

操作性に優れたジャマン干渉計装置の開発

Development of the Jamin interferometer device with excellent operability

高木 淳[†], 大鐘 亮[†]

Atsushi TAKAGI, Ryo OGANE

Abstract The Jamin interferometer device is very popular for the elementary education in experimental physics of university. The class contents are experiments using an interference phenomenon of the light. It is supposed that many students have a hard time to give an interference condition for the badness of the device operability. In addition, it also have a difficulty in the experimental instruction of students. We propose a device that is superior to conventional equipment in manipulation to perform the improvement of the device operation by students and the instruction method by teachers.

1. はじめに

ジャマンの干渉計は、光の干渉を利用して気体の屈折率を測定する装置で、理工系学生の初等物理実験教育によく用いられる。愛知工業大学では、工学部全専攻と情報科学部コンピューターシステム専攻の2年生に対し開講されている物理実験において、空気の屈折率を測定する実験テーマで用いられている¹⁾。測定は、気体の屈折率が気体の圧力に比例することを利用して、圧力の変化量と干渉縞の移動本数の関係を求めることにより行われる。

実験をスムーズに進める上で重要なのは、干渉縞を観察できる光学条件を見つけることである。この光学条件は、具体的には光を反射させる平面ガラスや透過させるセルの配置に依存するが、それぞれの微妙な調整が必要である。学生は、指導書やティーチングアシスタント (TA) の指示に従ってその調整を実施するが、ちょっとした調整のずれで適切な光学条件を見つけることができず、実験進行に大きく影響を与えていた。さらに指導する TA ですらその条件を見つけるのに苦勞する場合があります。実験指導上も問題があった。

本研究では、これらの問題点を解決するために、原因となっている平面ガラス板とセルの位置調整を中心に装

置を見直し、干渉縞を観察できる光学条件を速やかかつ確実に見出し、操作性に優れたジャマン干渉計装置を検討した結果について報告する。

2. 理論

2・1 気体の屈折率

気体の屈折率 n は、ローレンツ-ローレンツの法則により気体の密度 ρ と

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \text{const.} \quad (1)$$

なる関係がある。気体の屈折率 n は 1 に近い値であるから、上式は

$$n - 1 \propto \rho \quad (2)$$

としてよい。さらに、ボイル-シャルルの法則により、気体の密度 ρ は圧力 P と絶対温度 T によって

$$\rho \propto \frac{P}{T} \quad (3)$$

と表わされる。よって

$$n - 1 = k \frac{P}{T} \rightarrow n = 1 + k \frac{P}{T} \quad (4)$$

となる。 k は比例定数で、この値を決定すれば、任意の圧力 P での気体の屈折率 n を求めることができる。

2・2 ジャマンの干渉計における干渉縞

図 1 に、ジャマンの干渉計の模式図を示す。 G_1 、 G_2

[†] 愛知工業大学 基礎教育センター (豊田市)

はともに厚さ d 、屈折率 n_s の平行平面ガラス板である。

光源 S より出た単色の平行光線は G_1 、 G_2 において、表面で反射する光と屈折して内部に入り裏面で反射して出てくる 2 つの光に分けられる。その結果、図 1 のように 2 つの光路 $ABCD$ および $AB'C'D$ を通り、最後に再び重ね合わさって望遠鏡 O に入る。 G_1 、 G_2 における光の屈折角を θ_1 、 θ_2 とすると、2 つの光の光路差 f は

$$f = 2n_s d (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (5)$$

である。

もし、 G_1 、 G_2 が平行であれば、光の進む方向がわずかに変わっても 2 つの屈折角 θ_1 、 θ_2 は等しく、いつも $f=0$

となって干渉縞は現れない。しかし、 G_1 、 G_2 が互いにわずかに傾いていると、光の進む方向のわずかな違いによって 2 つの屈折角 θ_1 、 θ_2 が変化し、一致しなくなる。これにより、光の進む方向によって光路差 f が変わり、単色光（本実験では Na の D 線）の波長を λ として、 f が $\lambda/2$ の奇数倍になる方向では、干渉によって打ち消し合っ暗くなり、望遠鏡 O の視野の中に平行な干渉縞が現れる。

