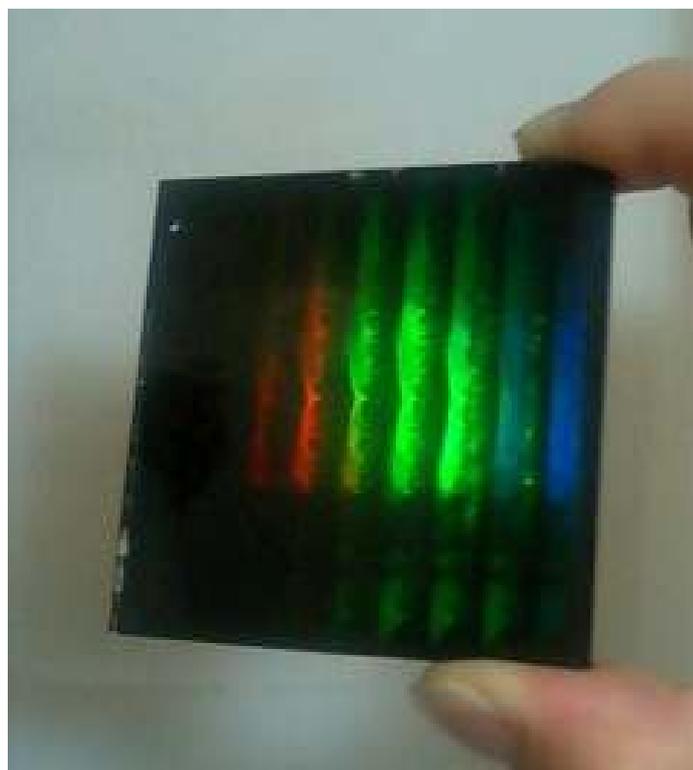


ETL No. 7

～ホログラム～

中川研究室 玉木 嘉人



[プログラムの目的]

ホログラフィの原理の理解

ホログラムの露光・現像・観察

目次

第一章	序論	1
1.1	歴史的背景	1
1.1.1	ホログラフィの誕生	
1.1.2	ホログラフィの発展	
1.2	身の回りのホログラム	2
1.3	ホログラムの原理	3
1.3.1	従来の写真とホログラムの違い	
1.3.2	光の干渉	
1.3.3	ホログラフィで記録される干渉縞	
	① 反射型ホログラム	4
	② 透過型ホログラム	5
第二章	ホログラム製作	7
2.1	光学系	7
2.1.1	ホログラムの製作において	
2.1.2	ホログラムの物体について	
2.1.3	Ar イオンレーザー特性	
2.2	ホログラム露光	8
2.2.1	ホログラム乾板セット（暗室での作業）	
2.2.2	露光	
2.3	ホログラム現像	9
2.3.1	現像処理	
2.3.2	現像処理における注意	
第三章	製作したホログラム	10
3.1	ホログラム確認	10
3.2	ホログラム観察	10
3.3	ホログラムが見えない時に考えられる原因	11
	付録・参考文献	12

第一章 序論

1.1 歴史的背景

1.1.1 ホログラフィの誕生

ホログラフィの最初の考えは 1948 年、D.Gabor によって提案された。当時、彼はイギリスのトムソン・ヒューストン社で電子顕微鏡の像を改善する研究をしていた。その頃の電子レンズは性能が悪く像が良くなかったが、この電子レンズの性能が改善されたとしても大幅な像の改良は理論的に期待できなかった。そこで、彼は像を飛躍的に良くする方法はないかと考え、1942 年に W.L.Bragg が提案した X 線開設顕微鏡の考え方に行き着いた^{1*}。Gabor は X 線の代わりに電子線を使い、第一段階として物体の回折波と、物体の周りを透過したバックグラウンド波とを重ね合わせて干渉パターンを記録し、第 2 段階でこれに光を当てて光学像として物体の像を再生するという方法を試みた。Gabor はこれを「波面再生法」と名づけ干渉パターンを“全てが記録されたもの”という意味の「**ホログラム (Hologram)**」と呼んだ。この語源は“完全な”を意味するギリシャ語の「holos」と、“メッセージ”を意味する「gram」から来ている。後に、ホログラムと写真術 (photography) を結びつけ、物体の全ての情報を記録し再生する技術としてホログラフィ (Holography) という言葉が生まれ、急速に広まった。しかし、Gabor の方法には 2 つの像が重なってしまうなどの原理的な欠点があり、また当時は干渉性の良い光源がなく、良い像は得られなかった。その為、画期的ではあったがこの技術は一部の人々以外には注目されなかった。

(^{1*}Bragg の方法は X 線による 2 段階の回折によって結晶格子の像を観測しようとするものである。)

