

廉価版の分光器を用いた シャボン玉の干渉実験

松村敬治・塩野正明

Interference Experiments of Soap-Bubble Films
Using a Low-Priced Visible Spectrometer

Keiji Matsumura and Masaaki Shiono

シャボン玉やセッケン膜などに見られる薄膜による光の干渉は、高校物理の学習内容の一つになっている。そこにおいては、シャボン玉の色付き方と膜厚の関係について言葉で説明しているが、実験法については解説していない。本研究では、一般の高校でも入手可能な廉価版の分光器と懐中電灯の光源を用いて、シャボン玉の干渉実験と膜厚の解析ができるかについて検討を行った。得られた干渉スペクトルは、干渉次数の帰属とシミュレーション解析が可能なのであったので、シャボン玉の膜厚の時間変化を高精度に決定することができた。また、今回の分光器のような測定領域が狭い範囲に限定される実験機器を用いても演示実験が可能であることを示すことができた。

はじめに

シャボン玉やセッケン膜などに見られる薄膜による光の干渉は、高校物理の学習内容の一つになっている。そこにおいては、シャボン玉の色付き方と膜厚の関係について言葉で説明しているが、実験法については言及していない。一方、我々は、高速で動作する小型マルチチャンネル分光器を用いた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高精度で決定できることを報告[1-6]した。この測定法は、干渉次数の帰属と膜厚の値が一意に決まるので、実験教材としては優れているが、高校物理の教材として普及させるためには、廉価版の測定装置の開発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。シャボン玉の干渉スペクトルを測定するための実験装置は、光源と分光器で構成されるが、光源については、懐中電灯を用いて安価で手軽に構築できることをすでに報告[7]した。一方、分光器に関して、最近、榎ノ木技研より廉価版のマルチチャンネル分光器が販売されていることを知った。そこで、本稿は、その榎ノ木技研の分光器がシャボン玉の膜厚を追跡する実験に於いてどの程度有効であるかについて報告することと、そうした廉価版の分光器を使って演示実験を行うときの留意点について言及することを目的とする。

測定および解析

最初に今回使用した榎ノ木技研のマルチチャンネル分光器 OTS-815V の基本性能について解説する。この分光器の価格は 47,000 円（内税）で、主な仕様は次のとおりである。

測定波長領域：340～780nm

波長分解能（半値幅）：11nm（typ）

検出器画素数：256

A/D 分解能：15 ビット

露光時間（積算時間）：10～10000ms

インターフェース：USB 2.0

仕様書に記してある測定波長領域は、メーカー保証の波長範囲なので、実際の範囲は少し大きくなる。ちなみに、本研究で使用した分光器の波長領域は 311.95nm から 802.37nm であった。

続いて、OTS-815V を用いたシャボン玉の干渉スペクトルの測定実験について解説する。図 1 に、OTS-815V の写真を示す。分光器本体は、80×50mm の大きさのプリント基板に電子パーツがむき出しに装着された状態であったので、基盤を保護するために、図 1 に示すようにアルミケースの底板にスペーサーで固定した。干渉スペクトルの実験装置は文献[7]のブロック図（図 3b）を参考にして図 2 の写真のように配置にした。左手の光源の懐中電灯と中央付近にある分光器の間の距離は約 20cm にセットした。直径 48mm のシャボン玉の中

