

中央精機のホログラフィ
改訂5版

中央精機株式会社

目次

< 撮影装置 編 >

1.ホログラフィとホログラム	..... 2
2.用語の説明	..... 4
3.簡単な説明	..... 6
4.ホログラフィで記録される干渉縞	..... 8
4- 1.反射型ホログラムに記録される干渉縞	..... 8
4- 2.反射型ホログラムに記録される干渉縞	.....10
5.ホログラムの製作について	.....12
6.ホログラムの物体について	.....13
7.ホログラフィで使用される主なレーザー光源と特徴	.....14
8.ホログラフィで使用される部品	.....16
9.ホログラムの製作	.....20
フレネルホログラフィ(1)	.....20
フレネルホログラフィ(2)	.....21
リップマンホログラフィ(1)	.....22
リップマンホログラフィ(2)	.....23
10.ホログラフィカメラ の紹介	.....24

< 現像処理 感光材料 編 >

11.ホログラフィ用感光材料に必要な特性	・・・26
12.ホログラフィ用感光材料の種類と特徴	・・・27
13.入手できるホログラフィ用感光材料について	・・・28
14.現像処理の手順について	・・・29
15.現像処理をおこなうときの注意事項	・・・31
16.現像処理の実際	・・・32
PFG - 03、PFG - 03Cの現像処理	・・・32
PFG - 03、PFG - 03Cの現像処理	・・・33
PFG - 03、PFG - 03Cの現像処理	・・・34
PFG - 03、PFG - 03Cの現像処理	・・・35
PFG - 03、PFG - 03Cの現像処理	・・・36
PFG - 03、PFG - 03Cの現像処理	・・・37
PFG - 03、PFG - 03Cの現像処理	・・・38
PFG - 03、PFG - 03Cの現像処理	・・・39
PFG - 01 - 45の現像処理	・・・40
一般的な現像処理	・・・41
一般的な現像処理	・・・42
17.参考資料と参考書の紹介	・・・47

ホログラムのあれこれ

再生方法によるホログラムの呼び方

反射照明で再生するホログラム
デニシユクホログラム
イメージ型リップマンホログラム

透過照明で再生するホログラム
フレネルホログラム
レインボウホログラム

反射照明はホログラムの
手前から照明する。
透過照明はホログラムの
背後から照明する。

白色光で再生できるホログラム

このタイプのホログラムが
一番多く見られる。

デニシユクホログラム
イメージ型リップマンホログラム
レインボウホログラム

記録方法によるホログラムの呼び方

フレネルホログラム
デニシユクホログラム
イメージホログラム
レインボウホログラム
リップマンホログラム
を含む

記録方法により干渉縞の
でき方が変わる。
干渉縞のでき方で再生の
方法が決まる。

攝影裝置 編

1.ホログラフィとホログラム

一見して何も写っていないように見える1枚のフィルムから、まるで物体が実在しているかのような3次元像が浮かび上がる……。

この現代の光の魔術”ホログラフィ”は私たちを美しくも不可思議な幻影の世界へと導いてくれます。

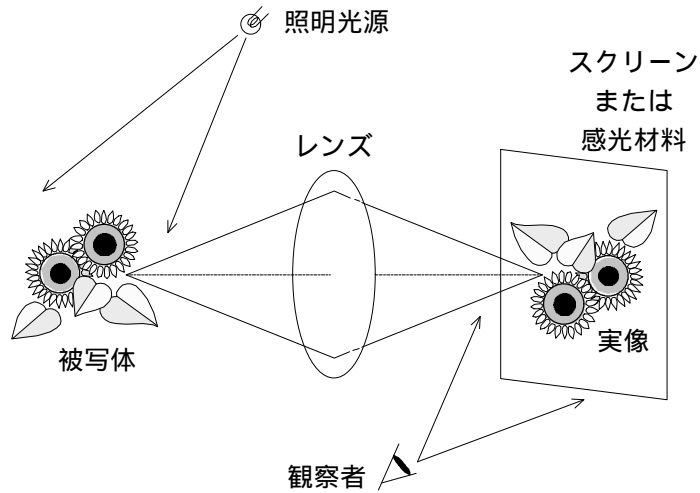
人類は記録とコミュニケーションの手段として、さまざまな表現技術を創り出してきましたが、ホログラフィは現実世界に最も接近することのできる記録・再生技術として、今後、私たちの文化に大きく貢献することになるでしょう。

夢の3次元ディスプレイと言われるホログラフィは、1960年にレーザーと呼ばれる新しい”コヒーレント”な光を人工的に創り出すことが可能となって、始めて実現されました。この新しい光の登場によって、現在私たちは、レーザーディスプレイやホログラムなど、日常を超えた光の世界を散策することができるようになりました。”hologram”（ホログラム）とは、ガボールが物体からの光をすべて記録できるという意味で、ギリシャ語の”完全な”を意味する言葉”holos”と”記録したもの”を意味する言葉”gram”の2つの言葉をあわせて付けた名称です。また、このようにして記録・再生する技術に対しては、ホログラムと写真技術を意味するフォトグラフィとから

”holography”（ホログラフィ）と言う合成語が用いられます。

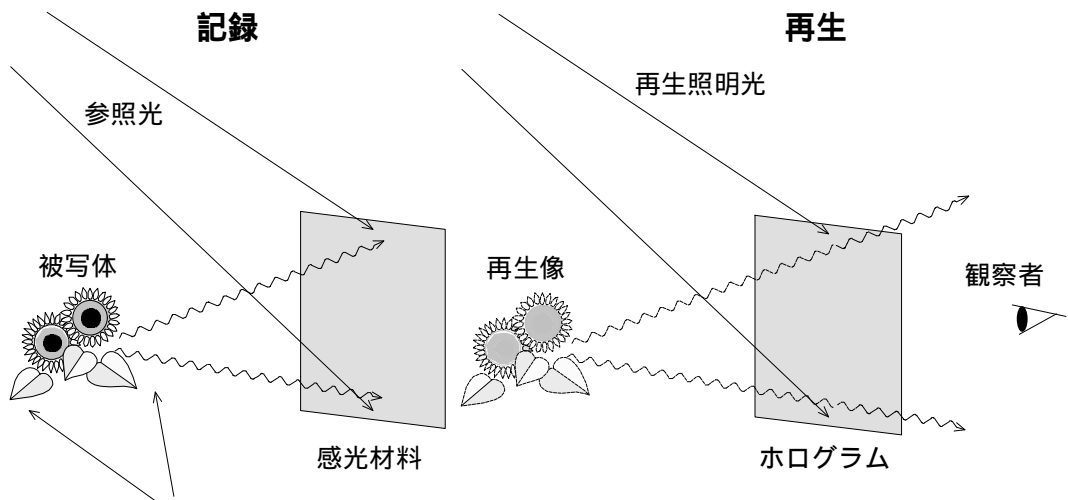
従来の写真による記録では物体からの光をレンズなどで感光材料上に結像させ、その像の光強度（光の振幅の2乗）の分布状態を記録しています。この方法では物体像の振幅（明暗情報）はそのまま記録されますが、物体の位置を示す位相（光の持つ性質）に関する情報を感光材料に記録することはできません。つまり従来の写真技術で得られた画像では元の物体の位置を表わす情報が含まれていないのです。そのために、立体感のない平面的な像となり、物体を実際に観察した状態とは異なったものになってしまいます。

ところが、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ます。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ですが、ホログラフィでは物体からの光（以後、物体光と呼ぶ）と同一光源（レーザー）から出て直接感光材料に達する光（以後、参照光と呼ぶ）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ます。これを現像処理したものをホログラムと呼び、この様にして記録された干渉縞の強度分布には物体光の振幅（被写体の明暗情報）ばかりでなく位相情報（被写体の位置情報）も含まれている事になります。



写真技術による被写体の記録と再生の方法

光学レンズによる被写体の記録法。電球等で照明された被写体を光学レンズで写真乾板やフィルム上に結像し、露光させる。観察者は現像定着処理によりできた像を見る事ができる



ホログラフによる被写体の記録と再生の方法

記録：レーザー光を2光束に分け、一方は被写体を照明する（物体照明光）。他方はミラーを介して感光材料を直接照明（参照光）し被写体からの散乱光（物体光）と干渉させ、その干渉縞を記録する。

再生：現像・定着後の乾板（ホログラム）を記録時の参照光と同じ光（再生照明光）で照明する。ホログラム内の細かい干渉縞により照明光が回折され、被写体の像が忠実に再生される。

2.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）がホログラムにできます。

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、その強度がもとの光の強度の和と異なる現象。

干渉縞(INTERFERENCE FRINGE)

干渉により強めあったり弱めあったりした光（波動）の強度分布が、空間的に変化して現れる明暗の縞。

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)

光源から出た光で物体に照明し、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。スクリーンやスリガラスを実像の位置に置くと像が現れます。

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）を照明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製作するとき、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照明光の進む方向とは逆の方向に再生光が出て行くホログラム。再生照明光をホログラムの観察者側から照明することで再生像を得る、デニシュ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なる。

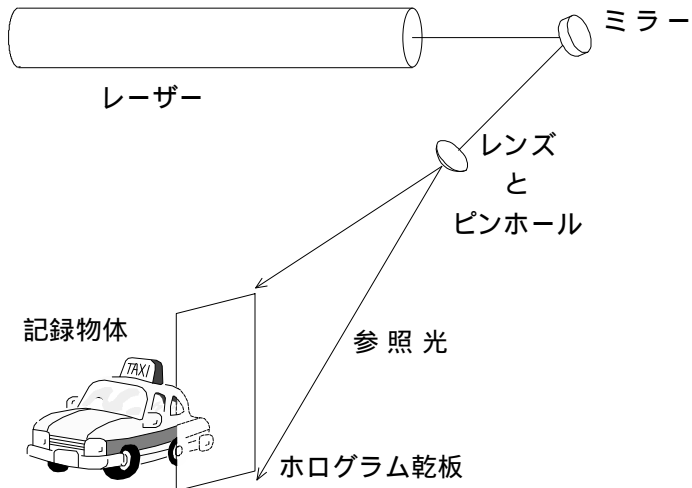
透過型ホログラム(TRANSMISSION HOLOGRAM)

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。

3.簡単な説明

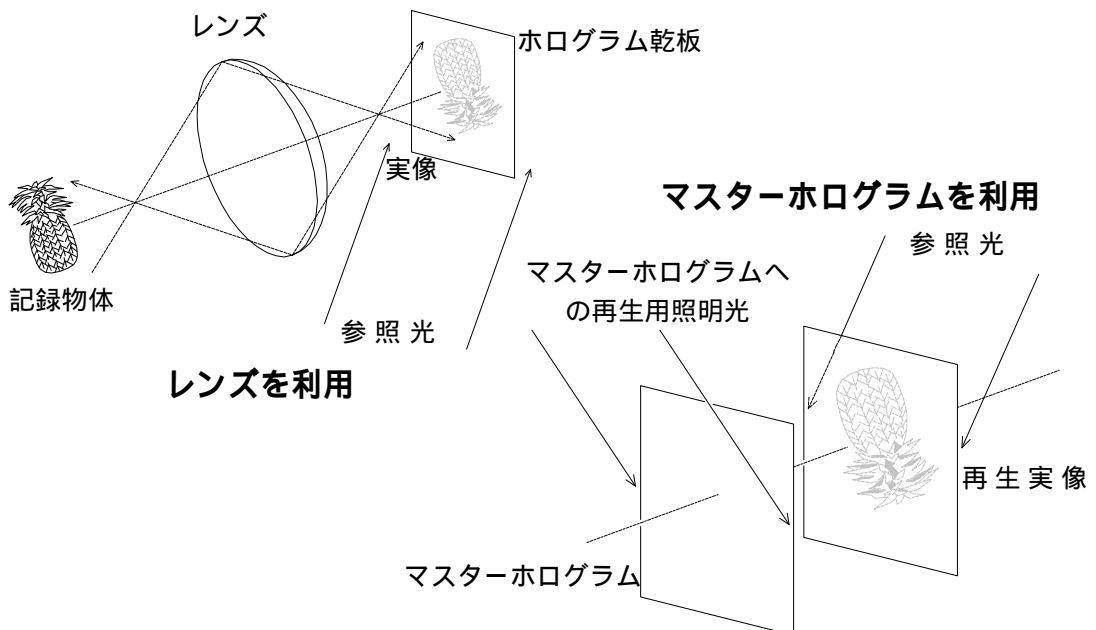
デニシユクホログラム (DENISYUK HOLOGRAM)

