

基礎光学 Basic Optics

提出者：08A17153 羽田充宏

実験実施日：2019年4月8日

実験実施日：2019年4月12日

実験実施日：2019年4月15日

実験実施日：2019年4月19日

実験実施日：2019年4月22日

実験実施日：2019年4月26日

提出日：5月13日

共同実験者：長野 貴裕
西尾 晃
畠中 駿平
能登 健太

Purpose and abstract of experimental theme

この実験では光学の基礎知識と研究での実践的な実験を学ぶ。実験は”光学装置の扱い”, ”ビームの拡大”, ”光の回折”, ”光の干渉”, ”光の偏光”, ”ホログラム” といった光学の幅広い題目を扱っていく。

1 Expandig laser beam

Purpose

実験の目的はビームの広がり角を求めることと、ビームエキスパンダーの製作、拡大率の評価である。

1.1 Divergence of beam

1.1.1 Procedure

まずビームホルダーを調節してビーム光が机に対して平行になるように調節する。次に方眼紙によってスクリーンを製作してスクリーンからレーザーまでの距離 z とスクリーンに当たったレーザー光の半径 $d(z)$ を求める。測定結果を式 (1) に代入して図 1 に表すレーザーのビームウエスト (d_0) と広がり角 (θ) を導き出す。

$$d^2(z) = d_0^2 + \theta^2 z^2 \quad (1)$$

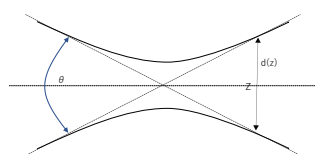


図 1 ビームウエストと広がり角

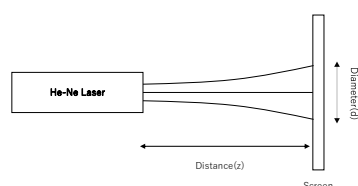


図 2 Distance と Diameter

そのため d_0, θ を求めるためには、スクリーンに映し出されたレーザーの直径の値、レーザーの射出口からスクリーンまでの距離、二つの測定値が必要となるのでスクリーンからの距離が異なる二箇所で測定を行なった。

1.1.2 Result

測定結果から次の表が得られた.

表 1 レーザーからスクリーンの距離と直径

$z(mm)$	$d(z)(mm)$
500	1.1
4000	5.0

またこの測定結果より, 関係式 (1) において変数消去を行うことで $d_0 = 0.915mm$, $\theta = 1.22 \times 10^{-3}rad$ という値が得られた. この結果よりレーザー光は確かに射出口から遠ざかれば遠ざかるほど広がっていることが確認できた. 一方でレーザーの広がり角は上記の通り非常に小さい角度であることが確認できた.

1.1.3 Discussion

通常実験用レーザーの広がり角は ($mrad$) オーダーであるので今回の実験結果は実際の広がり角から大きざれることなく測定できたと考えられる. しかし測定精度を下げる要因として, ビーム直径を測定する際にビームの強度が強すぎたために目視の正確さを欠いたことや, 観測者が毎回入れ替わったことによりそれぞれの直径の定義がバラバラであったことなどが挙げられる.

そもそもビームの光はガウス分布に従うため正確な境目が存在しない. したがってガウスシアンビームのビーム半径はビーム軸上のピーク値の $1/e^2$ まで減少する半径と決められている. つまりビームの 0.135 倍暗くなっている所を境界と定めるべきであった.

また, この測定から得られた θ, d_0 の値はレーザー特有の値であり測定地点の変化によって変わるものではないので $Distance, Diameter$ を 2 回ずつしか計測すればそれぞれの値を推測することは可能である. 一方で, $Distance, Diameter$ の測定回数を増やすことでよりビームウエストと広がり角の値をより正確に測定することができると考えられる. また今回の実験では θ, d_0 の値を求める際にスクリーンからの距離を二箇所のみ測定して関係式 (1) において連立して求めたがスクリーンからの距離を三箇所以上測定するとどの 2 点で計算するかが問題となってくる. しかし前述の通り θ, d_0 の値はレーザー固有の値であるので測定回数を増やし正確に測定を行えば計算値は真の値に近づいていくことが予想される.

さらに光の強度を下げてビーム半径を測定しやすくするために ND フィルターを利用して測定を行うなどの改善策が挙げられる.

1.2 The Keplerian Beam Expander

1.2.1 Procedure

今回はケプラー型のビームエキスパンダーを製作する．ケプラー型ビームエキスパンダーは凸レンズを二個組み合わせて製作する．図 3 に示すように光学系を組み立てた．まず ND フィルター ($1\% \times 2, 25\%$) 3 枚をレーザーの前に置き，次に焦点距離 50mm の凸レンズ，さらに焦点距離 200mm の凸レンズを置いた．次に二つ目のレンズを抜けた光が平行光となるようにレンズの位置を調整した．さらにエキスパンダーの拡大率を計算するために一つ目のレンズを透過する前のビーム直径，二つ目のレンズを透過した後のビーム直径をそれぞれ計測し，実際の拡大率と理論値との比較を行った．

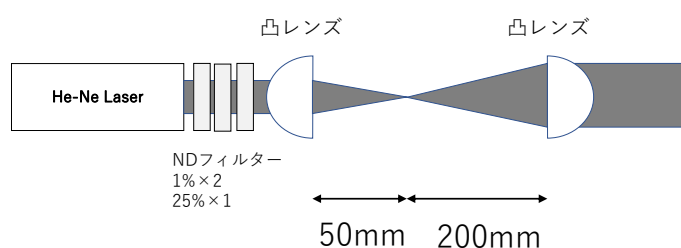


図 3 ケプラー型ビームエキスパンダー

1.2.2 Result

二つ目のレンズを透過した光が平行光となったのはレンズ間距離 $f_i + f_o$ が 260mm となった時であった．またエキスパンダー入射前のビーム直径は 1.3mm に対してエキスパンダーの透過光は 5.0mm となりビームエキスパンダーを通ることでビーム半径が大きくなることが確認された．この時の拡大率は 3.85 であった．