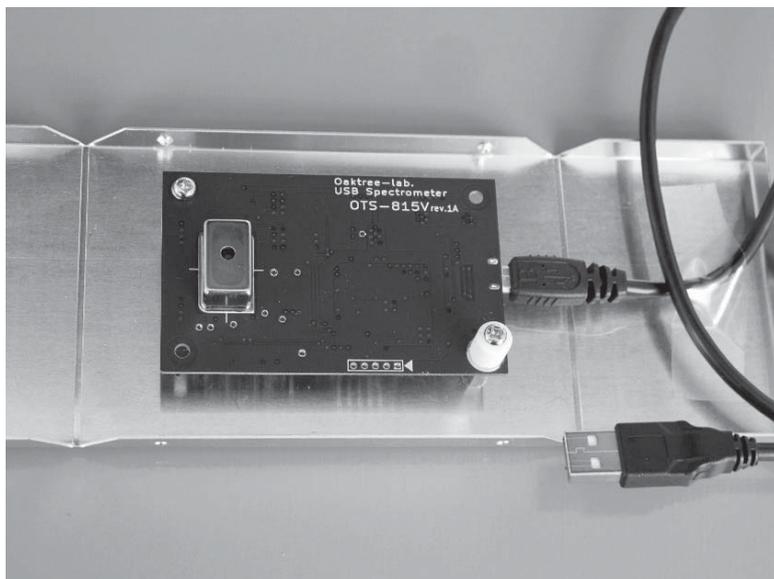


図1 榎ノ木技研のマルチチャンネル分光器 OTS-815V

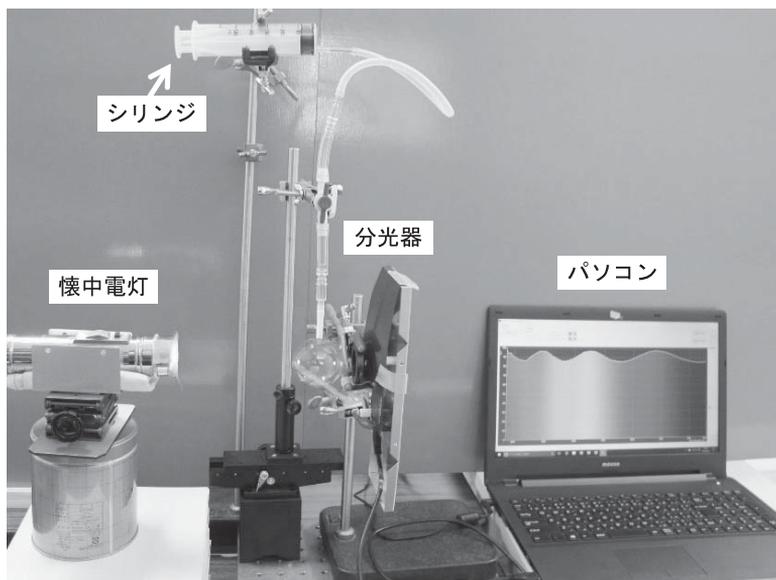


図2 シャボン玉の干渉スペクトルの測定器具の配置

心と分光器の間の距離は5cmとした。図3はシャボン玉と分光器の周辺部を近接撮影したものである。写真に示すように、光源の光量を調節し、迷光を防ぐために分光器の前に約2mmφまで絞ったアイリスを置き、分光器の前面を黒の色画用紙で覆った。今回は行っていないが、シャボン玉の測定を本格的に行うときは、シャボン玉が割れるときの飛沫が分光器に入らないように、分光器の前に透明なビニールのシートを覆うことをお勧めする。また、OTS-815Vの感度は文献[7]で用いた分光器(USB2000+XR1-ES)に比べて2桁程度悪いので、懐中電灯の光を強くして積算時間も2倍の100msecに設定する必要があった。

付属ソフトのezSpectraは、分光測定のための必要最小限のコマンドしか用意していないので、シャボン玉の干渉スペクトルの測定には工夫を要する。このソフトを用いると発光スペクトル、透過スペクトル、および吸収スペクトルの3つのモードで分光測定が可能であるが、リアルタイムにスペクトルの変動の様子を画面に表示できるのは、図4に示すような発光スペクトルのモードだけである。即ち、透過スペクトルと吸収スペクトルの画面は、発光スペクトルの画面から「試料光測定」ボタンを押して静止画面に切り替えることで初めて見ることができ、データ保存などの操作も、その静止画面の状態で行う必要がある。図2の実験装置での干渉スペクトル測定においては、各波長における透過率の測定データとそのデータの取得時間の記録が問題になる。透過率の分光測定は、リアルタイムに表示にしている発光スペクトルの画面を見ながら、測定したいと思う時点で、「試料光測定」のボタンをクリックすることで、図5のような静止画面の透過スペクトルを得ることで行われる。そのあと、データ保存の操作をすることになるのだが、このときの干渉スペクトルの測定時間は、データを保存した時間ではなく、「試料光測定」のボタンをクリックした時の時間にしないとイケない。透過率の測定データをパソコンに保存する操作は、透過率のスペクトルの画面上にある「数値表として保存」のボタンをクリックすることから始める。そのとき表示されるダイアログボックスの所定の位置にファイル名を入力して「保存」をクリックすると、測定データはcsvファイルで保存される。この一連の操作を行うのに、「試料光測定」のボタンをクリッ

