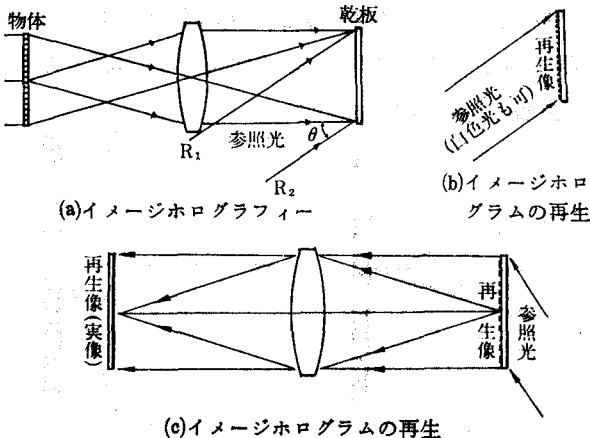
図 26 フーリエ変換ホログラムの再生



グラムを記録時と同じ位置に置き、参照光を記録時と反対側(共役)から入射し、レンズを図26(a)の位置におくと、もと被写体のあった位置に実像(真の像)が再生され、同図(b)のように、記録時と同じ方向から参照光を照射すると、レンズの焦点の位置に実像(共役像)が現われる。このホログラムでは、このように、真の像も共役像もともに実像として再生できる。また記録のときと再生のときとで異なる焦点距離のレンズを使用すれば、再生像の倍率を変えることができる。

③ イメージホログラフイー——図27(a)に示すように、物体をレンズで直接乾板上に結像させ、これと参照光との干渉によってホログラムをつくるもので、波面の状態から言えば、④の方式である。イメージホログラムの再生は、図27(b)に示すように、記録時と同じ参照光を照射すれば、ホロ

図 27 イメージホログラフイー



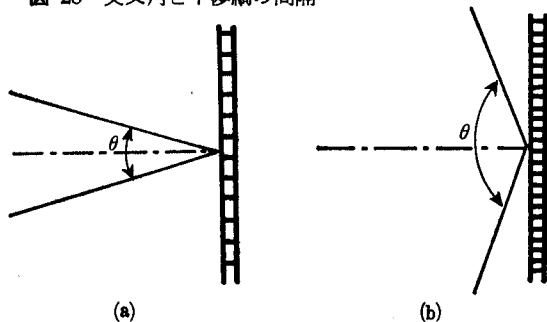
グラム面上に再生像が現われる。再生像は記録時と異なる波長の参照光で再生しても再生像の位置と大きさには変化がない。また、図 27(c) のように、記録時と同じ配置にし、記録時の参照光と共役な方向（記録時と反対側）から参照光を照射すれば、記録時に像のあった位置に実像が再生される。このときホログラム面上にも同時に再生像は現われる。ホログラム面上に再生される像を第 1 再生像、第 1 再生像をレンズで結像した再生像（実像）を第 2 再生像とよぶことがある。この第 2 再生像は記録時と再生時のレンズの焦点距離（倍率）を変えることにより再生像の大きさを変えることができる。

(2) ホログラフイーの種類と空間周波数、および記録する干渉縞の記録方式別  
ホログラム

ホログラムを乾板上に干渉縞として記録する際に、各種類のホログラフイーにおいて、それぞれのもつ最高空間周波数が記録可能な解像力をもつ写真感光材料を選ぶ必要がある。

一般的に、参照光も物体光もまったく変調をうけていない正弦波だと考えたとき、乾板の法線に対して図 28(a) に示すようにはほぼ等しい角度で入射するときが最も空間周波数が低くなる。即ち、乾板に記録される干渉縞の間隔が一番大きくなる。逆に、参照光と物体光とが図 28(b) のように乾板の法線に対して  $90^\circ$  近くの角度で交わると、空間周波数は最大になり、干渉縞の間隔は密になる。このときの干渉縞の間隔は  $\lambda/2$  に近くなり、空間周

図 28 交叉角と干渉縞の間隔



波数はほぼ  $2/\lambda$  である<sup>11)</sup>。光源に He-Ne レーザー (632.8 nm 発振) を使用すると空間周波数の最大値は 3,160本/mm となる。即ち、干渉によって生ずる空間周波数の範囲は理論的に 0~3,160本/mm ということになる。しかしホログラフィーの種類によって空間周波数の範囲もかなり狭くなる。

フレネルホログラフィーの場合、物体の各点から散乱する物体光と参照光とを乾板上で干渉させるから、干渉縞は乾板上にはほぼ均一に分布すると考えられる。いま、物体と乾板の大きさが同じと考えて、物体光と参照光との交叉角を調べると、図24において、 $A_2$  と  $A_4$  とのなす角を  $\theta$ 、 $R_2$  と  $A_4$  とのなす角を  $\theta_0$  とすると、最小交叉角 ( $A_3$  と  $R_1$  のなす角)  $=\theta-\theta_0$ 、最大交叉角 ( $A_2$  と  $R_2$  のなす角)  $=\theta+\theta_0$  となる。 $\theta_0$  は物体と乾板との距離によって変わり、距離が大きいと  $\theta_0$  は小さくなる。いま  $\theta=\theta_0=30^\circ$  になるような位置に配置したとすると、空間周波数の範囲は、およそ

$$\frac{2 \sin(\theta-\theta_0)}{\lambda} \sim \frac{2 \sin(\theta+\theta_0)}{\lambda} \doteq 0 \sim 2,740 \text{本/mm} \dots\dots\dots(6)$$

となる。従って、使用する乾板の解像度は少なくとも 2,740本/mm 程度を必要とする。

フーリエ変換ホログラフィーの場合、図25に示すように、レンズの焦点の近くの小さな範囲の回折像の干渉縞を記録するから、拡散光ではない。このため、図において、 $A_1$  と  $A_3$  とのなす角を  $\theta_0$ 、 $A_2$  と  $R_1$  とのなす角を  $\theta$  とすると、交叉角は、 $(\theta+\theta_0/2 \sim \theta-\theta_0/2)$  の間の角になる。前と同様に  $\theta=\theta_0=30^\circ$  とすると求める空間周波数の範囲は、

$$\frac{2 \sin(\theta-\theta_0/2)}{\lambda} \sim \frac{2 \sin(\theta+\theta_0/2)}{\lambda} = 412 \sim 1,210 \text{〔本/mm〕} \dots\dots(7)$$

となる。この場合、乾板の大きさによって空間周波数の範囲は変わらないが、レンズの焦点距離が変化すると範囲は変わる。

イメージホログラフィーの場合、物体光をレンズによって平行光線にして乾板を照射するので(図27(a))物体光と参照光との交叉角は乾板上どこで

図 29 回折効率

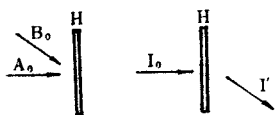


表 4 各種ホログラムの回折効率

ホログラムの 種類 回折 効率 (%)	薄いホログラム (二次元ホログラム)		厚いホログラム (三次元ホログラム)			
	透過または反射		透過形		反射形	
	振幅形	位相形	振幅形	位相形	振幅形	位相形
理論値	6.25	33.9	3.7	100	7.2	100
実験値	4.5	27	3.0	90	3.8	56

