

懐中電灯を光源に用いた シャボン玉の干渉実験と教材化

松村敬治・塩野正明

Interference Experiments of Soap-Bubble Films
Using a Flashlight as a Light Source and
Its Applications to Teaching Material of Science Educations

Keiji Matsumura and Masaaki Shiono

シャボン玉などに見られる薄膜による光の干渉は高校物理の学習テーマの1つになっているが、実験実習までは行われていない。一方、我々は、小型マルチチャンネル分光器を用いた実験装置を製作して、干渉スペクトルの測定からシャボン玉やセッケン膜の膜厚が精度良く決定できることをすでに報告している。シャボン玉やセッケン膜の膜厚の測定法を自然科学教室や高校物理の実験教材として普及させるためには、廉価版の実験装置の製作や実験メニューの確立などいくつかの克服すべき課題が残っている。そこで本研究では、懐中電灯を用いて安価で手軽な分光系を構築することで、シャボン玉の膜厚測定の実験コストの低減を図った。更に、シャボン玉の膜厚測定を高校物理の実験教材として提供するための教授法についても検討を行った。

はじめに

シャボン玉の魅力を子どもたちに伝える教材を開発することは、理科に親しむきっかけを与えることにつながるので重要である。シャボン玉の魅力の一つに表面が虹色に輝く現象があるが、この現象は膜の外側と内側で光が反射するときに起きる光の干渉によるものであり、膜の厚さに関する有益な情報を与える。シャボン玉に見られるこうした薄膜による光の干渉は高校物理で扱われる学習テーマの一つになっており、シャボン玉の色づき方と膜の厚さと光の干渉

の間の関係を解説した教科書もあるが、高校レベルでの測定法が確立していないので、扱いは限定的となっている。一方、CCD アレイ検出器を搭載した高速で動作する小型マルチチャンネル分光器は、手軽に紫外・可視領域でリアルタイムの発光スペクトルや吸収スペクトルが測定できるので、高校や大学の自然科学の授業での演示実験や実験実習の学習に最適である。我々は、この分光器に光ファイバーを用いた光学系を組み合わせ、シャボン玉の干渉スペクトルを測定して刻々と変化するシャボン玉とセッケン膜の膜厚を精度良く決定することができた[1-4]。

シャボン玉とセッケン膜のこうした膜厚の測定法を高校物理の実験教材として普及させるためには、実験コストの低減や実験メニューの確立などいくつかの克服すべき問題があることが分かった[3]。そこで本研究は、安価で手軽な分光系を構築することで、シャボン玉の膜厚測定の実験コストを低減することを目的としている。また、ここでの成果を基に、高校物理への実験教材の提供の仕方を検討することも本研究の目的である。

シャボン玉の干渉スペクトルによる膜厚決定は、2000年に Chattopadhyay [5]が、2001年に Sarma と Chattopadhyay [6]が行った。しかし、彼らが測定した干渉スペクトルは、回折格子を稼働させる一般の紫外・可視分光器を用いた測定法によるものなので、約1分間の測定中に膜厚が変動して、干渉縞が動いて干渉次数が定まらないという欠点を含んでいた[7]。一方、我々は2012年から従来型の分光器に比べて10万倍の速さで動作する小型マルチチャンネル分光器を用いてセッケン膜とシャボン玉に対して干渉次数の定まるシミュレーション可能な干渉スペクトルを観測して、それぞれの膜厚を高精度に決定することができた[1-4]。ここで、文献1はセッケン膜に対して、文献2, 3はシャボン玉に対して膜厚測定の実験結果を報告した。薄膜の干渉には透過光と反射光の干渉があるが、文献1は透過光に対して、文献2, 3は透過光だけでなく反射光に対しても干渉スペクトルの測定結果を報告した。特に、文献3では、透過光と反射光の干渉スペクトルを同時に測定して、光の固定端反射と自由端反射の位相の違いを直接示すことと、シャボン玉が生成してから割れるまでの膜厚の変化を測定することに成功した。また、文献4では、膜厚測定実験の解

析に用いる干渉スペクトルの理論式の導出法を光学の基礎から解説し、実測の干渉スペクトルがパソコンのシミュレーションにより細部まで再現できることを報告した。

薄膜による光の干渉の教科書での扱い

今回の実験について具体的に説明する前に、シャボン玉などの薄膜による光の干渉が、高校物理の中で、どのように扱われているかについて、S社の物理の教科書[8]の表現を用いて解説する。