Y. DENISYUK 博士の考案したホログラム。1 光束で記録材料と記録物体の両方を照明し、反射型ホログラムを製作することができる。



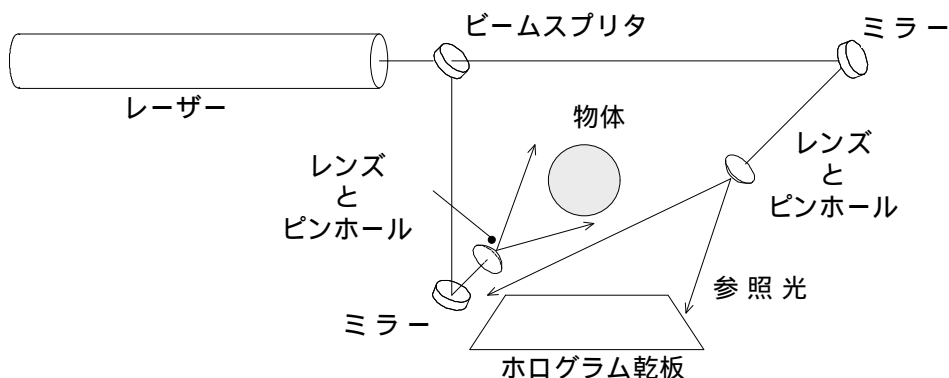
イメージホログラム (IMAGE HOLOGRAM)

レンズで結像した物体像や、マスターホログラムからの再生実像を物体光として記録するホログラム。物体光の記録方法（干渉縞の記録方法）で反射型ホログラム、透過型ホログラムのどちらも製作できる。



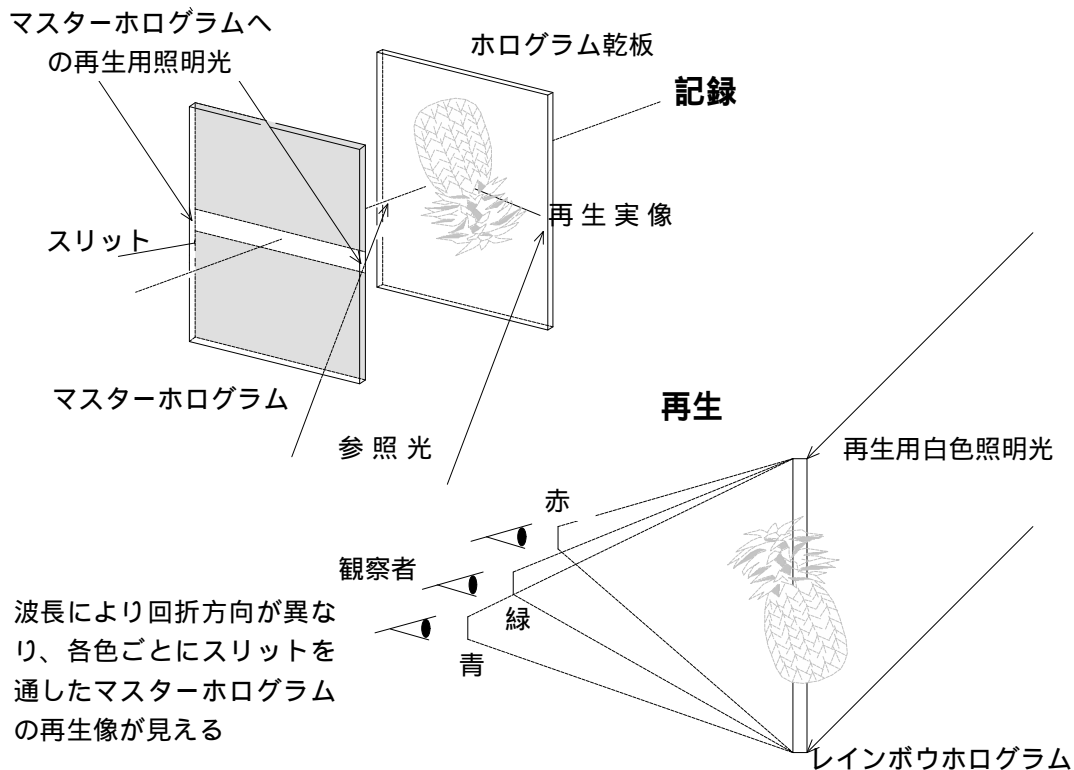
フレネルホログラム (FRESNEL HOLOGRAM)

ホログラムに記録する物体とホログラム乾板との距離が近く、物体光がフレネル回折光として扱えるホログラム。ホログラム乾板の片面（感光物質の塗布面）に参照光と物体光を当てる記録方法を取り、記録した光源を使用しないとホログラムから再生はできない。イメージホログラムのマスターとして使用される。



レインボウホログラム (RAINBOW HOLOGRAM)

S. A. BENTON 博士（ベントン、当時ポラロイド社で現 MIT）が考案したホログラム。このホログラムを透過照明で白色光再生すると、ホログラム製作時に使用したスリットによる回折により再生像が虹色に変化して見えることから、レインボウホログラムと呼ばれる。

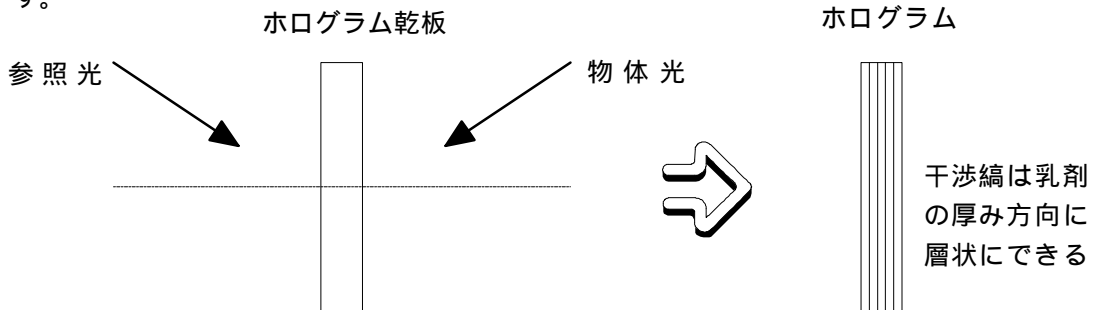


4. ホログラフィで記録される干渉縞

ホログラフィで記録される干渉縞は、記録方法により2種類に大別できます。

4-1. 反射型ホログラムに記録される干渉縞

反射型ホログラム（デニシュクホログラム、イメージ型リップマンホログラム）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ます。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等分線方向です。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ます。



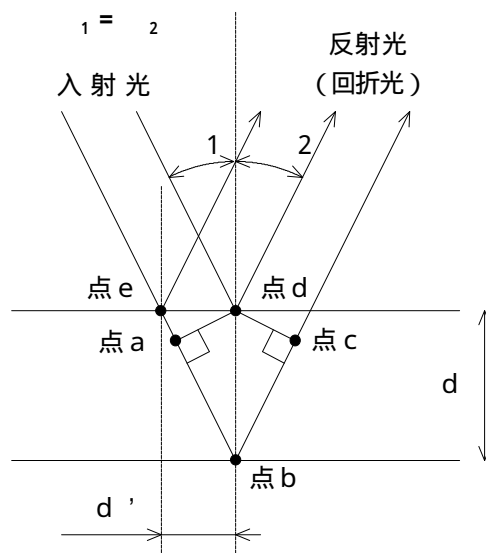
この層状に記録された干渉縞に再生用白色照明光を当てると、特定の入射角の光、特定の波長だけを強く回折（反射）する作用をします。この作用はブラッグ回折（反射）と呼ばれ、次のような条件を満たす場合だけ生じます。

点dで反射した光と点bで反射した光が互いに強め合うには、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

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

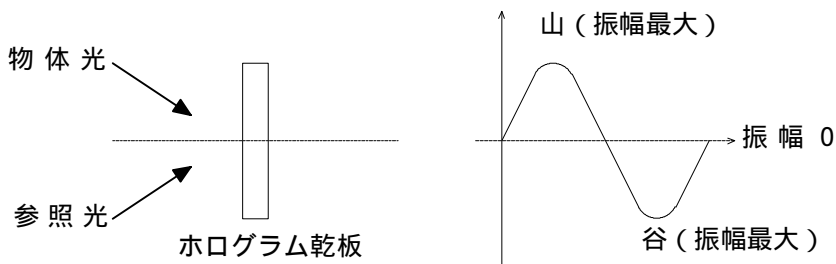
点eで反射した光と点dで反射した光が互いに強め合うには、次の条件が必要となる。

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



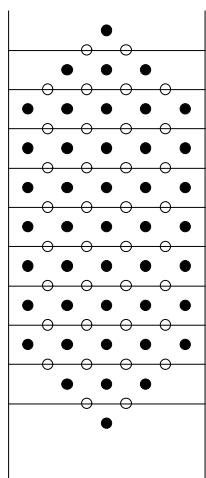
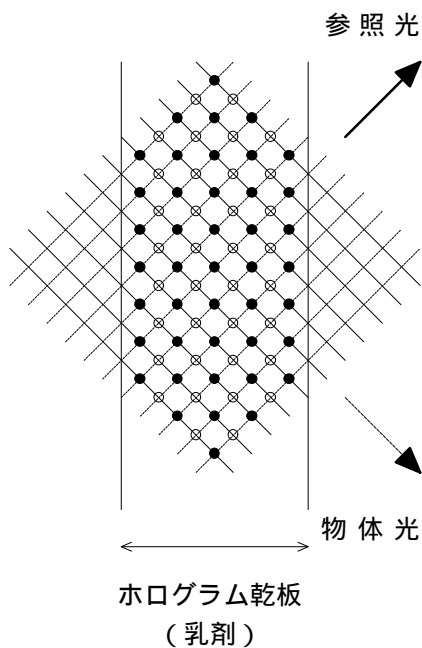
4-2. 透過型ホログラムに記録される干渉縞

透過型ホログラム（フレネルホログラム、レインボウホログラム）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ます。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等分線方向です。



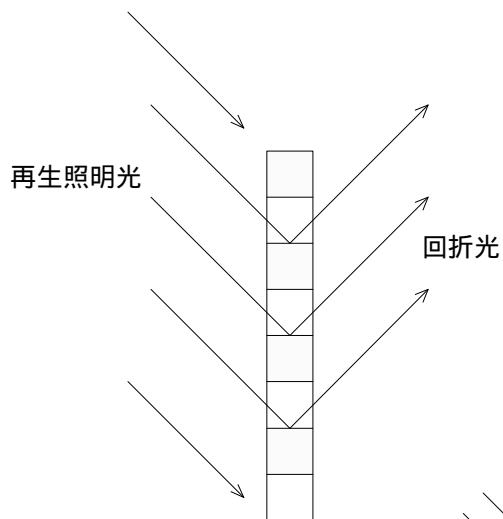
物体光と参照光をホログラムの乾板の両方面から入射させると、山と山あるいは谷と谷で互いに強め合い（印）、山と谷または谷と山では弱め合う（印）。これを図で示すと右図のようになり、印どうし、印どうしを結ぶ線が出来る。

- 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

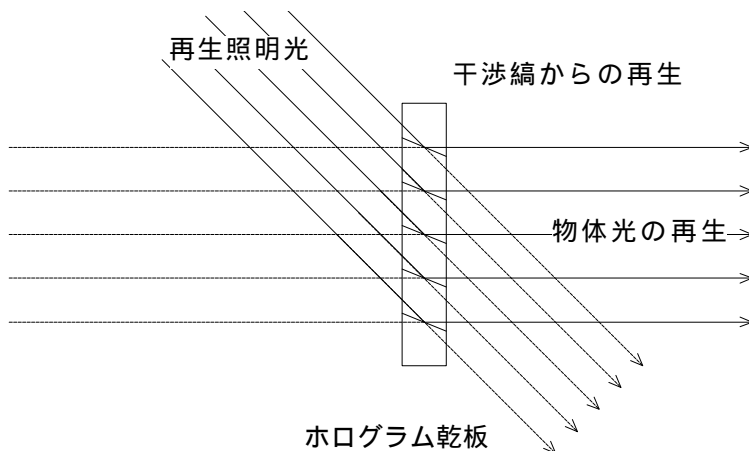
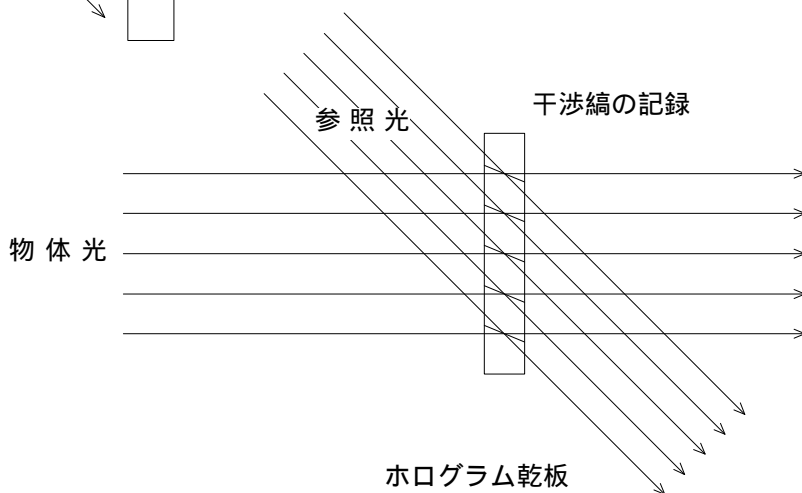


