

BD (Blu-ray Disc) のトラックピッチの測定

富山県総合教育センター科学情報部(理科教育室)

1. はじめに

ブルーレイディスク(以後、「BD」と記す。)はCDやDVDと同じ光ディスクの規格の一つである。トラックピッチは $0.32\mu\text{m}$ (320nm)、記録容量は最大25GB(単層)である。BDの記録面はCDやDVDとほぼ同じ構造であるが、トラックピッチが狭いため情報の読み取りには青紫色レーザー($\lambda=405\text{nm}$)が利用されている。※CD、DVDは読み取りに赤色レーザーが使われている。

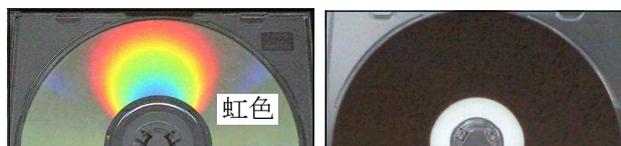


図1 正面から見たCD(左)、BD(右)の様子

CDやDVDは、白色光を鉛直に入射させると記録面で光が回折・干渉し虹色に輝いて見えるが、BDでは観察されない(図1)。しかし、BDは入射角を徐々に変化させると、青(紫)→緑→橙の順に色が観察できる(図2)。

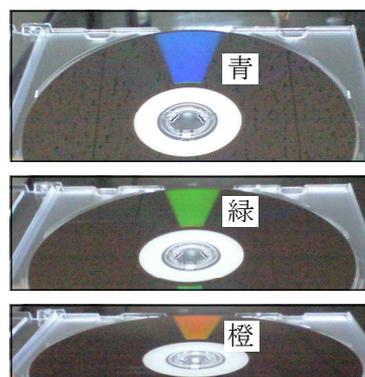


図2 BDが色づく様子

本実験では、このBDでおこる現象を光の回折・干渉から考え、BDのトラックピッチを測定する(BDの工業規格: $0.32\pm 0.01\mu\text{m}$)。

2. 可視光の波長(色)とBDの回折・干渉

光は電磁波の一種であり、可視光の波長は770nm(赤)~380nm(紫)程度である。

光ディスクの記録面に垂直に光を当てた場合、色付いて見える条件は式1で表される。三角関数 $\sin\theta$ は、0~1の値を取り、 $\sin\theta = m\lambda / d$ であるので、 λ と d の関係は、 $d \geq m\lambda$ となる。

$$d \cdot \sin\theta = m\lambda \quad \cdots \text{式1}$$

BDの場合、 $d=320\text{nm}$ なので、式を満足する波長 λ は320nm以下、すなわち紫外線領域となり可視光領域では回折・干渉しないことが分かる。

($m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$)

d : トラックピッチ

3. BDにおける光の干渉

次に、BDの記録面に対して、斜めに入射した場合の光の回折・干渉を考えてみる(図3)。

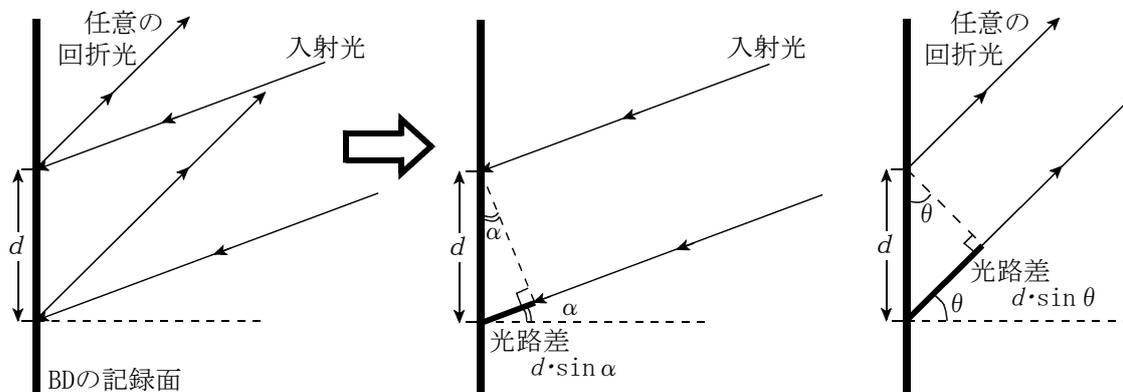


図3 記録面に斜めに入射した光の様子(入射側に回折した場合を考える)