もほぼ一樣になると考えてよい。いま交叉角  $\theta=30^\circ$  とすると、空間周波数は  $\sin \theta/\lambda$  であるから、790本/mm となり、他のホログラフイーの場合に比較すると最も空間周波数が低い。従ってあまり解像力の高い乾板を必要としない。

次に乾板上に記録する干渉縞の記録方式によって、振幅ホログラム (amplitude hologram) と位相ホログラム (phase hologram) とがあることは、すでに分類の項でも述べたが、再生像の明るさからこの記録方式を評価するのに回折効率 (diffraction efficiency) がある。図29に示すように、2つの平行光  $A_0, B_0$  で作成したホログラム H に、同じ波長で  $A_0$  と同じ方向から強度  $I_0$  の光を入射させて再生したとき、再生された光の強さを  $I'$  とすると、回折効率  $\eta$  は次式で表わされる。

$$\eta = I'/I_0 \dots\dots\dots (8)$$

即ち、ホログラムに照射する光のエネルギーと再生像に利用される光のエネルギーとの比が回折効率という量である。写真乳剤による振幅ホログラムと位相ホログラムとの回折効率の理論値と実験値を表4に示す<sup>12,13)</sup>。干渉縞が黒白の濃淡で記録される振幅形のホログラムでは再生時に写真乳剤中の黒化銀の部分での光の吸収がかなり強くて回折効率が非常に悪くなるが、同じ写真乳剤でつくられたホログラムでも現像処理後に漂白処理して黒化銀を透明な銀化合物に変えることによって、ホログラムの振幅透過の分布を位相分布に変えた、位相ホログラムでは、照明光の吸収が少ないので回折効率は理論的には100%になる。この位相ホログラムと同種のもので、フォトレジストなどを用いて鋸歯状の凹凸面を感光材料上につくる



ブレイズホログラムや、振幅及び位相両者の特徴を併せて記録する複素振幅ホログラムがある。

## 2.9. レーザー光再生ホログラフィー

三次元画像、即ち立体像の記録、再生がホログラフィーの最大の特徴であることはすでに述べた。立体像のホログラムの作成と再生の方法は、2.7.で分類したように、いくつかの種類があり、これらは原理的に多少の差異がある。ここでは代表的な2つのホログラフィーについて概説する。

### (1) フレネル(拡散照射)ホログラフィー

図30にフレネルホログラム作成用の実験光学系を示す。まず He-Ne レーザーから出た光を①の半透鏡(ビームスプリッターまたはハーフミラー)で2光束に分ける。分けられたレーザー光の振幅と位相を等しく保ったまま②のミラーで反射して③のスペーシャルフィルター(ピンホールともよばれ、レンズとピンホールとでレーザー光のモードを選択し、光束を広げる働きをする)で光束を広げる。2光束のうち一方は記録する物体を照明する光(物体光)として用い他方はその振幅や位相を保ったまま写真乾板の上に干渉縞をつくる助けとなる光(参照光)として利用する。照明光は対象物体の表面で反射して振幅・位相に変調をうけて乱れた波面の物体光として④の写真乾板面上に到達する。乾板上では参照光と物体光とが干渉し

図 30 フレネルホログラム作成用の  
実験光学系

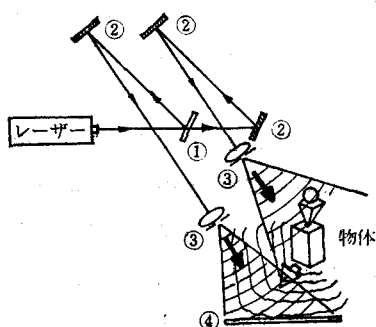


図 31 立体ホログラフィー実験の配置例  
(実体図)

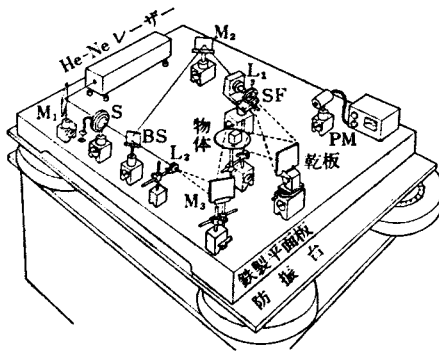
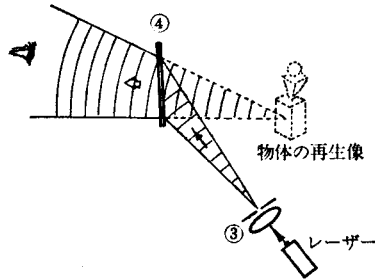


図 32 ホログラムの再生光学系



てホログラムがつくられる。物体光と参照光とで干渉縞ができる条件のうちで、両光路の差は極めて重要な条件である。レーザー光は干渉性が優れているとはいえ、He-Ne レーザーでは十数 cm 以内の光路差でないと干渉しない。被写体が二次元的な物体の場合は光路差はほとんど生じないが、三次元物体の場合には、この光路差を合わせるため②のミラーの位置を調整する。図31に実体配置図を示す。

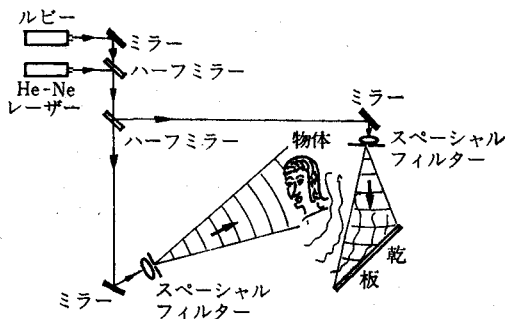
参照光と物体光の干渉縞が記録されたホログラムを参照光と同じ角度で再生すると、回折現象によって物体光の角度の延長方向に再生光が偏向させられて出て来る。これを図32のように観察者が見ると、あたかも物体があった方向から光が来るように見え、完全に物体からの光の波面を再生することができ、物体のあった位置に立体像（虚像）が見られる。再生像は

ホログラムを通してのみ観察され、目の位置を変えて見ると再生像の見え方（見る角度）が変わり、再生像が立体的であることがわかる。再生像はカメラを用いて写真記録ができる。