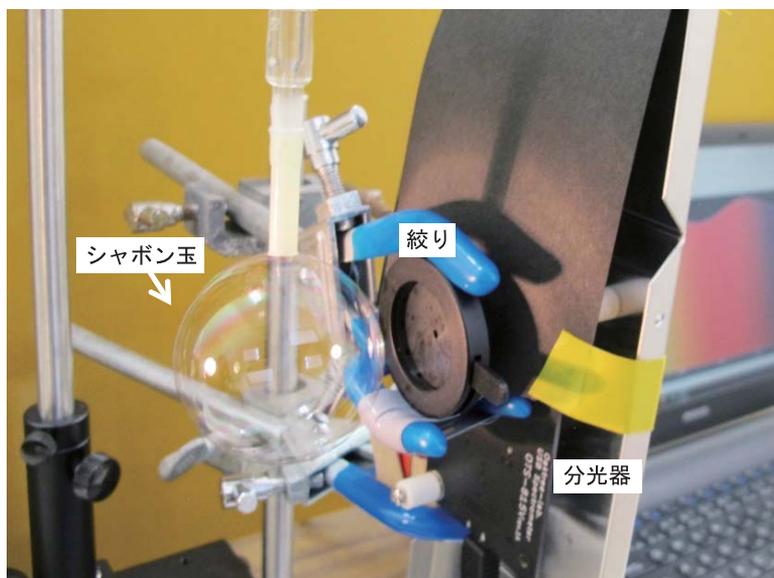


図3 シャボン玉と分光器周辺部の写真

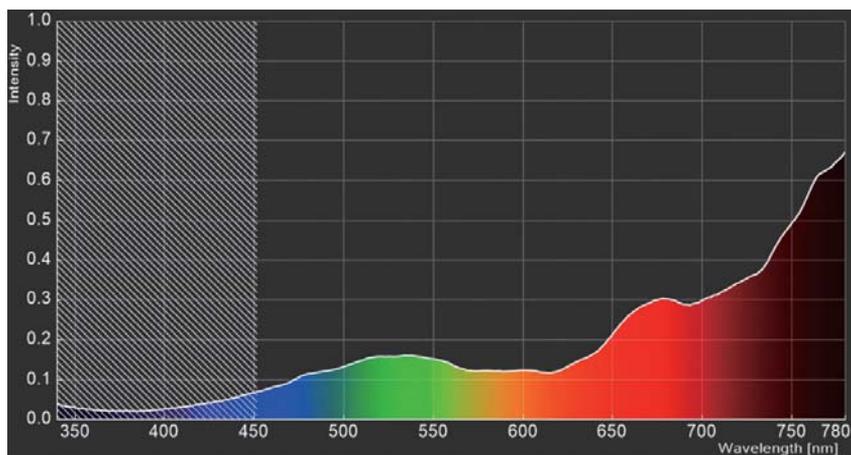


図4 ezSpectraの発光スペクトル表示のモード

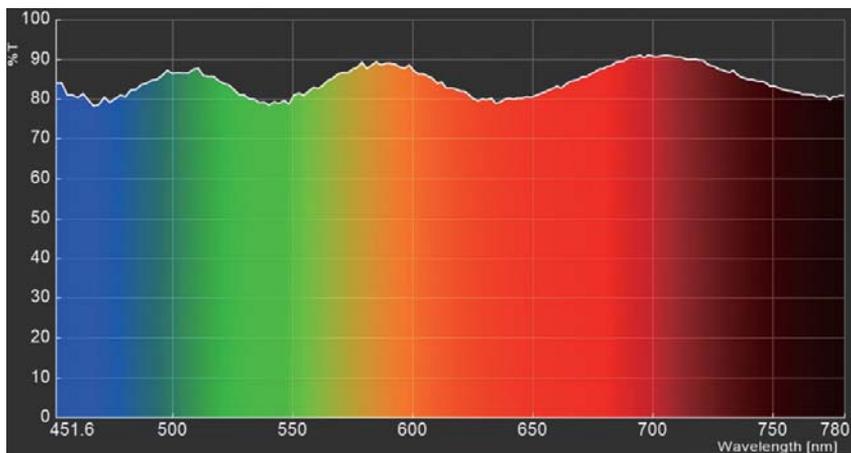


図5 ezSpectraに表示されたシャボン玉の透過スペクトル

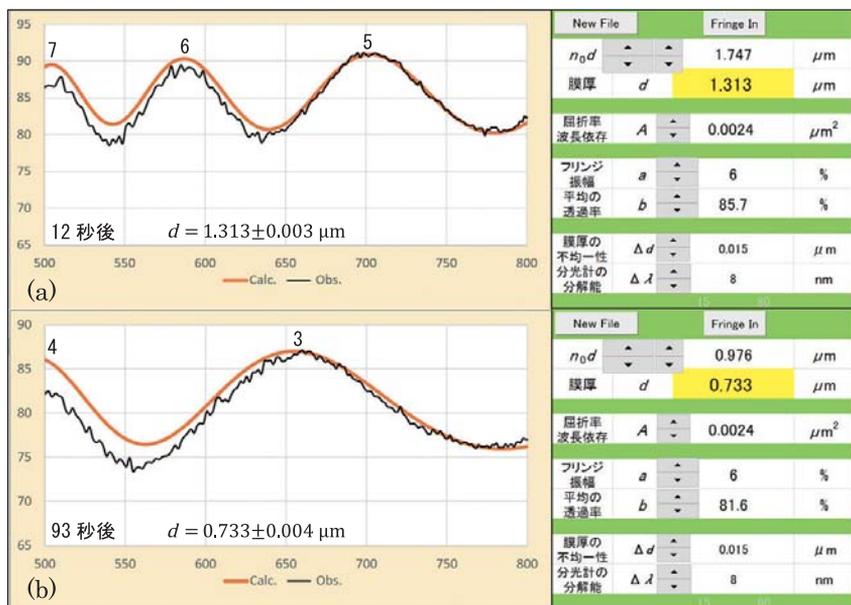


図6 干渉スペクトルの解析画面 [縦軸-透過率(%), 横軸-波長(nm)]

クしてから、30 秒くらい時間がかかり、その間にも干渉スペクトルは変化するので、シャボン玉の膜厚の時間変化を追跡する場合には工夫を要する。既に述べたとおり、干渉スペクトルの測定では、シャボン玉の膜厚が秒単位で刻々と変化するので、その時々々の膜厚の測定時間を正確に記録する必要がある。測定ソフトの OceanView や OPwave+ では、オプション設定で干渉スペクトルのデータファイルに測定時間を記録できるので問題無いが、ezSpectra には、この機能が付いていないので、測定時間を決めるには工夫を要する。今回はこの問題を解決するために、動画キャプチャーソフトの Bandicam (バンディカム) を使って測定中のパソコンの画面を録画して、実験後に再生画面から、シャボン玉が生成した時間と干渉スペクトルを測定した時間を正確に読み取って決定した。