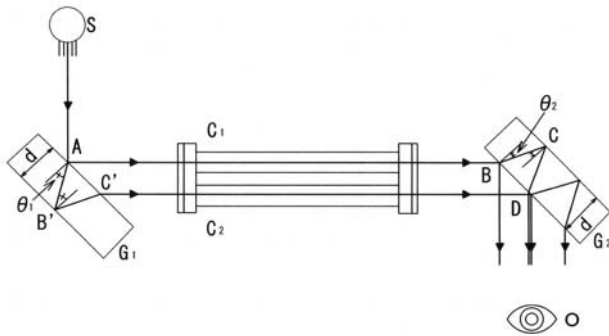


図 1 ジャマン干渉計の模式図

2・3 空気の屈折率の測定

ジャマンの干渉計の 2 つの光束中に長さ l の 2 つの空気セル C_1 、 C_2 を入れ、 C_1 のみ真空ポンプにつなぎ圧力を変化させられるようにする。 C_1 の空気の圧力を ΔP 変化させると、気体の屈折率が Δn だけ変化し、光路差が

$$\Delta f = \Delta n \cdot l \quad (6)$$

だけ変化する。このため 2 つの光束の干渉条件が変化し、望遠鏡視野内の干渉縞が移動する。干渉縞がこの間に ΔS 本だけ移動したとすると、光路差が波長の ΔS 倍だけ変化したことになるから

$$\Delta f = \Delta S \cdot \lambda \quad (7)$$

$$\therefore \Delta n \cdot l = \Delta S \cdot \lambda \quad (8)$$

なる関係を得る。(4) 式から温度一定で圧力だけ変化させた場合の気体の屈折率の変化は

$$\Delta n = k \frac{\Delta P}{T} \quad (9)$$

となるから、(8) 式と比較して

$$\frac{k}{T} = \frac{\Delta S}{\Delta P} \cdot \frac{\lambda}{l} \quad (10)$$

となる。以上から、温度一定での気体の屈折率の圧力依存性は次式で与えられる。

$$n = 1 + \frac{\Delta S}{\Delta P} \cdot \frac{\lambda}{l} P \quad (11)$$

すなわち、実験により C_1 の空気の圧力を ΔP 変化させたときの干渉縞の移動量 ΔS を求めれば、圧力 P （例えば大気圧）の空気の屈折率を求めることができる。

3. 従来装置の実験手順と問題点

上記したように、この実験で屈折率を求めるためには、干渉縞を観察できるようにしなければならない。図 2 に従来装置の概略図を示す。以下、干渉計の調整手順とその問題点について述べる。

3・1 実験手順

(1) 平行平面ガラス板 G_1 の回転方向の調整

図 2 の G_1 の光軸の高さは 80 mm である。①のねじをゆるめて、入射光がほぼ観測側の平行平面ガラス板 G_2 に円満に入ると思われる向きに回転してセットし、動かないように①のねじをしめる。