印を結ぶと、乳剤面と垂直な線が得られる。この線は干渉により強められた部分で、干渉縞の明縞（露光部分）になる。

記録された干渉縞に記録時と同じ波長、入射角度で再生照明光を当てます。干渉縞は再生照明光を特定方向へ強く回折する作用をし、これが各部分の干渉縞でおこなわれると互いに強め合い、回折光が作られる。



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。



5.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ました。

注 意 点	内 容
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。 発振出力が安定するように固定し、放熱・冷却をおこなう。 単一波長、シングルモード、直線偏光出力のレーザー光を使用する。
除 振	床などからの振動が定盤上に伝わりにくい（理想的には伝えない）ようにする。 除振台を使用する。 できるだけ静かな環境（近くで車や電車が走らない）でおこなう。
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、暗室を使用する。 レーザー光の調整が容易にできるように、暗室を使用する。 暗室の代わりに暗幕で作業場を作る。 除振台 + 作業できる空間 を必ず設ける。
光 学 系	参照光と物体光の光路長は、必ず0付近まで合わせる。 ミラーは表面（反射）鏡を使用する。 できるだけスペシャルフィルタ（レンズとピンホール）を使用する。 参照光には平行光を利用すると、便利になることが多い。 参照光と物体光の光量比が調整できるように、NDフィルタ等を使用する（デニシユクホログラムは除く）。 光軸をできるだけ低くする（作業性と振動を考慮して）。
固 定	着磁性のある定盤では、必ずマグネットスタンドをONにする。 スタンドなどの固定用つまみは、必ず最後まで締め付けて固定する。 着磁性のない定盤ではタップ（ねじ）等を使用する。
遮 光	レーザー光源からの漏れ光は、カバーシートや黒模造紙などで隠す。 反射による漏れ光は、ホログラム乾板に入らないように遮光板を使用する。 使用している部品（ミラーホルダなど）のシャフトも、できるだけ黒模造紙等で反射の生じないようにする。
安 定	光学系の調整は、区切りごとに安定時間を設け、振動を除いてから次の作業に入る。 ホログラム乾板を固定してから、数分の時間を置き安定させてから露光を開始する。

6.ホログラムの物体について

ホログラムの記録に適・不適な物体について簡単にまとめました。

ホログラムに適した物体	ホログラムに適さない物体
動かないもの（石、置物など） 反射率の高いもの 反射光が拡散するもの ホログラムサイズより小さいもの 奥行きが適当なもの など	人間や動・植物など（常に）動くもの 反射率の低いもの 反射光が拡散しないもの（鏡など） ホログラムサイズより大きいもの 奥行きのあるもの（可干渉距離以上） など

適・不適についての説明

・ホログラフィでは干渉縞で物体情報を記録します。光源の出力や感光材料の特性から写真撮影のように瞬間的に記録することができません（パルス発振の光源ならば可能）。数秒から数百秒の記録中、常に干渉縞が安定し同じ状態を保っていることが必要です。このため、動いてしまうもの・常に動いているものは記録できません。記録中に動かないもの、固定できるものは適しているといえます。

・物体の表面から反射してくる光が弱いと、それだけ露光時間が多く必要となり、干渉縞が嫌う振動や物体の経時変化（しだいに動いてしまう）を受けやすくなります。反射が多ければ、露光時間を短縮でき、良質に記録できる可能性が高くなります。

・鏡など特定方向に強い反射をするものは、強い部分と弱い部分の差が大きくなりすぎ、干渉縞としてではなく像として焼き付いてしまうことがあります。ホログラム自体に跡が残るだけでなく、再生像の明るさのバランスも崩れてしまいます。物体表面がザラザラしたものや、凹凸のあるものは一様に反射するため、良好な再生像が得られます。

・ホログラムサイズより小さい物体は、ホログラムを通して全体を見ることができます。ホログラムサイズより大きい物体では、一部分だけしか見ることができません。もし、全体を見えるようにするには、物体はホログラムから遠く離れ、小さくなります。ホログラムサイズに対してやや小さい物体が適当です。

・奥行きのあるもの（たとえば電車や飛行機の模型、ヘビの置物など）は反射を得るための照明光を十分に当てられませんが、レーザー光源の可干渉距離（He-Neレーザーで300mm程度）の問題で記録できない場合があります。

7.ホログラフィで使用される主なレーザー光源と特徴

光源の種類	特徴
He-Neレーザー	<p>主な発振波長：0.6328 μm (赤色) 出力：最大約100mW、連続発振 He (ヘリウム) と Ne (ネオン) の混合ガスを利用 可干渉距離：数百mm以下 大型 (箱型) は10mW以上の直線偏光出力 小型 (円筒状) は10mW以下でランダム偏光または直線偏光の出力 現在最も普及しているレーザー光源 比較的安価で容易に入手できる</p>
半導体レーザー	<p>主な発振波長：0.635 μm、0.650 μm、0.670 μm (赤色近辺) 出力：機種により10mW程度、連続発振 半導体のpn接合を利用するダイオードレーザーが主 可干渉距離：実用で1m程度まで 直線偏光出力とそれ以外がある He-Neレーザーの置き換え用に急速に普及している小型・軽量のレーザー光源 温度変化で出力・波長が変化しやすい</p>
Nd-YAGレーザー	<p>主な発振波長：0.532 μm (緑色) 1.064 μmの第二高調波で半分の波長で使用するのが一般的 出力：機種により数十mW～数Wまで、連続発振 Nd (ネオジウム)、Y (イットリウム)、Al (アルミニウム)、Garnet (ガーネット) による固体を利用したレーザー 可干渉距離：実用で数m程度まで 直線偏光出力 Arレーザーより小型・軽量、また空冷式のため緑色系でよく使用される</p>
Arレーザー	<p>主な発振波長：0.457 μm (青紫色)、0.488 μm (青色) 0.514 μm (緑色) 出力：数mW (空冷式)～数十W (水冷式)、連続発振 Ar (アルゴン) ガスを利用 可干渉距離：数m (エタロン板で波長選択性を高めた場合) 水冷式は高出力であるが高電流 (数十アンペア) が必要 波長を切換えて発振できる製品もある 空冷式は冷却ファンの振動がある カラーホログラムの青・緑色用に使用される</p>

これ以外にも クリプトンレーザー (発振波長：0.647 μm) や He-Cdレーザー (発振波長：0.442 μm) などが使用されます。

レーザー (LASER) は、"放射の誘導放出による光の増幅" を意味する

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭文字から命名されました。

〔 ホログラフィに必要なレーザー光源の特性 〕

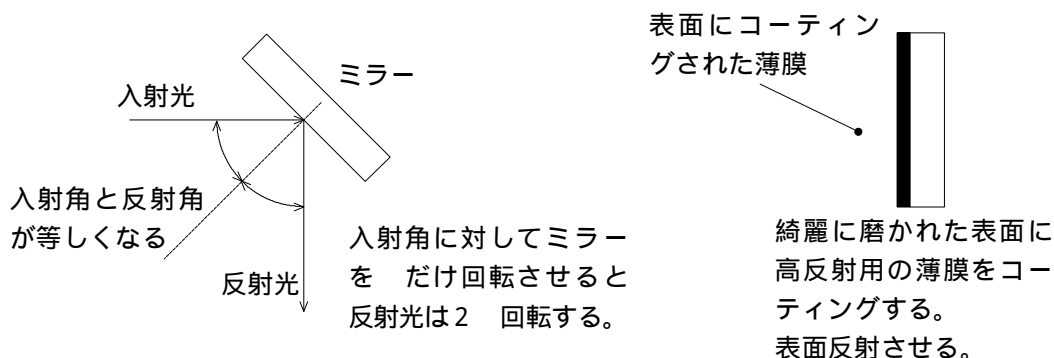
項 目	内 容
干渉性	可干渉距離が長いこと。 より大きな物体を記録でき、光学系の調整が容易。
偏 光	直線偏光出力であること。 干渉現象は同一偏光面どうして生じる。
波 長	単一波長であること。 干渉縞を鮮明にできる。
出 力	できるだけ大出力であること。 露光時間を短縮できる。

8.ホログラフィで使用される部品

ミラー (ミラーホルダ)

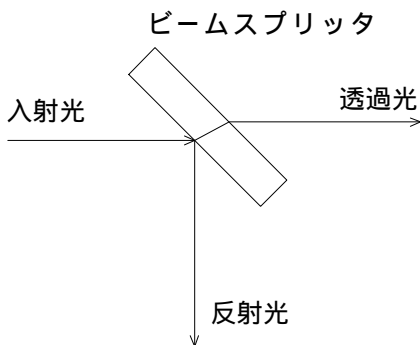
ミラー表面に入射した光を反射させ、進路を変える働きをする光学部品です。入射光に対して反射光が損失なく反射されるように、表面に薄膜（はくまく）をコーティングして反射率を高めています。アルミ薄膜をコーティングしたもの（アルミミラー）は、可視光に対して90%程度の反射率を持ちます。より高い反射率を必要とする場合は、使用する波長と反射角度に制限を受けますが、誘電体多層膜をコーティングしたミラー（誘電体多層膜ミラー）を使用します。

ミラーは、縦と横の角度調整が出来る専用のホルダを使用すると微調整（1°以下の角度調整）も容易に出来ます。

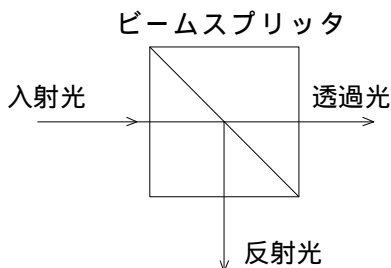


ビームスプリッタ

入射光を反射光と透過光に分ける部品で、特に反射光と透過光を同じ比率にするものをハーフミラーと呼びます。ビームスプリッタは、意図的に反射光と透過光の比率を変えた製品もあり、形状も板状と立方体のものがあります。立方体は反射光と透過光が互いに直角に出射し入射した後の光路長が等しくなります。板状では、反射光を任意の方向に指向することができますが、透過光はビームスプリッタ内部で屈折してから出射されるため、入射光とは平行ですが同一直線上にのりません。



ビームスプリッタ (板状)

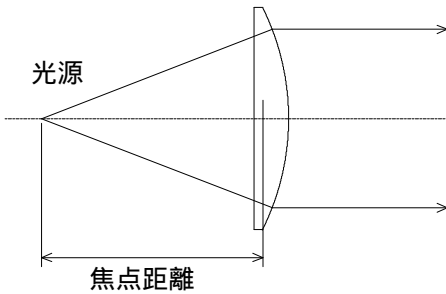


ビームスプリッタ (立方体)

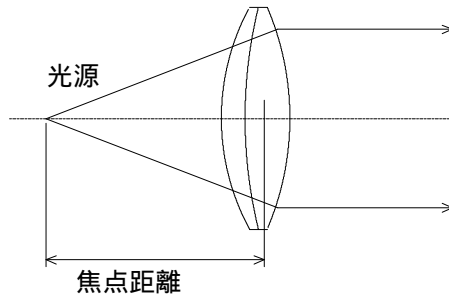
レンズ

レンズは入射光を集光・発散させる働きをする光学部品です。凸レンズと凹レンズがあり、さらに平面・球面（凸面、凹面）・非球面などの面形状が組み合わせられます。凸レンズは主に集光する場合に、凹レンズは拡散（発散）させる場合に使用します。ホログラフィでレンズは平行光を作る用途に使われることが多く、平凸レンズまたはアクロマティックレンズ（コリメーティングレンズ）を使用します。