図1aは、屈折率 n ($n > 1$)、厚さ d の薄膜の表面に波長 λ の単色光が反射して生じる干渉について説明する図である。ここで、空気の屈折率は1とする。図1aにおいて、入射角 i で入射する光に対して、実線で示した薄膜の上の面で反射する光①と点線で示した屈折角 r で膜の中に入射して薄膜の下の面で反射する光②が重なって起きる光の干渉について考える。このとき、光①と光②の光路差は $2nd \cos r$ となる。また、光①に起きる薄膜の上面からの反射は、屈折率の小さい媒質（空気）から入射し、屈折率の大きい媒質（薄膜）との境界面での反射になるので固定端での反射に相当し、反射によって位相が π だけ（半波長分）変化する。一方、光②に起きる薄膜の下面での反射は、屈折率の大きい媒質（薄膜）から入射し、屈折率の小さい媒質（空気）との境界面での反射になるので自由端での反射に相当し、反射によって位相は変化しない。ここで、自由端反射と固定端反射で位相が違う理由については一般の光学のテキスト[9, 10]や文献4で解説している。以上の考察から、反射光の干渉で現れる明線と暗線の条件式は次のようになる。

$$\text{明線} : 2nd \cos r = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

$$\text{暗線} : 2nd \cos r = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

ここで、 m は干渉回数と呼ばれるものであるが、高校の教科書[8]には名称に関する記述は無い。

一方、図1bは、屈折率 n 、厚さ d の薄膜に波長 λ の単色光が透過して生じる干渉について説明する図である。入射角 i で入射する光に対して、実線で示

した屈折角 r で膜の中に入射して薄膜をそのまま透過して出て行く光①と点線で示した屈折角 r で膜の中に入射して薄膜の下と上の面で2回反射して出て行く光②が重なって起きる光の干渉について考える。このとき、光①と光②の光路差は図1aの場合と同じになり、 $2nd \cos r$ となる。また、光②では薄膜の下と上の面で2回反射しているが、いずれの場合も、屈折率の大きい媒質（薄膜）から入射し、屈折率の小さい媒質（空気）との境界面での反射になるので自由端での反射に相当し、反射によって位相は変化しない。以上の考察から、透過光の干渉で現れる明線・暗線の条件式は、反射光の干渉の場合とは逆になり、次のようになる。

$$\text{明線} : 2nd \cos r = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

$$\text{暗線} : 2nd \cos r = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

高校物理の教科書[8]の本文には、図1aの薄膜における反射光の干渉に関する内容が詳しく記述されているが、透過光の干渉に関する記述は無い。しかし、教科書を巻末の練習問題なども含めて総合的に読み解くと、図1bの薄膜における透過光の干渉は、高校レベルで理解できる内容になっており、少なくとも、高校物理の発展的な学習として扱うことのできる内容になっている。

シャボン玉を光の干渉の実験対象に選ぶ場合、図2に示すような2つの測定が考えられる。図2aはシャボン玉の反射光の干渉の測定を示しており、測定は入射光をシャボン玉の薄膜に垂直に入射させて、点 p_1 の周辺に対して行うことになる。測定結果に対しては、(1)、(2)式に垂直入射の条件式 ($i=r=0$) を代入して解析を行うことになる[3]。

一方、図2bはシャボン玉の透過光の干渉の測定を示している。このとき、測定は入射光をシャボン玉の薄膜に垂直に入射させて行うが、入射光は図1bに相当する薄膜を2度透過することになる。具体的には、図2bにおいて、点 p_1 の周辺の薄膜に透過させて干渉を起こした光は、シャボン玉の内側の空間を伝搬した後に、点 p_2 の周辺の薄膜に再び透過させて2度目の干渉を起こした状態で観測されることになる。ここでの測定結果に対しては、点 p_1 と p_2 の膜厚が等しいと仮定できる場合は、(3)、(4)式に垂直入射の条件式 ($i=r$