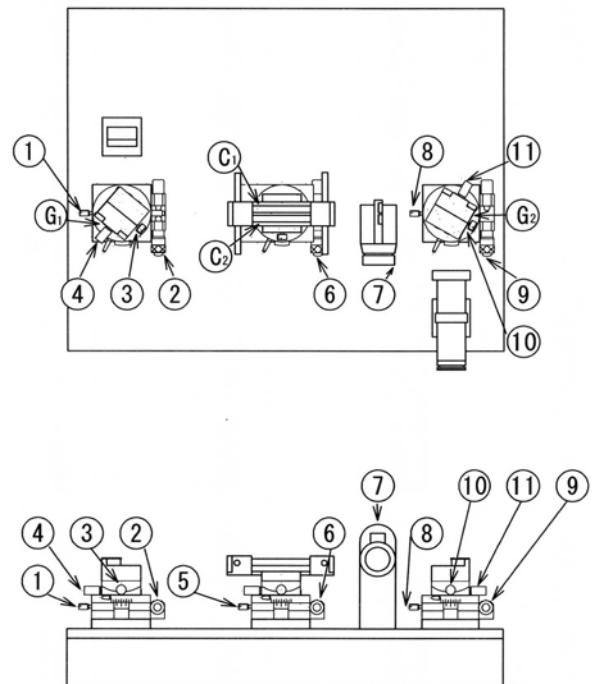


図 2 改良前のジャマン干渉計装置

(2) 空気セルの回転方向と G_1 の上下方向の調整

⑤のねじをゆるめセルが光軸と平行になるように回転し、動かないように⑤のねじをしめる。光軸微調整用のコンペンサター⑦を、つまみを回してほぼ垂直になるようにセットする。 G_1 の表面反射光は空気セル C_1 より、裏面反射光は空気セル C_2 より入射するように、上下方向の調整を行う。その際 G_1 の向きが関係するので、③のねじをゆるめて、④のねじで G_1 の上下方向を調整する。コンペンサターの前すなわち空気セルの後ろに白い紙を立て、しっかりと光束が空気セル中を通り抜けているか確認する。その後、動かないように③のねじをしめる。左右方向の微調整は、②と⑥のねじで調整する。

(3) 平行平面ガラス板 G_2 の調整

望遠鏡の光軸の高さは 80 mm である。望遠鏡をのぞきながら⑧のねじをゆるめて、ピンホールの像が視野に入るように回転してセットし、⑧のねじをしめ、⑨で微調整をする。上下方向は、⑩のねじをゆるめて⑪のねじで調整する。望遠鏡のアイピースを前後してピンホールにピントを合わせて、ピンホールの中に図3のような干渉縞が見えるようにする。干渉縞が見えないときは、 G_1 の再調整も必要なので、再度③と⑩、④と⑪を用いて調整を行う。

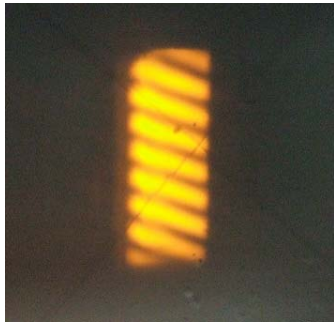


図3 干渉縞

(4) 気圧変化に対する干渉縞移動量の測定

空気セル C_1 を真空に引き、 C_1 につながったニードルバルブを用いて空気をリークさせる。 C_1 の気圧変化に伴い干渉縞が移動するので、望遠鏡の十時線上の干渉縞の移動数 5 ごとに C_1 の気圧を測定する。この測定を C_1 の気圧が大気圧となって干渉縞が移動しなくなるまで行う。

3・2 問題点

(1) 空気セル C_1 、 C_2 両方に確実に光束を通すことが基本であるので、先に述べたように空気セル後方に白い紙を立て、光束が空気セルを確実に通って最も明るくなるように位置調整を行うが、その後の干渉縞を観察できるような平面ガラス板 G_1 、 G_2 の調整により、光束が空気セルを通らなくなることがある。つまり、光束を空気セルに確実に通そうとすると干渉縞を観察できる条件を見出せず、干渉縞を観察できるような条件では、光束が空気セルを確実に通らない。空気セルをまったく外れてしまっは実験が成立しないので、空気セル、平面ガラス板ともにシビアな位置調整を要求される。

(2) 平面ガラス板 G_1 、 G_2 および空気セルの位置調整で重要なことは調整後しっかりと固定することである。これとしないと、微調整時などにそれらが動いて調整がやり直しとなる。空気セル C_1 につなげてある真空配管は、真空に耐えられることと空気セルの位置調整を両立させるため、図4に示すように比較的強度および弾力性のあるゴム管である。そのため特に空気セルは、このゴム管の影響で知らない内に動いてしまっていることが多い。



図4 改良前の真空配管

(3) C_1 の真空度を変化させるのに用いるニードルバルブは、図5に示すようにハンドル式である。このハンドル操作によって干渉縞の移動速度が決まる。このため、干渉縞の移動数を確実に測定できるように、移動速度を確認しながらバルブを徐々に開く。移動数 5 でバルブを閉め、 C_1 の気圧を測定する。この作業を C_1 の気圧が大気圧となって干渉縞が移動しなくなるまで続ける。1 回でもバルブ操作を誤って開きすぎると、移動が速すぎて測定できず最初からやり直しとなる。逆に開きが小さいと測定時間がかかるので、その微妙な調整が必要である。