1.2.3 Discussion

実験で使用した凸レンズは $f_i = 50\text{mm}, f_o = 200\text{mm}$ だったので理論値としてはレンズ間の距離は 250mm であるはずだが実験値はその値よりも大きい値となった．ビームの軌跡がレンズの中心に当たっていなかったために実際の焦点距離よりも実験値の焦点距離が大きくなってしまったなどが考えられる．また拡大率が理論値の 4 倍よりも小さく出てしまった原因についても上記と同様のことが考えられる．この場合拡大率が理論値よりも小さくなったので焦点距離 50mm の凸レン

ズの計測値がビームが中心に当たっていなかったなどの理由で実際の値よりも小さく出てしまったことが考えられる。そのように考えると平行光を作り出す時のレンズ間距離が理論値よりも大きくなってしまったことにも説明がつく。

1.3 The Galilean Beam Expander

1.3.1 Procedure

図 4 に示すように光学系を組み立てた。まず前回同様、ND フィルター ($1\% \times 2$, $25\% \times 2$) 3 枚をレーザーの前に置いた。次に焦点距離 -40mm の凹レンズを置き、その後で前回使用した焦点距離 200mm の凸レンズを置いた。次にエキスパンダーの透過光が平行光となるようにレンズ間の距離を調節した。またエキスパンダーの透過光のビーム直径を測定し、透過前のビームと直径と比べて拡大率を計算し、理論値との違いを比べた。

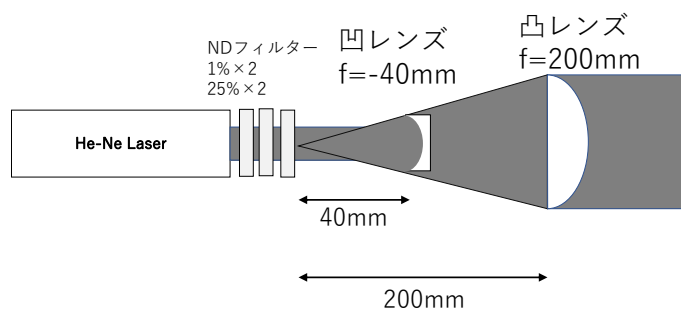


図 4 ガリレオ型ビームエキスパンダー

1.3.2 Result

エキスパンダーの透過光が平行光になる時のレンズ間の距離は 160mm であり理論値と一致した。また、エキスパンダー透過前のビーム直径は 1.5mm であったのに対して、エキスパンダーを通った後のビーム直径は 7.5mm であった。以上より実験での拡大率は 5.0 でありこれも理論値と一致した。

1.3.3 Discussion

今回の実験ではレンズ間距離もエキスパンダーの倍率も理論値と一致した。しかし観測者を前の実験から入れ替えてしまったのでケプラー型の時と比べビーム直径の測り方に若干のズレが生じてしまった。またケプラー型、ガリレオ型のエキスパンダーの実験を通してどちらのエキスパンダーもレンズ間距離は $f_i + f_o$ で与えられるが、ガリレオ型の方が凹レンズを使用しているため f_i の焦

点距離が負になるため同じ拡大率を実現しようとする場合、ガウス型の方がより短いレンズ間距離で実現することができる。またガウス型はエキスパンダーを通る前と後で像が逆転しないという利点もある。これらのエキスパンダーの応用例としてはプロジェクションマッピングなどで拡大した大きい像を見せたい時に応用することができる。

2 Diffraction from circular apertures and slits

Purpose

実験の目的は円形開口やスリットの干渉模様の観察し、干渉から開口の直径、スリット幅、ダブルスリットの間隔を計算することである。

2.1 Circular aperture

2.1.1 Procedure

図 5 に示すように光学系を組み立てる。またそれぞれの距離を図 5 に示すように名前をつける。まず、レーザーの前に円形開口を置きそこから離れた距離にスクリーンを設置する。今回は $0.2mm, 0.4mm$ の二つの円形開口を用いて実験を行う。また、スクリーンは方眼紙で製作する。次に開口からスクリーンまでの距離 L を測定する。レーザーの電源をつけるとスクリーンに円形の干渉縞を得る。次に円形の干渉縞の中心から 1 番目の暗線のまでの距離 r を測定する。これを二種類の円形開口に対して距離 L を変えながら二回ずつ計測を行う。

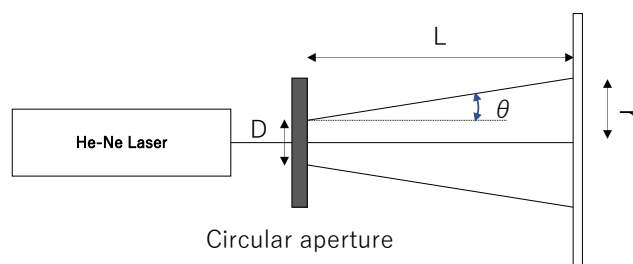


図 5 円形開口の光学系

またこれらの測定した距離は式 (2) の関係をもたす。

$$\sin\theta = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (2)$$

またこの時 θ, D の値は非常に小さいので $\sin\theta \simeq \tan\theta = r/L$ とみなすことができる。また今回使用した He-Ne Laser の波長は $\lambda = 632.8nm$ である。以上より計測値を関係式へ代入して円形

開口の直径を推測する．その後 0.2mm 円形開口を光学顕微鏡によって計測しその直径を実際に求めた．

2.1.2 Result

測定結果から次の表が得られた．

表 2 0.2mm 円形開口		
$r(mm)$	$L(mm)$	$D(mm)$
0.25	583	0.18
0.45	1435	0.246

表 3 0.4mm 円形開口		
$r(mm)$	$L(mm)$	$D(mm)$
2.6	974	0.289
3.5	1430	0.315

またそれぞれ以下のような干渉模様が観測できた．

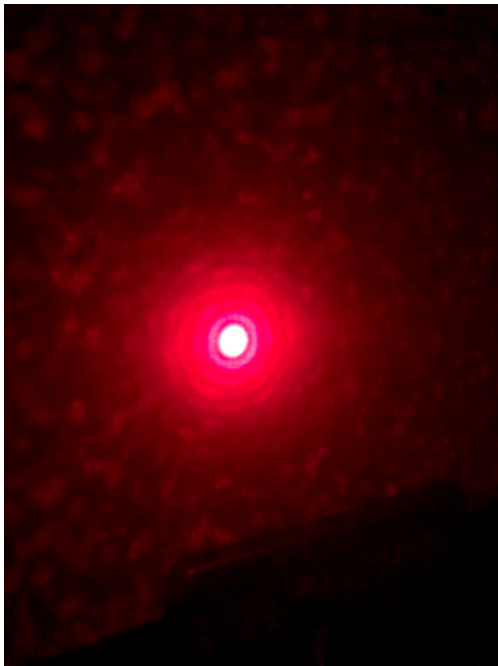


図 6 0.2mm 円形開口の干渉縞



図 7 0.4mm 円形開口の干渉縞

また 0.2mm 円形開口の実測値は 0.19mm であった．干渉模様は円の半径が大きくなっていくに連れて明暗の境目が不明瞭になって区別がつかなくなった．

また以下は光学顕微鏡で観測した 0.2mm 円形開口の写真である。図 9 における一目盛りは $10\mu\text{m}$ であるのでそれぞれの画像を透過させて円形開口の大きさを測定した。その結果円形開口は 0.19mm であることが測定された。