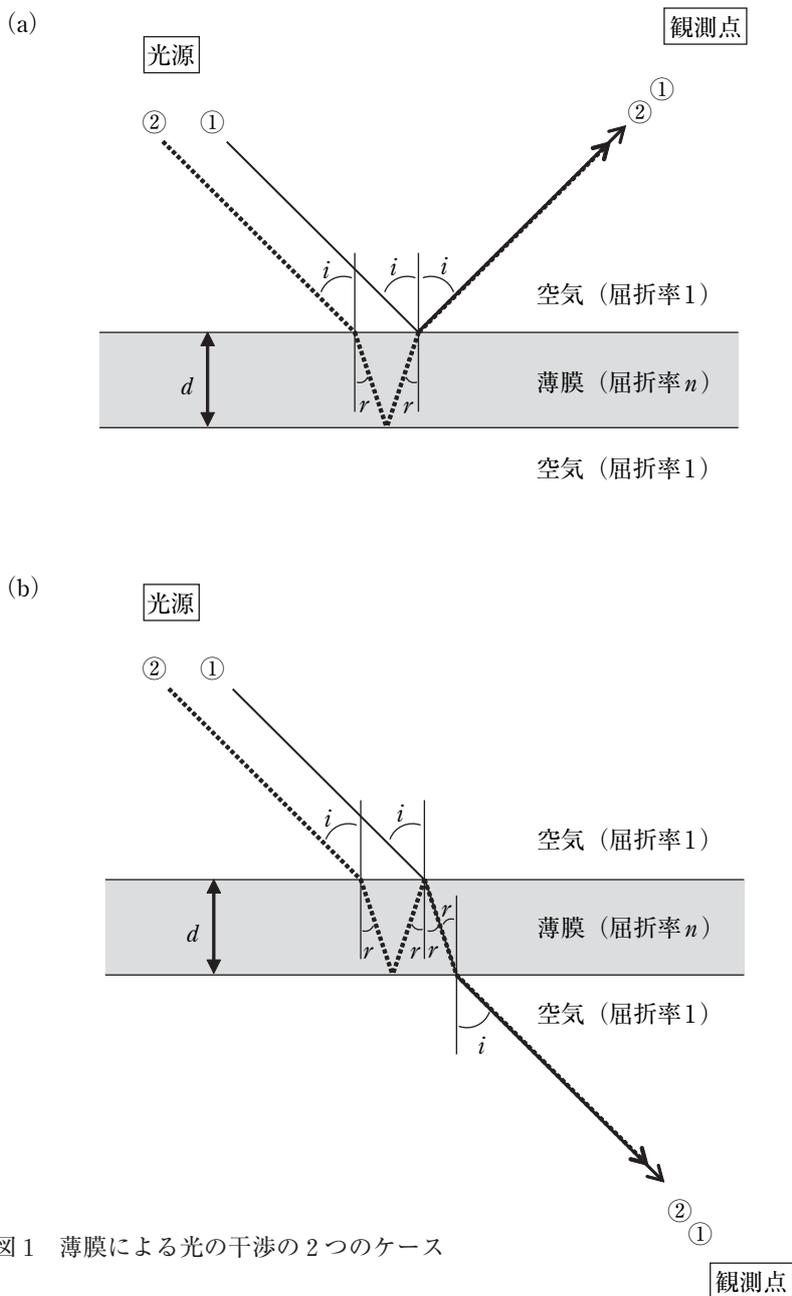
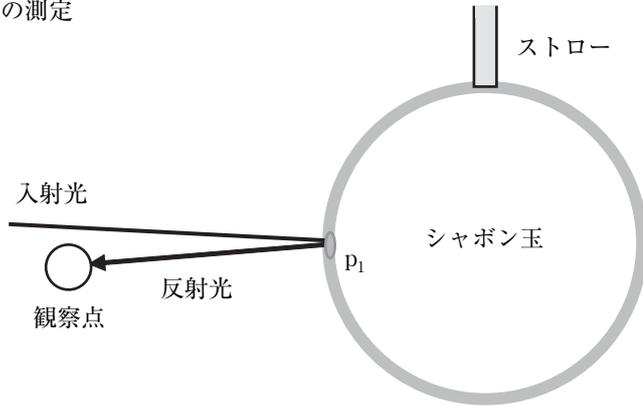


図1 薄膜による光の干渉の2つのケース

(a) 反射光の測定



(b) 透過光の測定

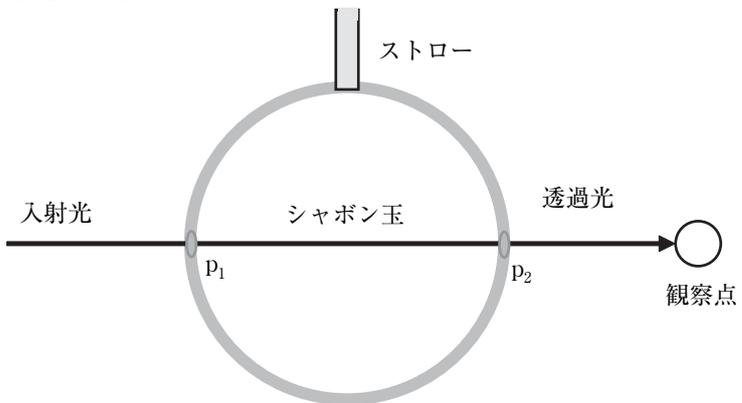
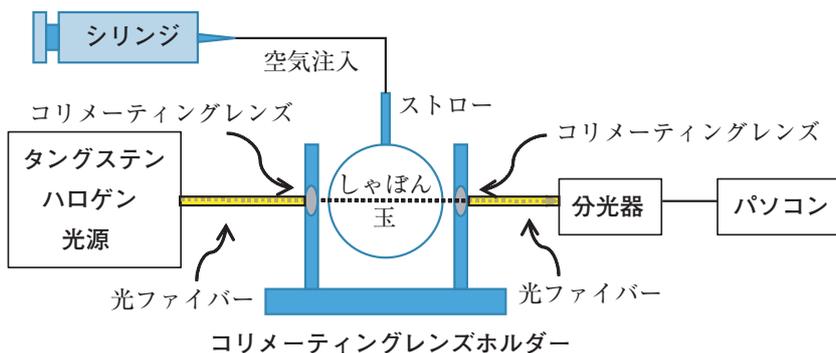