レンズの焦点距離は使用する波長で変化（波長により屈折率が異なるため）するので、平行光を作る場合には注意が必要です。



平凸レンズによる平行光化



アクロマティックレンズによる平行光化

スペシャルフィルタ

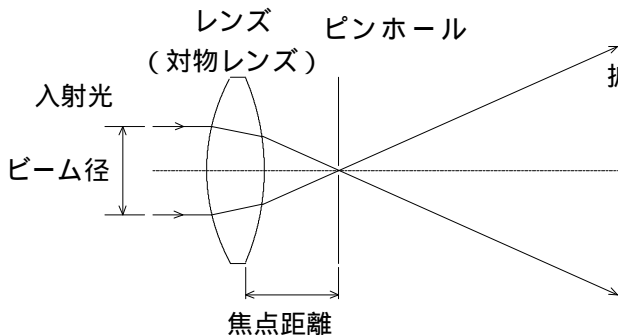
スペシャルフィルタはレンズとピンホールで構成され、レンズの集光位置にピンホールを配置することでゴミやレンズのキズなどによる不要な干渉縞を取り除き、ノイズのない綺麗に整形された拡散光を作ります。スペシャルフィルタは空間フィルタリングに使用する器具であることから、このように呼ばれています。

スペシャルフィルタで使用するレンズは、顕微鏡用の対物レンズが使用されます。これは短焦点距離（数mm）、球面収差が補正してある、などの理由からです。ピンホールは使用する光源の波長、対物レンズ焦点距離から計算され、適切な直径のもの（数 μm ～50 μm 程度）を使用します。

$$d = 4 f \quad /$$

$$D = 2 d = 8 f \quad /$$

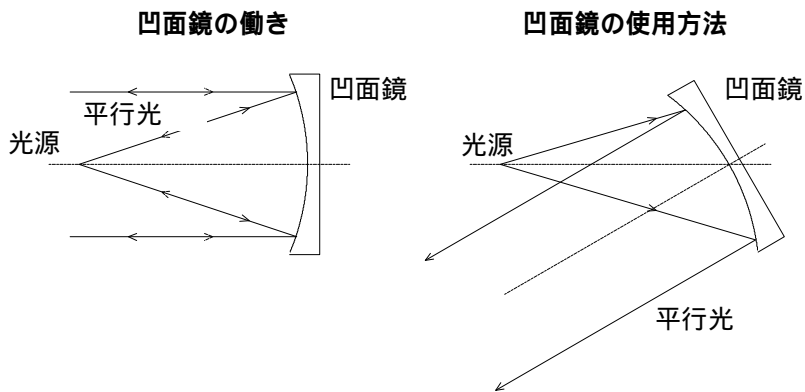
入射光のビーム径は、強度が $1/e^2$ となる直径を利用します



レンズの焦点距離 : f
 入射光のビーム径 :
 使用光源の波長 :
 集光位置でのスポット径 : d
 ピンホール径 : D

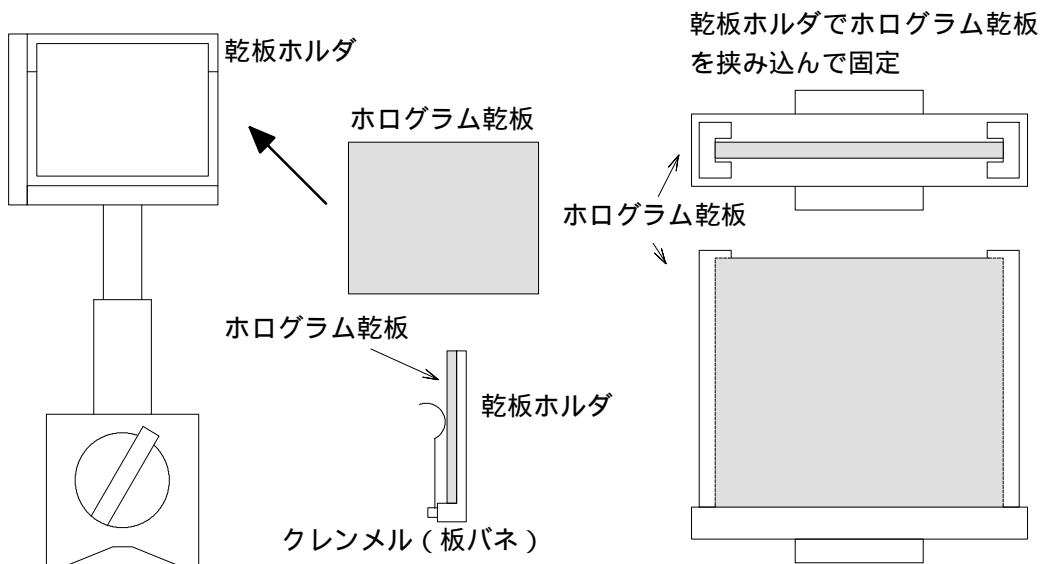
凹面鏡

凹面鏡は、焦点位置からの拡散光を平行光にしたり、平行光を焦点位置に集光させる場合に使用する光学部品です。レンズに比べ大口径でも安価・容易に製作できるので多く使用されています。ホログラフィでは平行参照光を作るときに使用されます。



乾板ホルダ

ガラス製のホログラム乾板を保持・固定する部品です。乾板サイズの大小によりいくつかの種類と保持方法があります。4×5インチ(101.6×127mm)までは乾板の端部をクレンメル(板バネ)などで押さえて固定できますが、8×10インチ(203.2×254mm)より大きなものは端全体を挟み込んだり、吸着(真空ポンプを使用)させたりします。反射型ホログラムでは長時間露光になりやすく、記録される干渉縞の間隔が細かいので、固定を十分に行います。

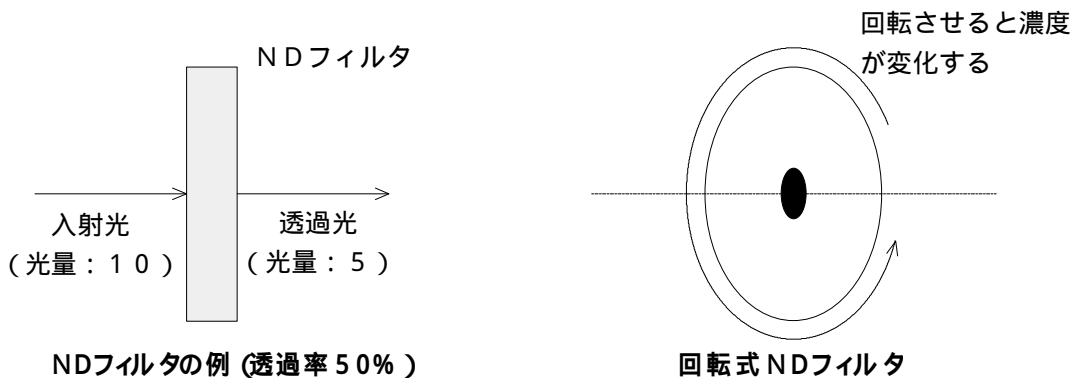


NDフィルタ

NDフィルタは透過する光量を調整するために使用する光学部品で、波長に依存しない濃度特性を持つので、ニュートラルデンシティ（頭文字の略ND）フィルタと呼ばれます。

NDフィルタ単体で1種類の透過率を持つもの、回転式の円盤上に段階的に透過率が変化するようにしたものなどがあります。

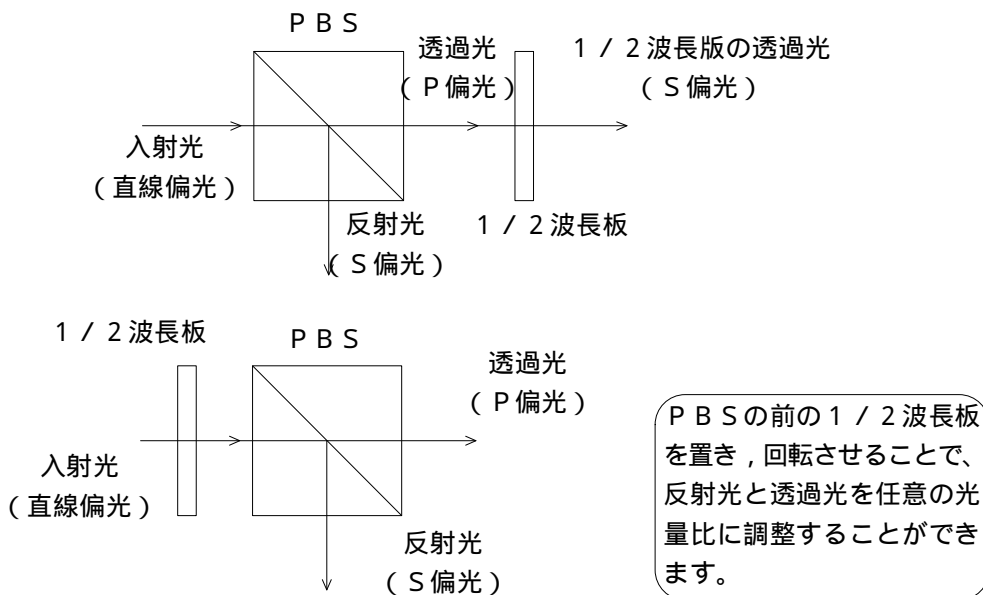
ホログラフィでは、物体光と参照光の光量比を調整するために使用されます。



波長板 (1/2波長板)

1/2波長板は直線偏光出力レーザー光の偏光面を回転させ、干渉の条件を整えるために使用される光学部品です。特に、偏光ビームスプリッタ (PBS) を使用した場合、透過光と反射光の偏光面が 90° 異なるため、これを合わせるために1/2波長板を使用します。

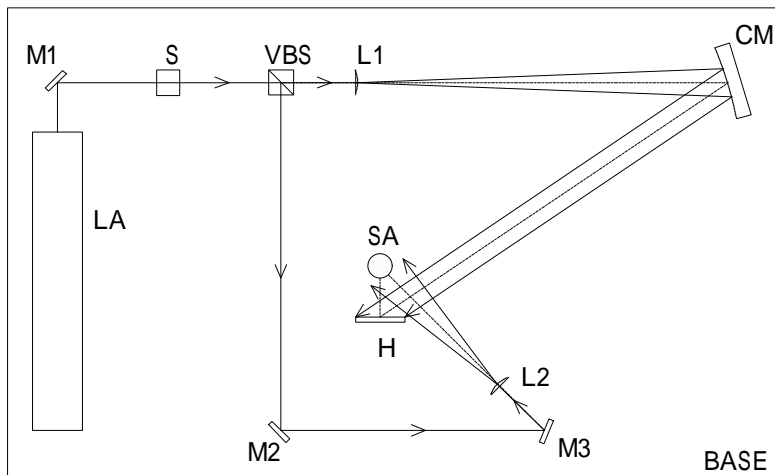
また、1/2波長板とPBSを組み合わせて、連続光量可変のビームスプリッタを構成することができます。



9.ホログラムの製作

フレネルホログラフィ(1)

フレネルホログラフィ(1)光学系 略図

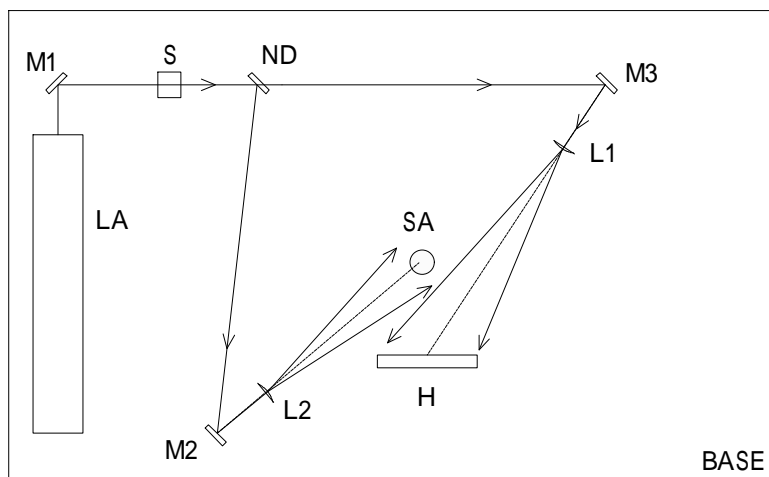


記号	品名	構成ユニット	個数
BASE	ベース	空気バネ式精密除振台とコンプレッサを使用	1
LA	レーザー光源	レーザー管と電源、レーザー管ホルダセット	1
S	シャッター	メカニカルシャッターとホルダセット、リリース	1
M1~M3	ミラー	ミラーとそのホルダセット	3
VBS	光量可変ビームスプリッター	分割光量を可変する波長板とPBSのホルダセット	1
L1,L2	スペイシャルフィルタ	対物レンズとピンホールによる空間フィルタセット	2
CM	凹面鏡	平行光用の凹面鏡とホルダセット	1
H	ホログラム	感光材料保持用の乾板ホルダセット	1
SA	試料台	撮影物体用の固定台セット	1
P	偏光板	VBS調整用の偏光板とホルダセット	1