## (2) パルスレーザーホログラフイー

初期のホログラフイー技術は、静止物体で振動の影響の少ないものしか記録できなかったが、ディスプレイとして実用化するには、動的物体や柔軟性のある物体などを記録する必要が起こってきた。この解決方法には、高出力レーザー（出力数W以上）を用い露光時間を短くする方法が考えられるが、連続発振で使い易い He-Ne レーザーや Ar レーザーなどは最高数百 mW 程度である。そこで高出力パルス発振のルビーレーザーを光源として使用することで解決した。ルビーレーザーの発光パルス幅は約 20 n sec で波長は 693.4 nm の暗赤色、出力は  $0.05\sim 5 \text{ J/cm}^2$  である。パルス発振は連続発振と違って光学系の調整などが難しく、通常 He-Ne レーザーの助けを借りている。図33に実験光学系を示す。光学系は図30と基本的には同じであるが、この場合レンズはすべて凹レンズを用いる。これは凸レンズを用いると光路の途中に集光部分ができ、その部分のエネルギー密度が非常に高くなり、波面の状態が悪くなるからである。また、物体が均一に照射されるように、物体光の途中に拡散板を挿入する。さらに、ルビーレーザーは発振が不安定で、パルス状のため、物体光と参照光の強度

図 33 パルスレーザーを用いるホログラフイーの実験光学系



比の調整がかなり難しい。この方式で記録したホログラムの再生には連続発振の He-Ne レーザーを用いる。ルビレーザーは発振出力のピーク値が数百 kW~数 MW に達するから、操作に当たっては安全保護眼鏡を用意して危険防止に心掛ける。

## 2.10. 白色光再生ホログラフィー

今まで述べた方法は、すべてコヒーレント光で記録し、コヒーレント光で再生するという方式であった。このため日常どこでも再生像を見ることが出来ず、特殊のディスプレイと考えられていた。これに対し通常の白色光を用いて再生像が観察できるように考案された方式がリップマン形のホログラフィーである。この方式に用いる乾板は厚い乳剤層をもち、いわゆる三次元ホログラムを作成する。このホログラムを白色光で照射すると、ブラッグの反射の原理の応用によって、特定波長の強い反射光によって再生像が形成される。

### (1) 三次元ホログラムとブラッグ反射

図34(a)に示すように、2つの光波が重なり合っている部分は、空間のすべてにわたって干渉現象が起こっている。即ち、三次元的に干渉縞が発生する。この干渉縞の発生している空間に乳剤層の薄い(二次元的と見なせる)乾板を置けば、記録される干渉縞は二次元ホログラムを形成する(図34(b))。これに対して、干渉縞の間隔に比較してある程度以上の厚い乳剤

図 34 干渉縞の三次元的記録

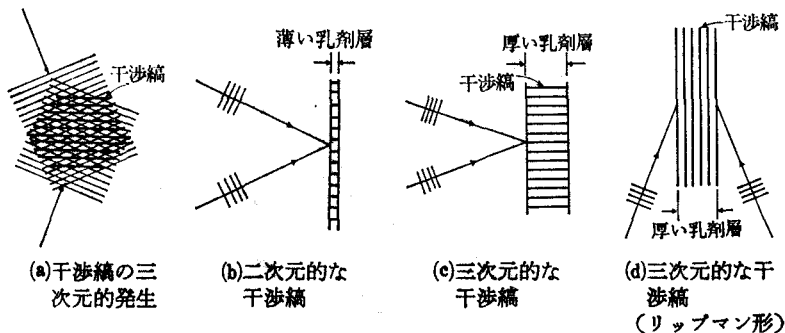
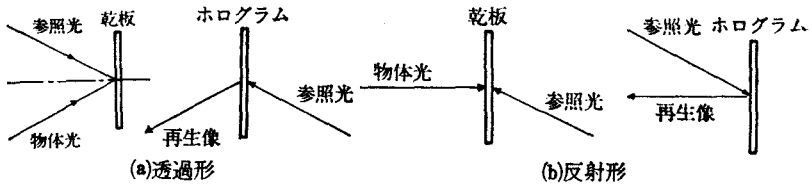


図 35 三次元プログラムの透過形と反射形



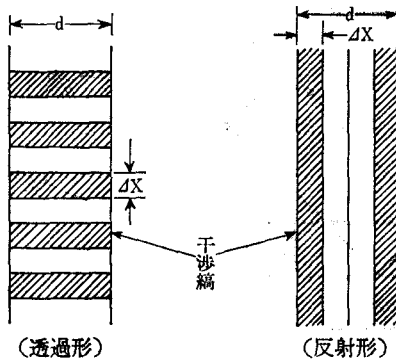
層をもつ乾板を置けば、干渉縞は平面的でなく奥行きをもった三次元的記録になる(図34(c), 及び(d))。三次元プログラムには、干渉縞の形成のしかたによって、透過形と反射形とがあり、またそれぞれ振幅形と位相差形とに分けられる。

透過形プログラムは図35(a)に示すように、干渉縞を記録するとき、物体光と参照光とを乾板の一方の面から大きな交叉角で入射させる。再生するときは、参照光の透過光で像を再生する。反射形プログラムは、同図(b)で示すように、乳剤面側から物体光を、乾板の反対面から参照光を入射させてつくる。この場合発生する干渉縞は乾板面に対しほぼ平行に記録される。再生するときは、参照光が入射させた側に再生光として反射される。図36で、三次元プログラムに記録された干渉縞の間隔(ピッチ)を  $\Delta x$  とすると

$$\Delta x = \lambda / 2 n \sin \theta \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 $\lambda$ : レーザ光の波長、 $n$ : 乳剤層の屈折率、 $\theta$ : 物体光と参照光

図 36 三次元プログラムの判定



との交叉角である。

三次元ホログラムと二次元ホログラムとの区別は、通常、次式で示す  $Q$  の大ききで判別される。

$$Q = 2\pi\lambda d / n\Delta x^2 \dots\dots\dots (10)$$

ただし  $d$  : 乳剤層の厚さである。この式の  $Q$  の値が

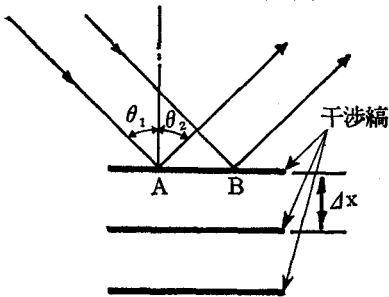
$Q > 10$  の場合は三次元ホログラム

$Q < 1$  の場合は二次元ホログラム

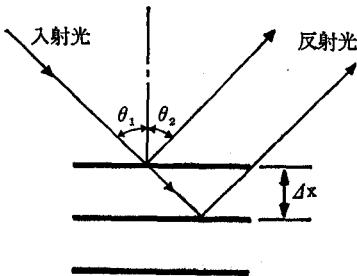
として取り扱われる場合が多い<sup>14)</sup>。

三次元ホログラムから再生像が得られるのはブラッグ反射（ブラッグ回折ともいう）による。図37(a)に示すように、乳剤層中に三次元干渉縞が平行に記録されているとする。干渉縞の厚みを  $0$  と仮定して、このホログラムに入射角  $\theta$  で光を入射する場合を考える。最初に一番表面に近い干渉縞の A 点と B 点とで回折する光が互いに強め合う条件は、AB間の距離を  $d$