図2 シャボン玉の薄膜による光の干渉と測定ポイント

(a) 従来の実験装置



(b) 今回の実験装置

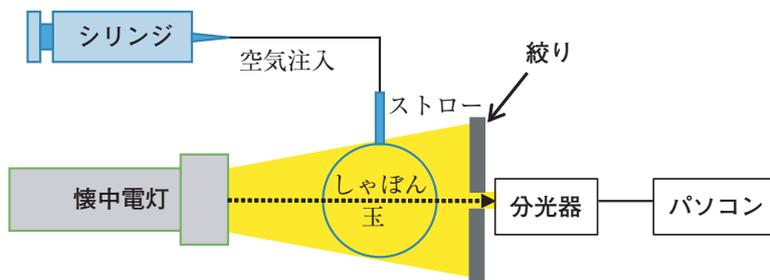


図3 従来と今回の実験装置のブロック図

(a)



(b)

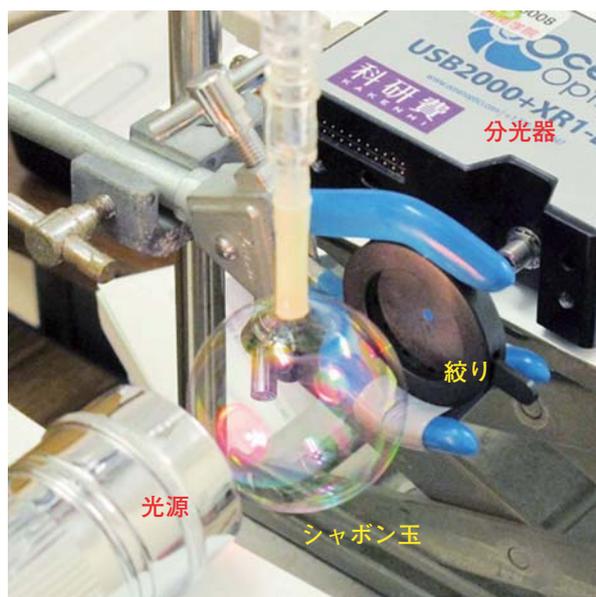


図4 実験装置の写真

=0)を代入して解析を行うことができる[3]。

シャボン玉の薄膜は、厳密に言えば、平面ではなく曲面になるが、シャボン玉の直径が5cm程度であり、入射光が垂直入射であれば、平面として近似できることがわかっている[11]。

図2の具体的な測定に関しては、入射光に市販のタングステンハロゲンランプを用い、観察点に分光器を用いて、反射光と透過光の干渉実験を行ったものはすでに報告している[2, 3]。本稿において報告するのは、入射光に懐中電灯を用い、観察点に分光器を用いて、図2bに対応する透過光の干渉実験を行った結果である。

実 験

図3aには、従来の装置[1, 2]のブロック図を示す。タングステンハロゲン光源から出た光は、光ファイバーを通してレンズホルダーの一方の柱に固定したコリメーティングレンズに導入され、そこからビーム状の光となってシャボン玉の中心に向けて放射され、透過した後に、他方の柱に固定したコリメーティングレンズで集光して光ファイバーで分光器に導入して分光されるという経路をたどることになる。この方法はシャボン玉の干渉スペクトルの測定のためのアラインメントが簡単であるが、タングステンハロゲン光源 (SEC2000-TH) 1個、光ファイバー (QP600-1-SR) 2本、コリメーティングレンズ (74-UV) 2個、およびコリメーティングレンズホルダー (74-ACH) 1個が必要となり、結局、光学系を組むのに分光器と同程度のコストがかかることになる。

図3bには、今回の廉価版の実験装置のブロック図を示す。この装置は懐中電灯を光学系に用いている。具体的には、懐中電灯の光を直接シャボン玉に照射してシャボン玉を透過させ、その光を絞りで光量を調節して分光器に導入する方法を採っている。ここで、絞りは光量を調節する以外に、光がシャボン玉の中心を通るためのアラインメントの役目や迷光を防ぐ役目も果たしている。図4に図3bをもとにした実験装置の写真を示す。懐中電灯は市販の千円程度のものを用いた。写真では光路調整がやり易いように懐中電灯をラボジャッキの上に置いているが、適当な厚さの雑誌を数冊重ねた台の上に置いて