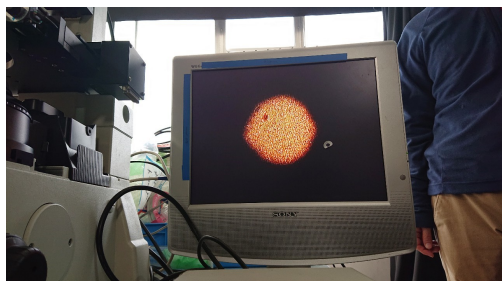


図 8 光学顕微鏡で観測した 0.2mm 円形開口

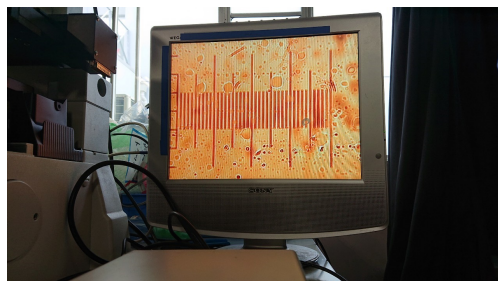


図 9 光学顕微鏡で計測した目盛り

2.1.3 Discussion

0.2mm 円形開口の実験値と実測値である 0.19mm との差は比較的小さかった。一方で 0.4mm 円形開口の理論値との差はかなりの開きがあった。また円形開口のプレートは複数個の開口があったためにそれぞれの円形が偏っていたりしたことも考えられる。さらに他の要因としてそもそも D を算出する際に $\sin\theta \simeq \tan\theta = r/L$ と近似したために実際の値とは異なる結果となった可能性が考えられる。さらには目測による測定に誤差があったなどの要因も考えられる。また干渉には開口部の大きさがスクリーンまでの距離に対して十分小さい時に起こるフレネル回折、ビーム源もしくは観測点がビームを回折するものから無限遠に位置する時に起こるフラウンホーファー回折などがあるが今回の実験では観測点はビームを回折する開口に比べて十分大きいと考えられるのでフラウンホーファー回折であると考えられる。

2.2 Single Slit

2.2.1 Procedure

基本的には前回と同じ光学系を組み立てる。今回は円形開口の代わりにシングルスリットをレーザーの前に置く。以下の図はシングルスリットの光学系である。今回は r, L の距離を測定する事によって ω の値を推測する。またこの実験では 0.1mm, 0.2mm 二つのスリットを用いてそれぞれ 1 回ずつ測定を行う。

またこれらの測定した距離は

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{\omega} \quad (3)$$

式 (3) の関係をみたとす。またこの時 θ, D の値は非常に小さいので $\sin\theta \simeq \tan\theta = r/L$ とみなすこ

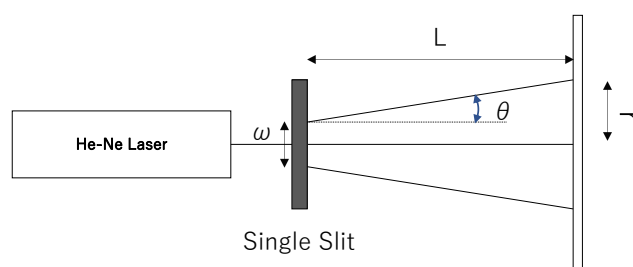


図 10 シングルスリットの光学系

とができる．また今回使用した He-Ne Laser の波長は $\lambda = 632.8nm$ である．以上より計測値を関係式へ代入してシングルスリットの間隔を推測する．今回は時間の関係上実際に光学顕微鏡を用いてスリット幅を測定することはできなかった．

2.2.2 Result

測定結果から次の表が得られた．また式 (3) の関係よりスリット幅が大きくなるにつれて干渉縞の間隔は小さくなっていくことが予想される．実際に実験からもこの関係が確かめられた．

表 4 0.1mm シングルスリット

$r(mm)$	$L(mm)$	$\omega(mm)$
7.0	974	0.088

表 5 0.2mm シングルスリット

$r(mm)$	$L(mm)$	$\omega(mm)$
3.5	974	0.176

またそれぞれ以下のような干渉模様が観測できた．

2.2.3 Discussion

いずれの結果も理論値よりも $0.02mm$ ほど小さくなってしまったのでどちらも目測による計測の時実際の感覚よりも大きく読んでしまった可能性が考えられる．また光学顕微鏡を用いて実測値を計算していないので実際にスリット幅が $0.2mm, 0.1mm$ ではなかったために誤差が生じていることも考えられる．



図 11 0.1mm シングルスリットの干渉縞



図 12 0.2mm シングルスリットの干渉縞

2.3 Yong Double Slit

2.3.1 Procedure

光学系を図 13 に示すように製作する．ダブルスリットをビームの経路に置きビーム光を回折させスクリーンに干渉縞を映し観察する．

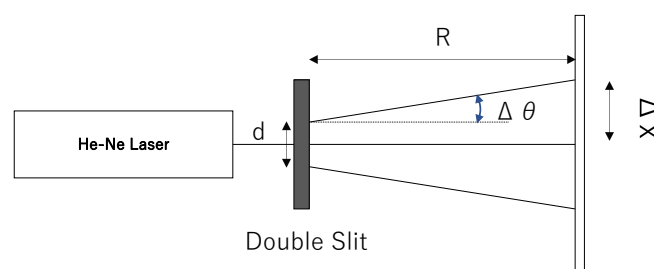


図 13 ダブルスリットの光学系

またこの時以下の式 (4),(5) の関係が成り立つ．それぞれ測定した $\Delta\theta, \Delta x$ を式に代入することで二つのスリット間隔 d を推測する．また今回は $0.2mm, 0.1mm$ の二つのスリット間隔を持つダブルスリットに対して一回ずつ計測を行う．また今回も時間の都合上ダブルスリットの間隔を光学顕微鏡を用いて計りはしなかった．