このフレネルホログラフィ(1)光学系では、レーザー光再生型ホログラムを製作できません。

フレネルホログラフィ(2)

フレネルホログラフィ(2)光学系 略図



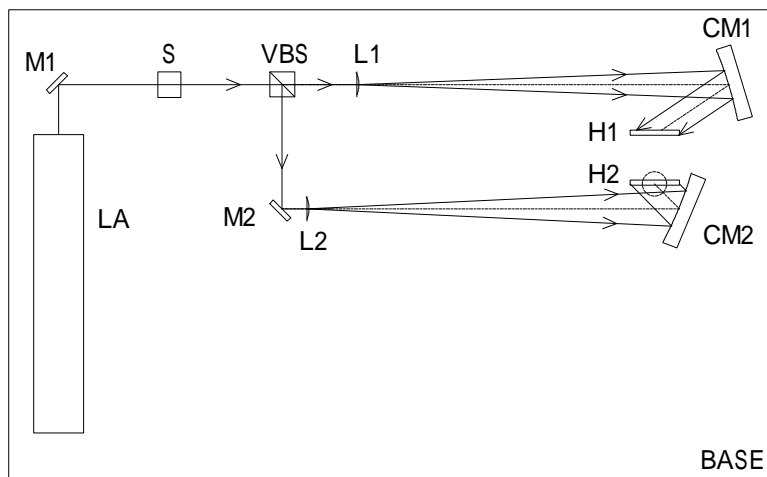
記号	品名	構成ユニット	個数
BASE	ベース	空気バネ式精密除振台とコンプレッサを使用	1
LA	レーザー光源	レーザー管と電源、レーザー管ホルダセット	1
S	シャッター	メカニカルシャッターとホルダセット、リリース	1
M1 ~ M3	ミラー	ミラーとそのホルダセット	3
ND	NDフィルタ	回転式NDフィルタとホルダセット	1
L1, L2	スペイシャルフィルタ	対物レンズとピンホールによる空間フィルタセット	2
H	ホログラム	感光材料保持用の乾板ホルダセット	1
SA	試料台	撮影物体用の固定台セット	1

このフレネルホログラフィ(2)光学系では、レーザー光再生型ホログラムを製作できません。

イメージ型ホログラム用のマスターホログラムを製作する場合には、レンズ等を利用して参照光を平行光にしてください。

リップマンホログラフィ(1)

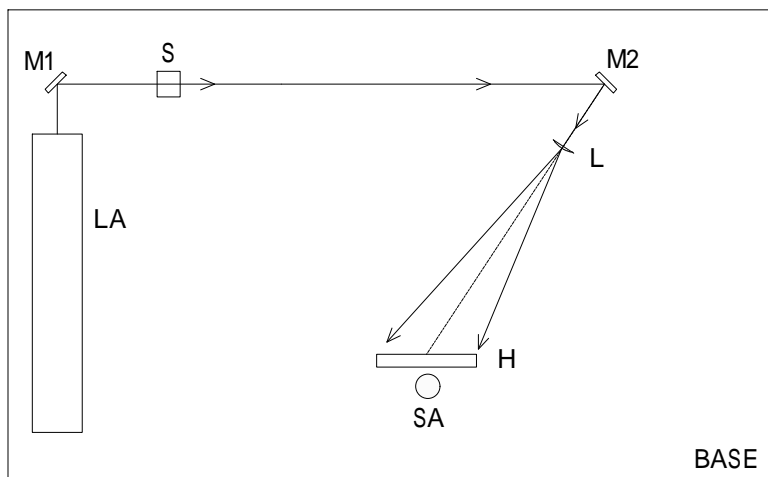
リップマンホログラフィ(1)光学系 略図



記号	品名	構成ユニット	個数
BASE	ベース	空気バネ式精密除振台とコンプレッサを使用	1
LA	レーザー光源	レーザー管と電源、レーザー管ホルダセット	1
S	シャッター	メカニカルシャッターとホルダセット、リリース	1
M1, M2	ミラー	ミラーとそのホルダセット	2
VBS	光量可変ビームスプリッター	分割光量を可変する波長板とPBSのホルダセット	1
L1, L2	スペイシャルフィルタ	対物レンズとピンホールによる空間フィルタセット	2
CM1, 2	凹面鏡	平行光用の凹面鏡とホルダセット	2
H1, H2	ホログラム	感光材料保持用の乾板ホルダセット	2
P	偏光板	VBS調整用の偏光板とホルダセット	1

リップマンホログラフィ(2)

リップマンホログラフィ(2)光学系 略図



記号	品名	構成ユニット	個数
BASE	ベース	空気バネ式精密除振台とコンプレッサを使用	1
LA	レーザー光源	レーザー管と電源、レーザー管ホルダセット	1
S	シャッター	メカニカルシャッターとホルダセット、リリース	1
M1, M2	ミラー	ミラーとそのホルダセット	2
L	スペイシャルフィルタ	対物レンズとピンホールによる空間フィルタセット	1
H	ホログラム	感光材料保持用の乾板ホルダセット	1
SA	試料台	撮影物体用の固定台セット	1

このリップマンホログラフィ(2)の光学系では、1光束で感光材料と物体を照明するリップマンホログラム(デニシュクホログラム)を製作できます。

10.ホログラフィカメラ の紹介

ホログラフィカメラ は中央精機の長年におよぶ技術から生まれました。5 mW直線偏光出力のHe - Neレーザーを使用し、光学系の切り替えにより3種類のホログラムを撮影することができます。

特徴

4×5インチ縦サイズのホログラム
が製作可能

光学系の切り替えにより フレネル
リップマン レインボウ の各
ホログラムが製作可能

撮影開始までの待ち時間設定が
可能なアナログタイマー機能付き

フレネルホログラフィ用参照光に
平行光を使用



ホログラフィカメラ

仕様

内蔵光源	He - Neレーザー	5 mW
製作可能なホログラム	フレネル、リップマン、レインボウの各ホログラム	
シャッターの設定時間	0.12 sec. ~ 1 hour	アナログタイマー
本体寸法	360 (W) × 500 (D) × 465 (H) mm	
本体質量	27 kg	
電源	AC100V	50 / 60 Hz

現像処理・感光材料 編

11.ホログラフィ用感光材料に必要な特性

干渉現象を利用して物体情報を記録するホログラフィでは、単色光（単一波長）で作られる干渉縞を記録する特性が優れている感光材料が望まれ、また使用する必要があります。カラーホログラムでは複数の波長を使用しますが、使用する特定波長に対しての特性が優れていることが要求されるのは同じです。

特 性	内 容
解像力	互いに接近した2つ（点、または線）をどこまで区別できるかを示す能力で、これが高い（高解像力）ほど微細な干渉縞を忠実に記録できる。 一般に短波長ほど解像力が要求される。 銀塩粒子を使用している感光材料の解像力に比べ、粒子を持たないDCG（重クロム酸ゼラチン）などはより高い解像力を持つ。 反射型ホログラム用の乾板には高解像力が要求される。
露光感度	干渉縞を記録するのに必要な露光エネルギーで、露光感度が高い（必要な露光エネルギーが低い）ほど使いやすくなる。 高解像力の感光材料は、銀塩粒子が非常に細かいため露光感度が低くなる。 現像処理（使用液、温度など）により露光感度の具体的な数値は変化する。
分光感度	光に対する感光性がどのくらいの波長域まで持つかを示す。 単一波長の光源であればあまり影響を受けないが、カラーホログラムなど広い範囲で複数の波長を使用する場合に問題となる。 一般に、青・緑色用の感光材料は赤色には感光性をまったく持たないが、赤色用の感光材料は青・緑色にもいくらかの感光性を持つ。
粒子サイズ	解像力と露光感度に影響し、微粒子ほど高解像力にできるが、露光感度が低くなる。 波長が短いほど必要な解像力を得るための干渉縞間隔が細くなるので、より微細な粒子サイズが必要になる。
乳剤の強さ	感光物質を含んで塗布されている乳剤（特にゼラチン）は、ある程度の硬さ（丈夫さ）がないと、現像処理中に剥離（はくり）したりキズが付きやすくなる。 また、硬いと現像薬品の浸透が遅くなる。
サイズ	ホログラムサイズは製造メーカーの規格で決められているので、自由にならないが、物体より大きなサイズを使用すると視域が広く取れる。 ガラス製は必要サイズに分割するのが難しいが、フィルム製は容易にできる。 フィルムの固定はサイズが大きくなるほど困難になる。

12.ホログラフィ用感光材料の種類と特徴

現在使用されている感光材料の種類と特徴について簡単にまとめました。

種 類	特 徴
銀塩感光材料	<p>感光物質に銀塩粒子を使用している。 解像力を高めるため微粒子にしているが、露光感度は比較的高く、最も使用しやすい。 一般に青・緑色用と赤色用に分かれている。 湿式（液体）による現像処理が必要。 乳剤面の湿気からの保護が必要。</p>
DCG (重クロム酸ゼラチン)	<p>重クロム酸アンモニウム水溶液などで感光化されたゼラチンに、アルコールによる脱水・乾燥をおこない、干渉縞を露光部と未露光部の屈折率変化として記録する。 粒子性がないため高解像力が得られ、ノイズが少なく透明度が高い反射型ホログラムに利用される。 未使用品の保存性が低い、赤色には増感剤を用いないと感光性を持たない、露光感度が低い、湿気に弱い、などの欠点がある。</p>
フォトポリマー	<p>高分子材料の光重合反応を利用したもので、光の照射によりモノマー（単量体）から重合体（ポリマー）に変化する。 干渉縞の明縞に対応する部分は光重合により密度（屈折率）が高くなり、干渉縞の明暗を屈折率分布で記録できる。 液体を使用しない現像処理（紫外線照射、ベーキングなど）でホログラムを製作できるものもある。 粒子性がないため高解像力を持つが、露光感度が低いものが多い。 市販されている製品は少ない。</p>
フォトレジスト	<p>露光により薬品耐性が変化する高分子材料で、干渉縞の明縞（露光部）が薬品に不溶性になるネガ型、薬品に溶性になるポジ型がある。 ポジ型のほうが解像力が高い。 フォトレジストは干渉縞の明暗を表面の凹凸として記録できるので、エンボスホログラムの原盤作製に使用される。 ホログラム用はなく、半導体製造用を流用している。 フォトレジスト液を購入して、ガラス面へ均一に塗布し、乾板を自作する。 紫外から青色にしか感光性がなく、露光感度がたいへん低い。</p>

13.入手できるホログラフィ用感光材料について

現在、下記のホログラフィ用感光材料が入手できます。

HOLOTREND	仕 様	サ イ ズ	入 数
PFG - 01 - 45	RED SENSITIVE	101mm× 127mm	25枚/箱
PFG - 03 - 45	RED SENSITIVE	101mm× 127mm	25枚/箱
PFG - 03 - 810	RED SENSITIVE	200mm× 250mm	6枚/箱
PFG - 03C - 45	PANCHROMATIC	101mm× 127mm	25枚/箱
PFG - 03C - 810	PANCHROMATIC	200mm× 250mm	6枚/箱

〔 各感光材料の仕様 〕

感 光 材 料	仕 様	乳 剤 厚 (μ m)	銀 粒 子 径 (n m)
PFG - 01 - 45	RED SENSITIVE	7~ 8	40
PFG - 03	RED SENSITIVE	7	12
PFG - 03C	PANCHROMATIC	11	12

