

ガラスファイバーを用いたヤングの実験

霜田光一

〒180-0003 武蔵野市吉祥寺南町 1-19-15

Demonstration of Young's Experiment Using Glass Fibers

Koichi SHIMODA

1-19-15 Kichijoji-Minamicho, Musashino 180-0003

Effective demonstration of diffraction and interference can be performed by using glass fibers of 0.1 to 0.3 mm in diameter. Young's experiment using a double glass fiber shows much brighter pattern of a very large number of fringes than those with a conventional double slit. The diffraction pattern formed with either a single or a double glass fiber without shielding outside of the fiber is composed by interference of transmitted light through the fiber and diffracted light around the fiber. The interference patterns of transmitted light and the diffracted light can be separated by making use of slightly tapered fibers. The interference pattern may be interpreted from the Babinet's principle.

Key words: Young's experiment, optics education, diffraction, interference

1. はじめに

内視鏡や光通信に用いられているファイバーは、細いガラスファイバーの軸方向に光を伝送するが、ここで実験するガラスファイバーは軸に垂直に光を通す。実験に用いるガラスファイバーは、ガラス棒の一部をガスバーナーの炎で溶かし、炎の外に出して熱いうちに引き伸ばすことによって簡単に作ることができる。急速に引き伸ばせば10 μm以下にもなるが、この実験にはややゆっくりと引き伸ばして0.2 mm前後の太さにしたものを使う。

ガラスファイバーは1 cmあまりの長さに切って、名刺サイズの紙にあけた直径6 mmの孔を差し渡すように接着テープで貼りつけると、取り扱いが便利である。

2. ヤングの実験

光の波動性を示すもっとも基礎的な実験は、最初に T. Young が1801年に行った複スリットによる干渉縞の観測であって、ヤングの実験として知られている。ヤングの実験では、せまいスリットのある遮光板 A と複スリットのある遮光板 B とスクリーン C とを Fig. 1 のように並べ、単色光源の光が遮光板 A のスリット P₀ で回折して遮光板 B のスリット P₁ と P₂ とを照らすようにすると、スクリーン C の上に干渉縞が現れる。よく知られているように、光の波動説での現象は完全に説明できるが、粒子説では

説明できない。スリット P₁ を通過した光の粒子とスリット P₂ を通過した光の粒子とは別々であるから、干渉するはずがないのである。そこで、ヤングの実験は光の波動説の強い根拠になったが、量子力学的光子は、古典的粒子とは違った奇妙な振る舞いをする。これらのこととは、朝永振一郎の書いた「光子の裁判—ある日の夢—」に懇切丁寧に解説されている¹⁾。

光は波長 λ の波動であると考え、スリットの幅が十分にせまいとき、P₁ と P₂ の間隔を a 、B と C の距離を L とすれば、スクリーン C には $\lambda L/a$ を周期とする等間隔の干渉縞ができる。スクリーン C の上でスリットに垂直に x 軸をとれば、干渉縞の強度は

$$I = I_m \{1 + \cos(2\pi ax/\lambda L)\} \quad (1)$$

で表される。

レーザーがなかったときには、複スリット P₁ と P₂ を照らす光を空間的にコヒーレントにするために、スリット P₀ が必要であった。そのため、干渉縞は暗くて、完全暗室でなければ観測困難であった。光源にレーザーを用いると、レーザー光の空間的コヒーレンスがよいのでスリット P₀ が不要になり、しかも輝度が高いので、普通の部屋を暗くしただけでも容易にヤングの干渉縞が観測できる。しかし、上述のように複スリットが線光源とみなせるように