$$\Delta\theta = \frac{\Delta x}{R} \quad (4)$$

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{d} \quad (5)$$

2.3.2 Result

測定結果から次の表が得られた．

表 6 $0.1mm$ ダブルスリット

$\Delta x(mm)$	$R(mm)$	$d(mm)$
7.0	974	0.088

表 7 $0.2mm$ ダブルスリット

$\Delta x(mm)$	$R(mm)$	$d(mm)$
2.8	974	0.22

また以下のような干渉縞が観察された．

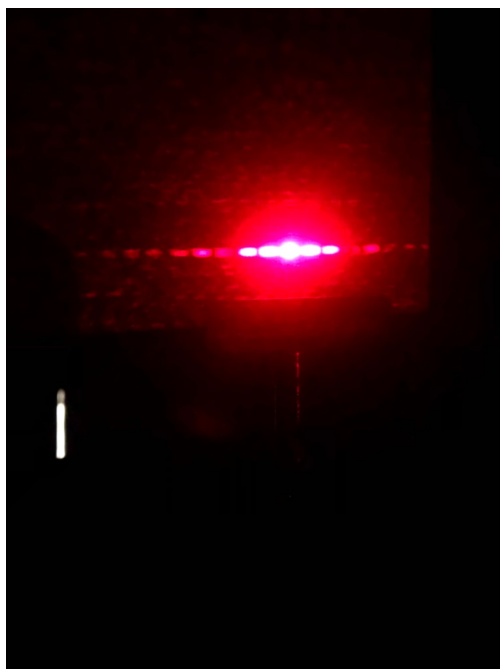


図 14 $0.1m$ ダブルスリットの干渉縞

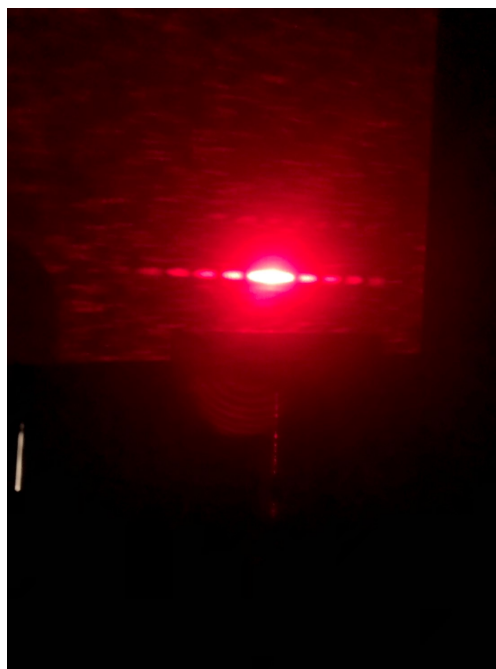


図 15 $0.2m$ ダブルスリットの干渉縞

2.3.3 Discussion

どちらの誤差も -0.02mm であったので目測の際に r を大きく読んでしまったことなどが考えられる。またシングルスリットの時と同じような干渉縞が得られたがシングルスリットの方が中心が明るく、ダブルスリットの時は中心から離れた干渉縞でも強度が高かったことが観測された。これはダブルスリットの際は二つのスリットを通過した際にビーム光が素元波となり互いの波が干渉をするためだと考えられる。

3 Michelson Interferometer and Coherence

Purpose

この実験の目的はマイケルソン干渉系によって作られる干渉模様を観測することと、実験で使用する He-Ne レーザーのコヒーレント長をマイケルソン干渉系を用いて測定することである。

3.1 Michelson Interferometer

3.1.1 Procedure

まず以下のように干渉系を組み立てる。

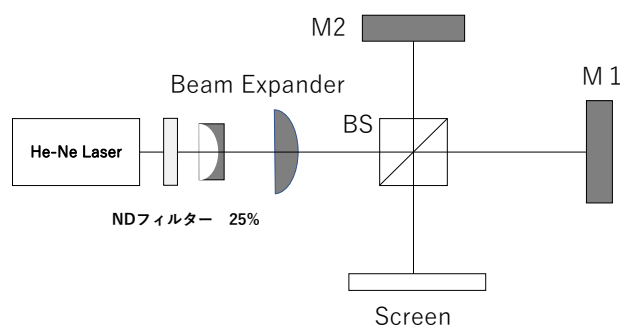


図 16 マイケルソン干渉系

まず光の強度を弱めるために ND フィルター (25%) をレーザーの前に設置する．次にビームエキスパンダーを組み立てる．今回はガリレオ型のエキスパンダーを組み立てる．また，それぞれのミラーの高さを合わせて跳ね返った光がスクリーン上で一致するように調整を行う．次に M2 のミラーを移動させることで干渉縞が観測されたので干渉模様を写真に収める．さらにその状態から机を叩く事により干渉模様がどのように変化するかを観察する．その後エキスパンダーの二個目の凸レンズを移動させて二つのレンズ間距離を小さくする事で干渉模様になどどのような変化が起きたかを観察する．得られた干渉縞の写真をカメラに収める．またこの時 $BS - M1 = 8.0cm$, $BS - M2 = 5.0cm$ の距離であった．

3.1.2 Result

二つの光がスクリーン上で重なり干渉を起こす事で図 17 のような干渉模様が得られた。また机を叩いて揺れを起こす事でスクリーン上に映っていた干渉模様が消えた。その後 0.98[s] 後に元どおりの干渉模様がまた形成した。さらにエキスパンダーのレンズ間距離を小さくすると干渉模様が図 18 のように円の一部分のように丸くなって映った。さらにレンズ間距離を元の位置よりも大きくすると同じような円状の干渉模様が得られた。