このとき、シャボン玉が生成した時間と割れた時間は、発光スペクトルが微妙に変化するときの時間から割り出すことができた。また、干渉スペクトルを測定した時間は、再生画面を見ながら「試料光測定」のボタンをクリックした時間を正確に読み取って書き留めることで記録できる。一方、csv ファイルを保存した時間は、ファイルのプロパティからエクセル VBA の FileDateTime 関数を用いて見ることもできる。

このようにして測定時間の問題が解決したので、この結果をもとに今回の測定スペクトルについて解説する。図 4 は、積算時間を 100msec に設定したときの光源の懐中電灯の発光スペクトルの画面で、短波長側の斜線がかかった部分は、光源の発光強度が弱いために自動的に透過スペクトルの測定から除外される波長領域である。図 5 は ezSpectra の透過スペクトルの画面で、シャボン玉ができてから 12 秒後の干渉スペクトルを示している。画面の表示範囲は 451.6nm から 780nm となっているが、csv ファイルに保存したときは、451.59 nm から 802.37nm までが有効データとなっていた。このスペクトルの csv ファイルのデータをエクセル VBA のプログラム [5] を用いて解析して、500nm から 800nm までの範囲を表示したものを図 6 (a) に示す。同様に、シャボン玉ができてから 93 秒後の干渉スペクトルを図 6 (b) に示す。今回、これらの測定も含めて、シャボン玉ができてから割れるまでの約 4 分間の間に合計 9 カ所の時点で測定を行った。このとき、シャボン玉の作り方は、文献 [3] に示