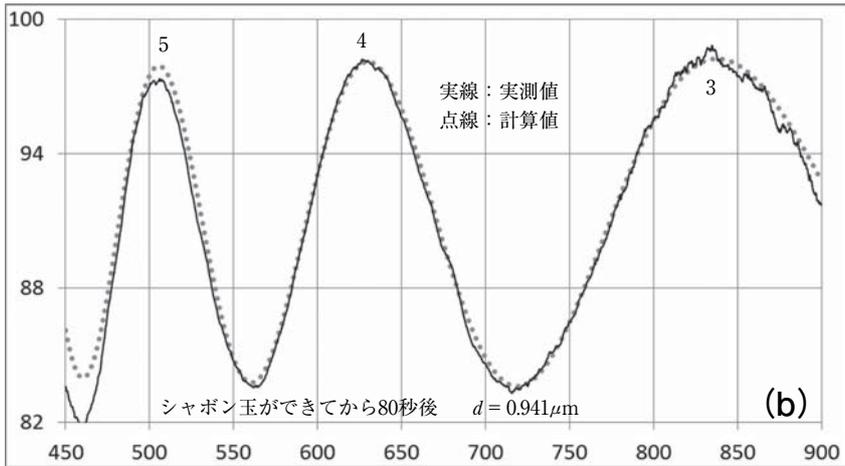
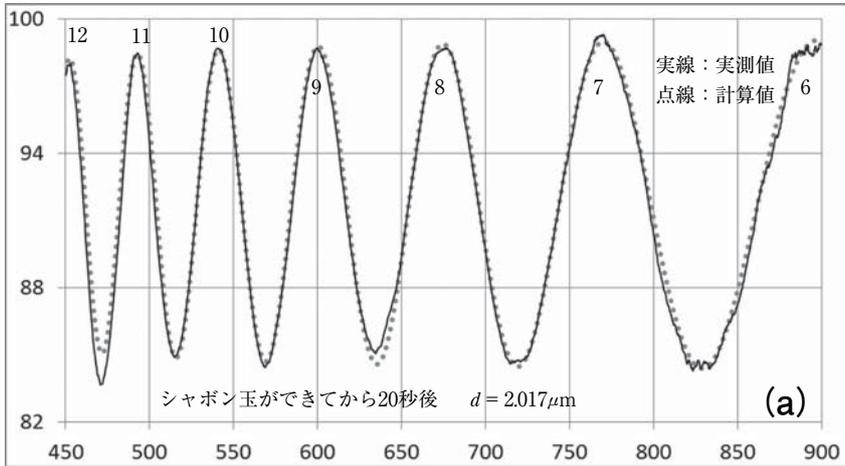


図5 シャボン玉の透過光の干渉スペクトル
 [縦軸-透過率(%) 横軸-波長(nm)]

も良い。絞りは、1万円程度のもを用いたが、黒い画用紙にホールパンチで穴を開けたもので代用することもできる。図4のシャボン玉は、プラスチックストローの先をナリカ製のしゃぼん玉液（ナリカ S77-1405）に浸して上部からプラスチックのシリンジを用いて58mLの空気を送り込んでふくらませたものを用いた。このときのシャボン玉の直径は、球形であると仮定すると、48mmとなる。シャボン玉を透過した干渉を含む光は直径約2mmの絞りの穴を通して分光器に導入して分光し、分光結果はUSBケーブルを通してパソコンに取り込んだ。分光器を動作させるパソコンのソフトとして、先の論文[3]と同じものを用いたが、分光器の測定データをテキスト形式のファイルで出力するソフトであればエクセルを用いてグラフィカルな解析ができるので、本研究と同様な解析が可能となる。

図5aおよび図5bには、それぞれ、シャボン玉ができてから20秒後および80秒後に実測した干渉スペクトルを、縦軸に透過率(%）、横軸に波長(nm)で実線を用いてグラフに示した。今後、図の中に現れる薄膜による光の干渉による透過率のうねりを、フリンジ (fringe) と呼ぶことにする。フリンジの極大値に付している整数は、干渉次数 m の値を示している。干渉次数の帰属の仕方については後の節で説明する。

図5aおよび図5bの干渉スペクトルに現れているフリンジの数は、それぞれ、6個および3個である。後で示すように、フリンジの数は膜厚に比例するので、これらの図から、シャボン玉ができてから80秒後の膜厚は、20秒後の膜厚の約半分になっていることがわかる。膜厚決定に関する詳細な解析は次の節で行う。