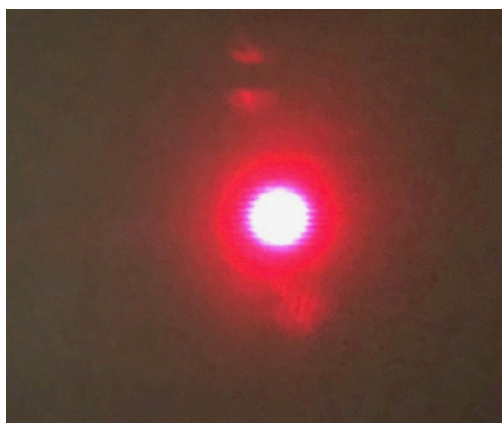


図 17 干渉模様



図 18 レンズ間を狭くした時の干渉模様

3.1.3 Discussion

まず M2 の位置を調節する事でスクリーン上に平行な干渉模様が得られたから M1 に反射された光と M2 に反射された光がそれぞれ平面波であってその波がスクリーン上でぶつかる事によって干渉模様が得られたと考えられる。この事実から実験で使用したレーザーはコヒーレントな光であると言える。

机を叩いた際に干渉模様が見えなくなったのは叩いた振動によって一時的にそれぞれの光路長が異なりスクリーン上で干渉条件が満たされなくなったためだと考えられる。

またミラーの角度を変えるとスクリーン上で観測される干渉模様の縞の感覚が異なったのは二つのビーム光の入射角度が異なるためだと考えられる。

さらにエキスパンダーのレンズ間距離を縮めた際に同心円状の干渉模様が得られたのは平行光だったビームエキスパンダーによって発散してビーム光が球面波になった為だと考えられる。

またマイケルソン干渉系は二つのビーム光の経路差に強く依存するため光路の途中にガラスなどを挿入することでガラスの屈折率を測定することに応用できると予測される。

3.2 Coherence

3.2.1 Procedure

前回の実験と同様に図 16 の光学系を製作する．初めの $BS - M1 = 8.0cm, BS - M2 = 5.0cm$ の状態から $BS - M1$ の距離のみを次第に広げていきスクリーン状で干渉模様が得られなくなるまで広げていきコヒーレント長を決定する．

3.2.2 Result

$BS - M1 = 10.0cm$ の時は干渉模様が観測された．しかし $BS - M1 = 12.5cm$ にすると干渉模様は見れなくなった．以上の結果より可干渉光路差は $(|BS - M1| - |BS - M2|) \times 2 = 4.0cm$ である事がわかった．

3.2.3 Discussion

一般に実験用のビーム光のコヒーレント長は数十 cm であるので今回の実験から得られた値とは大きな開きがあった．この原因としては二つの光の交差する角度が小さかったために干渉模様が得られなかった，調節不足で本当はあったのに観測できなかったなどの理由が考えられる．

4 Polarization of Light

Purpose

この実験の目的はまずマルスの法則を確認し，S 偏光と P 偏光の反射において入射角ごとの反射率を測定する．またブリュースター角を測定する．

4.1 Law of Malus

4.1.1 Procedure

光学系を図 19 のように製作する．今回は ND フィルターは用いなかった．まずビーム光の光路に二つの偏光板 P1,P2 を挿入する．次に偏光された光がフォトディテクターの中心に来るように調整する．初めに二つの偏光板の偏光角をどちらも同じに揃える．その後 10° ずつ P2 の角度を変えていきながらフォトディテクターに検出される偏光光の強度を観測してグラフにその推移をプロットしていく．

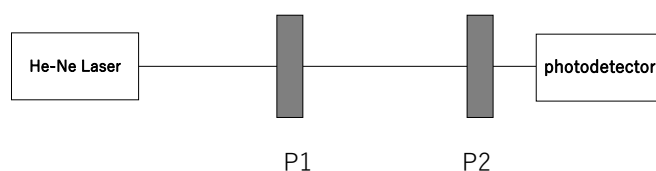


図 19 偏光実験の光学系

4.1.2 Result

図 20 は実験によって得られた結果とマルスの法則によって予測される式 (6) をプロットしたグラフである．ここで P1 となす角を θ ，光の強度を I ，偏光角 0° の時の光の強度を I_0 とした．

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (6)$$

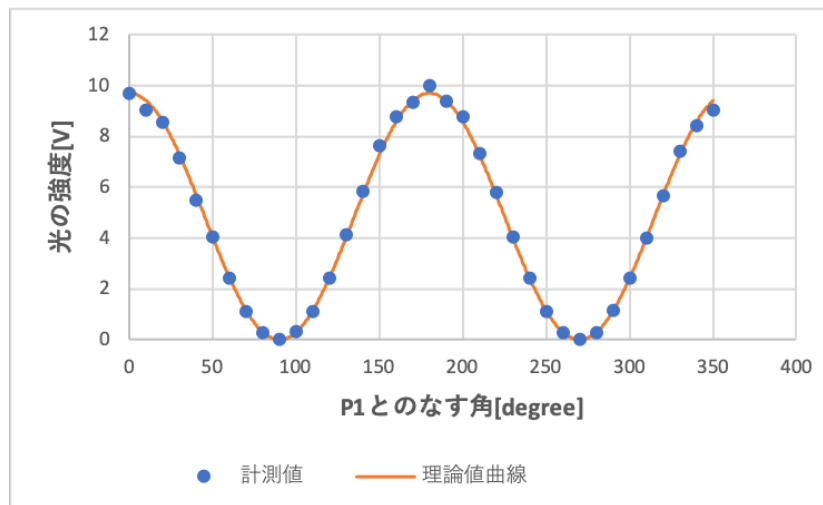


図 20 偏光角と光の強度の強さ

グラフより実験での計測値とマルスの法則より導かれる式 (6) の結果は概ね一致した。

4.1.3 Discussion

グラフのように光の強度が変化したのは P1 で偏光されて向きが統一されたビーム光をさらに P2 で偏光するため P1, P2 が垂直に近くなる程、偏光後の光の強度は小さくなっていくためであると考えられる。また強度が $\cos^2\theta$ に比例する理由は、まず P2 で偏光されることで波振幅は其余弦成分のみが取り出されるため、結果として強度は振幅の二乗に比例するので $\cos^2\theta$ に比例する結果となると考えられる。また完全に式 (6) に計測結果が一致しなかったのはフォトディテクターの中心にビーム光がしっかりと当たっていなかったことが考えられる。