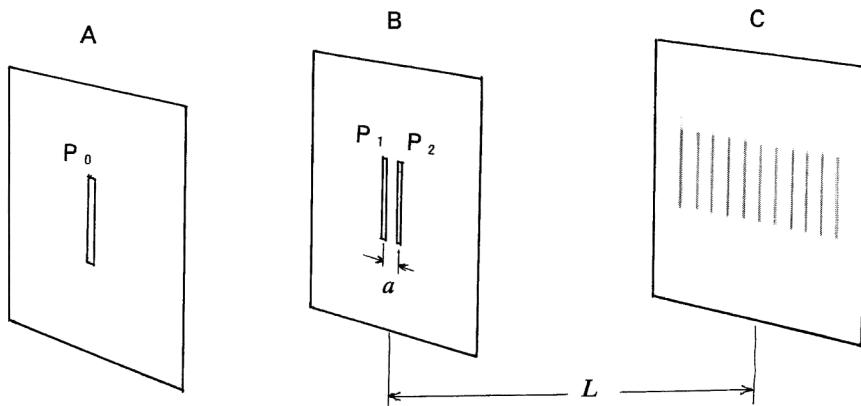


Fig. 1 Young's experiment.



Fig. 2 Young's fringes observed with a double slit of $a=0.4$ mm and $w=0.1$ mm.

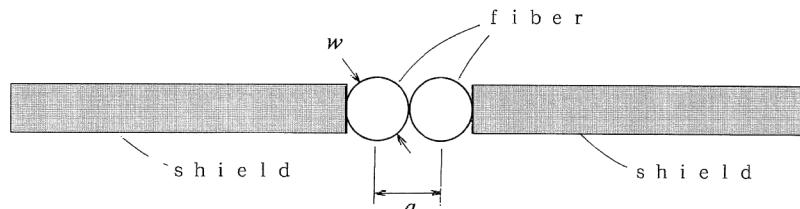


Fig. 3 Cross-section of a double fiber for the Young's experiment.

するためには、スリット幅 w を波長 λ と同程度にせまくしなければならないから、干渉縞は暗くなる。スリット幅 w を広くすると、ヤングの干渉縞は Fig. 2 のように幅 w の单一スリットによる回折像の強度分布で変調される。これを式で表せば

$$I = I_m \frac{\sin^2 \theta}{\theta^2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi a}{\lambda L} x \right) \right)$$

ただし $\theta = \frac{\pi w}{\lambda L} x$ (2)

のようになる。

单一スリットによる回折光の强度分布を求めるには、スリット幅 w の中の各部分を経由した光の干渉を積分する必要があるが、これはヤングの実験を理解していないければ説明できない。したがって、光学の教科書では、はじめに P_1 と P_2 を点光源または線光源としてヤングの干渉縞を説明している。しかし、実験では、スリット幅を $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度

にすると干渉縞が暗くてみえないので、 0.1 mm 程度の幅にしている。したがって、ヤングの干渉縞の強度は $x=0$ で最大で、 $x=\pm\lambda L/w, \pm 2\lambda L/w \dots$ で 0 になる。たとえば、 $a=0.4\text{ mm}, w=0.1\text{ mm}$ では $a:w=4:1$ なので土 4 次の干渉縞は消失し、 $\pm\lambda L/w$ の範囲には Fig. 2 のように 7 本しか観測できない。これでは、ヤングの実験の干渉縞が式 (1) のように正弦波状の繰り返しになるという理論的考察の実証実験として不完全である。

Fig. 3 のように、2 本のガラスファイバーを並べて複スリットのかわりに用いれば、ガラスファイバーが円柱レンズの作用をして、ファイバーの後側に線光源ができる。ファイバーの直径を w 、ガラスの屈折率を $1.5 \sim 1.6$ とするとき、焦点（線）はファイバーの後面から $0.25 \sim 0.17 w$ の距離にある。そこで、複ファイバーとほぼ垂直にレーザー光が入射すると、ファイバーの後側の空間に間隔 $a=w$ の 2 つの線光源ができる。この線光源からの光の干渉によっ

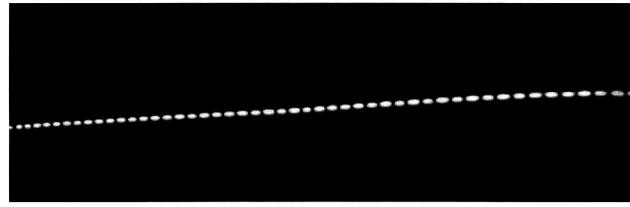


Fig. 4 Young's fringes observed with a double fiber of $a=w=0.17$ mm.