2003年4月現在のものです。

上記のホログラフィ用感光材料は、中央精機㈱が販売しています。

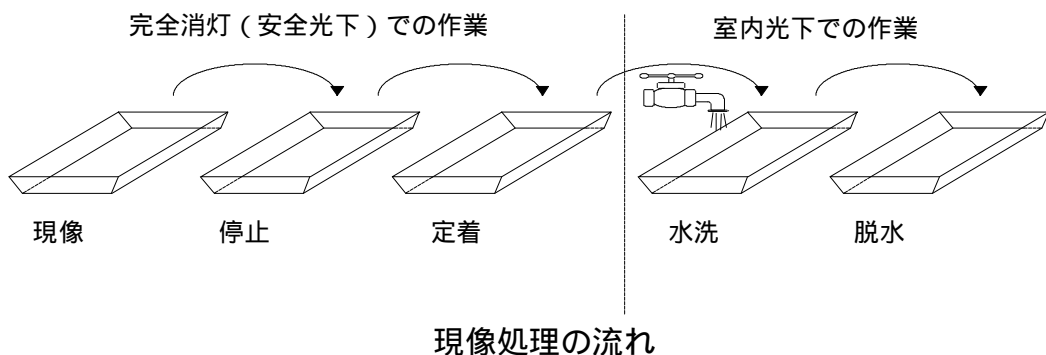
14. 現像処理の手順について

現像処理は以下の手順でおこないます。

〔 現像処理の流れ 〕

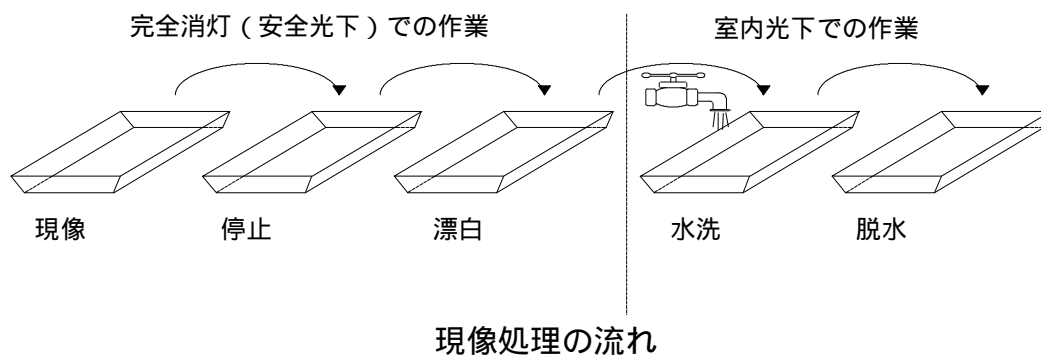
項目	処 理 内 容	
現像	露光したホログラム乾板の感光した部分（明縞部）を黒化させ画像を作る。	ホログラム専用の現像液が望ましい。
停止	現像の進行を停止させる。	停止液（酸性）または、流水。
定着	ホログラム乾板から未露光の銀塩粒子を取り除き、安定させる。	市販の定着液。
水洗	ホログラム乾板に付着した定着液を取り除く。	流水または、溜め水ですすぐ。
脱水	アルコールや水切り剤を使用して、ホログラム乾板の水分を取り除きやすくする。	アルコールまたは、水切り剤。
乾燥	ホログラム乾板の水気を完全に取り去り、膨張した乳剤をもとの厚さへ近づける。	ドライヤー（冷風）などで湯かす。

実際には、定着処理をなくし漂白処理をする行程がよくおこなわれます。この漂白処理は、現像により黒化した銀粒子（干渉縞の明縞、露光部分）を感光する前の銀塩粒子に戻す作用をします。このとき、未露光（干渉縞の暗縞部分）の銀塩粒子と漂白された銀塩粒子では屈折率（密度）が異なります。干渉縞の明暗が屈折率の変化に対応するようになると、ホログラムの再生像をより明るく見せる（回折効率が低いと呼ぶ）ことができます。漂白処理したホログラムは干渉縞の明暗を屈折率変化に置き換え、これにより再生像を作り出すのに必要な位相差を作り出しているため、位相型ホログラムと呼ばれます。漂白を行う場合の手順も簡単に示します。



[現像処理の流れ]

項目	処 理 内 容	
現像	露光したホログラム乾板の感光した部分（明縞部）を黒化させ画像を作る。	ホログラム専用の現像液が望ましい。
停止	現像の進行を停止させる。	停止液（酸性）または、流水。
漂白	ホログラム乾板内の黒化銀をハロゲン化銀にして透明にし、干渉縞の明暗を屈折率の変化に変えます。	ホログラム専用の漂白液または、市販の漂白液。
水洗	ホログラム乾板に付着した漂白液を取り除く。	流水または、溜め水ですすぐ。
脱水	アルコールや水切り剤を使用して、ホログラム乾板の水分を取り除きやすくする。	アルコールまたは、水切り剤。
乾燥	ホログラム乾板の水気を完全に取り去り、膨張した乳剤をもとの厚さへ近づける。	ドライヤー（冷風）などで湯かす。



15. 現像処理をおこなうときの注意事項

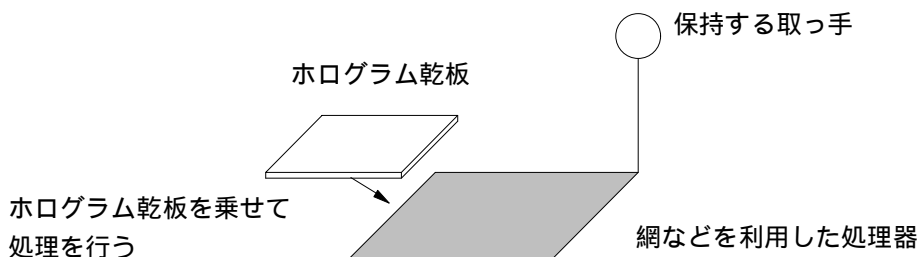
安全光を使用する

消灯した暗室作業で処理バットを間違えたり、処理液に不用意に触れたりしないように安全光（セーフライト）を使用します。He - Ne レーザー用のホログラム乾板では、薄い緑色の安全光を使用することができます。

安全光と処理中のホログラム乾板が近すぎたり、強い光では感光してしまうので、作業している手元がわかる明るさが適当です。もし、安全光が用意できない場合には、蓄光テープを貼付けた板などを使用すると手元がわかる程度の明るさが得られます。

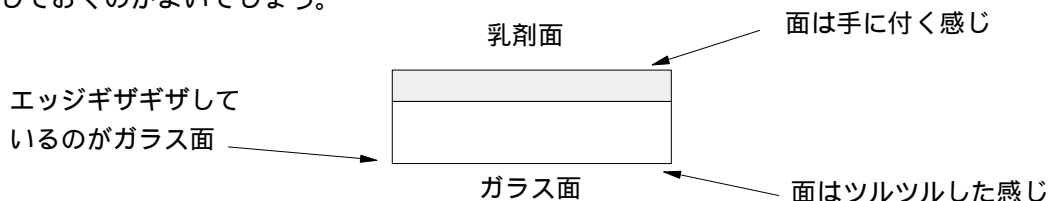
処理液には触れないように

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。これを防ぐためには、手袋等を使用するのが望ましいのですが、作業性が良好ではありません。現像処理を始めると液に触れる機会が多くなるので、つぎのような処理器を使用すると便利です。現像処理するホログラム乾板を処理器に乗せ、そのまま各液で処理をおこないます。4 × 5 インチ程度まではこの方法で処理することができます。



乳剤面を確認する

現像処理で直接バットにホログラム乾板を浸す場合、処理器を使用する場合でも乳剤面が必ず上を向いている必要があります。もし、乳剤面がバットや処理器の側を向いていると、現像されなかったりムラができたりすることがあります。ホログラム乾板はガラスの片面にゼラチンに含まれた感光物質（乳剤）を塗布したもので、実際に手で触れてみると感触の違いがわかります。また、一般にホログラム乾板のエッジに触れるとスムーズなほうが乳剤面、ギザギザしたほうがガラス面と区別できます。ホログラムの記録時と現像処理の前に確認する必要があるので、暗室（消灯した状態）で乳剤が確認できるように練習しておくのがよいでしょう。



16. 現像処理の実際

【 PFG- 03、 PFG- 03Cの現像処理 】

〔 GP- 8を使用した現像処理 〕

項目		内容	処理時間
現像	GP - 8 現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌（かくはん）する。	2 分
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	3 0 秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2 分
定着	F - 5 定着液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	5 分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2 分
脱水	アルコール 5 0 %	浸しながら攪拌する。	2 分
	アルコール 7 5 %	浸しながら攪拌する。	2 分
	アルコール 1 0 0 %	浸しながら攪拌する。	2 分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

全ての処理は 1 5 以下の温度で行う（PFG-03、PFG-03Cは硬膜されていないため）。
脱水処理には市販の水切り剤に 1 ~ 2 分程、浸しながら攪拌する方法もある。

GP - 8現像液の処方	
純水	800ml
フェニドン	0.2g
無水亜硫酸ナトリウム	100g
ハイドロキノン	5g
水酸化カリウム	10.6g
チオシアン酸アンモニウム	24g
純水を加えて総量を	1000ml

F - 5定着液の処方	
純水	800ml
チオ硫酸ナトリウム	240g
無水亜硫酸ナトリウム	15g
氷酢酸	13.4ml
ホウ酸	7.5g
硫酸アルミニウムカリウム	1.5g
純水を加えて総量を	1000ml

GP - 8現像液の処方 と F - 5定着液の処方 (薬品調合の場合)

GP - 8は調合液 6 0 mlを原液とし、純水 4 0 0 mlを加えて使用液とする。

この液量で 4 × 5 インチの乾板を 4 枚現像できる。

He-Neレーザーで反射型ホログラムを記録し、GP-8像液で処理したホログラムは緑色で再生されます。これは、定着で未露光の銀塩粒子が乳剤から取り除かれ、現像前（干渉縞の記録時）より乳剤が薄くなり干渉縞の間隔が短くなったためです。緑色に近いほど明るく感じられるので、見やすくなります。

【 PFG - 03、 PFG - 03Cの現像処理 】

〔 CW - C1現像液を使用した現像処理 〕

項目		内容	処理時間
現像	CW - C1現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌（かくはん）する。	5分
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
漂白	EDTA漂白液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	数分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
脱水	アルコール 50%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 75%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 100%	浸しながら攪拌する。	2分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

全ての処理は15℃以下の温度で行う（PFG-03、PFG-03Cは硬膜されていないため）。
EDTA漂白液では完全に漂白できない場合があります。
（この場合は後述のPBQ2漂白液との組み合わせで行うと良い結果が得られます）
脱水処理には市販の水切り剤に1～2分程、浸しながら攪拌する方法もある。

純水	800ml
カテコール	10g
無水亜硫酸ナトリウム	10g
無水炭酸ナトリウム	30g
純水を加えて総量を	1000ml

純水	800ml
EDTA鉄キレート	30g
硫酸水素ナトリウム	30g
臭化カリウム	30g
純水を加えて総量を	1000ml

CW - C1現像液の処方 と EDTA漂白液の処方 (薬品調合の場合)

CW - C1現像液とEDTA漂白液は、どちらも原液のまま使用する。

CW - C1現像液とEDTA漂白液の組み合わせで製作したホログラムは記録時の波長(色)に近い波長(色)の再生像になります。

【 PFG - 03、 PFG - 03Cの現像処理 】

〔 CW - C1現像液を使用した現像処理 〕

項目		内容	処理時間
現像	CW - C1現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌（かくはん）する。	5分
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
漂白	PBQ2漂白液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	数分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
脱水	アルコール 50%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 75%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール100%	浸しながら攪拌する。	2分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

全ての処理は15℃以下の温度で行う（PFG-03、PFG-03Cは硬膜されていないため）。
脱水処理には市販の水切り剤に1～2分程、浸しながら攪拌する方法もある。

純水	800ml
カテコール	10g
無水亜硫酸ナトリウム	10g
無水炭酸ナトリウム	30g
純水を加えて総量を	1000ml

純水	800ml
クエン酸	15g
臭化カリウム	50g
PBQ（パラベンゾキノン）	2g
純水を加えて総量を	1000ml

PBQ2漂白液の処方（薬品調合の場合）

パラベンゾキノン（PBQ）は使用直前に加える。

パラベンゾキノン（PBQ）はアルコール（エチル）で溶かしてから加えると良い。

パラベンゾキノン（PBQ）の粉塵や蒸気は、粘膜に有害なので、調合・処理ともに換気の良いところで行う必要がある。

CW - C1現像液とPBQ2漂白液の組み合わせで製作したホログラムは記録時の波長（色）に近い波長（色）の再生像になります。

【 PFG - 03、 PFG - 03Cの現像処理 】

〔 CW - C2現像液を使用した現像処理 〕

項目		内容	処理時間
現像	CW - C2現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌（かくはん）する。	5分
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
漂白	EDTA漂白液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	数分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
脱水	アルコール 50%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 75%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 100%	浸しながら攪拌する。	2分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

全ての処理は15℃以下の温度で行う（PFG-03、PFG-03Cは硬膜されていないため）。
EDTA漂白液では完全に漂白できない場合があります。
（この場合は先述のPBQ2漂白液との組み合わせで行うと良い結果が得られます）
脱水処理には市販の水切り剤に1～2分程、浸しながら攪拌する方法もある。