解析と結果

シャボン玉の膜の厚さを d 、屈折率を n とすると、透過光の干渉（図2b）における干渉の条件は、(3)、(4)式に垂直入射の条件式($r=0$)を代入することにより、次のようになる。

$$\text{明線} : 2nd = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

$$\text{暗線} : 2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

具体的な干渉の測定は、シャボン玉に照射する単色光の波長 (λ) を掃引しながら透過光の強度の変化を測定する方法と、本研究のようにシャボン玉に白色光を照射して透過光を分光器で分光して波長ごとの強度を測定する方法があるが、測定結果はいずれの場合も透過率を縦軸に入射光の波長を横軸にして図示した干渉スペクトルによって表現される。透過光の透過率 T は、(5), (6) 式から、 $\frac{2nd}{\lambda}$ が整数のときに極大になり、半整数のときに極小になるうねり (フリンジ) を生じるので次式で表現できる。

$$T = a_t \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\right) + b_t \quad (7)$$

ここで、 a_t と b_t は、それぞれ、フリンジの振幅と平均の透過率である。(7) 式の理論的な導出は、文献4に詳しく解説しているので、興味ある人は参照されたい。測定結果に合わせて、 a_t と b_t の値を適当に選び、 nd をパラメータとして実測スペクトルとフィットさせることで、(7)式を用いて干渉スペクトルのシミュレーションを行うことができる。

図5aの点線のグラフは、シャボン玉ができてから20秒後の干渉スペクトルに対するシミュレーションスペクトルである。ただし、シミュレーションの精度を上げるために、屈折率に対してコーシーの分散公式をもとにした次式に示す屈折率の波長依存性を考慮した[2]。

$$n = n_0 \left(1 + \frac{A}{\lambda^2}\right) \quad (8)$$

ここで、 n_0 と A は物質固有の定数である。実際の膜厚決定においては、これらの値は文献2, 3から、 $n_0 = 1.331$ および $A = 0.0024 \mu\text{m}^2$ を用いた。この補正を行うことで、膜厚決定の精度が3倍程度良くなった。また、振幅 a_t に対しても、膜の不均一度 Δd を $0.010 \mu\text{m}$ とし、分解能 $\Delta \lambda$ を 2.1nm とし、文献4をもとに補正を行った。

図5aにおいて、シミュレーションスペクトルは、膜厚 d を $2.017 \mu\text{m}$ としたときに実測スペクトル (実線) にベストフィットすることと、 d の値を ± 0.002

μm だけ変動させたときに実測スペクトルから明らかにずれることをグラフ上で確認した。ここで、450nm から 500nm の測定領域は、分光器が不安定な領域なので実測スペクトルと計算スペクトルの間にずれを生じたことを付記する。以上の考察から、図 5a のシャボン玉ができてから 20 秒後の膜厚は $2.017 \pm 0.002\mu\text{m}$ と決定した。図 5b に対しても同様な解析を行い、シャボン玉ができてから 80 秒後の膜厚は $0.941 \pm 0.004\mu\text{m}$ と決定した。

今回、決定したシャボン玉の膜厚と図 5 における点線と実線の一致から、廉価版の実験装置を用いても、シミュレーション可能な干渉スペクトルが得られ、シャボン玉の膜厚が高精度で決定できることがわかる。

高校物理の数式を用いた展開

前節で解説したシャボン玉の解析は、エクセル VBA で作成した自作ソフトを用いて行った[11]。このソフトは、干渉スペクトルのデータがテキストファイルで与えられている場合に、簡単にゲーム感覚でシミュレーションスペクトルを実測スペクトルにベストフィットすることが可能であるため、小学生でも高精度に膜厚を決定することができる。しかし、その決定方法が具体的にどのような原理や手順で行われているかについては理解しにくいと思われる。そこで、ここでは、干渉スペクトルの解釈を高校物理の学習者にも理解できる方法で議論を進めることにする。

これからの議論では、(5)式と(6)式を統合した次式を使用する。

$$2nd = m\lambda \quad (9)$$

ここで、 m (ただし、 $m \geq 0$) は実数で定義される広義の干渉次数 (以後、単に干渉次数と呼ぶ) である。 m の意味は、(9)式を変形した次式で明らかになる。

$$m = \frac{2nd}{\lambda} \quad (10)$$

(10)式から、 m は、光路差 ($2nd$) の中に生成する波の数であることがわかる。シャボン玉の透過光の干渉の場合、 m の値が 0 から増大するにつれて、明るくなったり、暗くなったりを繰り返すことになる。このとき、 m が自然数に