4.2 Reflection

4.2.1 Procedure

図 21 のように光学系を製作する。まず入射面に対し垂直に振幅する S 偏光，入射面に対して平行に振幅する P 偏光の二つの光を偏光板を使って作り出す。この時二つの偏光光の強度を等しくするためにビームの振幅は入射面に対して 45° をなすように設置する。次に偏光光をスライドガラス (屈折率 $n = 1.52$) に当てて反射させる。この際スライドガラスにオイルをつけてプリズムに固定する。その後二つの偏光光ごとに反射光の強度をフォトディテクターを用いて計測する。反射角は 10° から 10° 刻みに大きくしていき 60° まで測定する。特に P 偏光に関してはブリュースター角付近の 55° 前後を 2° ずつ測定する。測定後に入射角と反射光の強度の関係をグラフにプロットする。またブリュースター角は相対屈折率 n とすれば式 (6) で与えられる。

$$\theta_B = \arctan(n) \quad (7)$$

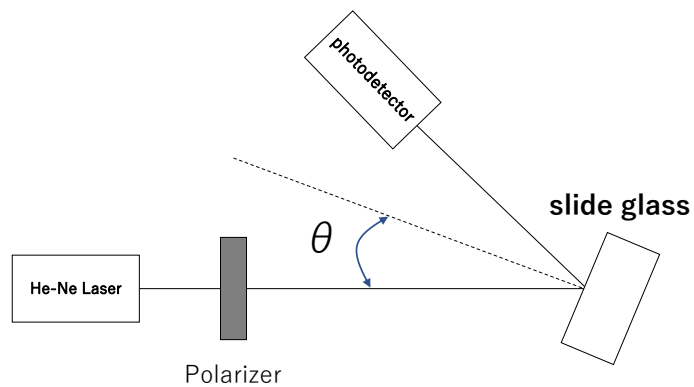


図 21 反射強度の実験

4.2.2 Result

結果をグラフにプロットすると以下ようになった。

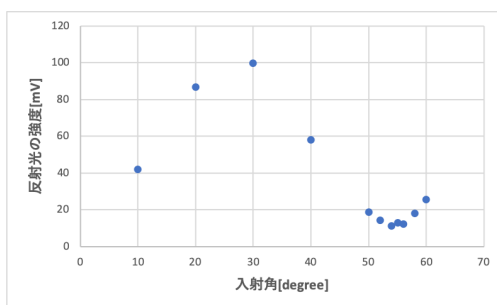


図 22 P 偏光の反射光強度

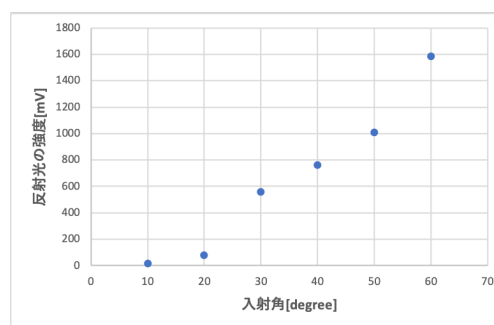


図 23 S 偏光の反射光強度

グラフより P 偏光, S 偏光どちらも基本的に反射角が大きくなっていくにつれて反射光の強度も強くなっていった。また P 偏光においてはブリュースター角付近で反射光の値が非常に小さくなることが確認された。一方 S 偏光では反射角が大きくなるにつれて反射光強度は大きくなっていった。また P 偏光においては 20°から 40°において理論値のグラフ概形から大きく外れる結果となった。

4.2.3 Discussion

実験から P 偏光において $\theta = 55^\circ$ の時に反射光の値が一番小さくなった．つまり $\theta = 55^\circ$ が実験におけるブリュースター角であると推測できる．実際に式 (7) に空中の屈折率 1.0, スライドガラスの屈折率 1.52 を考慮すると，ブリュースター角の理論値は $\theta_B = 56.659$ と計算でき概ね実験結果と同じ値を示した．しかし実験において 56° の値が 54° , 55° の値よりも大きくなり一つだけ外れた値となってしまった理由としてはフォトディテクターに反射光がまっすぐに当たらなかったことが考えられる．

また図 22 において P 偏光の反射強度が入射角 20° から 40° において理論値のグラフ概形から大きく外れてしまった原因は反射角が小さい時に光学機器同士が机上に密集していたためにフォトディテクターを安定して設置することができず中心にビーム光が当たらなかったからだと考えられる．そのように考えると入射角が 10° , 20° において P 偏光の反射光強度が S 偏光の反射光強度に比べて著しく低くなったことにも説明がつく．

またプリズムはスライドガラスを安定して机に固定するために用いたと考えられる．またスライドガラスとプリズムの間にオイルを塗ったのはオイルの屈折率が 1.518 とガラスの屈折率に非常に近く，オイルによりプリズムとスライドガラスの間に空気を入れないためだと考えられる．このことによってプリズムによる反射光を作り出さずにスライドガラスによって反射された光のみを測定することができるようになった働きがあると推測される．またブリュースター角において S 偏光，P 偏光の関係は図 24 で表される．

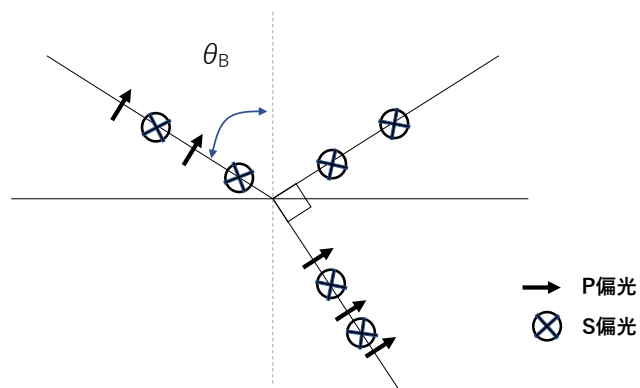


図 24 ブリュースター角における S 偏光 P 偏光の関係

5 Diffraction grating fabrication by two-beam interference

Purpose

今回の実験の目的は二光干渉によってフォトクロミックプレートに作られた干渉模様を記録することである。またフォトクロミックプレートにできた干渉模様によって回折する光について計測し、その干渉模様を理論的に考察する。