したとおりであるが、ストローの先にキネシオテープは巻かなかった。測定を行ったときの実験室の温度は 19.5℃、湿度は 60% であった。

表 1 に、測定した 9 カ所の干渉スペクトルの解析結果を示す。1 列目に測定番号、2 列目にシャボン玉ができてからの経過時間、3 列目と 4 列目に、それぞれ、シャボン玉の膜厚 d と膜厚の決定精度を示す。図 6 の (a) と (b) は、それぞれ、測定番号 1 と 5 の干渉スペクトルに対応している。図 6 の黒の曲線は測定スペクトルを示し、オレンジの曲線はシミュレーションプログラム [5] で描いた計算スペクトルを示す。図 6 (a) において、シミュレーションスペクトルは、膜厚 d を $1.313\mu\text{m}$ としたときに実測スペクトルにベストフィットすることと、 d の値を $\pm 0.003\mu\text{m}$ 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。それゆえ、シャボン玉ができてから 12 秒後の膜厚は $1.313 \pm 0.003\mu\text{m}$ と決定した。図 6 (b) に対しても同様な解析を行い、シャボン玉ができてから 93 秒後の膜厚は $0.733 \pm 0.004\mu\text{m}$ と決定した。同様にして、残り 7 つの干渉スペクトルの解析も行い、これらの結果は、表 1 にまとめて掲載した。

図 7 に、今回の実験で得られたシャボン玉の膜厚 (表 1) を、経過時間に対してプロットしたグラフで示す。この図を見ると、シャボン玉の膜厚の時間変化が滑らかな曲線で示されることがわかる。また、これまで報告した結果 [3, 6] と同じように、シャボン玉の膜厚は時間と共に薄くなっていくが、その変化はシャボン玉ができた直後と割れる直前に小さくなっていることがわかる。このように、今回の実験方法を用いると、廉価版の実験装置でも精度の高い測定ができることを示すことができた。

演示実験のための干渉スペクトルの基礎理論

今回測定した干渉スペクトルは、450nm から 800nm と限られた範囲の測定しかできなかった。この節では、このような狭い範囲の干渉スペクトルに対して、干渉次数を帰属する方法と、膜厚を見積もる方法について基礎的な部分から解説する。

表1 シャボン玉の膜厚の測定結果

測定番号	経過時間 (秒)	膜厚 (μm)	膜厚の精度 (μm)
1	12	1.313	± 0.003
2	29	1.216	± 0.003
3	52	1.040	± 0.003
4	72	0.891	± 0.003
5	93	0.733	± 0.004
6	111	0.598	± 0.004
7	145	0.346	± 0.005
8	171	0.201	± 0.006
9	208	0.151	± 0.009

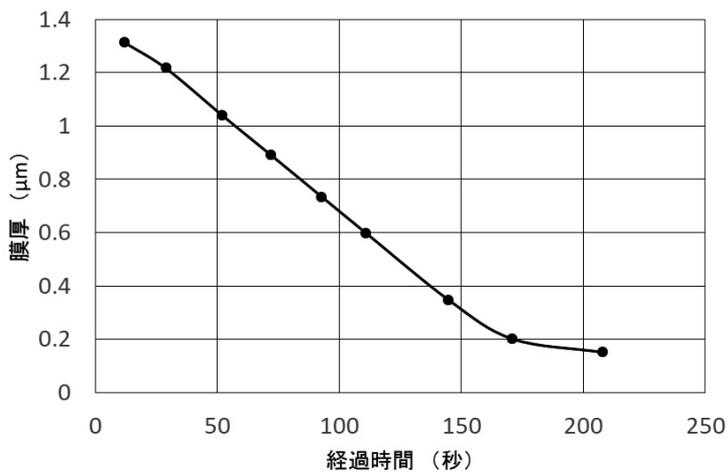


図7 シャボン玉の膜厚の時間変化

シャボン玉の干渉の基本式

厚さ d 、屈折率 n の薄膜に垂直に入射して透過した波長 λ の光が示す干渉は、膜を素通りして出て行く 1 つ目の光と、膜の内側で 2 回反射した後に透過して出て行く 2 つ目の光が重なるときの干渉になるので、光路差は $2nd$ となり、干渉の式は次式となる。