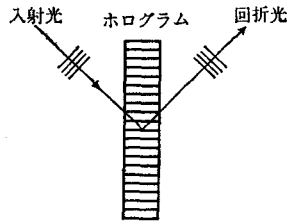
図 37 ブラッグ反射（回折）



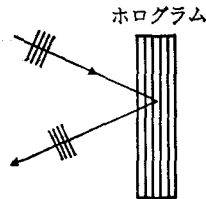
(a)



(b)



(c)



(d)

とすると

$$d(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) = m\lambda \dots\dots\dots(11)$$

ただし  $m$ : 正の整数,  $\theta$ : 回折角

である。いかなる  $d$  に対しても、この条件の成立が必要であるから、 $\theta_1 = \theta_2$ ,  $m\lambda$  (光路差) = 0, 言いかえると入射角と反射角が等しいという反射の条件と同じである。次に同図(b)に示すように、第1番目と第2番目の干渉縞とでそれぞれ回折する光が互いに強め合う条件は、乳剤の屈折率を無視すると、図からわかるように、

$$\Delta x \cos \theta_1 + \Delta x \cos \theta_2 = m\lambda \dots\dots\dots(12)$$

となる。反射の条件から  $\theta_1 = \theta_2$  とすれば

$$\Delta x = m\lambda / 2 \cos \theta \dots\dots\dots(13)$$

となり、干渉縞  $\Delta x$  の間隔は、次数  $m$  が干渉縞が形成されるとき1つずつずれていると考えてよいから、 $m=1$  と置くことができる。従って、

$$\Delta x = \lambda / 2 \cos \theta \dots\dots\dots(14)$$

となる。この式は、干渉縞の間隔  $\lambda$  と入射角  $\theta$  が決まれば、特定の波長  $\lambda$  の光だけ回折されることを意味している。また、ホログラムの厚みが大きく、干渉縞の層数が多いほど、それぞれの層(干渉縞)で回折する光が重なり合い、ますます極く限られた波長のみが回折(反射)される。このような現象をブラッグ反射とよび、 $\Delta x$  と  $\theta$  によって与えられる波長のみが反射されるので、波長選択性を備えた反射であると言える。この波長選択性が白色光ホログラムを再生する重要な原理である。しかし、ブラッグ反射を利用するので、白色光再生では、光源スペクトルの極くわずかな成分しか再生光として利用できないので、光源の利用率はあまり良好ではない。

白色光で再生可能なホログラムを作成するには厚い乳剤層をもつ写真乾板が必要であることは最初に述べたが、実際に市販のホログラム用写真乾板で考えてみよう。コダック社の649Fプレートを例にとると、乳剤層の厚み、 $d=15\mu\text{m}$ 、乳剤の屈折率  $n=1.5$ 、解像力は2,000本/mmである。

使用する He-Ne レーザーの波長を 632.8 nm とし、乾板の乳剤側から物体光を、裏側から参照光を入射させて干涉縞をつくる。このとき乳剤解像力の限界から交角  $\theta$  を  $80^\circ$  とすると、干涉縞の間隔  $\Delta x$  は

$$\Delta x = \lambda / 2n \sin \theta / 2 = 632.8 \times 10^{-9} / 2 \times 1.5 \times 0.98 \doteq 0.21 \mu\text{m} \dots (15)$$

となる。三次元ホログラムか二次元ホログラムかを判定するパラメーター  $Q$  (10式) は、

$$Q = 2\pi\lambda d / n\Delta x^2 = \frac{2 \times 3.14 \times 632.8 \times 10^{-9} \times 1.5 \times 10^{-4}}{1.5 \times (0.21 \times 10^{-6})^2} \doteq 60 \dots (16)$$

となり、 $Q > 10$  を充分満足するので、三次元ホログラムが作成できる。

(2) リップマン形ホログラフィー

図38(a)にリップマンホログラムを作成するための実験光学系を示す。同図(b)はリップマンホログラムを白色光で照射したときの再生像の状態を示したものである。

図39にはイメージ形のリップマンホログラムを作成する実験光学系を示す。これはマスターホログラムを使用する2段階法で、大口径レンズを用い、マスターホログラムの実像を新しい乾板上に結像させるため、再生像がホログラムから飛び出して見えるものが出来る。マスターホログラムはレーザー再生形を用いる。

リップマンホログラムは三次元状の干涉縞を記録したもので、反射像を

図 38 リップマンホログラムの作成とホログラムの再生

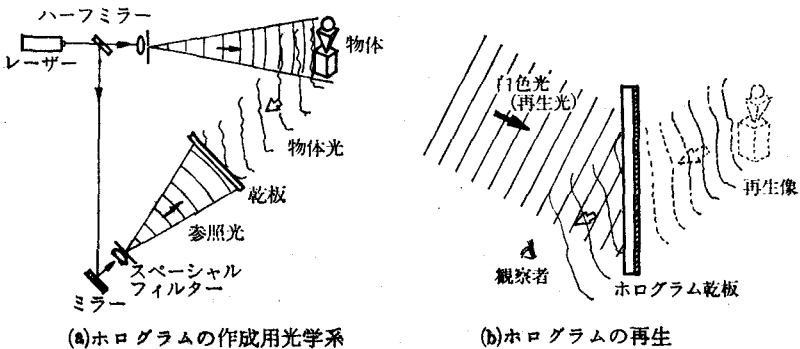
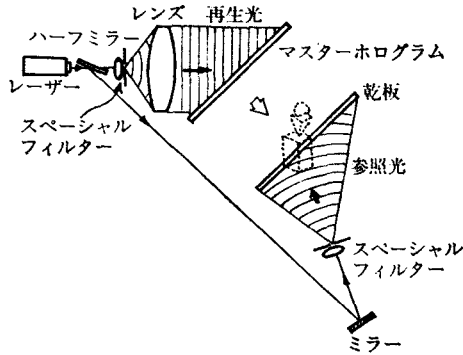




図 39 大口径レンズを用いたイメージ形の  
リップマンホログラム作成のための実  
験光学系



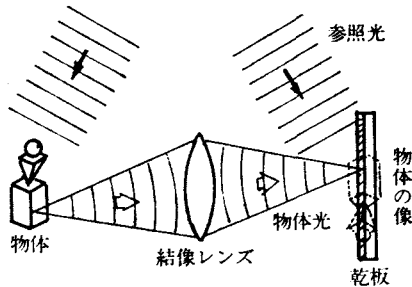
再生像として観察するところから、リップマンホログラムのことを、反射形ホログラムとか、ポリウム（体積）ホログラムとかよんでいる。

前項で述べたように、白色光再生ホログラムでは、形成された干渉縞から照明光が選択反射されて、特定波長だけ回折されて観察者に見える。従って、He-Ne レーザーで記録し、白色光で再生した場合、赤色だけが選択反射して赤色の像になる。しかし実験してみると青色の像が観察されることがある。これは乾板を現像処理する過程で乳剤が収縮して干渉縞の記録状態が変化したためである。

