

# 高感度CCDカメラを用いたヤングの干渉実験教材の試作とその特性評価

小林 浩 太 埼玉県立所沢北高等学校

大向 隆 三 埼玉大学教育学部自然科学講座

キーワード：ヤングの実験、CCDカメラ、明線間隔、可干渉条件

## 1. はじめに

高等学校や大学の初級程度の物理学では、光の波動性を示す実験としてヤングの干渉実験を学ぶ。教科書で説明されているヤングの干渉実験は、ランプからの光を単スリットと複スリットに通し、そこから離れたスクリーン上で明暗の縞模様（干渉縞）を観測できるという実験である。光を粒子として考えたのならば、スクリーン上で2つのスリット（単スリットと、複スリットのうちの一方）を結ぶ直線とスクリーンの交わる2点で明るくなると予想されるが、実験結果はそうならず、周期的に明暗を繰り返す縞模様が観測される。この結果は光の正体が波であると考えれば2つの光波の干渉の結果生じた現象と説明できるので、光の波動性を明快に示した歴史的に意義のある物理学実験のひとつである。しかし、学習者が実際に行う実験として紹介されているヤングの干渉実験は、ランプの代わりにレーザーを光源として用いる内容の記載がほとんどである<sup>1)</sup>。レーザー光を光源に用いることの技術的メリットは、レーザー光のコヒーレンスにより単スリットを使わずに複スリットだけで実験を行うことができ実験の配置が簡単になること、レーザー光は指向性が高く単一波長の光であるので干渉縞を明瞭に観察できること、最近ではレーザーポインターなど可視域に発振波長を持つ半導体レーザーを比較的手軽に購入できることなどが挙げられる。しかし、上記のような機器と配置での実験では学習者が本来のヤングの実験では存在した単スリットの役割を考える機会を奪われたり、教科書の説明と実際の実験配置との違いに困惑したりする可能性がある。また何よりも、レーザーの存在しない時代にランプの光で干渉縞を生じさせ観察するために行われた実験的な工夫は極めて重要であり、それらを学習者が追体験することは教育的に有意義である。

そこで我々は、ランプ光源、単スリット、複スリットを全て用いてヤングの干渉実験を行う実験教材の開発に取り組んできた。ヤングの干渉実験に関して、今までに太陽光を用いてフィルム式カメラと暗筒で干渉縞を撮影した研究<sup>2)</sup>や、光センサーと電気回路でレーザー光による干渉縞の光強度分布を表示する教材の研究<sup>3)</sup>などがある。我々は光源に白色LEDライトを、干渉縞の検出には高感度モノクロCCDカメラを使用するというユニークな方法でヤングの干渉実験教材を作製するアイデアを提案し、その開発を行った。その結果、我々の提案した実験機器と配置で干渉縞を観察して記録すること、その画像から理論値と一致した明線間隔を得ること、15次までの高次の明線を明瞭に観測すること、単一スリットのフラウンホーファー回折を観測することなどを達成した<sup>4)</sup>。白色LEDライトだと高輝度の光源を使用してもハロゲンランプのように高温になることはなく、学習者が安全に実験に取り組むことができる。また、CCDカメラによる観察ではリアルタイムに干渉縞を観察することが可能になるので、実験時における機器配置の調整にも便利であるし、干渉縞をプロジェクターでスクリーンへ映して教室で演示することもできる。しかしこの研究

では、感度の高い CCD カメラの使用を優先させたので白黒の干渉縞の画像を撮影しただけで、カラー画像での撮影はまだ行われていない。色（光の波長）によって干渉縞の様子がどのように変化するのが一見して分かりにくいままであった。