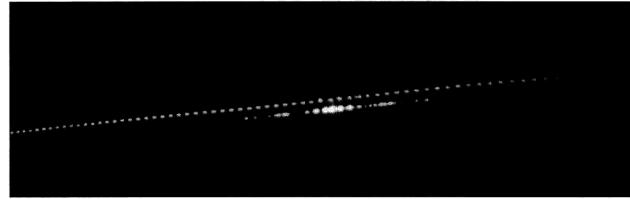


Fig. 5 Young's fringes (upper) and diffraction pattern (lower) observed with a slightly tapered double fiber of $w=0.21$ mm and $a=0.26$ mm without shielding outsides.

て、多数のヤングの干渉縞がほとんど等しい強度で Fig. 4 のように観測される。ファイバーに入射した光の 90%以上が透過して干渉縞をつくるので干渉縞は明るく、線光源の横に遮光板がないので、入射光から $\pm 90^\circ$ の方向までも干渉縞が現れる。Fig. 4 は $a=w=0.17$ mm の複ファイバーで得られた干渉縞の一部の写真であるが、左のほうで干渉縞の間隔がせまくなっているのは、スクリーンの右側から撮影しているからである。

3. 遮光板のないファイバーによる光の回折

Fig. 3 の複ファイバーをつくるのに、筆者は小さく切っ

た黒い写真フィルムを遮光板として用いたが、遮光板をつけないで 1 本または 2 本のファイバーを並べた実験のほうがやりやすい。このときには、ファイバーの中を透過した光とファイバーの外側を通過した光が重なり合って干渉するので、複雑な回折像が現れる。この回折像の解析は面倒であるが、わずかなテーパーをもつファイバーを用いると、ファイバーの中を透過した光と外側を通過した光とを分離することができる。テーパーのあるファイバーを透過する光はテーパーのプリズム作用で偏向（偏角）するので、ファイバーの外側を直進する光とは違う方向に進むからである。

テーパーをつけた複ファイバーでヤングの干渉縞を観測するには、遮光板をつけないで 2 本のガラスファイバーを並べるだけでよく、2 本のファイバーの間に隙間があっても差し支えない。しかし、2 本のファイバーのテーパーもファイバーの平行度もレーザー光の広がり角以内にそろえなければならない。そこで、ヤングの実験用の複ファイバーをつくるには、テーパー角のあまり大きくなれない 2 本のファイバーを使ったほうがよい。Fig. 5 は、このようにしてつくった複ファイバー ($w=0.21$ mm, $a=0.26$ mm) によるレーザー光の回折干渉像の写真である。上側にはヤングの干渉縞、下側にはファイバーの両側と 2 本のファイバーの隙間 ($a-w$) を通過した光の回折像が現れている。

ファイバーの外側を通った光の回折像は、バビネの原理²⁾を使って説明することができる。バビネの原理によれば、光源とスクリーンとの間に、任意の形の遮光板を置いたときのスクリーン上の光の振幅分布を $u(x, y)$ とし、遮光板の遮光部と透過部を逆転した（ネガの）遮光板を置

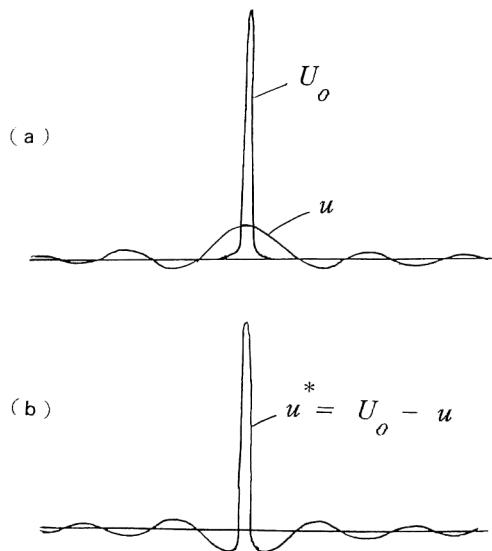


Fig. 6 (a) Distribution of the amplitude of diffracted light by a single slit. (b) Distribution of the amplitude of diffracted light by a single wire of equal width with the slit.