### (3) イメージホログラム

イメージホログラフィーは2.8.でも述べたように、物体を直接乾板上に結像させて、これと参照光との干渉によってホログラムをつくる方式である。イメージホログラム自身は波長選択特性をもっているので、白色光再生ホログラムとして有効である。図40に白色光で再生できるイメージホログラムの作成法を示す。図のように結像レンズを用いて物体の像をフィルム面上、またはその近くにつくって、それをホログラフィックに記録する方法である。このホログラムの再生像は、物体の結像位置により、乾板面から飛び出した状態のものもつくれる。しかし、ホログラフィーの原理で述べた冗長性は失われてしまう。このホログラフィーの方式がレーザー光再

図 40 白色光で再生可能なイメージ  
ホログラム作成法



生ホログラフィーと異なっている点は、図に示しているように、物体の実像を乾板面近辺に結像させる点である。このため、物体を広い方向から観察できる状態にするためには、大口径レンズを用いる必要があり、性能のよい大口径レンズの入手が困難なので、普通は凹面鏡を使用する。改良形イメージホログラムは、フレネルホログラフィーの光学系を用いてマスターホログラムをつくり、このマスターホログラムの再生像をイメージホログラム用光学系で乾板上にホログラムをつくるものである。

イメージホログラフィーの一種で、フレネル形で作ったマスターホログラムから実像を再生する際に、ホログラムの前に横方向のスリットを置いて、マスターホログラムの横方向の立体情報だけを取り出し記録する、レインボーホログラフィーとよばれる方式がある。1970年、Polaroid社のS. Bentonが提案した方法で、ホログラフィーに含まれる上下左右の立体情報のうち上下方向より左右方向の立体情報がディスプレイとして有効であるという視覚特性を利用して、スリットを用い記録時の情報量を減少させ、感光材料内部での記録状態をよくすることが特徴である。白色光で再生できる方法として現在かなり普及しているが、記録、再生の光学系、装置など改良の余地を残している。このホログラムでは垂直方向の立体情報がないから、目の位置を垂直方向に移動させると再生像の見え方はあまり変化せず、色だけ変わって見えるので、レインボーホログラフィーの名称がつけられた。

## 2.11. カラーホログラフィー

ホログラフィーをディスプレイに利用するには何としてもカラー画像を再生できるホログラムが望ましい。白色光源と違ってレーザー光というスペクトル範囲の限られた光源でカラー像を記録・再生することはかなり困難であるが、三原色に近い波長を発振するレーザーを組み合わせて、視覚的には相当良好な色再現を示すカラーホログラフィーが開発されつつある。ここではカラーホログラフィーの基本的な方式とその構成について概要を述べる。

カラーホログラフィーの色再現はテレビと同様に、赤、緑、青の三色光の混合による加色法による。この三原色に近い色光の波長を発振するレーザーとして次の3種が使用される。

赤：He-Ne レーザー 632.8 nm

緑：Ar レーザー 515.4 nm

青：Ar レーザー 488.0 nm

これら3種の波長の光を組み合わせて白色光を得るための条件を色彩学的に検討して、それぞれのレーザーの出力比を求め、乾板の波長感度特性や回折効率などのファクターを考慮して、被写体の色再現の良好なホログラムの作成を行う。

カラーホログラフィーの方式は、レーザー光再生カラーホログラフィーと、白色光再生カラーホログラフィーに大別される。

### (1) レーザー光再生カラーホログラフィー

この方式で、一番簡単なのは、被写体を3波長の混合レーザー光で照明し、同様の参照光とで1枚の乾板上に重ねて3色の干渉縞を記録する方法で、再生には同様の混合参照光を使用する。この方式は極めて単純でカラー再生画像が得られると思われるが、実際には、赤の波長で記録されたホログラムの成分は赤の波長のみで再生されるだけでなく、青や緑の光でも再生され、波長の違いが再生像の大きさの違いとなって現われる。これら

は他の波長でも同様で、いずれもゴースト像となって異なる色像が重なりあって像の質が低下する。これを防ぐために、各色の参照光と物体光との交叉角を大きく分離したり、ホログラム記録面上で、赤・緑・青のホログラムを3分の1ずつの面積に分割して記録し、これらのホログラムからの再生像を重ね合わせて色再現を得る、などの解決方法がとられた。しかし前者はゴースト像を、再生像から離して再生させて重なりを防ぐことはできるが、被写体の大きさで制限される。また後者は、三原色フィルターによる空間分割カラーホログラフィーで、再生時に各色によるホログラム部分をそれぞれ同じ色のレーザー光で照射するから像の重なりは少なくなるが、再生像の分解能が低下する。第3の改良法は、3色のレーザー光を合成した参照光の途中にスリガラスなどのコード板を挿入し、参照光をコード化する方法である。この方法によると、コード板で散乱される参照光には、光の波長によって屈折率の違いがあるため、波長によって散乱の状態が異なる。乾面板上の参照光は各波長で固有の波面になり、コード化された参照光でホログラムができる。再生時も同一条件の参照光で照射するとそれぞれの波長に対応する再生像のみ現われ、ゴースト像は出ない。しかし記録と再生の両過程で光学素子の配置を厳密に一致させる必要があるなど技術的に難しい問題がある。

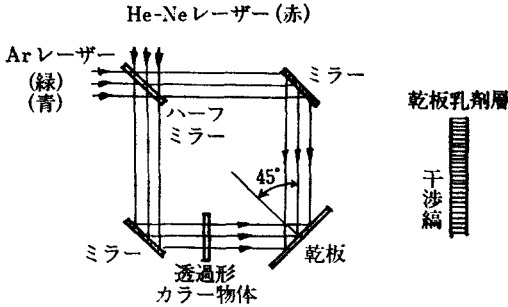
## (2) 白色光再生カラーホログラフィー

カラー画像の再生に白色光が使用できればレーザー装置は記録時のみでよく技術的にも経済的にも有利である。

白色光再生方法には、前述した、乾板の乳剤層の厚みを利用した三次元(体積)ホログラムを作成し、ホログラムに波長選択性をもたせてカラー画像の再生を行うやり方と、イメージホログラフィーの原理を利用する方法、また、レインボーホログラフィー方式で、マスターホログラムプロセスによって、赤・緑・青のレインボーホログラムをサンドイッチ状に重ねて、白色光の平行光束で照明する、という少々面倒な方法もある。

リップマン(体積)ホログラム方式の構成で、二次元物体(透過物体)