本研究では、干渉縞検出用のカメラを高感度カラー CCD カメラに換えて実験を行う。モノクロ CCD カメラの実験から、高次の明線の観測のためにはどの程度の感度が必要かわかったので、それに準じた性能のカラーカメラを使用する。撮影された干渉縞の明線間隔を測定し、理論値との比較を行う。また、ヤングの実験の説明では単スリットから複スリットまでの距離について言及されることは殆んどない。しかし物理的には、干渉縞を観測するためにスリット幅、スリット間隔、スリット間距離、波長らの物理量の間には一定の制限が加えられる。明瞭な干渉縞を観測するために、2つのスリット間距離について課される条件を実際の干渉縞の撮影結果から考察する。さらに、干渉縞の明線間隔は、スリット間隔とスクリーン上の観測位置が複スリットからスクリーンまでの距離に比べて十分小さいという近似条件を用いて導かれた値を使うのが一般的であるが、その近似を使って得た明線間隔が実際のそれと比べて差が生じるのはどのような場合かも調べる。これらの研究により、我々の試作したヤングの干渉実験教材を教科書の説明に即して学習者が正しく理解するために課せられる実際的な実験条件を明確にする。

## 2. 高感度カラー CCD カメラによる干渉縞撮影

最初に我々はカメラを高感度カラー CCD カメラに換えて干渉縞の撮影を試み、何次の明線まで観測できるか、明線間隔の測定値と理論的に計算から得られる値が一致するかなどを調べた。

実験配置写真を図 1 に示す。これは、CCD カメラ以外文献 [4] で記載したものと同じで、光源は高輝度白色 LED 照明装置（シグマ光機 SLA-100）、スリットは内田洋行製 CG-5 を使用した。単・複スリットの両方ともスリットの幅 ( $D$ ) は  $0.02 \pm 0.005 \text{ mm}$  で、複スリットのスリット間隔 ( $d$ ) は  $0.1 \pm 0.001 \text{ mm}$  である。光源から出た光のうちスリットを通った光以外は CCD カメラで検出しないようにするため、プラスチック製パイプ（長さ 160 mm, 外径 42 mm, 内径 40 mm）で遮光筒を作製した。その概略を図 2 に示す。この筒に 100 mm の間隔 ( $l$ ) で単スリットと複スリットを平行に設置した。スリットの設置部分には筒に切り込み（深さ 30 mm, 幅 8 mm）を入れ、切り込みの中にはパイプにそって丸く切った 2 枚のスポンジ（厚さ 5 mm）を黒いビニールテープで固定した。このスポンジの間にスリットをはさんで設置し、スリットのパイプからの取り外しや位置調整を容易にした。白色 LED 照明装置からの出力光を狭帯域バンドパスフィルタ（BPF）に通して単色化し、単スリットへ照射した。BPF の透過率の半値全幅は 10 nm、透過の中心波長は  $620 \text{ nm} \cdot 590 \text{ nm} \cdot 520 \text{ nm} \cdot 490 \text{ nm}$  とした。干渉縞の撮影は CCD 受光面上に生じる光の強度パターンをモ

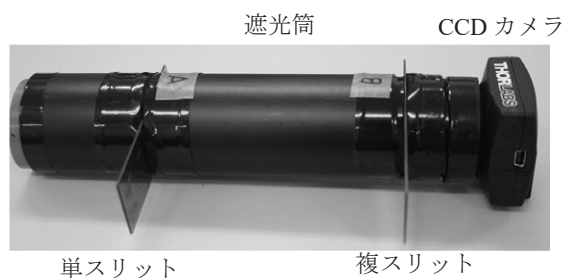


図 1 実験配置写真

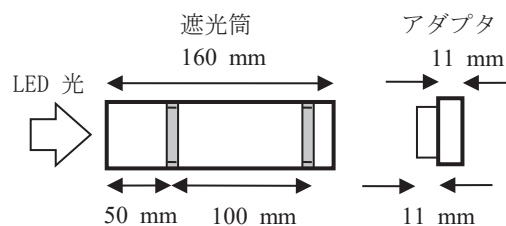


図 2 遮光筒の概略

ニターすることによって行うため、カメラにはレンズをつけず、CCD面を露出させて複スリット側へ向けて配置した。複スリットとCCDカメラの間にはカメラの接続と遮光を兼ねたアダプタを用意した。アダプタの概略も図2に示す。遮光筒と同じように外径42mmのプラスチック製パイプを使い、遮光筒との接続側には紙筒（外径38mm，内径33mm）を内側に取り付け、CCDカメラとの接続部にはパイプの内側にそってスポンジ（厚さ5mm）を貼り付けた。これらにより、実験時における遮光とカメラ交換を両立できるようにした。