1.1.2 ホログラフィの発展

ホログラフィに劇的な発展があったのは、1962 年～1964 年にかけてのことであった。アメリカのミシガン大学の E.N.Leith と J.Upatnieks は 1962 年からの一連の論文において、物体の回折波に、物体側から傾いて入射する参照光を加えて干渉させる「2 光速法」を提案し、Gabor の方法の欠点を一挙に解決した。この方法によって記録されたホログラムは今日、基本的なレーザー光再生ホログラムとなっているフレネルホログラムである。特に、1964 年の論文に掲載されたおもちゃの貴社の見事な像は多くの研究者の注目を集め、その後のホログラフィの発展の端緒となった。これは開発されて間もない He-Ne レーザーと、高解像力写真乾板を使って記録されたホログラムからの再生像であった。

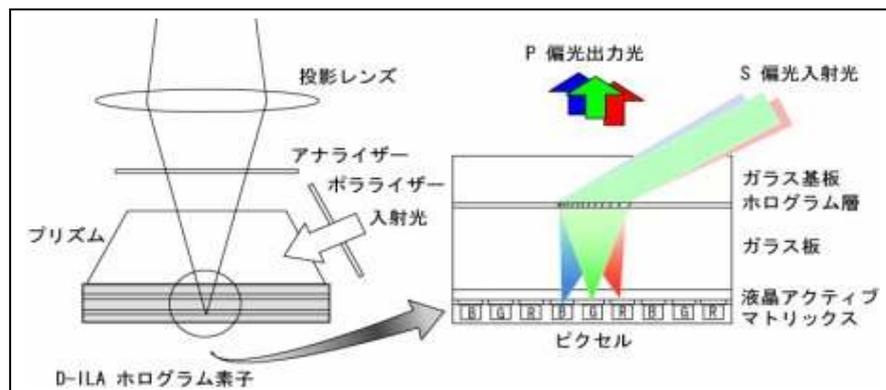
ほぼ同じ頃、ロシアの Y.N.Denisyuk は、Gabor の方法とは異なる方法で完全な像を形成する手段について研究していた。それは、記録材料を透過した参照光で物体を照明し、物体からの反射光と参照光を干渉させる方法である。これは今日、ディスプレイ用ホログラムとして、またホログラムを使った光学素子 (ほろグラフィック光学素子) として欠かせない重要なホログラムとなっている。

これらの先駆的な研究以後、ホログラフィへの関心が一挙に高まり、基礎理論および応用方面の研究が多数行われた。しかし、期待と共に制約も多く、当初夢見られたほどには多くの分野での応用が難しいことも次第にわかってきた。その為、ホログラフィの研究は波があったが、研究者の地道な活動によって制約が次第に取り除かれ、今日、実用的な技術として定着してきた。ホログラフィの発明に対し、1971年ノーベル物理学賞が Gabor に与えられた。

1.2 身の回りのホログラム

ホログラフィは多くの可能性を持った技術である。以下にその一例を示す。

- ① 医学
断層画像の立体視、標本
- ② セキュリティ
クレジットカード、キャッシュカード、商品券、紙幣、免許証
- ③ 光情報処理
文字・図形認識、指紋鑑定、画像ファイル、メモリ
- ④ 産業機器
回折格子、結像レンズ、CD・DVD 光学ヘッド、干渉フィルター
乗り物の HUD（ヘッドアップディスプレイ）、液晶パネル表示デバイス
- ⑤ 干渉計測
物体の変位・変形・振動測定、形状測定、欠陥検査、粒子分布
- ⑥ その他
インテリア、アート、広告、研究、3次元テレビ



1.3 ホログラムの原理

1.3.1 従来の写真とホログラフィの違い

従来の写真による記録では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（光の振幅の 2 乗）の分布状態を記録している。この方法では物体像の振幅はそのまま記録されるが、物体の一を示す位相に関する情報を感光材料に記録することは出来ない。つまり、従来の写真技術で得られた画像では元の物体の位置を表す情報が含まれていない。その為に、立体感のない平面的な像となり、物体を実際に撮影した状態とは異なってしまう。

これに対して、ホログラフィでは、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できる。感光材料が光の強度だけにしか感じない点は通常の写真技術と同様だが、ホログラフィでは物体からの光（参照光）と同一光源（レーザー）から出て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しているところが大きく異なっている。このように記録された干渉縞の強度分布には物体光の振幅ばかりでなく、位相情報も含まれている。

1.3.2 光の干渉

光は電磁波であり、波として z 方向へ進行する様子は次式で表される。

$$E = A_0 \sin[k(z - ct) + \phi] \quad k = 2\pi / \lambda$$

A_0 は光の強度、 k は真空中の波数、 λ は光の波長、 c は光速、 t は時間、 ϕ は光の位相を表している。真空中での 2 つの光波 E_1, E_2 を

$$\begin{aligned} E_1 &= A_1 \sin[\omega t + \phi_1] \\ E_2 &= A_2 \sin[\omega t + \phi_2] \end{aligned} \quad (\omega \text{ は角速度})$$