なるとき明線となり、半整数のとき暗線となる。この明線と暗線の繰り返しが干渉スペクトルのフリンジとなる。

シャボン玉の膜厚 d は、(9)式を変形した次式から得られる。

$$d = \frac{m\lambda}{2n} \quad (11)$$

(11)式から、シャボン玉の膜厚 d は、帰属した干渉次数 m と光の波長 λ から計算できることがわかる。

次に、干渉スペクトルの干渉次数の帰属の仕方と膜厚の決定法について解説する。最初に薄膜の透過光の干渉実験により、図6に示すような干渉スペクトルが得られた場合について考える。縦軸は透過率で、横軸の波長は、 λ_2 から始まり λ_1 で終わるとする。ここで、 $\lambda_1 > \lambda_2$ とし、波長 λ_1 および λ_2 における干渉次数を、それぞれ、 m_1 および m_2 とする。また、屈折率 n の波長依存性は無視できるものとする。図6は膜厚 d が変動しない条件で測定したチャートであるから、この条件を(11)式に代入すると次式が成立する。

$$\frac{m_1\lambda_1}{2n} = \frac{m_2\lambda_2}{2n}$$

$$m_1\lambda_1 = m_2\lambda_2 \quad (12)$$

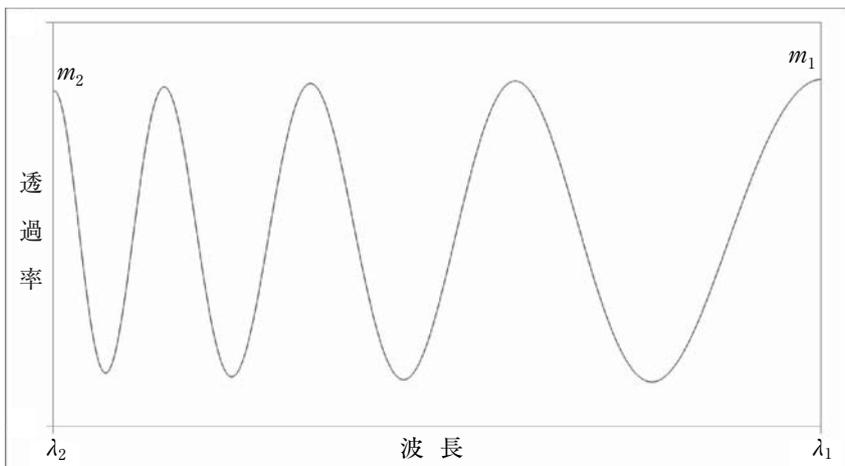


図6 干渉スペクトルを説明するための概念図

N_f を干渉スペクトルの表示画面に現れるフリンジの数とすると、 N_f は次式で表現される。

$$N_f = m_2 - m_1 \quad (13)$$

(13) 式の m_2 に (12) 式を代入すると次式を得る。

$$N_f = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2} m_1 \quad (14)$$

(14) 式を干渉次数 m_1 について解くと、次式が得られる。

$$m_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} N_f \quad (15)$$

(15) 式を (13) 式に代入して、干渉次数 m_2 について解くと、次式が得られる。

$$m_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_f \quad (16)$$

(15) 式を (11) 式に代入すると、膜厚 d を決定する次式を得る。

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n (\lambda_1 - \lambda_2)} N_f \quad (17)$$

(17) 式は、干渉スペクトルに現れるフリンジの数 N_f は膜厚 d に比例することを示している。

図 6 の干渉スペクトルはフリンジを 4 個持つので、 $N_f=4$ となる。一般に、 N_f の値がわかれば、(15)、(16)、および(17)式から、干渉次数 m_1 、 m_2 、および膜厚 d が決定できる。

また、 $N_f=1$ のとき、即ち、 λ_2 と λ_1 の間にフリンジが 1 つある場合 (あるいは、 λ_2 の位置の干渉次数が λ_1 の位置の干渉次数より 1 つ大きくなる場合)、(17) 式は文献 3 の (4) 式と一致することがわかる。

以上のように、高校物理の数式を展開することにより、干渉スペクトルの解釈が可能であることがわかる。

測定領域が 2 倍の関係になる場合の教材

図 5 の干渉スペクトルは、波長領域が 450nm から 900nm であり、測定領域の始めと終わりがちょうど 2 倍の関係になっている。この関係を満たす測定

場合は干渉次数の帰属や膜厚の決定が簡単になり、実験実習がやり易くなる。ここでは、この関係、即ち、次式を満たす場合の教材の展開について解説する。

$$\lambda_1 = 2\lambda_2 \quad (18)$$

(18)式を(15)式や(16)式に代入すると次式を得る。

$$m_1 = N_f, \quad m_2 = 2N_f \quad (19)$$

図5aの干渉スペクトルにはフリッジが6個あるので、 $N_f=6$ となり、(19)式から、干渉次数は、 $m_1=6$ 、 $m_2=12$ となる。この結果を基に、6から12までの干渉次数を帰属したものを図5aに示す。