我々がこの実験で使用した高感度カラー CCDカメラは、ワテック社製WAT-221S2である。このカメラはアナログ式ではあるが、もっとも高感度で撮影できる条件で動作させたとき最低被写体照度が0.000025lxになる。従来使用していた高感度モノクロ CCDカメラ（WAT-910HX：最低被写体照度0.000003lx）<sup>4)</sup>と比べて検出感度が約10倍劣ることになるが、モノクロカメラで十分な感度の余裕をもって干渉縞を撮影できていたので、この程度の感度の低下では撮影に支障が出ないと見込んだ。また、このカメラのCCD受光部におけるセルサイズが8.4 $\mu$ m (H)  $\times$  9.8 $\mu$ m (V)、総画素数も811 (H)  $\times$  508 (V) であり、想定される干渉縞の明線間隔（0.2mm程度）の測定や高次の明線の観察にも十分な性能であると判断した。

このカメラを用い、干渉縞を撮影した結果が図3である。これらは4つの波長での干渉縞撮影結果であり、中央の最も明るい0次明線の位置を合わせて画像を配置した。単スリットからCCD受光面までの距離 ( $L$ ) は31.1 $\pm$ 0.3mm、カメラの感度は最低被写体照度が0.00005lxの条件で測定した。図3では、4つの波長全てで明瞭な干渉縞が確認できた。光の波長が長くなるほど、明線の間隔が広がっていることもわかる。さらに、観測できた明線は波長620nmで15次、波長490nmでは19次までであり、高次の明線まで検出できている。現在のところこの検出可能な明線の次数は、カメラの感度ではなく実験の配置とCCD受光面のサイズで制限されているので、複スリットからCCD受光面までの距離を短くすればさらに高次の明線観測も可能になると考えられる。4つの波長について、明線間隔を理論から計算で得た値（計算値）と測定から得た値（測定値）を表1にまとめた。明線間隔の測定値は、図3の画像をプリントアウトして紙面上での明線間隔を測定したあと、それを紙面の画像の両端の長ささとCCD受光面の水平方向のサイズとの比から実際の間隔に換算して求めた。全ての波長で計算値と測定値は誤差の範囲内で一致しており、理論に従う測定値がこの実験装置で得られていることがわかる。また、明線の強度は中央の0次明線が最も明るく、それから離れるに従い周期的に変化した。特に、5次、11次、16次の明線は観測されなかった。このような明線強度の変化はフラウンホーファー回折によって生じており、明線が観測されない次数は $d/D$ の整数倍で与えられる。実験で使用しているスリットでは、この値は5 $\pm$