図3において、入射光の光路差は $d \cdot \sin \alpha$ 、任意の回折光の光路差は $d \cdot \sin \theta$ となり、入射から回折(入射側)に至る光路差の合計は $(d \cdot \sin \alpha + d \cdot \sin \theta)$ となる。

従って、回折した光が強め合う条件は式2となる。これにより、白色光を斜めから入射した場合は、垂直に入射した場合と比べ光路差が長くなる。この結果、BDにおいて入射角を徐々に大きく変化させると、青(紫)→緑→橙の順に色が観察できる。

$$d \cdot \sin \alpha + d \cdot \sin \theta = m \lambda \quad \cdots \text{式2}$$

($m=1, 2, 3, \dots$)

※ d :トラックピッチ

なお、入射光 α の方向と同じ方向に回折光 θ がある場合 ($\alpha = \theta$)、式3のようなになる。

$$d \cdot \sin \alpha + d \cdot \sin \theta = m \lambda \quad (m=1, 2, 3, \dots)$$

$\alpha = \theta$ (以後 α を θ とする) より

$$2 d \cdot \sin \theta = m \lambda \quad \cdots \text{式3}$$

4. 緑色レーザーを用いたBDのトラックピッチの測定実験

緑色レーザーポインタとBDを用いて回折・干渉実験を行い、BDのトラックピッチを測定する。実験は、斜め方向からレーザー光を入射させる。

(1) 準備

- ・ 緑色レーザーポインタ(波長: $\lambda = 532\text{nm}$) ・ BD(Blu-ray Disk) ・ グラフ用紙(A3)
- ※失明する危険があるので、直接レーザー光を覗き込んではいけません。
- ・ 物差し(30cm) ・ セロハンテープ ・ Y型洗濯ピンチ(2個) ・ マグネットシート
- ・ ブックスタンド(2個、折り部が直角なMサイズを使用、参考:幅140×奥行183×高さ190mm)
- ・ 厚紙(ブックスタントの大きさに合わせる。中心線を引く。レーザー光の位置に直径約6mmの穴を空ける。)
- ・ レーザーポインタを乗せる台 ※参考:厚紙等で箱を製作、例. 幅130mm×奥行30mm×高さ83mm、一端にPPプレート、底面にズレ防止用のマグネットシートを貼る。

ブックスタンド、厚紙、レーザーポインタを乗せる台の概要を図4に示す。

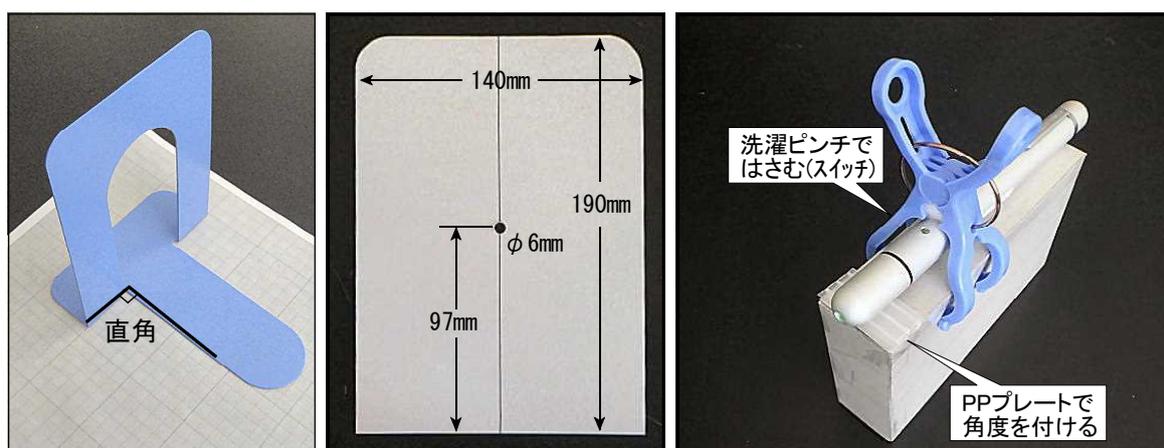


図4 ブックスタンド、厚紙、レーザーポインタを乗せる台の概要

※厚紙の穴やレーザーポインタを乗せる台の高さは、富山県総合教育センター備品のHe-Neガスレーザー装置($\lambda = 632.8\text{nm}$)とレーザーポインタ、どちらでも実験ができるようにしたためである。