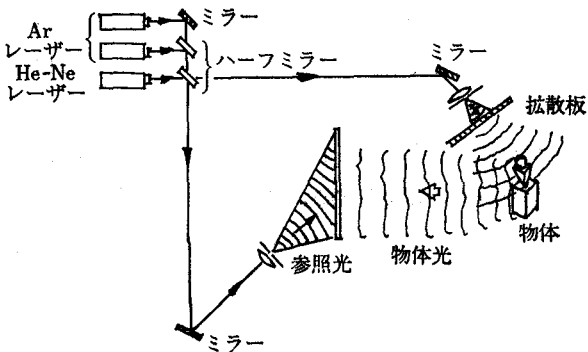
図 41 二次元被写体のカラーホログラムの作成



の記録方法を図41に示す。Ar レーザーの青と緑、He-Ne レーザーの赤のそれぞれのレーザー光を強度調整し、ハーフミラーで混合してから、物体光と参照光とをいずれも乾板面に対して45°の角度で同じ側から入射させると、乾板に記録される干渉縞はほぼ乾板面に垂直になる。このようにして作成したホログラムの裏面から白色光で照明すると透過形ホログラムとして働き、それぞれの波長で記録された干渉縞によって、それぞれ波長選択された再生像をつくるのでカラー像が再生される。波長の選択性は約10 nm である。このようなブラッグ反射を利用した再生方式のカラーホログラムは、波長選択性のためゴースト像が発生しないという特徴がある。

次に、図42に三次元物体のカラーホログラム作成の光学系の1例を示

図 42 白色光再生リップマンカラーホログラムの作成 (三次元被写体)



す。この方式は、リップマンのカラー写真の原理を利用してカラーホログラムをつくるもので、1962年ソ連の物理学者 Yu. N. Denisyuk によって開発された。赤・緑・青の3色で照射すると、それぞれの波長に対応した間隔の異なる干渉縞が乳剤中に記録され、反射形ホログラムができる。これを白色光で照明すると、3色が選択反射され、観察者にはカラー化された再生像が見える。このホログラムの回折率が極めて悪く、再生像は非常に暗いものになるという欠点がある。さらに、写真乳剤層中のゼラチンが現像処理で収縮する結果、干渉縞の間隔  $d$  が小さくなり、従って再生像の色が短波長側にシフトするから全体的に青っぽくなる。最近は大ダイクロメートゼラチン（後述）を用いて位相ホログラムをつくり、回折効率40%位まであげているが、なお多くの改良の余地を残している。

イメージホログラムを利用する方法は、透過被写体の場合、物体を三原色を混合したレーザーで照明し、物体像を乾板上に結像させる。参照光は3色をそれぞれ $120^\circ$ の角度で乾板を照射してホログラムをつくる。再生には白色光で照射し像を結ばせるレンズ系の中間に、同一円板上に $120^\circ$ に分割配置した3色フィルターを置き、それぞれの色に対応するフィルターを通して結像させることで、カラー画像を再現する。この方法は三次元カラー画像のディスプレイとしては特殊な用途に限られ、立体カラーホログラムとしてはあまり有効でない。

レインボーカラーホログラフィーでは3色のホログラムを別々につくるから、3色のレーザーを使用して計6回の撮影が必要となる。この方法は各色光での再生像の重なりやホログラムの明るさなどを一番良好な状態にすることが出来る。しかし操作が面倒で技術が難しい。これを1回の撮影でホログラムをつくる方法も考案されているが、物体の実像をつくるために精度のよい大型凹面鏡を必要とする。これは、レンズのいらぬ写真技術としての特徴をもつホログラフィーの主旨に反することになる。

## 2.12. マルチプレックスホログラム (ホログラフィクステレオグラム)

米国のマルチプレックス社の L. Cross らによって開発されたホログラムで、白色光で再生できるばかりでなく、ホログラムをのぞく目の位置を変えることで、再生像が動いて見えるものである。このホログラムは、映画とホログラムを組み合わせたものといえる。

まず、物体をゆっくりと回転する台上に置き、在来の映画撮影とまったく同じに、撮影機で何百もの写真を映画フィルム上に撮る。次にこの写真の1枚目の画像を円筒形レンズを用いて、幅約1mm、長さ約20cmの細長いスリット形のホログラムをつくり、これを長いフィルム上にスリットを通して記録させる。次の画面を同様にして1番目のスリットに隣接してつくる。これを繰り返して1枚のフィルム上に各々の画面を記録したスリット状ホログラムを多数並べて配置したものをつくる。この複合ホログラムを物体の回転角に対応して曲げ円筒にする。この円筒の中心に白色光源を置き照明する。各成分ホログラムは、ちょうどホログラムを作ったときの画面と同様に奥行きも視差もない虚像を生ずる。しかし観察者がフィルムを見るときには、左右の目は別々の成分ホログラムを通して1つの像点を見る。このとき網膜上にできる像は、ステレオ写真の場合と同様、少し違っているため、三次元的立体像が見える。観察者が横に頭を動かすと異なるホログラム像が見える、従って円筒をゆっくり回転するか、円筒のまわりを回りながら見ると、映画を撮影したときの物体の動きが再現され、動いて見える。

## 2.13. ホログラフィー用感光材料

ホログラフィーでは、写真乾板に干渉縞を記録したホログラムを作成する過程が重要であり、写真感光材料の選択と露光、現像などの写真技術がホログラムの質の優劣を決めるポイントになる。既に述べたようにホログラムに記録される干渉縞の空間周波数は一般に極めて高く、従って特殊な

高解像力乾板を使用することが多い。そこでホログラム記録用の感光材料について主要な特徴と種類をあげておく。

### (1) 銀塩写真感光材料

ハロゲン化銀を感光主体とする写真乳剤を感光層にもつ感光材料で、ホログラフィーでは乾板と略称される。乾板の代りにフィルムを使用するときもあるが、乾板が物理的にも安定したホログラムが得られる。現在は写真乾板は、一般撮影用にはまったくと言ってよいぐらい製造されておらず、わずかに、スペクトル撮影用、原子核乾板、超 LSI マスク撮影用、それにホログラム作成用など特殊用途のものが限定生産されているに過ぎない。

写真乳剤の特性としては、現像後の黒化銀粒子の集合によって形成される画像の評価規準となる、粒状性、解像力、コントラスト、などがある。さらに露光時における規準として、感光度及び分光感度がある。写真乳剤は可視画像をつくるのに現像という湿式処理を必要とし、この処理条件によって乳剤特性、特に画質が影響をうける。そのためにホログラムの作成に当たっては、乾板の種類と選択とともに現像などの処理条件に十分注意する必要がある。表5に現在市販されているホログラフィー用写真感光材料の品種、仕様及び使用条件などの一覧表を示す。国内では生産されていないようである。各品種とも詳しい特性、使用条件などを示した technical information がメーカーから出されているので、使用に当たっては、通常このデータに従えばよい。

乾板の分光感度は、レーザー光の発振波長に感色性を合わせればよく、カラーホログラフィーではパンクロを用いればよい。感度は、ホログラフィーの場合  $\text{erg/cm}^2$  の表示が用いられる。ホログラム用感光材料は、感色域も狭く、通常の写真感光材料とは異なった特性が要求されるため、ASA や ISO などの感度表示は不適當である。