図5 改良前のハンドル式ニードルバルブ

4. 装置の改良点

上記したように従来装置では、測定に必要な干渉縞を観察できる光学条件を見出すのに困難な場合が多く、測定にも神経を使うため、学生の実験進行はもちろんのこと TA の実験指導にも障害となっていた。したがって、先の問題点に対し以下の改善を行った²⁾。

4・1 平面ガラスと空気セルの調整の分離

図 6 に改良後のジャマン干渉計装置を示す。大きな変更点は、従来の装置では固定されていた空気セル C_1 、 C_2 をスライドして光路上から外せるようにした点である。これにより、平行平面ガラス板 G_1 、 G_2 のみの調整で干渉縞を速やかに観察できるようになり、その後、空気セルを光路上に移動させるので、確実に光束をセル内に通すことができるようになった。調整手順は以下の通りで、簡便かつ確実に干渉縞を観察できるようになった。

(1) 平行平面ガラス板 G_1 、 G_2 の調整

空気セルを光路上からいったん外すため、⑤のねじをゆるめて空気セル C_1 、 C_2 を図 6 のようにスライドさせる。空気セルが光路上にない状態で、目視で、 G_1 および G_2 の光軸が水平になるように、③と⑩のねじを回し調整する。光軸微調整用のコンペンセーター⑦の前に白紙を置き、①のねじをゆるめ、 G_1 を回転させ、表面反射光と裏面反射光が⑦のプリズムを通過するような角度に調節後、

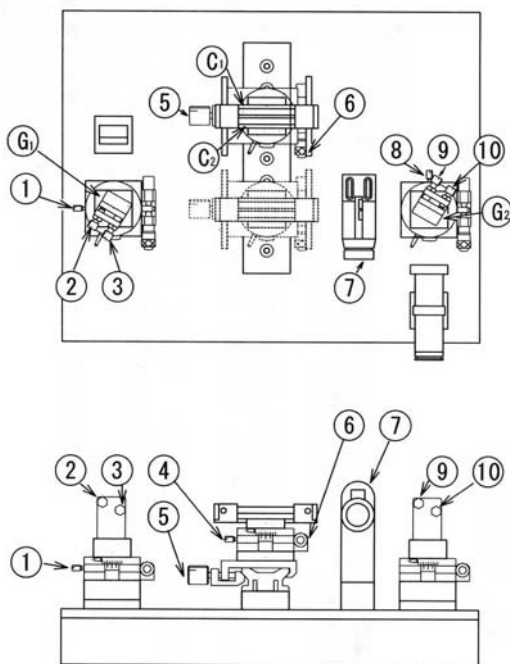


図 6 改良後のジャマン干渉計装置

①のねじをしめて固定する。さらに必要ならば、②のねじで微調整する。

望遠鏡をのぞきながら、⑧のねじをゆるめて G_2 を回転させ、ピンホールの像が視野に入るようにセットした後、⑧のねじをしめ、望遠鏡のアイピースを前後してピントを合わせる。必要ならば、⑨のねじで微調整すると、ピンホールの中ですぐ図 3 のような干渉縞を確認できる。

(2) 空気セル C_1 、 C_2 の調整

空気セル C_1 、 C_2 を平行平面ガラス板 G_1 、 G_2 の間の光路上にスライドさせ、⑤のねじをしめて空気セルを固定する。空気セルとコンペンセーター⑦の間に白紙を立て、表面反射光が C_1 のセルを、裏面反射光が C_2 のセルを通るように④のねじをゆるめて空気セルを回転し、角度を調整する。その後④のねじをしめて空気セルを固定する。角度の微調整は⑥のねじを用いて行う。

望遠鏡をのぞいて、干渉縞が観察できるか確認する。観察できない場合は、再度空気セルの位置および回転角度の調整を行う。干渉縞が確認できたら、③または⑩のねじを用いて干渉縞の数を調節し、視野の中に 5~10 本の縞が観察できるようにする。