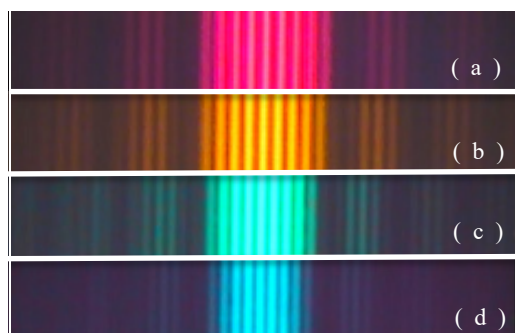


図3 高輝度白色LED光による干渉縞撮影結果  
(a) 620nm, (b) 590nm, (c) 520nm, (d) 490nm

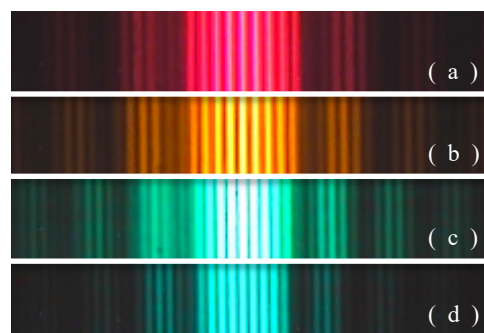


図4 白色LED懐中電灯による干渉縞撮影結果  
(a) 620nm, (b) 590nm, (c) 520nm, (d) 490nm

1 になり、上記の次数はこの値の整数倍で与えられる範囲に入っていた。

表1 干渉縞の明線間隔

波長 (nm)	計算値 (mm)	測定値 (mm)
620	0.193±0.003	0.191±0.001
590	0.183±0.003	0.180±0.001
520	0.162±0.003	0.162±0.001
490	0.152±0.003	0.152±0.001

上記のように高感度カラー CCD カメラで干渉縞の撮影、明線間隔の測定、フラウンホーファー回折の観測をできた。それに加えて干渉縞撮影にカメラの感度には十分な余裕があることもわかったので、実験装置を今よりも簡略化して学習者がもっと使いやすくするために光源を懐中電灯タイプの白色 LED 光源に換えて同様の実験を行った。その結果が図4である。光源の輝度が低下するのでカメラの感度は最低被写体照度が0.000025 lx 上げて撮影した。そのため、図4は図3よりも明るい明線が観測されているように見える。図4の結果は図3の結果と同様に、干渉縞を高次の明線まで明瞭に撮影できており、フラウンホーファー回折も観測できている。懐中電灯タイプの白色 LED 光源は電池で点灯でき、手軽に購入することができる。我々の実験装置では、このような汎用的な光源に換えても学習者の理解に必要な物理的な実験結果を十分に提供できることが示された。

### 3. 可干渉条件の検討

ヤングの干渉実験において干渉縞を発生させ、それを学習者が観測するためには、スリットの幅 ( $D$ )、スリットの間隔 ( $d$ )、単スリットから複スリットまでの距離 ( $l$ )、光の波長 ( $\lambda$ ) について制限が加えられる。これは光源を点波源とみなし、複スリットの2つのスリットを透過する光波の位相が同じとみなすために課される条件である。この条件を式で表すと、

$$d \cdot D \ll l \cdot \lambda \tag{1}$$

となり、この条件を可干渉の条件と呼ぶ<sup>5)</sup>。式 (1) は光の干渉を生じさせるために必須の実験条件を決定する重要な内容を表しているが、不等式で表されており、この式に現れる各物理量について不等式を満たす範囲でどの程度許容されるのか詳しく調べられた研究がない。また、高校の物理の教科書には  $l$  の満たすべき条件について記述されていない。前章の実験条件では、波長 520nm で  $(d \cdot D / l \cdot \lambda) = 0.12$  となり、図3 (c) の通り明瞭な干渉縞を観測できているので可干渉の条件を満たしていると言える。本研究では、実際にヤングの干渉実験を行う際に実験装置の具体的な配置を決めるために、この  $(d \cdot D / l \cdot \lambda)$  の値がどのような条件を満たさねばならないかを、干渉縞の観測結果から定量的に明らかにすることを試みた。

実験配置は図1及び図2と同じである。使用したスリットも前述の通りである。光源は高輝度白色 LED 照明装置、使用した BPF は中心波長が 520nm のものである。単スリットから複スリットまでの距離 ( $l$ ) を 40mm から短くしながら干渉縞を撮影した。