$$2nd = m\lambda \quad (\text{ただし, } m \geq 0) \quad (1)$$

ここで、 m は光路差の中に生成する波長 λ の光の波の数（実数）で、広義の干渉次数（実数）である。 m の値が変化するにつれて、観察される干渉は、明るくなったり、暗くなったりを繰り返す。透過光の干渉では、 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ので、横軸を波長、縦軸を透過率で表現すると、図 6 のような干渉スペクトルが観測される。ここで、図の中の明線と暗線の繰り返しのうねりをフリンジ (fringe) と呼ぶことにする。この図において、フリンジの極大値（明線）のところにある整数は、後述の方法で帰属した干渉次数である。ここで、シャボン玉の透過光の干渉スペクトルは、ほぼ同じ膜厚の薄膜を 2 回透過した光についての分光になるのでフリンジの強度は約 2 倍になるが、その扱いは 1 枚の薄膜の場合と同じ様に扱うことができる [4] ことを付記する。

次に、(1) 式を用いて図 6 の干渉スペクトルを解析する。膜厚 d の薄膜の干渉スペクトルの波長領域が、短波長側の λ_s から始まり長波長側の λ_L で終わるとし、 λ_s と λ_L における干渉次数を、それぞれ、 m_s と m_L とする。屈折率 n の波長依存性は無視できるものとする (1) 式から次式が成立する。

$$m_s \lambda_s = m_L \lambda_L = 2nd \quad (2)$$

波長領域に現れるフリンジの数 N_f は、次式で表される。

$$N_f = m_s - m_L \quad (3)$$

膜厚 d は、(3)式の m_s と m_L に(2)式を代入して変形することにより、次式で表される。

$$d = \frac{\lambda_L \lambda_S}{2n(\lambda_L - \lambda_S)} N_f \quad (4)$$

(4)式から、薄膜の膜厚が干渉スペクトルに現れるフリンジの数に比例することがわかる。ここでは、 λ_S と λ_L を干渉スペクトルの両端の波長としたが、 λ_S と λ_L を N_f の値が定まるようなフリンジの極値間の波長としても良いことを付記する。

また、波長 λ_P における干渉スペクトルの干渉次数 m_P は、(4)式に(1)式を代入することにより、次式で表される。

$$m_P = \frac{\lambda_L \lambda_S}{\lambda_P (\lambda_L - \lambda_S)} N_f \quad (5)$$

以上、(1)式から派生した式を列記した。続いて、これらの式を用いて、演示実験での干渉スペクトルの解析の仕方について解説する。

演示実験での干渉スペクトルの解析

演示実験では、測定画面に現れる干渉スペクトルを見ながらリアルタイムで干渉次数と膜厚について解説する必要がある。

文献[3, 6]で用いた分光器では、 $\lambda_S = 450\text{nm}$ 、 $\lambda_L = 900\text{nm}$ であったので、解析や説明が簡単であった。このときは、 $\lambda_L = 2\lambda_S$ が成り立っているので、(2)式と(3)式から $m_s = 2m_L$ および $m_L = N_f$ となることを利用して、干渉次数の帰属と膜厚を決定することができた。

一方、今回のように、測定波長領域が狭い場合は、測定した干渉スペクトルのうち、500~800nmの部分に着目すると良い。即ち、次式の条件の下で考えることになる。

$$\lambda_S = 500\text{nm}, \lambda_L = 800\text{nm} \quad (6)$$

このとき、膜厚 d の概算値 (μm) は、シャボン玉の屈折率 1.34 を (4) 式に代入すると、次式で近似できる。

$$d = 0.50 \times N_f \quad (7)$$

また、干渉次数の帰属に関しては、(5)式を用いると、波長が $\lambda_p = 666.6\text{nm}$ のときの干渉次数 m_p は $2N_f$ となることがわかる。

