

# 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

松村敬治・塩野正明

Measurements of the Thickness of Soap Bubble Film by  
High-Speed Optical Spectroscopic Observations

Keiji Matsumura and Masaaki Shiono

## はじめに

シャボン玉が美しいと感じる理由の一つに、透き通った薄い膜が虹色に輝いて見えることが挙げられる。この輝く虹色は、シャボン玉膜の内側と外側の表面で光が反射するとき起きる干渉によるものであるが、シャボン玉の膜の厚さに関する重要な情報も与えてくれる。先の論文<sup>1)</sup>ではシャボン玉膜（石鹼膜）の干渉スペクトルの測定から、シャボン玉の膜ができてから割れるまでの20分間に、膜の厚さが $3\mu\text{m}$ から $0.4\mu\text{m}$ に変化していることを報告した。ここでは、プラスチックフィルムなどの膜厚を決定する方法をシャボン玉の膜厚測定に適用したが、その測定法は一般の紫外可視分光器を使った極めて単純なものであり、いくつかの問題点を含んでいた。その中で最も大きな問題は、干渉スペクトルの測定に時間がかかり、シャボン玉の膜厚が測定中に変動して干渉縞が動き、干渉次数（order of interference）が定まらないという問題である。この問題は、測定の信頼度にかかわる重要な問題であり、先の論文における測定<sup>1)</sup>がシャボン玉膜の変化を完全には把握できていないことを意味する。これを解決するためには、シャボン玉の膜厚の変動が無視できるくらいに高速化した測定系を構築する必要がある。

今回、CCDアレイ検出器を搭載した小型マルチチャンネル分光器で測定系

を構築することにより、干渉スペクトルの測定時間を約10万分の1に短縮することに成功し、干渉次数の問題を解決することができたので、本稿で詳細を報告する。

### シャボン玉の膜厚の決定法と問題点

シャボン玉の膜厚の決定法 シャボン玉の膜厚の測定については、SciFinderによるオンライン検索の結果、2000年に Chattopadhyay<sup>2)</sup>が報告していることがわかった。その論文では、一般の紫外可視分光器を用いた干渉スペクトルの測定からシャボン玉の垂直方向の膜厚が12分間に $1\mu\text{m}$ から $0.3\mu\text{m}$ まで変化したことを報告している。また、2001年には、Sarmaと Chattopadhyay<sup>3)</sup>が同様な方法を用いてシャボン玉の垂直方向と水平方向の干渉スペクトルを測定しており、 $1\mu\text{m}$ から $0.2\mu\text{m}$ までの膜厚の変化とマランゴニ対流によるシャボン玉表面の流動を観測した。2010年には我々のグループ<sup>1)</sup>がシャボン玉(石鹸膜)の膜厚が約7分の時定数で20分間の間に $3\mu\text{m}$ から $0.4\mu\text{m}$ まで変動していることを報告した。これらの論文に掲載された干渉スペクトル<sup>1-3)</sup>は、Chattopadhyayの論文を含めてすべて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なので、測定時間に問題があり、干渉次数が定まらないという問題点を含んでいた。

膜厚を決定するその他の方法としては、2008年にNHKのシャボン玉に関する特集番組<sup>4)</sup>で、小さく膨らませたシャボン玉をそのまま液体窒素で瞬間冷凍し、それを割った破片の観察から決定する方法を紹介していた。放送では、膜の厚さが $10\mu\text{m}$ になることを報告していたが、この方法は小さなシャボン玉だけにしか適用できない点や精度の点で問題がある。また、2011年には Afanasyevら<sup>5)</sup>がデジタルビデオカメラの映像からシャボン玉の膜厚を決定する方法を紹介している。この方法は身近な電化製品を用いて手軽に測定できるという利点があるが、解析に注意を要する点が問題である。

干渉スペクトルから膜厚を決定する方法は、光の波長を物差しが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シンプルで信頼がおける方法である。ここでは、干渉スペクトルの測定から膜