実験結果を図5に示す。図5の (a)、(b)、(c) はそれぞれ  $l$  が 40mm、25mm、15mm のと

きで、これらは  $(d \cdot D / l \cdot \lambda)$  の値に換算すると0.10、0.15、0.26となる。撮影時のCCDカメラの感度はすべて最低被写体照度が0.0032lxである。図5 (a) では可干渉の条件を十分に満たしていると考えられ、実際に明瞭な干渉縞を確認できた。フラウンホーファー回折も観測された。 $l$  を25mmまで短くした図5 (b) では、単スリットから複スリットまでの距離が短くなる分CCD受光面での光量が増大するので、図5 (a) よりも明るい干渉縞が観測された。また、明線は1本ずつ分離して観測されており、光の干渉を実験的に観測できていると言える。 $l$  をさらに短くして15mmにしたとき (図5 (c))、従来のように明線の1本ずつを区別できなくなった。その結果縞模様が観測されず、画像の中央部が全体的に明るい帯のようになった。このように見える理由は2つ考えられる。一つ目は  $l$  の値を小さくすることで可干渉の条件が成り立たなくなり干渉縞が観察されなくなったこと、二つ目は干渉縞の光量が増大してCCDカメラからの出力信号が飽和したことである。そこでどちらの理由で干渉縞が明瞭に観測できなくなったかを確認するため、CCDカメラの感度を最低被写体照度が0.006lxにまで落として再度撮影した。その結果が図5 (d) である。カメラの感度以外の条件は図5 (c) と同じである。図5 (c) と (d) を比べると、図5 (d) は画像中央部の帯のように見えた部分が暗くなっているが、やはり明線を1本ずつ分離して観測できていない。このことから、図5 (c) 及び (d) では干渉縞が生成されていないと結論できる。すなわち、干渉を発生させるための可干渉の条件は、具体的には  $(d \cdot D / l \cdot \lambda)$  の値が0.15までにすべきであり、これが0.26以上では明線を明確に区別できずに縞模様が観測されなくなる。この値が複スリットの2つのスリットにおいて同時刻に通る光波の位相が同じであると言えるかどうかを決める境界になる。実際の実験においては上記の条件を満たすように可干渉の条件を具体的に定め、実験機器の配置を行う必要がある。

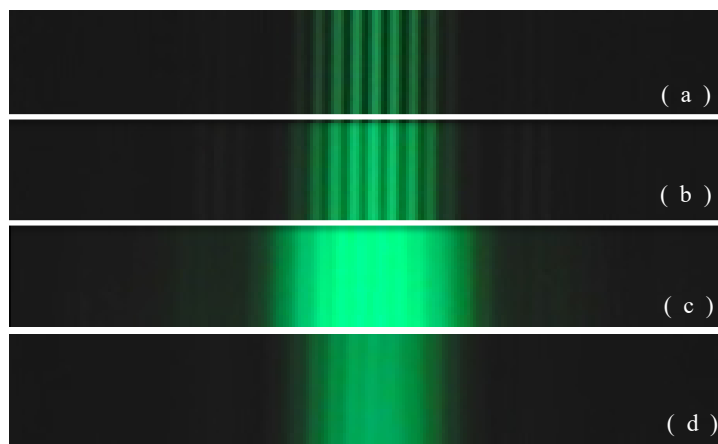


図5 可干渉の条件の実験結果 (a)  $l=40\text{mm}$  (b)  $l=25\text{mm}$  (c)  $l=15\text{mm}$  (d)  $l=15\text{mm}$

#### 4. 明線条件導出の近似が成立する範囲の検証

ヤングの干渉実験において、スクリーン (本実験ではCCDカメラの受光面) 上に生じた明線の位置は、スクリーン上に座標軸 (例えば、 $x$  軸) をとり、光軸 (光源と単スリットを結ぶ直線) がスクリーンと交わる点を原点として、その座標で示される。複スリットの2つのスリットからスクリーン上の点までの距離を  $L_1$ 、 $L_2$  として、明線が生じる位置 ( $x$  座標) は

$$|L_1 - L_2| = m \cdot \lambda \quad (2)$$

から決定される。ここで $\lambda$ は光の波長、 $m$ は0以上の整数である。対称性により $x \geq 0$ に限定してこの式を $L$ 、 $d$ 、 $x$ を用いて表すと、次の式(3)の通りとなる。

$$\sqrt{L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2} - \sqrt{L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2} = m \lambda \quad (3)$$