5.1 Diffraction grating fabrication by two-beam interference

5.1.1 Procedure

図 25 のように光学系を製作する。まず偏光板を光路に挿入して光の強度を下げておく。偏光された光を 50% のビームスプリッターによってビームを二つに分ける。分けたビームをそれぞれミラーで反射させてフォトクロミックプレートで一点に集まるように調節する。この時分けられた光のそれぞれの光路を $Path1 = BS - M2 - filterholder$, $Path2 = BS - M1 - M3 - filterholder$ とする。光の干渉により回折格子を作りたいのでこの $Path1, Path2$ の光路差がコヒーレント長を上回らないように注意する。今回の実験での光路長は $Path1 = 74cm$, $Path2 = 74cm$ であり光路差は $0cm$ となった。また二光のなす角 2θ が 30° を超えないように注意してフィルターホルダー、ミラーの位置を調節する。今回は $2\theta = 27.7^\circ$ とした。次に偏光板を回し光の強度が強くなるように調節する。その後フォトクロミックプレートに干渉光を当てることで回折格子をフォトクロミックプレート上に作り出す。その後フィルターホルダーの後ろに紙をスクリーンとして置き干渉光を観察する。また $Path1, Path2$ の光を交互に隠すことでスクリーンにどのような干渉スポットが浮かび上がるのかを確認する。

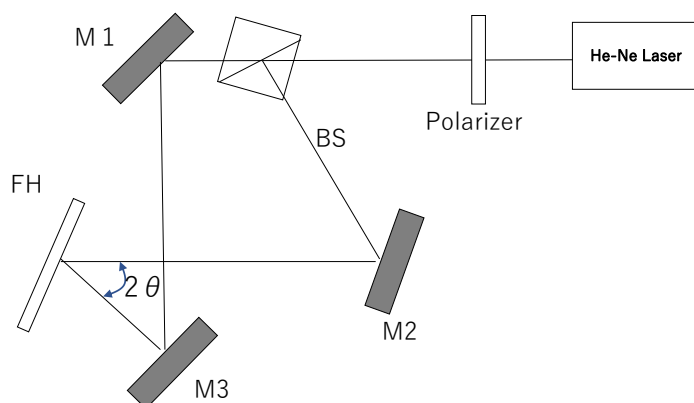


図 25 二光干渉による回折格子作成の実験

その次にレーザー光を十分に当てたフォトクロミックプレートを顕微鏡で観察し単位長さあたりに何本の干渉縞が存在しているのかを観察する。

5.1.2 Result

偏光板を回転させ光の強度を上げてしばらくフォトクロミックプレートに光を当てると図 26 に示すような干渉スポットがスクリーン上に現れた。また光路 Path1, Path2 のどちらを隠しても干渉スポットは消えることなく存在し続けた。その後 Path2 からのビーム光を遮り Path1 からの光を用いてスクリーン上の干渉スポットを観察した。ビーム光の回折格子への入射角は 0° , 回折角は 27.512° であった。さらに光学顕微鏡で干渉模様を観察すると図 27 に示すような干渉縞が観測された。干渉縞の本数を数えたところフォトクロミックプレート上には $80\ \mu\text{m}$ に 58 本の干渉縞が観測された。

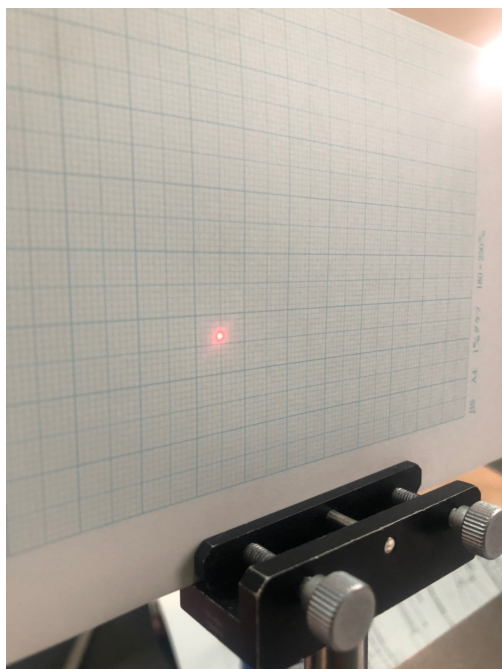


図 26 フォトクロミックプレートによってできた干渉縞

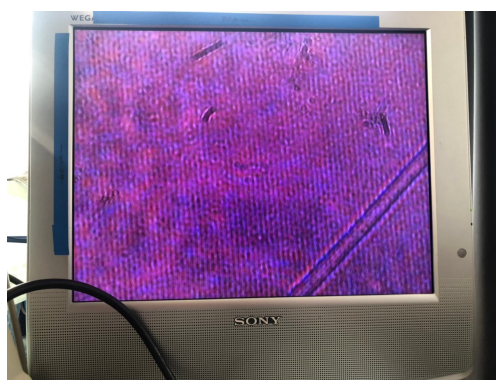


図 27 フォトクロミックプレート上の干渉縞

5.1.3 Discussion

まずフィルターホルダーの後ろのスクリーンに干渉スポットが観測されたのは、干渉模様がフォトクロミックプレート上にうつされたことにより干渉模様の部分の色がなくなり、フォトクロミックプレートが回折格子の役割を果たしたためだと考えられる。また、フォトクロミックプレート上に $80\ \mu\text{m}$ に 58 本の干渉縞が観測されたことからこの回折格子定数は $d = 1.379\ \mu\text{m}$ であることがわかる。また回折格子の関係式 $\lambda = 2d\sin\theta$, さらに He-Ne レーザーの波長 ($\lambda = 632.8\ \mu\text{m}$) と実験

より $2\theta = 27.7$ から格子定数 $d = 1321.79 \mu m$ と計算できる.

以上より回折格子定数の実験値と理論値は概ね一致した. しかし θ の値が大きかったために回折格子定数が小さく目測で $80 \mu m$ の中に何本の干渉縞があるのかを観察するのが困難になってしまったために理論値に多少の誤差が生じてしまったことなどが考えられる.

またスクリーン上に映った回折光は一つしか観察されなかったので $m = -1$, 入射角 $\theta_1 = 0^\circ$ として回折格子の干渉条件 $d\sin\theta_1 - d\sin\theta_2 = m\lambda$ の関係式に代入して回折角を求めると, $\theta_2 = 27.316$ であり実験で計測した 27.512° と近い値となった. この時回折格子に対して入射角が完全に垂直ではなかったことなどが値が異なった理由として考えられる.