とすると、干渉光の強度 I は光の電場 E の 2 乗に比例するので

$$\begin{aligned} I &= E^2 = (E_1 + E_2)^2 \\ &= (A_1^2 + A_2^2) / 2 + A_1 A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $A_1 A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)$ において $\phi_1 = \phi_2$ のときに 2 つの光は互いに強めあい、 $\phi_1 - \phi_2 = \pi$ のときに弱めあう干渉がおき、これが縞模様として現われ干渉縞となる。

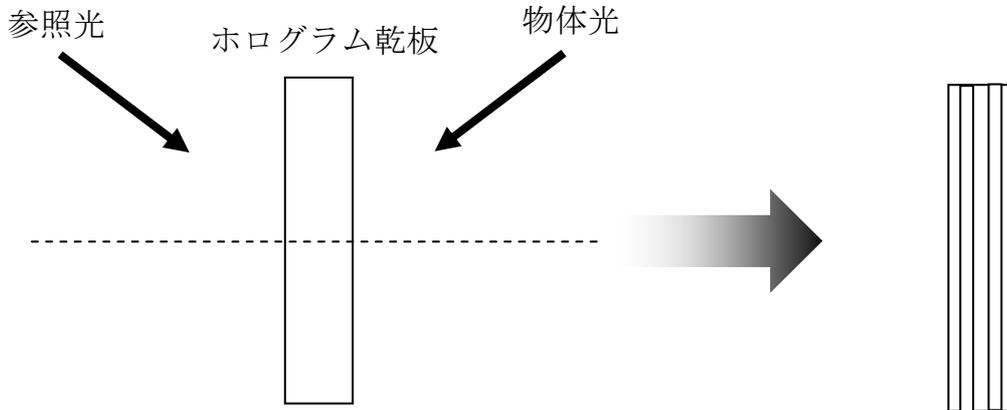
1.3.3 ホログラムで記録される干渉縞

ホログラフィで記録される干渉縞は、記録方法により次の 2 種類に大別できる。

- ① 反射型ホログラム
(例：デニッシュークホログラム、イメージ型リップマンホログラム)
- ② 透過型ホログラム
(例：フレネルホログラム、レインボウホログラム)

① 反射型ホログラム

反射型ホログラムは、ホログラム乾板の両面から参照光と物体光を入射させる。干渉縞は乳剤の厚さ方向に層状となって記録され、干渉縞の向きは参照光と物体光の交差角度の2等分線方向である。この層状に記録された干渉縞は、ブラッグ回折（反射）の条件により強い波長選択性を生じる。



この層状に記録された干渉縞に再生用白色照明光を当てると、特定の入射角の光、特定の波長だけを強く回折（反射）する作用を起こす。この作用はブラッグ回折（反射）と呼ばれ、次のような条件を満たす場合だけ生じる。

点 d で反射した光と点 b で反射した光が互いに強めあうには、点 d の反射光と点 a—点 b—点 c の順に進む反射光が同位相であることが必要となる。これより、

$$d(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) = n\lambda$$

点 e で反射した光と点 d で反射した光が互いに強め合うには、次の条件が必要となる。

$$d'(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) = 0$$

$$\theta_1 = \theta_2$$

この2式より、 $\theta = \theta_1 = \theta_2$ とすると

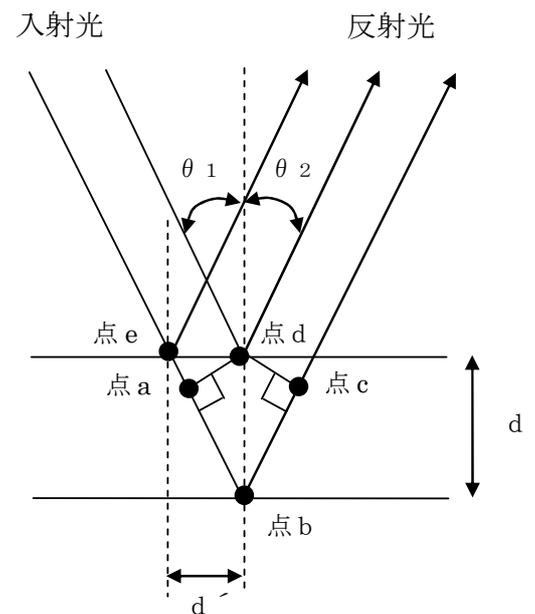
$$2d \cos \theta = \lambda \quad (n=1)$$