ところが高校の教科書ではこの式を展開する過程で、複スリットからスクリーンまでの距離( $L$ )がスリット間隔( $d$ )や $x$ に比べて十分大きいという近似が用いられる<sup>6)</sup>。そうすると式(3)を $x$ について解くことが簡単になり、明線位置 $x$ (0次明線からの距離)は

$$x = m (L \lambda / d) \quad (4)$$

となる。この式から干渉縞の明線は式(4)で与えられる一定の間隔で周期的に並ぶという比較的単純でわかりやすい結論が一般的に導かれる。しかし、実際に観測される干渉縞はそのような単純な縞模様ではなく、フラウンホーファー回折の効果が観測されるほか、上記の近似が成り立たない高次明線の領域で明線の間隔が式(4)で与えられる値とは異なるようになる。特に後者の点については、 $x$ と $L$ の相対的な大きさの比がどれくらい小的时候からこの近似が成り立たなくなるのかが今まで実験を通じて明らかにされていない。また、式(4)で表された値とは異なる明線間隔を実験で演示することができれば、式(4)の導出で用いた近似条件の物理的意味を理解させる機会を学習者に提供できるとも言える。

そこで本研究では、上記の近似を用いたときと用いないときで明線が現れる位置を計算によって求め、それらを実際の実験で撮影して得た距離と比較をした。そして、近似を用いず厳密に計算しないと説明できない明線位置を示すのは、何次の明線からであるかを定量的に明らかにする。またこのことは、教科書どおりの実験を行う際には何次の明線までの観測にとどめておくべきかを明確にできる。

実験配置は図1の通りである。ここで光源は高輝度白色LED照明装置とした。干渉縞撮影用のCCDカメラは文献[4]で使用実績のある高感度モノクロCCDカメラ(WATEC製 WAT-910HX)に換えた。今回の実験では20次以上の高次の明線観測が必要になると予想されるため、カラーよりも感度の高いモノクロカメラを使用することとした。使用した光の波長は620nmである。本実験では干渉縞の高次明線の位置を測定することが重要となる。そこで、高次の明線がCCD受光面内に入るように、複スリットからCCD受光面までの距離( $L$ )を $12.5 \pm 0.1$ mmまで短くした。これにより撮影される画像上での明線間隔は狭くなるが、CCD受光面で検出できる明線の次数は従来よりも2倍以上に増える見込みである。また、明線は0次がもっとも明るく、高次になるほど暗くなる傾向がある。そこで実験では異なる2種類の感度で干渉縞を撮影した。1つ目の画像は比較的低い感度で撮影した干渉縞である。この撮影の目的は0次~10次程度の低い次数の明線の明瞭な撮影である。高次の明線観測にはカメラの感度が不足していて、画像上でこれらの領域では真っ暗に映るであろう。もう1つの画像は比較的高い感度で撮影した同じ干渉縞である。この撮影の目的は高次の明線の撮影である。感度が高いので、画像上の0次明線付近では過大な光強度信号を検出して真っ白に映るはずである。10次~15次くらいの明線は両方の感度で撮影さ

れていると思われる。両方の画像に共通して観測される10次～15次の明線の位置を合わせて2つの画像を並べ、0次明線から高次の明線までの距離を求めた。

実験結果を図6に示す。図6 (a)がカメラの感度を最低被写体照度0.000003lxに設定したとき、(b)は0.00077lxに設定したときの干渉縞撮影結果である。事前の予想通り図6 (a)では高次の明線が撮影できているが、明るい明線が観測されるはずの画像中央部では真っ白に映っている。実際の光量に比べてカメラの感度が高すぎ、明線を撮影できていない。逆に図6 (b)では、画像中央部の明るい明線は明瞭に観測できているが、カメラ感度が低すぎて15次以上の高次明線ははっきりと検出されなかった。10次～15次の明線は2つの画像で両方とも撮影できたから、これらの位置を合わせて配置したのが図6の結果である。この結果から、20次、25次、30次の明線位置を測定した。測定に使用した0次と25次の明線位置を図中に矢印で示した。また、式(3)及び式(4)から導かれるそれぞれの次数の明線位置も計算した。20次、25次、30次の明線の0次明線からの距離の測定結果、及び理論式から得られるそれらの計算結果を表2にまとめた。明線位置の測定値の誤差は読み取り誤差と平均値の平均二乗誤差から得た。式(4)から得られる明線位置の誤差の値は、 $L$ 、 $\lambda$ 、 $d$ の誤差の伝播則から求めた。式(3)から $x$ をあらわに表すことが困難なので、式(3)から導かれる明線位置の値には誤差を計算していない。