(2) 実験手順

- ・グラフの端から10cmを基準線にするため、線を紙の両端まで延長して描く。
- ・ブックスタンド1に厚紙を取り付ける（裏面にマグネットシート）。
- ・ブックスタンド1とグラフ用紙（四隅）を机にセロハンテープで固定する。このときグラフ用紙の延長線と厚紙の中心線がつながるようにする。ブックスタンド1の留め方は下図を参照。
- ・レーザーポインタを台に乗せ、厚紙の穴にレーザー光が通過するように、ブックスタンド1に置く。

概要を図5に示す。

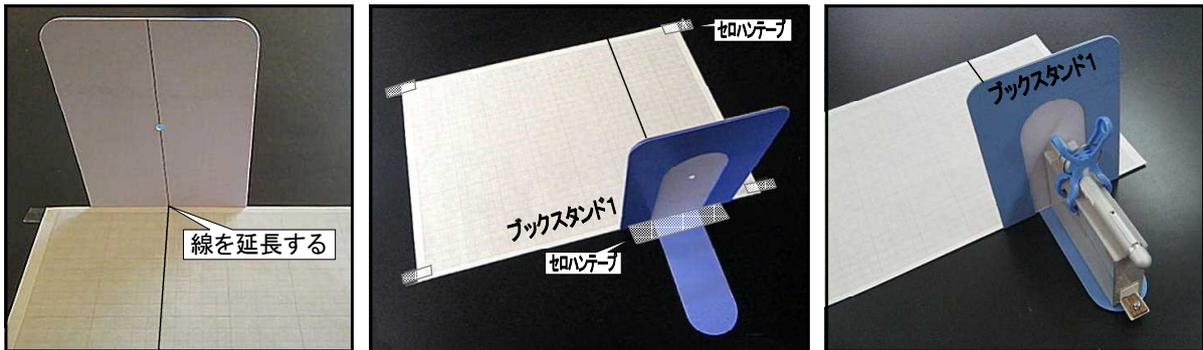
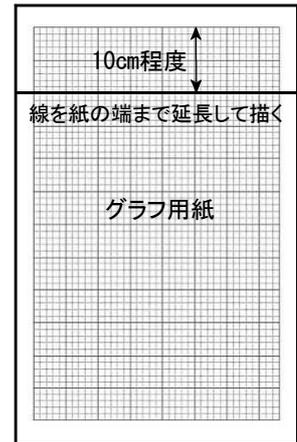
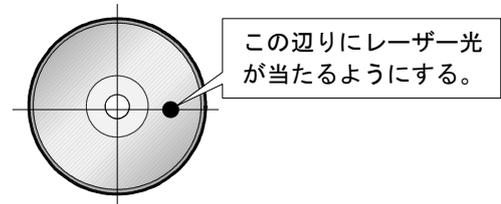


図5 各装置の設置の様子

- ・レーザー光線がグラフ用紙の基準線に沿うように調整する。調整の方法はグラフ用紙の基準線にあわせてブックスタンド2を置き、レーザー光がブックスタンドの端ぎりぎり、水平に当たるようにする（P4光軸の調整を参照）。
- ・ブックスタンド2に洗濯ばさみでBDを取り付ける。このときレーザー光が記録面に当たる位置に注意する。