$$d = \frac{\lambda}{2 \cos \theta}$$

この式は、記録された干渉縞の間隔 d について

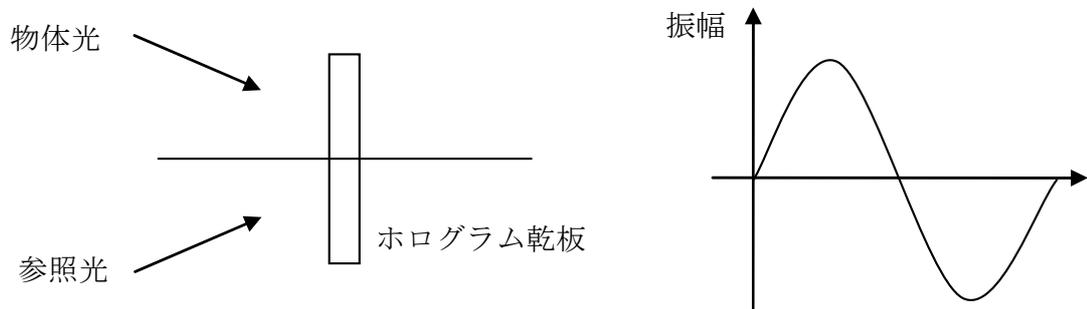
1. 干渉縞の記録と同じ波長 λ の光を角度 θ で入射すると、 θ 方向へ強く反射する。
2. いくつかの波長を含んだ光を θ で入射させると、波長 λ の光が最も強く反射する。

であることを示しています。



② 透過型ホログラム

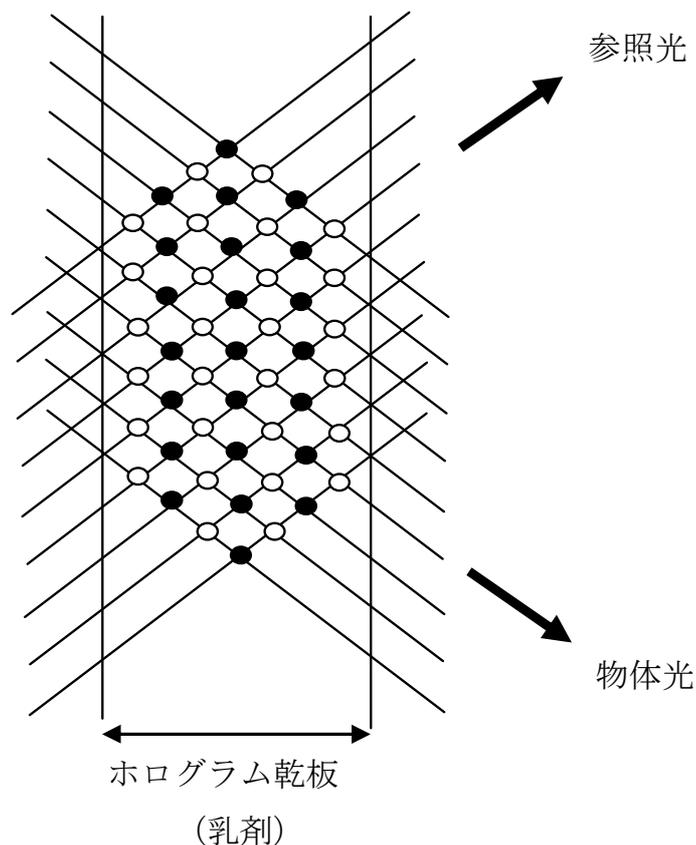
透過型ホログラムはホログラム乾板の片面から参照光と物体光を入射させる。干渉縞は乳剤の厚さ方向と垂直で干渉縞の方向は参照光と物体光の交差角度の2等分線である。



物体光と参照光をホログラムの乾板の両方面から入射させると、山と山あるいは谷と谷で互いに強めあい（○印）、山と谷または谷と山では弱めあう（●印）。これを図で示すと下図のようになり、○印どうし、●印同士を結ぶ線が出来る。