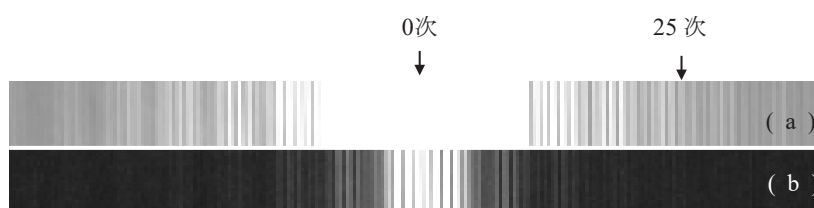


図6 明線位置の測定結果 最低被写体照度が (a) 0.000003lx、(b) 0.00077lxのときの撮影結果

表2 0次明線からの高次明線までの距離

次数	0次明線からの距離 (mm)		
	近似を用いた計算値	近似を用いない計算値	測定値
20	$1.550 \pm 0.032$	1.562	$1.573 \pm 0.002$
25	$1.938 \pm 0.040$	1.961	$1.972 \pm 0.002$
30	$2.325 \pm 0.048$	2.366	$2.383 \pm 0.002$

一般に明線位置の最確値は次数が高いほど大きくなるが、上記の表の明線位置の計算結果から、近似を用いた場合と用いない場合とを比較すると、20次～30次の明線位置の計算値は近似を用いるかどうかにかかわらず誤差範囲を含めて考えると一致していると言える。しかし、最確値には差が生じていて、次数が高くなるほどその差は大きくなっている。次数が30を超えるとすぐに誤差の範囲を考慮しても両者は一致しなくなると考えられる。

明線位置の測定値を、近似を使って得た計算値と比べると、20次と25次の明線は誤差範囲を含めて一致していると言える。しかし、30次になると誤差範囲を考慮しても両者には差が生じた。つまり、現状の使用機器や実験方法が生じさせている誤差要因を勘案したところ、25次の明線までは近似条件が成り立っていると解釈して実験データを考察して支障ないが、30次以上では近似条件が成り立っていると仮定すると計算により得られる明線位置の値と測定により得られるそれと

の間に差が生じてしまうことが避けられず、当初から近似条件を用いずに厳密に計算して考察しなければならないことになる。前述の通り、今回は近似を用いないときの明線位置の計算結果について誤差の値を求めているが、最確値は近似を用いて計算したそれよりも大きな値になっており、明線位置の測定値の最確値に近い。30次以上では明確に近似が成り立たなくなっているが、20次程度でも近似を用いない計算結果のほうが実際の明線位置の測定結果に近い値を得られていると考えられる。