厚を決定する方法の概略を説明し、この方法の問題点と解決策を議論する。

屈折率  $n$ 、厚さ  $l$  の膜が光が透過するとき、膜の出射側で生じる干渉は、光の波長  $\lambda$  が次の関係を満たすとき、明るくなる（吸光度が小さくなる）。

$$\lambda = \frac{2nl}{m} \quad (1)$$

ここで、 $m$  は干渉次数で、 $m=0, 1, 2, 3, \dots$  で示される整数値をとる。屈折率  $n$  は光の波長にゆるやかに依存する変数であるが、ここでは特に断らない限り定数として扱うものとする。光の波数  $k$  は波長  $\lambda$  と次式で示すように逆数関係にある。

$$k = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

いま、(1)式を満たす波長  $\lambda$  および波数  $k$  を、干渉次数  $m$  に依存する変数ということで、それぞれ、 $\lambda_m$  および  $k_m$  と表記することにする。干渉次数  $m$  がわかれば、膜の厚さ  $l$  は、(1)式から次のように決定できる。

$$l = \frac{\lambda_m m}{2n} \quad (3)$$

干渉スペクトルにおいてフリンジ (fringe) が複数できている場合、干渉次数  $m$  がわからなくても膜厚は決定できる。縦軸が吸光度となっている干渉スペクトルにおいて、ある干渉フリンジの極小値の波数を  $k_m$  とし、その極小値から短波長側に  $i$  個目の極小値の波数を  $k_{m+i}$  とすると、膜の厚さ  $l$  は、(1)、(2)式から次のように決定できる。

$$l = \frac{i}{2n(k_{m+i} - k_m)} \quad (4)$$

ここで、 $k_m$  と  $k_{m+i}$  の値としてフリンジの極小値を起点とした値を用いたが、フリンジの極大値を起点とした値を用いても、(4)式と同じ形の式を導くことができる。さらに議論を進めると、干渉フリンジのうねりのどの起点からも(4)式と同様な式が得られることがわかる。それゆえ、実際の測定においては、観測されるスペクトルのノイズの状況に応じて読み取りの起点を決めてから膜の厚さ  $l$  を決定することになる。

ここまででは屈折率が既知であることを前提に議論を進めていたが、屈折率が既知でない場合は、(4)式の代わりに次式を用いて議論を進めて行く。

$$nl = \frac{i}{2(k_{m+i} - k_m)} \quad (5)$$

(5)式は、屈折率  $n$  の波長依存性を評価するときにも、用いることができる。この場合は、 $nl$  (屈折率×膜厚) の値を色々な波長で測定して、 $nl$  をグラフにプロットすることで屈折率の波長依存性を判定する。膜の厚さ  $l$  は特定波長で測定した屈折率とその波長における  $nl$  の読み取り値から決定する。

干渉次数  $m$  は、(4)式または(5)式から求めた膜の厚さ  $l$  を(3)式に代入することで求めることができる。このようにして求めた干渉次数は整数値に近い値になるはずであるが、膜厚の時間的変動などで、干渉スペクトルの測定精度が悪くなる場合は整数値から外れてくる。干渉次数が決まる場合は、(3)式を用いて膜の厚さ  $l$  を再決定することができ、このときは(4)式を用いたときよりも精度が上がる。すべての測定領域にわたって、一つ一つのフリンジの極値の波長から決めた膜の厚さが矛盾していなければ、シミュレーションにも耐えうる目的の干渉スペクトルが得られたことになる。

シャボン玉の膜厚の決定の問題点 文献1、2、3には、横軸を波数、縦軸を吸光度にして測定した干渉スペクトルの図と決定した膜厚の値が掲載されている。波長  $\lambda$  における干渉スペクトルのフリンジの吸光度  $A(\lambda)$  は次式で近似できる。

$$A(\lambda) = a \left( 1 - \cos \left( \frac{4\pi nl}{\lambda} \right) \right) \quad (6)$$

ここで、 $a$  は干渉フリンジの振幅で、透過光で起きる干渉の場合は0.005付近の値<sup>1)</sup>になる。膜の厚さ  $l$  が決まれば、(6)式からシミュレーションスペクトルを描くことができるはずである。ところが、文献1、2、3に掲載された干渉スペクトルに対しては(6)式を用いては再現できないことが分かった。干渉スペクトルのフリンジの極小値の位置とシミュレーションスペクトルのフリンジの極小値の位置が全く対応しないのである。このことは、干渉スペクトルのフリンジに対して干渉次数が決まらないことを意味する。この原因は、回折格子