各装置の調整の様子を図6に示す。

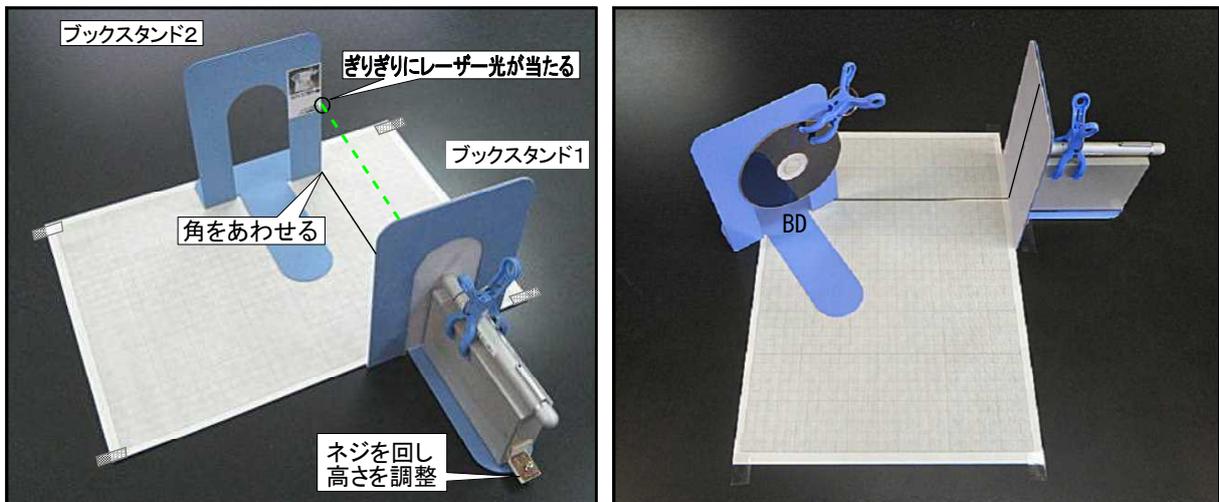


図6 各装置の調整の様子

- ・記録面にレーザー光を照射する。
- ・1次明線がレーザー光の入射方向に戻るようにブックスタンド2の位置を調整する。
このとき、明線の位置が上下にずれている場合は、BDの取り付け位置をずらしてみる。

実験の様子を図7に示す。

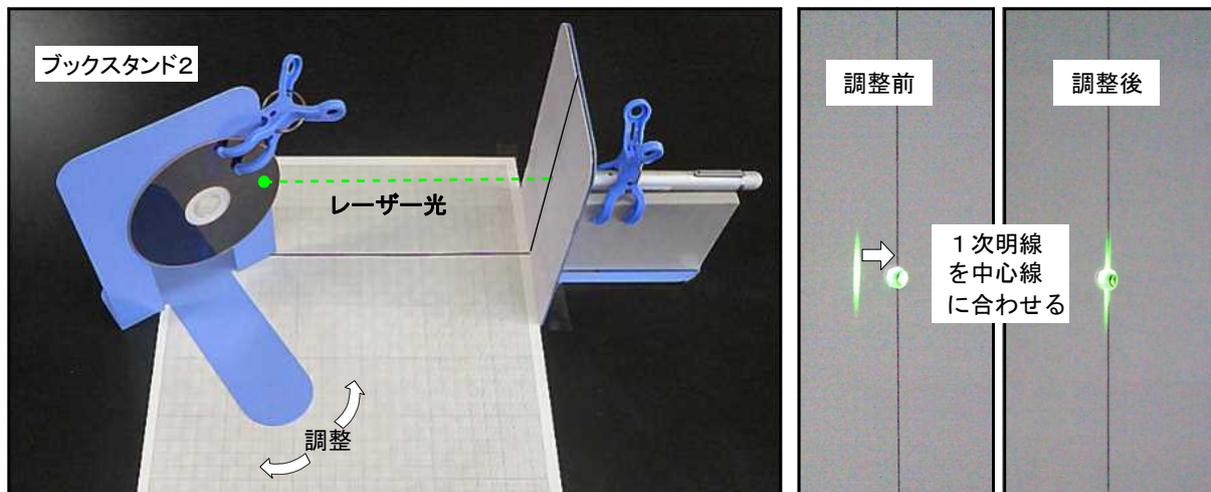


図7 1次明線の調整(入射光と1次明線が同じ位置)

- ・ブックスタンド2のガイドに沿って物差しを置き、30cm程度の線を描く。
- ・基準線を底辺とする直角三角形を描く(斜辺Aの長さが30cm直角三角形を描くとよい)。
- ・斜辺A[cm]と高さX[cm]を測定する。