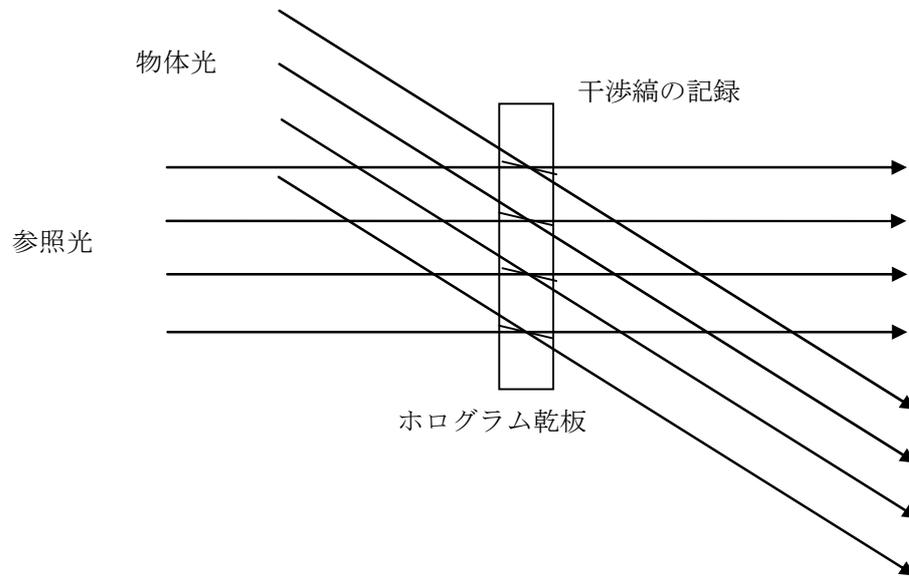
- 印 : 山と山、谷と谷が重なり合わされた部分
- 印 : 山と谷、谷と山が重なり合わされた部分

○印を横方向に結ぶと、乳剤面と垂直な線が得られる。この線は干渉により強められた部分で、干渉縞の明縞（露光部分）になる。

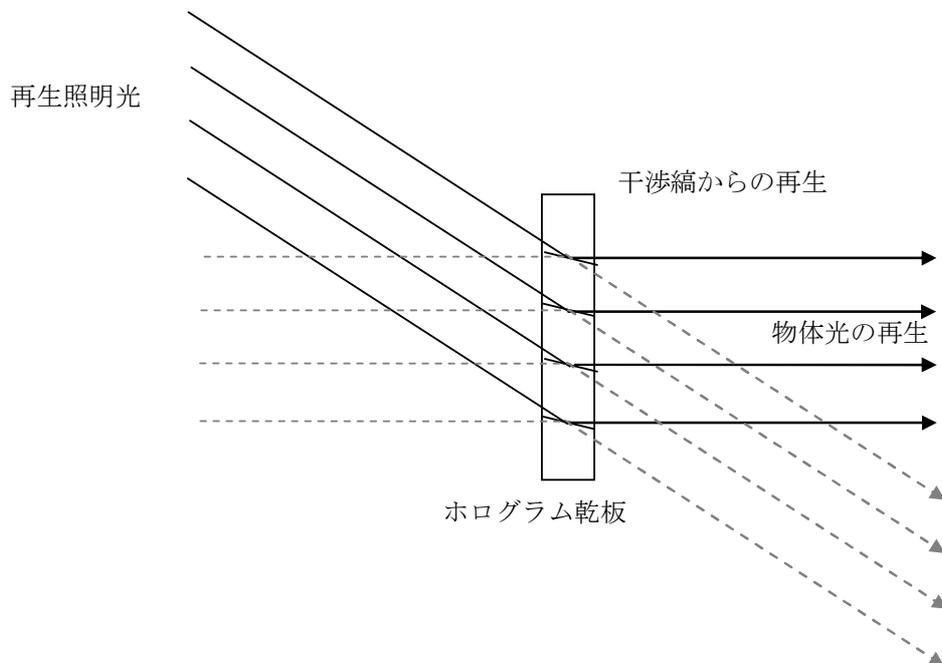


記録された干渉縞に記録時と同じ波長、入射角度で再生照射光を当てます。干渉縞は再生照明光を特定の方向へ強く回折する作用をし、これが各部分の干渉縞で行われると互いに強め合い、回折光が作られる。そして、記録された干渉縞の間隔（明縞と暗縞の間隔）と、入射角度により強く回折される方向が決まる。