銀塩感光材料は、振幅ホログラムをつくとともに、現像銀を漂白することで位相ホログラムをつくることができる。乳剤の厚さを利用する体積

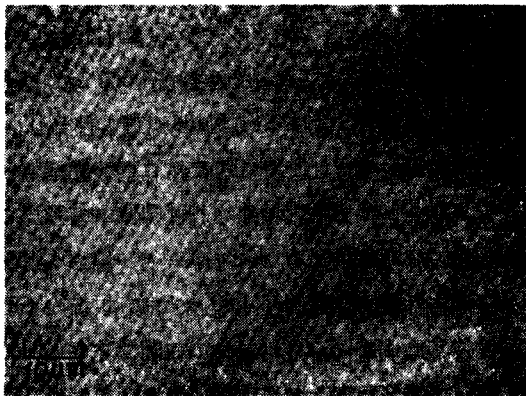


表 5 ホログラフィー用銀塩感光材料の仕様と使用条件

品名	乳剤層厚み	支持体*	指定現像液	その他
Kodak 649F	15 $\mu$ m 7 $\mu$ m	ガラス(乾板) シートフィルム	D-19	セーフライトは暗緑色
Kodak 120-02	7 $\mu$ m	ガラス(乾板)	D-19	セーフライトは暗緑色
Kodak S0-173	5 $\mu$ m	シートフィルム	D-19	セーフライトは暗緑色 (120-02をフィルムにしたもの)
Kodak S0-253	9 $\mu$ m	シートフィルム	D-19	セーフライトは暗緑色 (120-02をフィルムにしたもの)
**Agfa (8E-56)	7 $\mu$ m	ガラス(乾板)	アトマルル または	セーフライトは明赤色 光(R3フィルター)
10E-56	5 $\mu$ m	トリアセテート フィルム	レファイナル	黄色光(Y9フィルター)
Agfa (10E-70)	7 $\mu$ m	ガラス	メティノールu ノイトールs	セーフライトは暗緑色 G4, または青緑G8
10E-75	5 $\mu$ m	トリアセテート フィルム	G150	ハレーション防止層を持つ
Agfa (8E-70)	7 $\mu$ m	ガラス(乾板)	メティノールu ノイトールs	セーフライトは暗緑色 G4, または青緑G8
8E-75			G150	ハレーション防止層を持つ
Agfa 14C70	5 $\mu$ m	トリアセテート フィルム	メティノールu ノイトールs	セーフライトは暗緑色 G4ハレーション防止 層をもつ
			G150	

- \* 乾板およびシートフィルムの寸法は、6×6~20×25.4cmの何種類かずつある。
- \*\* Agfaのこの種の製品はSCIENTIAと総称される。

写真 1 アルゴンイオンレーザーによる干渉縞の記録



使用乾板: Agfa-Gevaret SCIENTIA 10E-75 (×1,000)

ホログラムやリップマンホログラムなどが作成されることは、既にそれぞれの項で述べた。現在の段階ではホログラムの作成には、銀塩感光材料が最もポピュラーである。

写真1は、写真乳剤に記録された、Ar レーザーによる干渉縞を顕微鏡で拡大( $\times 1,000$ )した写真である。

## (2) 重クロム酸ゼラチン (DCG)

重クロム酸ゼラチン(di-chromate gelatin)は良質のゼラチンに重クロム酸イオン( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ )を加えたものである。DCGは、フォトレジストとして既に100年の歴史をもつが、1968年初めてホログラム記録材料に適用されてから、高回折効率、低ノイズを特徴とする優れた記録材料として注目され、今後の発展が最も期待される感光材料である<sup>15)</sup>。

DCGには、露光されない部分のゼラチンが水に溶け去る非硬化型と、露光された部分とされない部分との間に屈折率の差を生ずる硬化型の2種類の型がある。現在はほとんどが硬化型DCGである。

DCGは、銀塩乳剤と違って無粒子であって解像力が高く、また位相ホログラムであるため非常に高い回折効率が得られるし、しかも散乱も少ない。しかし一方低感度であること及び感光波長域が短いことなどが短所である。

DCGの重クロム酸塩は重クロム酸アンモン $[(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7]$ である。この固有吸収波長は380nm付近にピークをもち、560nm以上に感度が無い。そこでArレーザーの488及び514.5nmが最も使われ、またHe-Neレーザーの441.6と325nmの光も使用できる。この分光感度はメチレンブルー<sup>16)</sup>やメチレングリーン<sup>17)</sup>で色素増感すれば720nm程度まで延ばせるから、He-Neレーザーの632.8nm、ルビーレーザーの647.1nmの光が使用可能である。解像力は極めて高く5,000本/mm以上の干渉縞も十分記録できる。周波数応答は100~5,000本/mmの間でフラットである。回折効率は硬化型DCGで90%程度とほぼ理論値に近い値が得られている。最大回折効率を得るために必要な露光量は、ゼラチンの硬膜の程度によって

写真 2 DCG による位相差ホログラムを収めたペンダント (白色反射光で本物そっくりに見える)



1976年ホログラフイーの幻想展より。

大幅に変化するが、普通は  $488 \text{ nm}$  で  $5 \sim 30 \text{ mJ/cm}^2$  である。これは銀塩の  $10^2 \sim 10^4$  倍である。色増感 DCG では、 $632.8 \text{ nm}$  で  $70 \sim 400 \text{ mJ/cm}^2$  の露光量を必要とする。DCG ホログラムは銀塩乳剤ホログラムを漂白後、脱銀処理してつくることも出来る。DCG は市販品はないので自家製造による。ホログラムの質は DCG の調製、処理の条件に依存するので操作に熟練を要する。

写真 2 は DCG による位相差ホログラムを入れたペンダントで、白色反射光で、本物の銅貨が入っているように見える。

### (3) その他の感光材料

IC や LSI の製造に利用されるフォトレジスト材料が、表面凹凸による干渉縞を形成する位相ホログラムとして使用される。解像力は  $3,000 \text{ 本/mm}$  が得られ、優れているが、感度が Ar レーザーの  $488 \text{ nm}$  の波長で  $2,000 \text{ J/cm}^2$  と極めて低い。この材料の特徴は凹凸面に金属メッキしてマスターをつくり、同じホログラムを多数コピーできることである。