線の記入と長さの測定の様子を図8に示す。

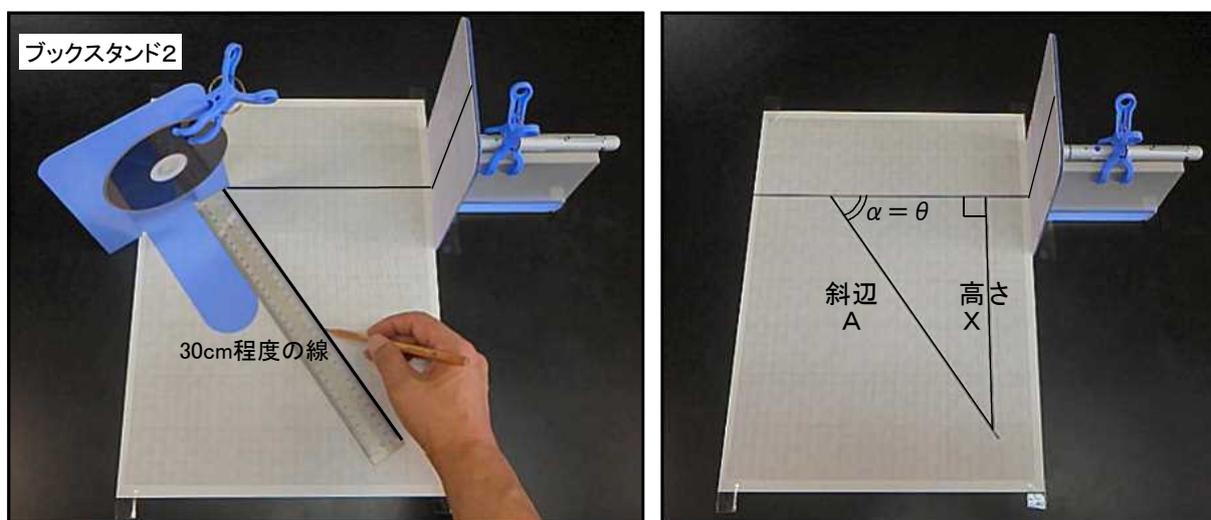


図8 線の記入と長さの測定

(3) 実験結果

- ・緑色レーザーの波長： $\lambda = (532) \text{ nm}$
- ・斜辺： $A = (30.0) \text{ cm}$
- ・高さ： $X = () \text{ cm}$

(4) 考察

- ・実験結果からBDのトラックピッチ d [nm]を計算せよ。

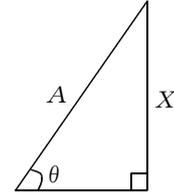
(ヒント) 光が強め合う条件は、

$$d \cdot \sin \alpha + d \cdot \sin \theta = m \lambda \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad \text{※} d: \text{トラックピッチ}$$

$\alpha = \theta$ (以後 α を θ とする)、 $m=1$ より上の式は、

$2d \cdot \sin \theta = \lambda$ となる。よって、

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad \text{となる。さらに、} \sin \theta = \frac{X}{A} \text{ より}$$



BDのトラックピッチ d を求める計算式は、

$$d = \frac{\lambda \cdot A}{2 \cdot X} \quad \text{となる。}$$

なお、 $\frac{A}{X}$ は、辺の比の計算なので、単位が揃っていればよい。

すなわち、波長 λ の単位が[nm]であれば、トラックピッチ d の単位は[nm]となる。

$$\text{つまり、} d \text{ [nm]} = \frac{532 \cdot A}{2 \cdot X} = 266 \cdot \frac{A \text{ [cm]}}{X \text{ [cm]}} \text{ の簡単な計算で} d \text{ [nm]} \text{ が求まる。}$$

(計算結果)

BDのトラックピッチ _____ [nm]

- ・実験によって求めたBDのトラックピッチ d を工業規格(320[nm])と比較しなさい。

実験結果の例

- ・緑色レーザーの波長： $\lambda = (532)$ nm
- ・斜辺： $A = (30.0)$ cm
- ・高さ： $X = (24.9)$ cm

トラックピッチの計算式 $d = \frac{\lambda \cdot A}{2 \cdot X}$ に代入する。

$$d = \frac{532 \times 30.0}{2 \times 24.9} = 320.4$$

この計算は $\text{cm} \div \text{cm}$ なのでこの項の単位は無しとなる
すなわち d の単位は、レーザーの波長 λ と同じnmとなる

有効数字は3桁なので、トラックピッチは $d = 320$ [nm] である。

工業規格は $0.32 \pm 0.01 \mu\text{m}$ (320nm 有効数字は2桁)なので、規格と一致したBDである。

5. 発展課題と考え方

BDのトラックピッチ測定装置を用いて、次の発展課題に取り組んでみましょう。また、実験値と理論値を比較してみましょう（各学校の課題研究などで取り組んでみましょう）。