4・2 真空配管の取り直し変更

前述したように、空気セル C_1 につなげてある真空配管は、比較的強度および弾力性のあるゴム管で、空気セルの意図しない移動や平行平面ガラス板への干渉の原因となっていた。これを図 7 に示すようなものに変更した。これは、空気セルがスムーズに移動できるように、配管チューブを工作機械などで利用されているチューブ支持案内保護装置に収納するようにしたものである。この改良により、真空配管がすっきりと整理されて調整箇所干渉しなくなり、空気セルにも過度な力が加わることがなくなり、適切な位置調節ができるようになった。



図 7 改良後の真空配管

4・3 ニードルバルブの調整方法の変更

通常ニードルバルブはハンドル式であり、先に述べたように、本装置の空気セル C_1 の真空度を変化させるのに用いられていたのもこの方式である。そのため、測定のために適切なリーク量を得るために、ハンドルを手作業で調整していた。したがって、特にバルブを開き過ぎてリーク量が多すぎると、干渉縞の移動速度が速すぎて測定不能となり、実験を最初からやり直すことになる。そこで、これを図8に示すようなプッシュ式のメカニカルバルブを備えたニードルバルブに変更した。これは、ボタンを押している間、①のメカニカルバルブが開き空気が流入するが、あらかじめ適切なリーク量にセットした②のニードルバルブにより、適切なリーク量で真空度を変化させることができるものである。さらに③のフィルターにより真空系内にゴミが入るのを防ぐこともできる。この変更によって誰でも特に気を使う必要なく確実に干渉縞の移動数を測定できるようになった。

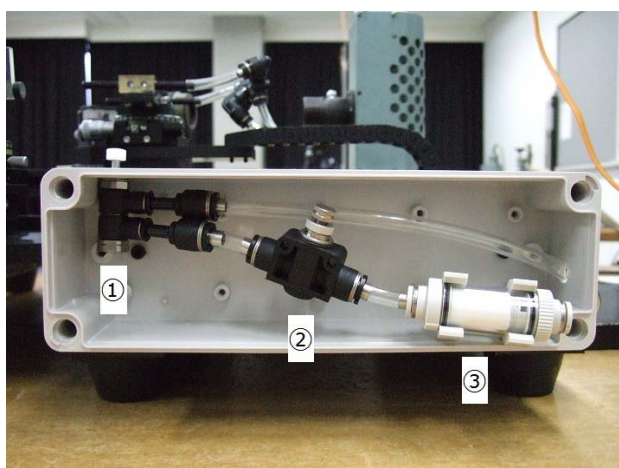


図8 改良後のプッシュ式ニードルバルブ

5. まとめ

愛知工業大学の物理実験では、同一テーマで5グループの実験を実施できるように、5つのテーブルに各々同一実験装置が設置してある。各テーブルで実験装置の差異が出ないように、できる限り配慮やメンテナンスを行って、学生から不満が出ないように心掛けている。しかし本論文で取り上げたジャマン干渉計装置は、その調整が微妙であるため、装置を構成する各器具の設置位置のわずかなずれが実験条件に大きく影響を与え、装置間の微小な差異が実験進行に大きく関わることが問題となっていた。

本論文では、このジャマン干渉計装置の操作性の改良について述べた。最も重要な改良は空気セルを光路上から移動できるようにしたことである。先に平行平面ガラス板のみで干渉縞を観察できる条件を見出し、その後その光路上に空気セルを移動させるようにプロセス変更を行ったことにより、従来よりもはるかに速やかにかつ確実に実験を進めることができるようになった。今後、操作性だけでなく、Na単色光による干渉縞の観察時における実験者の目への負担軽減など安全面も視野に入れて、さらなる検討をしていく予定である。

参考文献

- 1) 愛知工業大学物理学教室編、「物理実験指導書」, 学術図書出版社, pp48~53, 2004. 3.
- 2) 大鐘亮, 高木淳, 「操作性に優れたジャマンの干渉計装置の開発」, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 18a-PA1-1, 青山学院大学相模原キャンパス, 2014. 3.

(受理 平成26年3月19日)