いたときのスクリーン上の振幅分布を $u^*(x, y)$ とする
と、両者の和

$$u(x, y) + u^*(x, y) = U_0(x, y) \quad (3)$$

は、遮光板がないときのスクリーン上の振幅分布 $U_0(x, y)$ に等しい。

たとえば、レーザー光を単一スリットに入射させたときの回折像の振幅 u は Fig. 6 の上側 (a) のようになるが、単一スリットと等しい幅のファイバーによる回折像の振幅 $u^* = U_0 - u$ は下側 (b) に示すようになる。レーザービームは細いので、中央部以外では U_0 はほとんど 0 である。したがって、 u^* の干渉縞は中央部だけが変形し、その他の部分では振幅の符号が変わるだけだから、強度分布はスリットでもファイバーの遮光でも同様になる。そこで、2 本のファイバーの周囲から回折した光による干渉像は、中央の部分を除けば複スリットによる干渉像と同様になるのである。

1 本または 2 本のテープファイバーの実験では、ファイバーを透過した光と外側から回折した光による現象を比較考察することができる。また、バビネの原理は写真的ポジとネガとの関係と同等だと誤解されることがあるが、このような実験は、バビネの原理が光の強度分布ではなく振幅分布を考えていることを教えてくれる。

4. ファイバー回折格子

直径の等しいガラスファイバーを何本も並べると、効率のよい透過型の回折格子ができる。しかし、初学者にファイバー回折格子の実験をみせると、多数のファイバーがあるので干渉縞がたくさん現れるのだと誤解されることが多い。したがって、光学の基礎教育では、2 本のファイバーによる回折と干渉によって、式 (1) の通りに強度が正弦波で変化する干渉縞が Fig. 4 のように観察されることに重点を置き、回折格子の実験は先送りすることを勧め

たい。

ファイバーの本数を増すと、干渉縞の数がふえるのではなくて、干渉縞が正弦波よりも鋭くなるのである。このことは、ヤングの実験を十分に理解したうえで学ぶ次の段階の学習にしたほうがよいと思う。

5. おわりに

ここで述べた実験の大部分は、小型の He-Ne レーザーの赤色光 (633 nm, 1 mW) を用いて行ったものである。干渉像の写真は、 $L=4\text{ m}$ に置いたスクリーンを標準レンズのカメラで 0.8~1 m の距離から撮影した。一部の実験は He-Cd レーザーの青紫色光 (441 nm) でも行ったが、光の波長が異なれば、波長に比例して干渉像の大きさが異なるだけである。スクリーンまでの距離やレーザー出力にもよるが、可視光のどの波長の実験でも、直径 0.1~0.3 mm 程度のガラスファイバーが適当であろう。あまり細いファイバーは見えにくかったり曲がりやすかったりして取り扱いが困難であるし、あまり太いと干渉縞の間隔（周期）がせますぎる。なお、ファイバーを接着するテープには、粘着力の弱いものを使ったほうが工作しやすい。

この研究は、2003 年 9 月に開催された第 37 回日本光学会サマーセミナーにおけるナイトセッションの実験を契機として発展したもので、セミナーに関係された方々に感謝いたします。特に、元上智大学の石川和枝氏には、その後も引き続き実験についてのコメントや He-Cd レーザーの使用などについて、ご支援をいただいたことを感謝いたします。

文 献

- 1) 朝永振一郎：“光子の裁判”，量子力学的世界像，朝永振一郎著作集 8 (みずず書房, 1982) pp. 3-40.
- 2) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 3rd ed. (Pergamon Press, New York, 1965) pp. 379-381.