ここでの結果を用いて図6を解析してみよう。図6 (a) の干渉スペクトルは、フリッジが2.6個あるので、 $N_f = 2.6$ になり、膜厚の概算値は(7)式から $1.30\mu\text{m}$ となる。この値は、表1のシミュレーション解析からの値 $1.313 \pm 0.003\mu\text{m}$ と良く一致している。また、波長が 666.6nm のフリッジの干渉次数は、 $2N_f = 5.2$ となるので、 700nm 付近のフリッジの極大値の干渉次数は、5に帰属でき、その他のフリッジの極大値も次々に帰属できる。一方、図6 (b) の干渉スペクトルは、フリッジが1.5個あるので、 $N_f = 1.5$ になり、膜厚の概算値は(7)式から $0.75\mu\text{m}$ となる。この値は、表1のシミュレーション解析からの値 $0.733 \pm 0.004\mu\text{m}$ と良く一致している。また、波長が 666.7nm 付近のフリッジの極大値の干渉次数は、 $2N_f = 3$ に帰属できる。これらの結果は、図6の中に示している。

以上、測定波長領域が狭い分光器を用いても演示実験における解説が可能であることがわかる。特に、シャボン玉の膜厚の概算値 (μm) は、(7)式に示される通り、画面に現れるフリッジの数を2で割れば良いので、暗算で見積もることができて便利である。また、こうした解析が行えない場合でも、少し時間と手間がかかるが、VBAのプログラム[5]を用いれば、干渉次数の帰属や膜厚の決定が行えることを付記する。

おわりに

最後に、図7のシャボン玉の膜厚の経時変化のグラフについてコメントする。そのグラフは、すでに述べたように、シャボン玉ができてから50秒から170秒までは、ほぼ一定の速さで膜が薄くなることを示していた。膜厚の変化を数

値で表すと、 $-0.0075\mu\text{m}/\text{秒}$ となるが、この値は文献3の図から読み取った速さの $-0.019\mu\text{m}/\text{秒}$ に比べて半分以下のゆったりした速度となっている。今回も、ナリカ製のシャボン玉液 (S77-1405) を使ったが、文献3と異なる点は、ストローの先にキネシオテープを巻かなかったことと、温度・湿度を違う値に設定したことである。キネシオテープを巻かなかったことで、ストローの先に付着するシャボン玉液が少なくなり、シャボン玉ができたときの膜厚が $1.3\mu\text{m}$ と、文献3と比べて約 $1\mu\text{m}$ も薄くなっていた。この初期の膜厚の違いが、膜厚の変化に影響を与えたのかも知れない。一方、今回の実験室の温度と湿度は、それぞれ、 19.5°C と 60% で、文献3の 22°C と 32% に比べて、温度は低く、湿度は高くなったので、シャボン玉の表面から蒸発する水が少なくなり、このことが主な原因で膜厚の変化が遅くなったと考えられる。

本研究では、廉価版の分光器と懐中電灯の光源を用いてシャボン玉の干渉実験を行った。得られた干渉スペクトルは、干渉次数の帰属とシミュレーション解析が可能なものであったので、シャボン玉の膜厚を高精度に決定することができた。更に、録画した測定画面から、干渉スペクトルの測定時間を正確に割り出すことで、膜厚の変化を詳細に追跡することができた。今回は測定時間の割り出しに動画キャプチャーソフトを用いたが、デジタルカメラの動画撮影機能などを用いることも可能であり、本稿で述べた方法はシャボン玉の膜厚の時間変化の測定に有用であることがわかる。また、今回用いた分光器は測定領域が狭い範囲に限定されたものであったが、こうした器具を使っても演示実験が可能であることを示した。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方法については現在検討中である。

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、2017 年度理科教育学会年会で発表した。

参考文献

- [1] 松村敬治、塩野正明：「分光測定的高速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] 松村敬治：「演示教材のための干渉スペクトルの解析プログラムの作り方—エクセルを用いてシャボン玉やセッケン膜の膜厚を測定する方法—」西南学院大学人間科学論集 13-1 (2017), 27-43.
- [6] 松村敬治：「シャボン玉の測定—シャボン玉ができてから割れるまでの膜厚の追跡—」光技術コンタクト 56-4 (2018), 14-22.
- [7] 松村敬治、塩野正明：「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」西南学院大学人間科学論集 12-1 (2016), 40-48.
- [8] 松村敬治、塩野正明：「シャボン玉の誕生から割れるまでの膜厚を追跡する演示実験」日本理科教育学会全国大会発表論文集 15 (2017), 478.

西南学院大学人間科学部児童教育学科