- (1) BD(トラックピッチ: $d = 320\text{nm}$)と緑色レーザー(波長: $\lambda = 532\text{nm}$)を用いた実験では、何次の明線(m 次)まで確認できるか。

$$d = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad \text{より} \quad \sin \theta = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot d} = \frac{m \times 532}{2 \times 320} = 0.831 \times m \quad 1 \geq \sin \theta \quad \text{より}$$

$$1 \geq 0.831 \times m \quad \text{すなわち} \quad m \leq 1.203 \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad \boxed{\text{よって1次明線まで確認できる。}}$$

- (2) BD(トラックピッチ: $d = 320\text{nm}$)と赤色レーザー(波長: $\lambda = 650\text{nm}$ のレーザー)を用いた実験では、明線(m 次)は確認できない。この理由を計算により推測しなさい。

$$d = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad \text{より} \quad \sin \theta = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot d} = \frac{m \times 650}{2 \times 320} = 1.016 \times m \quad 1 \geq \sin \theta \quad \text{より}$$

$$1 \geq 1.016 \times m \quad \text{すなわち} \quad m \leq 0.985 \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad \boxed{\text{よって明線は確認できない。}}$$

- (3) 700MBのCD(トラックピッチ: $d = 1500\text{nm}$)と緑色レーザー(波長: $\lambda = 532\text{nm}$)を用いた実験では、何次の明線(m 次)まで確認できるか。

$$d = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad \text{より} \quad \sin \theta = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot d} = \frac{m \times 532}{2 \times 1500} = 0.177 \times m \quad 1 \geq \sin \theta \quad \text{より}$$

$$1 \geq 0.177 \times m \quad \text{すなわち} \quad m \leq 5.639 \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad \boxed{\text{よって5次明線まで確認できる。}}$$

- (4) DVD(トラックピッチ: $d = 740\text{nm}$)と緑色レーザー(波長: $\lambda = 532\text{nm}$)を用いた実験では、何次の明線(m 次)まで確認できるか。

$$d = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad \text{より} \quad \sin \theta = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot d} = \frac{m \times 532}{2 \times 740} = 0.359 \times m \quad 1 \geq \sin \theta \quad \text{より}$$

$$1 \geq 0.359 \times m \quad \text{すなわち} \quad m \leq 2.782 \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad \boxed{\text{よって2次明線まで確認できる。}}$$

- (5) 実験(3)・(4)において、トラックピッチを求める場合、明線(m 次)はできるだけ m を大きくした方が誤差が小さくなる。その理由を考えよ。

m 次を小さくすると、そのぶん θ が小さくなる。その結果、斜辺 A の長さが十分に確保できても、高さ X の長さが短くなり測定誤差が大きくなる。従って測定誤差を小さくするために明線(m 次)はできるだけ m を大きくした方がよい。

- (6) 緑色レーザー(波長: $\lambda = 532\text{nm}$)を用いて、CDとDVDのトラックピッチを測定しなさい。なお、何次の明線(m 次)を用いるかは自由とする。また実験によって求めたトラックピッチを工業規格(700MBのCD: $d = 1.5 \times 10^3\text{nm}$ 、DVD: $d = 0.74 \times 10^3\text{nm}$)と比較しなさい。

(C D) $m = 5$ (5次の明線) $A = 30.0[\text{cm}]$ 、 $X = 26.7[\text{cm}]$ $d = 5 \times 266 \times (30.0/26.7) = 149[\text{nm}]$ $\qquad\qquad\qquad = 1.5 \times 10^3[\text{nm}]$	(D V D) $m = 2$ (2次の明線) $A = 30.0[\text{cm}]$ 、 $X = 21.6[\text{cm}]$ $d = 2 \times 266 \times (30.0/21.6) = 739[\text{nm}]$ $\qquad\qquad\qquad = 0.74 \times 10^3[\text{nm}]$
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

実験結果より、CDとDVDは、ともに工業規格と一致する。