純水	800ml
カテコール	20g
L - アスコルビン酸	10g
無水亜硫酸ナトリウム	10g
純水を加えて総量を	1000ml

純水	800ml
尿素	100g
無水炭酸ナトリウム	60g
純水を加えて総量を	1000ml

CW - C2現像液の処方（薬品調合の場合）

CW - C2現像液は使用直前にA液：B液 = 1：1で混合し、使用液とする。

CW - C2現像液とEDTA漂白液の組み合わせで製作したホログラムは記録時の波長(色)に近い波長(色)の再生像になります。

【 PFG - 03、 PFG - 03Cの現像処理 】

〔 CW - C2現像液を使用した現像処理 〕

項目		内容	処理時間
現像	CW - C2 現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌（かくはん）する。	5分
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
漂白	PBQ2 漂白液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	数分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
脱水	アルコール 50%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 75%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 100%	浸しながら攪拌する。	2分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

全ての処理は15℃以下の温度で行う（PFG-03、PFG-03Cは硬膜されていないため）。
脱水処理には市販の水切り剤に1～2分程、浸しながら攪拌する方法もある。

CW - C2 A液の処方	
純水	800ml
カテコール	20g
L - アスコルビン酸	10g
無水亜硫酸ナトリウム	10g
純水を加えて総量を	1000ml

CW - C2 B液の処方	
純水	800ml
尿素	100g
無水炭酸ナトリウム	60g
純水を加えて総量を	1000ml

CW - C2現像液とPBQ2漂白液の組み合わせで製作したホログラムは記録時の波長(色)に近い波長(色)の再生像になります。

PBQ2漂白液の処方	
純水	800ml
クエン酸	15g
臭化カリウム	50g
PBQ (パラベンゾキノン)	2g
純水を加えて総量を	1000ml

PBQ2漂白液の処方 (薬品調合の場合)

パラベンゾキノン (PBQ) は使用直前に加える。
パラベンゾキノン (PBQ) はアルコール (エチル) で溶かしてから加えると良い。

パラベンゾキノン (PBQ) の粉塵や蒸気は、粘膜に有害なので、調合・処理ともに換気の良いところを行う必要がある。

【 PFG - 03、 PFG - 03Cの現像処理 】

(MA(メトールアスコルビン酸)現像液とEDTA漂白液を使用した現像処理)

項目		内容	処理時間
現像	MA現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌(かくはん)する。	3分
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
漂白	EDTA漂白液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	数分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
脱水	アルコール 50%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 75%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 100%	浸しながら攪拌する。	2分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

全ての処理は15℃以下の温度で行う(PFG-03、PFG-03Cは硬膜されていないため)。
EDTA漂白液では完全に漂白できない場合があります。
(この場合は先述のPBQ2漂白液との組み合わせで行うと良い結果が得られます)
脱水処理には市販の水切り剤に1~2分程、浸しながら攪拌する方法もある。

MA現像液の処方(薬品調合の場合)

MA現像液の処方	
純水	800ml
メトール	5g
L-アスコルビン酸	40g
無水炭酸ナトリウム	60g
水酸化ナトリウム	7g
臭化カリウム	2g
純水を加えて総量を	1000ml

EDTA漂白液の処方	
純水	800ml
EDTA鉄キレート	30g
硫酸水素ナトリウム	30g
臭化カリウム	30g
純水を加えて総量を	1000ml

MA現像液とEDTA漂白液の組み合わせで製作したホログラムは記録時の波長(色)に近い波長(色)の再生像になります。

PFG-01-45でリップマンホログラムを製作するときにも使用できます。

また、PFG-01-45は現像処理を常温でおこなうことができます。

【 PFG - 03、 PFG - 03Cの現像処理 】

〔 MA(メトールアスコルビン酸)現像液とPBQ2漂白液を使用した現像処理 〕

項目		内容	処理時間
現像	MA現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌(かくはん)する。	3分
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
漂白	PBQ2漂白液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	数分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
脱水	アルコール 50%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 75%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 100%	浸しながら攪拌する。	2分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

全ての処理は15℃以下の温度で行う(PFG-03、PFG-03Cは硬膜されていないため)。脱水処理には市販の水切り剤に1~2分程、浸しながら攪拌する方法もある。

MA現像液の処方	
純水	800ml
メトール	5g
L-アスコルビン酸	40g
無水炭酸ナトリウム	60g
水酸化ナトリウム	7g
臭化カリウム	2g
純水を加えて総量を	1000ml

PBQ2漂白液の処方	
純水	800ml
クエン酸	15g
臭化カリウム	50g
PBQ(パラベンゾキノン)	2g
純水を加えて総量を	1000ml

PBQ2漂白液の処方(薬品調合の場合)

パラベンゾキノン(PBQ)は使用直前に加える。

パラベンゾキノン(PBQ)はアルコール(エチル)で溶かしてから加えると良い。

パラベンゾキノン(PBQ)の粉塵や蒸気は、粘膜に有害なので、調合・処理ともに換気の良いところで行う必要がある。

MA現像液とPBQ2漂白液の組み合わせで製作したホログラムは記録時の波長(色)に近い波長(色)の再生像になります。

【 PFG - 03、PFG - 03Cの現像処理 】

〔 前硬膜液を使用した現像処理 〕

項目		内容	処理時間
前硬膜	アグファ410	ホログラム乾板を浸し、攪拌（かくはん）する。	1～2分
現像	MA現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	3分
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
漂白	PBQ2漂白液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	数分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
脱水	アルコール 50%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 75%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール100%	浸しながら攪拌する。	2分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

処理温度は全て20℃で行える。

脱水処理には市販の水切り剤に1～2分程、浸しながら攪拌する方法もある。

アグファ410前硬膜液の処方 (薬品調合の場合)

アグファ410前硬膜液 + MA現像液 + PBQ2漂白液の組み合わせで製作したホログラムは記録時の波長(色)に近い波長(色)の再生像になります。

アグファ410前硬膜液の処方	
純水	800ml
無水硫酸ナトリウム	5g
無水炭酸ナトリウム	40g
ホルマリン(ホルムアルデヒド35%)	2g
純水を加えて総量を	1000ml

蒸気は刺激性で、皮膚、目、粘膜をいため、神経毒であるから換気を十分に行う必要がある。

前硬膜液はここで紹介したアグファ410以外にもコダックSH-5等があります。前硬膜処理を行うことにより低温現像を行う必要がなくなり、現像処理が容易になります。ここで紹介した組み合わせ以外でも前硬膜処理は行えます。硬膜処理により乳剤に現像液などが浸透しにくくなる場合があるため、硬膜処理を行っていない場合と同じ現像時間とはならない可能性があります。

【 PFG - 01 - 45の現像処理 】

〔 コダックD - 19現像液とコダックフィクサー - 定着液を使用した現像処理 〕

項目		内容	処理時間
現像	D - 19 現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌（かくはん）する。	3 ~ 6分
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
定着	コダックフィクサー -	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	5分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
脱水	ドライウエル	浸しながら攪拌する。	1分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

全ての処理は20℃で行えます。

脱水処理にはアルコールを使用する方法もある（前項参照）。

D - 19現像液の処方	
純水	800ml
メトール	10g
無水亜硫酸ナトリウム	90g
ハイドロキノン	5g
炭酸ナトリウム 1水塩	52.5g
臭化カリウム	5g
純水を加えて総量を	1000ml

コダックD - 19現像液、コダックフィクサーは粉末剤が市販されているので容易に入手できますが、一度に3.8リットル（1ガロン）分を作る必要があります。

上記の現像、定着、脱水に使用する粉末剤（脱水は液体）は市販されているので容易に入手できます。

PFG - 01 - 45でフレネルホログラムを製作するときの、一般的な現像処理方法です。

【一般的な現像処理】

〔コダックD-19現像液を使用した現像処理〕

項目		内容	処理時間
現像	D-19現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌（かくはん）する。	1
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
漂白	EDTA漂白液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	数分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
脱水	アルコール 50%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 75%	浸しながら攪拌する。	2分
	アルコール 100%	浸しながら攪拌する。	2分
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

1 現像時間は、この処理を行う感光材料の種類によって変わります。

処理温度は、この処理を行う感光材料の種類によって変わります。

感光材料によってはEDTA漂白液では完全に漂白できない場合があります。

（この場合は先述のPBQ2漂白液との組み合わせで行うと良い結果が得られます）

脱水処理には市販の水切り剤に1～2分程、浸しながら攪拌する方法もある。

D-19現像液の処方	
純水	800ml
メトール	10g
無水亜硫酸ナトリウム	90g
ハイドロキノン	5g
炭酸ナトリウム 1水塩	52.5g
臭化カリウム	5g
純水を加えて総量を	1000ml

コダックD-19現像液は粉末剤が市販されているので容易に入手できますが、一度に3.8リットル（1ガロン）分を作る必要があります。

【一般的な現像処理】

市販の白黒フィルム用現像液を使用した現像処理]

項目		内容	処理時間
現像	白黒フィルム用現像液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌（かくはん）する。	1
停止	停止液	浸しながら攪拌する。	30秒
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	2分
定着	硬膜定着液	ホログラム乾板を浸し、連続攪拌する。	5分
水洗	水洗	流水または溜め水でよくすすぐ。	5分
脱水	水切り剤	浸しながら攪拌する。	30秒
乾燥	ドライヤー	弱冷風を当てる。	乾くまで

1 現像時間は、現像の進行をセーフティライトで確認しながら、濃度が0.5～1程度（現像した部分が完全に黒くならない程度）となる時間で終了します。この現像処理方法は振幅型（漂白処理なし）のフレネルホログラムに適用できます。

市販されている白黒フィルム用現像液

コダック : D - 76、D - 19、D - 11、マイクロロールX
 富士フィルム : フジロール、ミクロファイン
 コニカ : コニカロールファイン
 その他 : ND - 76、HD - 76

市販されている硬膜定着液

コダック : コダックフィクサー
 富士フィルム : フジフィックス
 コニカ : コニカフィックス

市販されている水切り剤（水滴防止剤）

コダック : フォトフロー600
 フジフィルム : ドライウェル
 コニカ : コニカダックス

現像

現像液はホログラム乾板に記録した干渉縞から、忠実に再生像が得られるように日々工夫・改良されています。ホログラフィで使用される現像液のほとんどはホログラフィ専用で、いくつかの薬品を調合・組み合わせて作られ、市販のものはほとんどありません（日本国内では）。市販されている白黒フィルム用現像液（コダック D - 19 など）を流用する方法もありますが、専用液を使用した場合ほど良好なホログラム再生像は得られません。

専用現像液では、CW - C 2 現像液が有名で透過型ホログラム・反射型ホログラムの両方に多く使用されています。また、ロシア（旧ソビエト）で開発された GP 系の現像液（GP - 8、GP - 2 など）は漂白をしなくても鮮明な位相型ホログラムを作ることができ、再生像が緑色（赤色光で記録した場合）になるので、よく使用されています。

フレネルホログラムをとりあえず製作するのであれば、市販の白黒フィルム用現像液（コダック D - 19 を推奨します）を使用することができます。

現像液に含まれる薬品には手に付着するとかゆみ、湿疹などが生じる刺激性の高いものもあり、素手で扱うには注意が必要です。薬品の調合などでもゴム手袋の使用、換気を良くする必要があります。

現像液は現像するたびに、また時間が経過すると劣化するので、特定の回数で使い捨てにします。使用済みの廃液は専用のポリタンクに保管し、産業廃棄物として処理業者などで処分してもらうようにします。

停止

停止液は現像の進行を停止させるために必要です。現像はアルカリ性で進行しますので、進行を止めるには酸性の溶液で中和させるか、流水などで現像液を取り除きます。酸性の溶液としては希釈した酢酸や氷酢酸（酢酸の純度の高いもの）を使用しますが、写真用として市販されているものをそのまま使用できます。溜め水の場合では、付着した現像液を完全に取り除くまで現像は進行しているので、現像ムラを作らないように十分に、手早くおこないます。

停止液は安価に作ることができるので、処理枚数を決め使い捨てにします。

定着

定着液は市販品（コダック フィクサー、フジ フィックスなど）をそのまま使用することができます。用途により何種類か販売されていますが、硬膜定着液（硬膜作用で乳剤へのキズ付きなどを多少防止できる）を使用します。定着液は未露光の銀塩粒子を取り除き、溶け出した銀粒子が定着液に含まれた状態になるので、使用するたびに劣化します。定着液の劣化は、新品の定着液と使用した定着液とで未露光の写真フィルムを浸したとき、完全に抜けるまでの時間がどの程度伸びたかで判断します。使用済みの廃液は専用のポリタンクに保管し、産業廃棄物として処理業者などで処分してもらうようにします。