干渉縞の記録



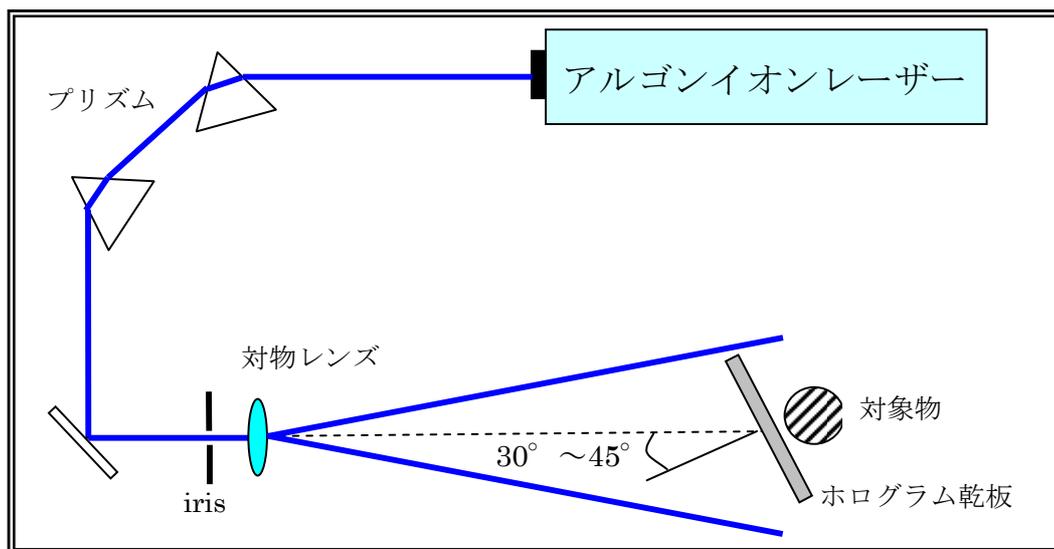
干渉縞からの再生



第二章 ホログラム作成

2.1 光学系

光学系は以下のようなデニッシュクホログラム用のものを組んだ。



2.1.1 ホログラムの製作について

ホログラムの製作に必要な注意点について簡単にまとめた。

- ① レーザー光源
使用するレーザー光源に高い干渉性が必要。単一波長、シングルモード、直線偏光
- ② 除振
光学常磐上での作業となる。しかし、光学素子が振動してもいけないので安定時間を設けて振動を除いてから次の作業に入る。
- ③ 暗室
外光により未露光のホログラム乾板が感光しないように、現像処理は暗室の安全光の下で行う。露光場は暗室の変わりに暗幕で作ってある。
- ④ 光学系
参照光と物体光の光路長は、出来るだけ0に近づける。作業性と振動を考慮して光軸は低くしてある。
- ⑤ 遮光
レーザー光源からの漏れ光、反射による漏れ光を防ぐため、黒い紙などでふさいだ。

2.1.2 ホログラムの物体について

ホログラムに適した物体とは、

- ① 動かないもの
- ② 反射率の高いもの
- ③ 反射光が拡散するもの
- ④ ホログラム乾板サイズ（今回：63mm×63mm）よりも小さいもの
- ⑤ 奥行きが適当なもの

2.1.3 Ar イオンレーザー特性

今回用いる光源の Ar イオンレーザーの特性について簡単にふれておく。

- 主な発振波長 : 457nm (青紫色)
488nm (青色)
514nm (緑色)
- コヒーレント長 : 数m
*このことを実際に体験してもらうために、マイケルソン干渉計を組んだ。
実際に目で見て確認してもらう。

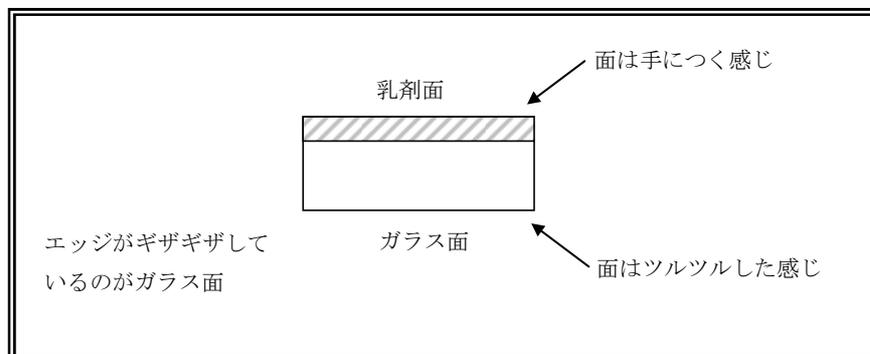
2.2 ホログラム露光 (イメージ型リップマンホログラム)

今回は用意に鮮明なホログラムが出来るリップマンホログラムの製作を行う。

2.2.1 ホログラム乾板セット (暗室での作業)

まずはホログラム乾板をスタンドにセットする。今回使用する乾板は青色、緑色に感度があるため赤色のセーフライトのある暗室で作業を行う。なお、現像のときも同様に暗室で作業を行う。

- ① セーフライトをつけた状態で箱からホログラム乾板を取り出す。そしてガラス面、乳剤面を確認する (下図参照)。



- ② 乳剤面が確認できたら、露光物体側が乳剤面となるようにスタンドにセットする。
- ③ スタンドにセットできたら、感光しないようにスタンドごと箱に入れて露光場まで運ぶ。出来る限り感光しないように気をつけながら光学系にセットする。このとき、光に対して、 30° ~ 45° となるように調整する。

2.2.2 露光

露光手順

- ① ミラーなどの振動によって、干渉縞が形成されない恐れがあるので、ホログラム乾板をセットしてから、シャッター用の黒紙を持って10～20秒静かにする。
- ② 時間経過後、ゆっくりシャッターをあげて露光を開始する。露光物体にもよるが、本セットアップでは40秒露光する。時間はストップウォッチで正確に測る。
- ③ 時間経過後、ゆっくりとシャッターを閉じ、出来る限り感光しないように注意しながらスタンドごとホログラム乾板を箱に入れて暗室にもって行き現像する。