同様にして、図5bではフリッジが3個見えるので、干渉次数は、840nm付近の3から、510nm付近の5までを帰属できることになる。

干渉次数の帰属を終えたら、干渉次数ごとに極大値の波長を読み取って、(11)式から d を計算し、平均を取って膜厚を決定することになる。このとき、干渉次数の帰属を ± 1 ずらしたときに誤差が大きくなることを確認することで帰属の妥当性が検証できる。

以上のように、膜厚 d は、解析ソフトを用いなくても精密に決定できることがわかる。また、膜厚 d は、(16)式に $\lambda_1=900\text{nm}$ 、 $\lambda_2=450\text{nm}$ を代入した次式を用いても見積もることができる。

$$d = 0.34N_f \quad (\text{ただし、単位は}\mu\text{m}) \quad (20)$$

(20)式は、演示実験において、パソコンやオシロスコープの画面上に現れる干渉スペクトルと膜厚の関係についてコメントするときに便利である。

ここまでは、(18)式の関係を満たす場合の解析の手順について述べた。(18)式の関係を満たさない一般の測定でも、(15)式や(16)式を用いて干渉次数が帰属できるので、同様の解析は可能である。更に、(17)式から(20)式に対応する式が計算により導出できるので、一般の場合でも膜厚は干渉スペクトルのフリッジの数から簡単に見積もることができる。

おわりに

本研究では、懐中電灯を光源にした廉価版の実験装置を作成してシャボン玉の透過光の干渉実験を行った。得られた干渉スペクトルは、シミュレーション

可能で、専用の光源で構築した装置と同程度にシャボン玉の膜厚を高精度で決定できることを示すことができた。

また、実験と並行して、高校物理の式を展開することで干渉スペクトルの解析に便利な数式を導出した。今回得られた数式を用いると、測定波長領域が狭い比較的廉価な分光器を用いた測定に対しても、干渉次数の帰属や膜厚の決定が可能であることを示した。

本稿ではシャボン玉の干渉実験について扱ったが、同様な実験はセッケン膜に対しても可能である。ただし、セッケン膜の場合は、1枚の膜からの干渉を測定するので、フリッジの強度はシャボン玉の場合の約半分になることを付記する[4]。

本研究で行った干渉スペクトルから膜厚を決定する方法は、光の波長を物差しを目盛にして厚さを測る方法であり、日常生活の中で長さを物差しで測る方法と同じように基本的で信頼がおける方法である。それゆえ、本稿の成果を高校物理などの教材づくりに役立てることは、科学教育を進める上で意義あることであると考えている。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費・基盤研究(C) (一般) (代表者：松村敬治，課題番号 JP16K00980) の助成を受けて行ったものである。尚、本研究の一部は 2015 年度日本物理教育学会年会で発表した。

参考文献

- [1] 松村敬治、塩野正明：「分光測定の高速度化によるシャボン玉の膜厚の測定法の確立」西南学院大学人間科学論集 8-1 (2012), 27-43.
- [2] 松村敬治、塩野正明：「シャボン玉の反射光と透過光の分光測定による膜厚の決定」西南学院大学人間科学論集, 8-2 (2013), 215-228.
- [3] 松村敬治、塩野正明：「しゃぼん玉の薄膜の可視分光による干渉実験—反射光と透過光の干渉スペクトルの同時測定—」科学教育研究, 38-3 (2014), 188-195.
- [4] 松村敬治、塩野正明：「しゃぼん玉とセッケン膜の干渉スペクトルの解析のための理論式」西南学院大学人間科学論集 9-2 (2014), 179-203.
- [5] A. Chattopadhyay: Time-Dependent changes in a shampoo bubble, J. Chem.

- Educ., 77-10 (2000) 1339-1342.
- [6] T. K. Sarma and A. Chattopadhyay: Simultaneous measurement of flowing fluid layer and film thickness of a soap bubble using a UV-visible spectrometer, *Langmuir*, 17 (2001) 6399-6403.
- [7] 松村敬治、最上由佳、牧園美咲、田中武彦: 「可視分光によるシャボン玉の膜の厚さの測定」西南学院大学人間科学論集, 5-2 (2110), 13-33.
- [8] 國友正和ほか10名: 「物理 (平成24年3月検定済)」数研出版 (2013) 187-193.
- [9] 黒田和男『光学ライブラリー3 物理光学 —媒質中の光波の伝搬—』朝倉書店 (2011) 1-32.
- [10] 谷田貝豊彦『例題で学ぶ光学入門』森北出版 (2010) 69-70.
- [11] 松村敬治、塩野正明 出版準備中.

西南学院大学人間科学部児童教育学科