ホログラフィでは定着をしない場合が多くあります。記録したレーザー光源の波長で再生する場合、漂白をする場合などです。定着すると未露光の銀塩粒子が抜け、その分だけ乳剤の厚さが薄くなり、これにともない干渉縞の間隔が縮まり短波長側（赤色光で記録した場合は緑色）で再生されます。漂白する場合には、漂白液の特性に合わせて定着をする、

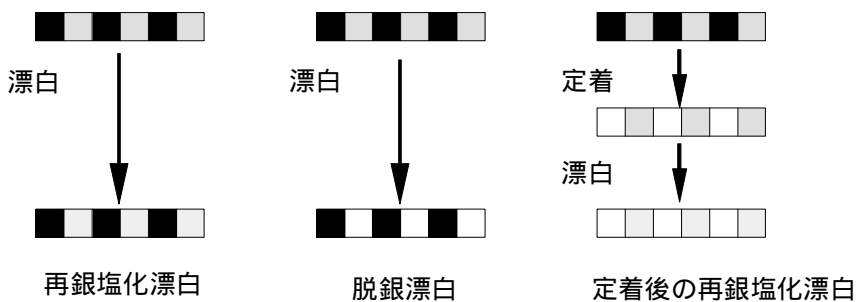
しないの判断をしないと、干渉縞の情報が残らなくなる場合もあります。

漂白

ホログラフィで使用される漂白液は、薬品の調合・組み合わせで作るものがほとんどで、市販品はありません。漂白は現像された銀粒子を未露光の銀塩粒子に戻す作用をしますが、漂白作用をする主薬とその添加剤の組み合わせで、漂白後の銀塩粒子の残り方が異なります。漂白された銀粒子は漂白液中に溶解してしまうので、溶解を防ぎ銀塩として残しておくために臭化カリウム（臭化物）などが添加されるものは再銀塩化漂白（液）と呼ばれます。この場合には、未露光の銀塩粒子と漂白された銀塩粒子の両方が残ります。漂白された銀粒子をそのまま漂白液中に溶解して、未露光の銀塩粒子だけを残すものを脱銀漂白（液）と呼びます。脱銀漂白では、未露光の銀塩粒子だけが残り、感光した干渉縞の明縞の部分には残りません。

漂白に使用される主薬は臭素ガス・臭素水、ヨウ素、P B Q（パラベンゾキノン）、鉄 - E D T A（エチレンジアミン四酢酸）、硝酸第二鉄、赤血塩（フェリシアン化カリウム）、クロムなど刺激臭や取り扱いに注意が必要なものがほとんどです。このため、調合や作業時には手袋やドラフトの使用、換気を良くするなど作業者と周りの環境に注意を払う必要があります。使用済み廃液も産業廃棄物として保管の後に処理業者に処理を依頼し、下水道などに流すことはできません。

現像を終えたホログラム乾板の干渉縞の様子



■：未露光銀塩粒子

■：現像された銀塩粒子

■：漂白された銀塩粒子

□：定着、脱銀された銀塩粒子があった部分

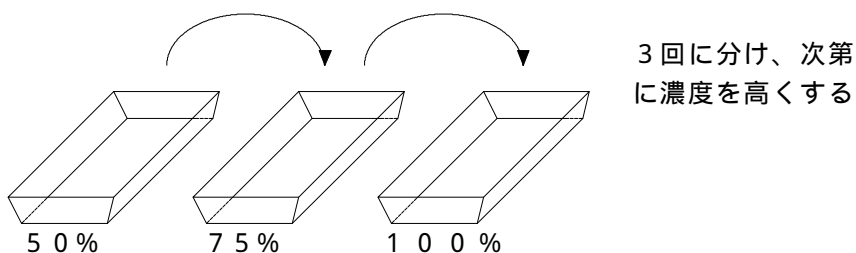
水洗

水洗いは定着または、漂白をおえたホログラム乾板に付着したままの液を完全に取り除くために、十分におこなう必要があります。できるだけ流水を使用し、付着物を洗い流すようにします。溜め水で行なう場合には、十分に攪拌（かくはん）し、数回は水を取り替えるようにします。

脱水

現像処理全体が液体を利用しているため、ホログラム乾板の乳剤は膨張した状態になっています。これをホログラム記録時の乳剤の状態（厚さ）に戻すために水分を取り除きます。乾燥の行程を容易にするため、水洗いを終えたホログラム乾板をアルコール（エタノールなど）に浸すと、乳剤中の脱水がおこなわれます。アルコール脱水では、濃度の低い（50%くらい）ものから次第に濃度を高く（最後は100%）する方法が通常おこなわれます。脱水ではありませんが、アルコール以外では、市販されている水切り剤（フジドライウエルなど）を使用すると乾燥が容易になります。

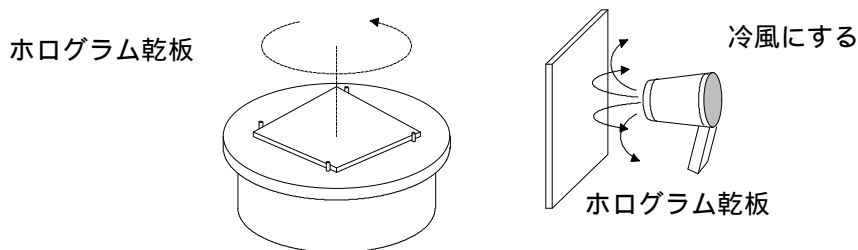
3段階によるアルコール脱水



乾燥

ホログラム乾板の乳剤表面やガラス面に残った水分を取り除くため、ドライヤーで乾燥させる方法があります。このとき、乳剤面に強い歪みを与えないように、温風ではなく冷風でしずかに乾燥させます。ドライヤー以外では、モーターを利用した回転板にホログラム乾板を乗せ、遠心力で水分を取り去る方法もあります。または、ホログラム乾板を立てかけ、自然乾燥する方法もあります。いずれの方法でも、ホコリ・ゴミなどが付着する可能性がありますから、できるだけ清潔な部屋で作業する注意が必要です。

モーターを利用した方法 ドライヤーを利用した方法



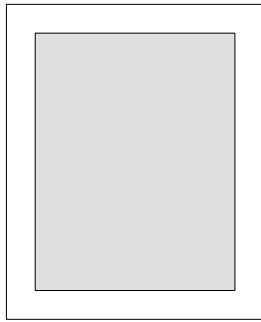
後処理

乾燥を終えたホログラム乾板は乳剤面がムキ出しのまま、キズ・指紋をつけたりする場合があります。ホログラム作品などのテスト撮影で保存しない場合には、そのまま放置してもよいのですが、せっかく製作したホログラムなので丁寧に扱い、長期間保管できるようにしましょう。特に乳剤面がムキ出しの状態は最悪で、キズなどはもとより、湿度の影響でホログラムから再生像が消えてしまうことにもなり兼ねません。乳剤の基であるゼラチン（食用ではありません）は、放置しておく空気中の湿気を吸い、干渉縞の情報である屈折率（密度）の差がしだいになくなってしまいます。

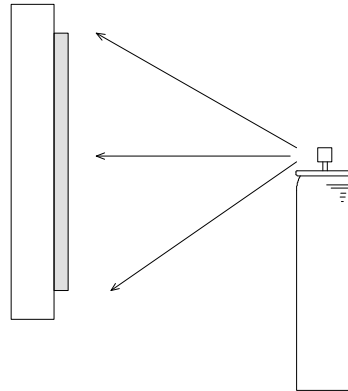
乳剤面の保護には、黒スプレーで全面を覆う、カバーガラスを接着する、吸湿性のない樹脂を塗るなどの方法をとります。いずれの方法でも、乳剤の厚さ（ $7\mu\text{m}$ 程度）方向も湿気の侵入を防ぐように、乳剤面の端を数mmづつ削り落とすことが重要です。

デニシユクホログラムでは、ホログラムの露光時に乳剤面を物体（物体光）側に向けます。イメージ型リップマンホログラムでは、ホログラムの露光時に乳剤面を参照光側に向けます。

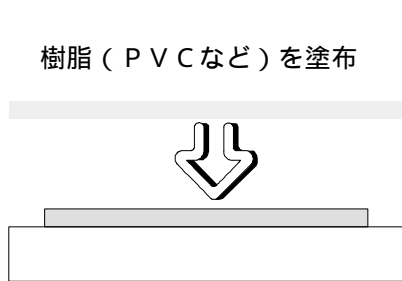
フレネルホログラムの場合は、マスターホログラムとして透過で再生するので、黒スプレーや樹脂を塗布することはできません。カバーガラスを接着する方法をとります。



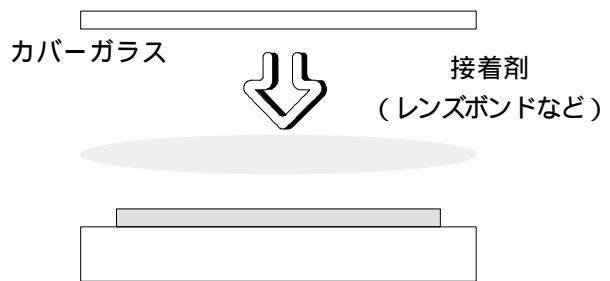
端を削り落とす（数mm）



黒スプレーで保護（油性）



樹脂で保護



カバーガラスで保護

17. 参考資料と参考書の紹介

ホログラフィに関する文献と資料を紹介します。

H.Kogelnig : Bell.Tech.J., Vol.48,No9 (1969) 2909 ~ 2947

Agfa : NDT Technical Information, NDT/Holography

H.I.Bjelhagen : Silver-Halide Recording Materials (1993)

G.Saxby : Practical Holography (1988)

西原 隆他 : 光学連合シンポジウム浜松 '94 講演予稿集 291 ~ 292

太田 和哉他 : 第3回 H odic 講演会講演論文集 59 ~ 62

「光用語辞典」

日置隆一 編、オーム社

ホログラフィの参考資料と、ホログラフィの記事がよく掲載される月刊雑誌を紹介します。

「ホログラフィー」物理学書選 22

辻内順平 著、裳華房 (1997年)

「ホログラフィー入門 - 原理と実際 - 」

久保田敏弘 著、朝倉書店 (1995年)

「ホログラフィー」

辻内順平 著、丸善 (1993年)

「三次元画像工学」

大越孝敬 著、朝倉書店 (1991年)

「三次元映像」

稲田修一 編著、昭晃堂 (1991年)

「ホログラフィックディスプレイ」(ディスプレイ技術シリーズ)

辻内順平 編著、産業図書 (1990年)

「ホログラフィのはなし」
本田捷夫 著、日刊工業新聞社 (1987年)

「実践ホログラフィ技術」
鈴木正根 著、オプトロニクス社 (1986年)

「ステレオグラフィックス&ホログラフィ」
安居院猛、中嶋正之、羽倉弘之 共著、秋葉出版 (1985年)

「ホログラフィーハンドブック」
中島真人、花野和生 共著、暁印書館 (1985年)

「レーザーの世界」
青山邦章、守屋博之、分部至郎 共著、暁印書館 (1981年)

「美しい光の世界」
横田英嗣 編、東海大学出版会 (1980年)

「ホログラフィ入門」
辻内順平、中村琢磨 共訳、共立出版 (1975年)

「写真工業」
写真工業出版社

「オプトロニクス」
オプトロニクス社

「OPLUS E」
新技術コミュニケーションズ

ホログラフィの記事がよく掲載される学会関係誌を紹介します。

「光学」
日本光学会 (応用物理学会)

「応用物理」
応用物理学会

この内容は2003年3月現在のものです。

紹介した薬品（試薬）には毒劇法（毒物及び劇物取締法）に定める劇物が含まれています（水酸化ナトリウム）。薬品の取り扱い、保管は注意書きに従い、十分にご注意ください。

薬品（試薬）はお客様にてご用意ください。中央精機株式会社では薬品（試薬）の販売はしておりません。

薬品を調合した処理液の保管、使用済みの廃液保管・処分は十分にご注意ください。使用済みの廃液保管・処分はお客様の責任で実施してください。中央精機株式会社では処理できません。

ホログラフィ用感光材料（ホログラム乾板）は消耗品です。再使用はできません。

ホログラフィ用感光材料（ホログラム乾板）は製造元の都合により仕様の変更、製造中止になる場合があります。

中央精機のホログラフィ
改訂5版

発行 2003年4月1日 改訂5版
製作・編集 中央精機株式会社

中央精機株式会社