*今回、青色(488nm)、緑色(514nm)に感度のあるホログラム乾板を使用している為、どちらの波長の光でも出来る。その為、毎回2色試してもらつつもりである。

2.3 ホログラム現像

2.3.1 現像処理

現像手順

露光を行ったホログラム乾板を光が当たらないように暗室までもって行き、安全光の下で以下の手順をふむ。必ず乳剤面を上にして処理を行う。

- | | | | | |
|---|------------|---|-----------------------|------|
| ① | <u>現像</u> | : | ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。 | 3分 |
| ② | <u>水洗い</u> | : | 流水でよくすすぐ。 | 2分 |
| ③ | <u>定着</u> | : | ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。 | 5分 |
| ④ | <u>水洗い</u> | : | 流水でよくすすぐ。 | 2分 |
| ⑤ | <u>脱水</u> | : | ホログラム乾板を浸し、スーッと引き上げる。 | 30秒 |
| ⑥ | <u>乾燥</u> | : | クリップに挟み、ドライヤーで乾かす | 乾くまで |

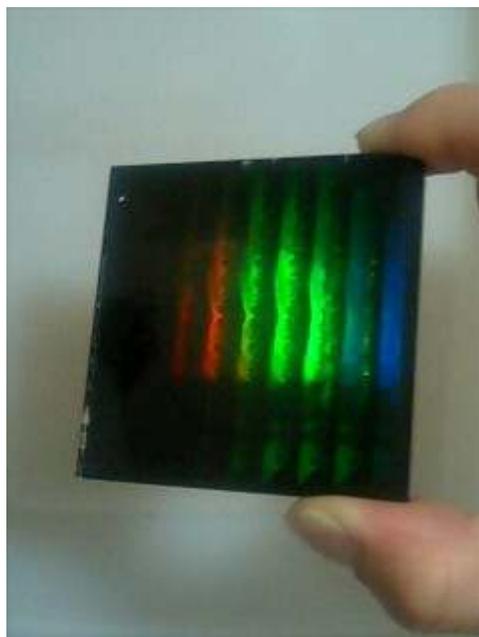
2.3.2 現像処理における注意

- 処理液には触れないように！
現像処理で使用する各液には手や皮膚に触れるとかゆみ・湿疹を生じることがあります。
- 乳剤面を上にして処理を行う。
うまく現像出来なくなることがある為。

第三章 製作したホログラム

3. 1 ホログラム確認

乾燥させたホログラムを白色光の下で傾きを変えながら見る。すると以下のような虹色が見える。これもホログラムの一種であり、この虹色が見えていなければ物体像を見ることは出来ない。



3. 2 ホログラム観察

ホログラムを露光したときのようにスタンドにセットして、同じように光学系をセットする。そして、乾板を微調整して像が出来ているか確認する。出来ていればETLの「ホログラム」の説明ページに載っている以上に立体的な像を見ることが出来るはずである。また、うっすらではあるが白色光の下でも像の有無を確認することが出来る。

3. 3 ホログラム再生像が見えない場合の原因と対策

1. 乾板に光が当たってなかった

なんらかの原因でレーザー光が遮られた場合、現像しても黒くならない。

⇒ 光学系をもう一度チェック！

露光のときに確かめられる。

2. 露光中、振動などのため干渉縞が記録できなかった

確かめるのは非常に困難。疑うべきところとして、

① シャッターとして用いた黒紙が露光中に光学部品などに当たらなかったか

② 干渉縞の安定度は大丈夫か ⇒ マイケルソン干渉計でみる

③ 乾板セットのときの振動が落ち着いてから（約 30 秒）露光を行ったか

3. レーザー光の出力が十分ではなかった

この場合は露光不足となって、現像の際乾板が十分に黒くならない。レーザー光の出力に関しては事前に確認しているため（488nm）、考えられるとすれば、決められた露光時間よりも短い時間しか露光しなかったことが考えられる。

4. 現像液を間違えたか、古くなっていた

現像液と思っていたものが定着液であったり、ドライウェルであったりして間違えたことが考えられる。この場合、現像液に入れる前に定着液やドライウェルに入れると黒くならない。現像液は使用期限以内であると判断している。

付録

A. 【用語の説明】

- ホログラフィ (Holography) とホログラム (Hologram)

干渉現象を利用して物体の情報を記録・再生する技術を総称して“ホログラフィ”と呼び、ホログラフィで物体の情報を記録・保存したものをホログラムと呼びます。光の干渉現象では、感光物質を使用した感光材料（銀塩、重クロム酸ゼラチン、フォトポリマー、フォトレジストなど）がホログラムに出来ます。今回、本プログラムで使用したのは銀塩です。
- 干渉 (Interference)