その他、フォトクロミック材料、サーモプラスチック材料などがあるが

表 6 ホログラフィー用感光材料

感光材料および品名	解像度 (lin/mm)	感 度 (erg/cm <sup>2</sup> )	ホログラムの種類		可 逆 性	感光レーザー	使 い やす さ				
			二次元	三次元							
			吸 位	吸 位							
銀 塩 感 光 材 料	Kodak 649F*	2,000	2×10 <sup>6</sup>	○	○	△	○	×	He-Ne, ルビ ー, Ar, Kr	◎	
	Kodak 120-02*	2,000	10 <sup>7</sup>	○	○	△	△	×	He-Ne, ルビ ー, Ar, Kr	◎	
	Kodak S0-253*	1,500	5	○	○	△	△	×	He-Ne, ルビ ー, Ar, Kr	◎	
	Agfa 8E56*	3,000	2×10 <sup>6</sup>	○	○	△	△	×	Ar	◎	
	Agfa 10E56*	2,800	10	○	○	△	△	×	Ar	◎	
	Agfa (8E70)* 8E75	3,000	2×10 <sup>7</sup>	○	○	△	△	×	(He-Ne) ルビー	◎	
	Agfa (10E70)* 10E75	2,800	50	○	○	△	△	×	(He-Ne) ルビー	◎	
Agfa 14C70*	1,500	3	○	○	△	△	×	He-Ne	◎		
フ ォ ト ポ リ マ ー	重クロム酸ゼラチン*	2,000~3,000	10 <sup>6</sup>		○			○	×	Ar, He-Cd	◎
	フォトレジスト*	3,000	~10 <sup>4</sup>		○				×	Ar	○
	アクリル酸バリウム主剤	1,500~3,000	~10 <sup>4</sup>		○			○	×	ルビー He-Ne, Ar	○
フ ォ ト ク ロ ミ ッ ク ス	KBr	200	10 <sup>7</sup> ~10 <sup>8</sup>			○		○		Ar の第 2 高 調波	○
	NaCl	1,000	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>6</sup>			○		○		Kr	○
	AgCl ガラス	~2,000	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>6</sup>			○		○		Ar	○
	スピロピラン	~500	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>7</sup>			○		○		He-Ne	○
強 誘 電 体	LiNbO <sub>3</sub>	1,600	~10 <sup>6</sup>					○	○	Ar	△
	Sr <sub>0.75</sub> Ba <sub>0.25</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	~600	~10 <sup>7</sup>					○	○	He-Ne	△
強 磁 性 体	MnBi	~700	10 <sup>6</sup>		○				○	ルビー	△
	EuO	100	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>4</sup>		○				○	ルビー	△
そ の 他	サーモプラスチック*	1,000	~10 <sup>6</sup>		○				○	He-Ne	△
	Bi	1,000	5×10 <sup>6</sup>	○					×	ルビー	△
	Si	2,500	10 <sup>6</sup>		○				×	Ar	△
	カルコジガラス	~1,000	10 <sup>6</sup>					○	×	Ar	△
	ルミネセントガラス	2,000	5×10 <sup>6</sup>					○	×	Ar	△

\* 印は実用的な感光材料である。

省略する。

表6にこれらを含めたホログラフィー用材料の一覧表を示す。

### 3. あとがき

最近、ホログラフィーが情報化社会における新しい映像ディスプレイとして急激に台頭してきた。三次元のディスプレイとして立体映像の社会文化あるいは芸術面において果たす役割が認識され、その展開が期待されているとき、ホログラフィーについて基本的な項目をあげ、映像、記録メディアとしての特徴を、その物理学的構成から検討した。

レーザー光というコヒーレント光の特質と写真技術のマッチングは、従来の二次元情報を三次元情報に高めた。この驚異的な情報量の増加は、科学や技術の広範な分野で研究や開発のスピードを促進した。ホログラムに収められた密度の濃い立体情報や多重記録は、計測技術の進歩や情報処理手段の開発をもたらした。今や科学の最先端技術である。

同時にホログラフィーが立体映像の再生という点で画期的な特徴をもつということは、情報化社会における映像の役割にも革命的な影響をもたらすということである。それは、発明以来、とかく、大学や企業の研究室内で実験的に進められていたホログラムが、今や街に出て、大衆レベルの視覚媒体にならんとしていることで明らかである。

従来は一部技術者の独占物であったホログラフィーが日常生活における表現の道具として使われ始めたことで、ホログラムを、新しい視覚メディアとして、一つの文化的技術として認知しはじめている。米国では、数年前からホログラフィーがウィンドウディスプレイ、舞台装置などをはじめ、アクセサリ(写真2)の分野まで進出し始めている。わが国でも早くからホログラフィーの研究は進められており、先端技術は欧米と遜色ないと思われるが、普及についてはいま一步というところである。米国では、New York に、Museum of Holography が1976年に設立され、啓

蒙，普及に務めている。

ホログラフィーは新しい映像メディアとして情報化社会の将来に欠かせない重要な役割りを果たすことに間違いはない。その具体的な動向や応用技術の展開といったことを予測・調査することは情報化社会教育の在り方を研究するうえで必要なことであろう。

### 参考文献

#### 総合的参考文献

- 藤岡由夫監修，柏本寛訳 レーザーと光 1.5 共立出版（1969）  
松下昭編，平井紀光著 ホログラフィーの基礎と実験 共立出版（1979）  
村田和美著 光学 サイエンス社（1980）  
横田英嗣編 美しい光の世界 東海大出版会（1980）  
小林春洋著 レーザのはなし 日刊工業新聞社（1981）  
日本写真学会編 写真工学の基礎（銀塩写真） コロナ社  
稲葉文男編 レーザーハンドブック 朝倉書店  
鶴田匡夫 ホログラフィ 日写誌 30, 70（1967）  
辻内順平 ホログラフィの知識 写真工業 28, No. 3, 84（1970） 28, No. 4,  
97（1970） 28, No. 5, 89（1970）  
E. N. Leith, 霜田光一訳 白色光ホログラフィー 別冊サイエンス 日本経済  
新聞（1975）

#### 事項別参考文献

- 1) D. Gabor; Nature 161, 777 (1948)
- 2) T. H. Maiman; Nature, 187, 493 (1960)
- 3) N. Leither & J. Upatnieks; J. Op. Soc. Amer., 52, 1123 (1962)
- 4) N. Leither & J. Upatnieks; J. Op. Soc. Amer., 53, 1377 (1963)
- 5) 辻内順平; 日写誌 41, 184 (1978)
- 6) 大塚正男, 田本祐作, 有賀研一; 日写誌 36, 304 (1973)
- 7) J. Tsujiuchi, K. Matsuda & N. Takeya; Applications of Holography (Plenum Press 1971) 247
- 8) G. W. Stroke; Proc. IEEE 63, 829 (1975)
- 9) 辻内順平; 日写誌 41, 184 (1978)
- 10) 林田和美; ホログラフィー入門 朝倉書店

- 11) 平井紀光; ホログラフィの基礎と実験 165 p.
- 12) J. C. Urbach and R. W. Meier; Appl. Optics, 8, 2269 (1969)
- 13) H. Kogelnik; Bell. Syst. Tech. J. 48, 2909 (1969)
- 14) Electro Tech. Lab.; "Research Report on Laser Information Processing" No. 168 (1970)
- 15) T. A. Shankoff; Appl. Optics, 7, 2101 (1968)
- 16) T. Kubota, T. Ose, M. Sasaki and K. Honda; Appl. Optics, 7, 2101 (1968)
- 17) A. Graube; Phot, Sci. Eng. 22, 37 (1978)