6 Holography - two-beam transmission hologram

6.1 Two-beam transmission holograms

6.1.1 Purpose

前回の二光干渉による回折格子の製作の原理を用いてホログラムを作る．ホログラムの原理を理解する．

6.1.2 Contents

以下のように光学系を製作する．

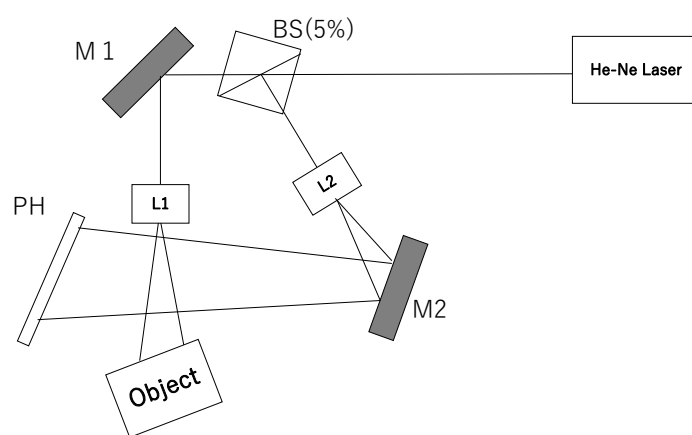


図 28 二光干渉によるホログラムの実験

まず今回は 5% のビームスプリッターを使用した．また分けたそれぞれの光を L1,L2 のレンズによって拡大した．L1 によって拡大された光を物体にあて反射光がプレートホルダーに届くように調節した．この時 Object として白鳥のモデルを使用した．また前回から基本的に実験機材を動かしていないため二つの光路差は 0 となっておりコヒーレント長を上回らないことを確認した．またプレートホルダー上において参照光の強度がと物体光の強度が 2 から 3 倍となるように計測器を用いて調節した．

この時参照光強度は $0.55 \mu W$, 物体光強度は $0.20 \mu W$ であった．以上結果よりフィルムプレートに露光する時間を計算する．ホログラムを作るのに最適な露光時間は $90[\mu J/cm^2]$ であるので計測器の面積が $16\pi[mm^2]$ であることに注意すると露光時間は $60.32[s]$ と計算できる．

露光が終わったら次は現像作業を行う．現像は以下のような手順で行なった．

現像後 5% ビームスプリッターを 100% ビームスプリッターに取り替え参照光を現像したフィルターにあてフィルター越しに干渉光を覗き込んでホログラムが作られているかを確認する．

表 8 現像の手順

項目		内容	処理時間
現像	現像液 コピナール	ホログラム乾板を浸し連続攪拌する	6 分
水洗い	水	水ですすぐ	2 分
定着	定着液 スーパーフィジフィックス	ホログラム乾板を浸し連続攪拌する	5 分
予備水洗い	水	水ですすぐ	2 分
水洗促進浴	水洗促進剤 フジ QW	浸しながら攪拌する	1 分
水洗い	水	水ですすぐ	2 分
脱水	仕上げ剤 ドライウェル	浸しながら攪拌する	1 分
乾燥	ドライヤー	ドライヤーの弱冷風を当てる	乾くまで

6.1.3 Result

現像したフィルターに参照光を当て覗き込むと下の写真のような像が観察できた。またこの像は写真などとは異なり三次元的に映し出されていた。



図 29 白鳥のホログラム

6.1.4 Discussion

まず、今回はコヒーレント長を上回らなかつたためにしっかりフィルター上にホログラムを作る回折格子が作られたと考えられる。もし光路差がコヒーレンス長を上回ってしまった場合はフィルター上で干渉を起こすことができずに綺麗にホログラムが生成されないことが予測される。そのため光路差を等しくする作業はこの実験において非常に重要な操作であったと考えられる。また今回の実験で得られたフィルターが割れたとしてもその破片に同じように参照光を同じ角度で当てるとこのホログラムは再現されると予想される。これはホログラムが再生されるためのフィルター上の回折格子の間隔は前回の実験から分かるように数 $\mu\text{ m}$ のオーダーであるからである。そのためある程度小さくプレートを割ったとしてもホログラムが再生されることが予想される。

また今回のホログラムの生成は原理としては実験5の二光干渉によってできた回折格子による干渉と同じである。今回の場合は前回の実験と異なり白鳥のオブジェクトから反射された光と参照光によってプレート上に回折格子が作られた。このプレートに参照光を照射した際に透過光の複素振幅が物体光に比例する光が再生されるためだと説明できる。この現象は以下の式によって説明される。

まず光電場を $E(\vec{r}, t) = A_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} = \Psi e^{-i\omega t}$ ここで複素振幅 $\Psi = A_0 e^{i\phi}$ ($\phi = \vec{k} \cdot \vec{r}$) とする。するとまずプレート上では参照光と物体光が干渉を起こすのでプレート面での複素振幅 Ψ_H は

$$\Psi_H = \Psi_O + \Psi_R$$

ここで Ψ_O, Ψ_R はそれぞれ物体光と参照光の複素振幅を表す。したがってプレート上でのビーム光の強度 I_H は

$$\begin{aligned} I_H &= (\Psi_O + \Psi_R)(\Psi_O + \Psi_R)^* \\ &= |\Psi_O|^2 + |\Psi_R|^2 + \Psi_R \Psi_O^* + \Psi_O \Psi_R^* \end{aligned}$$

プレート上の感光材がこの光強度 I_H に比例した透過率変化を起こすはずなのでこのプレートに参照光のみを照射した際に生成される透過光複素振幅 Ψ_T は比例定数 K を用いて

$$\begin{aligned} I_H &= K \Psi_R [|\Psi_O|^2 + |\Psi_R|^2 + \Psi_R \Psi_O^* + \Psi_O \Psi_R^*] \\ &= K [\Psi_R (|\Psi_O|^2 + |\Psi_R|^2) + \Psi_R^2 \Psi_O^* + \Psi_O |\Psi_R|^2] \end{aligned}$$

この時第三項の複素振幅 $\Psi_O |\Psi_R|^2$ は物体光の強度に比例するため、参照光の透過光により物体光が再生されることが数式によっても示された。

参考文献

- [1] 櫛田孝司『光物理学』（共立出版，1983）