2つ以上の光（波動）が互いに強めあったり弱めあったりして、その強度が元の光の強度の和と異なる現象
- 干渉縞 (Interference Fringe)

干渉によりつよめあったり弱めあったりした光（波動）の強度分布が、空間的に変化ひて現れる明暗の縞
- 回折 (Diffraction)

光（波動）が物体の陰に回り込んだり、本来の直進する方向から異なる方向へ進む現象
- 参照光 (Reference beam)

光源から出て感光材料を直接照明する光で、物体光と干渉させる。何も情報を持たず参照（基準に）すべき光
- 物体光 (Object beam)

光源から出て光で物体に照射し、物体から透過したか、あるいは物体から反射した光
- 虚像 (Virtual Image)

光学系を通過した光線が実際の像の位置では交わらず、光線を逆向きに延長すると交わり見える像。フレネルホログラムの再生像は一般的に虚像
- 実像 (Real Image)

光線が実際に交わって作る像。スクリーンやすりガラスを実像の位置におくと像が現れます。マスターホログラム記録時の参照光と逆方向から共役光（参照光が平行光ならば共役光も平行光となる）を参照して作り出した再生像が実像になる。
- フレネル回折 (Fresnel Diffraction)

光源および観察面の少なくとも一方が回折物体に対して有限の距離にある場合に生じる回折現象

- マスターホログラム (Master Hologram)

イメージ型ホログラムを作成するとき、実像を作り出す元になるホログラム。通常は、平行な参照光で作られたフレネルホログラムを利用する。

- 反射型ホログラム (Reflection Hologram)

ホログラムを再生するとき、ホログラムに対して照射した証明光をホログラムの観察者側から証明することで再生像を得る、デニシユクホログラムやイメージ型リップマンホログラムがこれにあたる。

- 透過型ホログラム (Transmission Hologram)

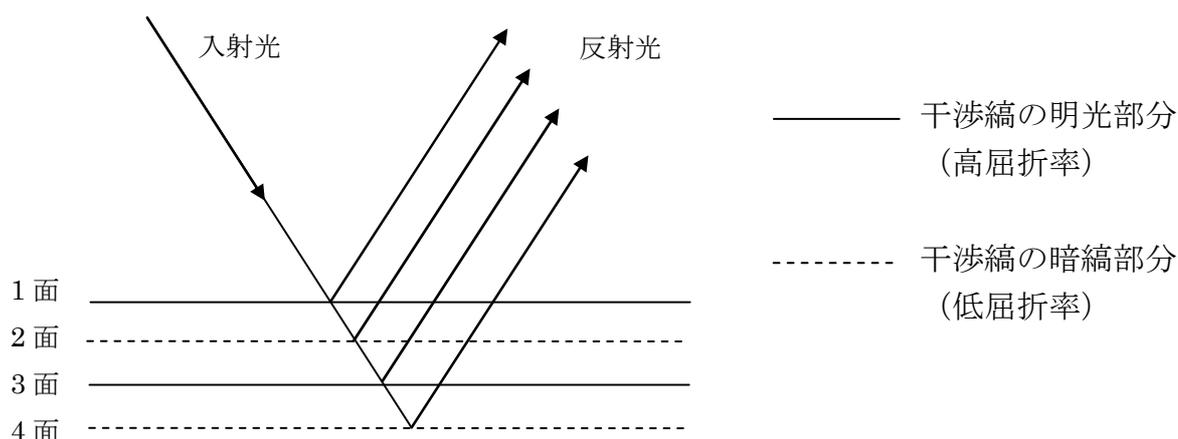
ホログラムを再生するとき、透過光により再生像が出来るホログラム。再生照明光をホログラムの背後から照明することで、再生像を得る。レインボウホログラムがこれの代表である。

本プログラムではこちらの方法をとっている。

B. ブラック回折

干渉縞の明暗でブラック回折を示すと次のように説明出来る。

下図のように全ての位相差が同じ (n の奇数倍なので、互いに強めあう)



1面	:	位相シフト	π			π
2面	:	位相シフト	0 (なし)	+光路差	$\pi/2*2$	π
3面	:	位相シフト	π	+光路差	$\pi/2*4$	3π
4面	:	位相シフト	0 (なし)	+光路差	$\pi/2*6$	3π

参考文献

1. 「ホログラフィ入門 ー原理と実際ー」 久保田敏弘 著 朝倉書店
2. 「ホログラフィー入門」 村田和美 著 朝倉書店
3. 久保田ホログラム工房 <http://homepage2.nifty.com/kubotaholo/>
4. 中央精機ホログラフィ 改訂5版 中央精機株式会社
<http://www.chuo.co.jp/index.html>