## 5. まとめ

白色LEDランプとCCDカメラを用いてヤングの干渉実験装置を試作し、様々な実験条件下で得られる干渉縞の物理的特性について考察した。最初に、高感度カラーCCDカメラを使用し、15次以上の高次の明線まで観測できることを確かめた。フラウンホーファー回折の観測や、理論と一致する明線間隔を測定できることも明らかにした。これにより、直接目視で観測するのと同じようにディスプレイ上で干渉縞を観測できるようになり、波長による明線間隔の違いの理解や教室での実験デモンストレーションを効果的に実施できるようになった。次に、単スリットから複スリットまでの距離を短くして行き、可干渉の条件が成り立つ具体的な条件を明らかにした。その結果、 $(d \cdot D / l \cdot \lambda)$  の値が0.15までならば明瞭な干渉縞を観測できるが、0.26を超える場合には明線がぼやけてしまい、実験結果を解析するには十分とはいえなかった。つまり、この実験装置を使ってヤングの干渉実験を行うには  $(d \cdot D / l \cdot \lambda)$  の値が0.15以下となるよう  $d$ 、 $D$ 、 $l$ 、 $\lambda$  の値を決定すべきであることがわかった。この結果は可干渉の条件に関して実際の実験を行うときに選ぶべき実験条件を具体的かつ定量的に示した初めての研究成果である。最後に、明線位置の導出計算において用いられる近似条件の適応範囲について調べた。数値計算と実験結果を比べた結果、30次以上の明線では近似条件を適応できないことがわかり、これらの測定においては近似を使わずに得られる明線位置を実際の測定と比較すべきであることがわかった。高校や大学初級で行う物理学実験では高々15次程度まで明線を測定すれば十分であろうと考えられる<sup>4)</sup>ので、そのような場合にはむしろ近似条件を積極的に活用すべきであろう。しかし、近似は必ず使用するのに有効な範囲があるので、そのことを意識付ける意味であえて近似条件が成り立たない範囲での測定を行う教育的意義も大きいと考えられる。

本研究で試作した実験装置は光の干渉に関する実験教材の開発を研究目的としていた。これまでの研究で波動光学的立場からの光の干渉現象は十分にこの装置で示すことができるとわかり、当初の目的に適う所望の成果をおさめることができた。今後は、量子論的な立場、すなわち光子(フォトン)の干渉を示す実験教材の開発に向けて、試作した教材の改良や工夫に取り組む予定である。

### 参考文献

- 1) 文部科学省検定済教科書高等学校理科用「物理」p.202 (啓林館, 2014)
- 2) 山田盛夫: 物理教育 第28巻第1号 (1980) pp.10-13.
- 3) 榎本成巳: 物理教育 第34巻第1号 (1986) pp.11-13.
- 4) 大向隆三、草薙栄理子、関川留都: 応用物理教育 第40巻1号 (2016) pp.1-5.
- 5) F. S. Crawford, Jr. (高橋秀俊 監訳): バークレー物理学コース 波動 (下) pp.523-526 (丸善 1973)



6) 文部科学省検定済教科書高等学校理科用「物理」pp.199-201 (啓林館, 2014)

(2016年9月16日提出)

(2016年12月15日受理)

# A Teaching Aid Trial Product for Young's Interference Experiment and Measurements of Its Physical Characteristics

**KOBAYASHI, Kouta**

Saitama Prefectural Tokorozawa Kita High School

**OHMUKAI, Ryuzo**

Faculty of Education, Saitama University

## Abstract

We faithfully reproduced Young's historical interference experiment using a developed teaching aid trial product consisting of a single slit, a double slit, and an incoherent light source. A high-luminance white light-emitting diode (LED) was used as the light source, and a color charge coupled device (CCD) camera was used for recording the interference fringes to make the product easy to handle. By using monochromatic filters and a high-sensitivity CCD camera, we clearly observed the interference fringes and the Fraunhofer diffraction pattern. The measured periods of bright stripes in the fringe agreed very well with the calculated periods. We then checked the coherence condition by shortening the distance between the single and the double slit. We found that the distance should be more than 25 mm under our experimental conditions to observe clear interference fringes. Finally, we investigated the validity of the approximation in calculating the periods of bright stripes, which is usually recommended in physics textbooks. The measured distance between the 0th and 30th bright stripe did not agree well with the calculated one when the approximation was used. Therefore, the approximation is valid when we measure the position below the 30th bright stripe in the interference fringe. The physical characteristics investigated here are useful for performing physics experiments in high schools and universities.

**Keywords:** Young's experiment, CCD camera, periods of bright stripes, requirement for coherence