を稼働させる一般の紫外可視分光器を測定に用いているので、測定時間がかかり過ぎて、測定中にシャボン玉の膜厚が変動して干渉縞が動くからである。測定精度の向上を図ったり、テキスト教材に提供できるような測定を目指したりするためには、シミュレーションで再現できるような測定を行う必要がある。今後、シミュレーションができるような干渉スペクトルのことを干渉次数が決まるスペクトルと呼ぶことにする。

これから、干渉次数が決まるスペクトルを測定するには、測定時間をどの程度短縮する必要があるかを考える。最初に、測定時間の短縮が測定誤差にどのような影響を与えるかを見積もるために、シャボン玉の膜厚の時間変動を表す関数として次式で示すような膜の厚さ  $l$  が時間  $t$  と共に指数関数的に減少する関数を仮定する。

$$l = l_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

ここで、 $l_0$  は  $t=0$  のときの膜厚で、 $\tau$  は時定数である。膜厚が半分になるのにかかる時間、即ち、膜厚の半減期  $t_{1/2}$  は、

$$t_{1/2} = \tau \ln 2 \quad (8)$$

となる。実際のシャボン玉の膜厚の時間変化は(7)式とは少し異なる挙動をするが<sup>1)</sup>、ここでは、実験条件についてのみ議論する予定なので、(7)式を使用しても差し支えない。膜厚が(7)式に従って変化するとき、膜厚の時間的な変動による測定の誤差  $\Delta l$  と、測定にかかる時間  $\Delta t$  の関係は次のように見積もることができる。

$$\Delta l = \frac{l}{\tau} \Delta t \quad (9)$$

膜厚の測定誤差を  $\Delta l$  以下に抑えるために許容される測定時間を見積もるときは、(9)式を変形して、

$$\Delta t = \frac{\tau}{l} \Delta l \quad (10)$$

を用いる。表1に、膜厚  $1\mu\text{m}$  のシャボン玉の測定誤差を  $0.01\mu\text{m}$  以下に抑え

表1 測定誤差を  $0.01\mu\text{m}$  以下にするための許容測定時間<sup>a</sup>

膜厚の半減期	10 秒	20 秒	30 秒	1 分	2 分	5 分	10 分
膜厚の時定数	14s	29s	43s	87s	173s	433s	866s
許容測定時間	0.14s	0.29s	0.43s	0.87s	1.73s	4.3s	8.7s

<sup>a</sup> 許容測定時間は (10) 式に  $l = 1\mu\text{m}$ 、 $\Delta l = 0.01\mu\text{m}$  を代入して計算

るために許容される測定時間を、いくつかの半減期に対して (10) 式から計算した結果を示す。先の論文<sup>1)</sup>で報告したシャボン玉の場合は半減期が 5 分（時定数が 7 分）であるから、そのシャボン玉膜に対して干渉次数が決まるスペクトルを測定するための許容測定時間は、この表から 4 秒となり、測定時間が 1 分以上かかる紫外可視分光器を用いた測定では干渉次数が決まらないことがわかる。この許容測定時間は (10) 式からわかるとおり、膜の厚さや時定数によっても変わる。特に、シャボン玉膜の物性はシャボン玉液の成分や温度によって大きく変動するので、干渉次数が決まるスペクトルを測定するには余裕を持って測定時間を 1 秒以下に抑えることが望ましい。

**高速化した測定系の構築** ここでは、干渉次数が決まるスペクトルを得るために、測定時間が 1 秒程度になるまで高速化した測定系の構築について考える。回折格子を稼働させるタイプの紫外可視分光器を用いた測定系は、測定時間が 1 分以上かかるので採用できない。測定領域を紫外可視領域まで拡張したフーリエ変換赤外分光器の場合は、測定時間を数秒まで短縮できるので緩やかに変化する膜厚の測定には採用できる。最近、ダイオードアレイ検出器や CCD アレイ検出器を搭載したマルチチャンネル型の紫外可視分光器が普及している。ダイオードアレイ式の分光器は 200 nm から 1000 nm までの波長範囲を約 1 秒で測定できる。一方、CCD アレイ式の分光器はさらに 1000 倍も高速になり、同じ波長範囲を約 0.001 秒 (1 ms) で測定することが可能になる。CCD アレイ検出器は家庭用のビデオカメラの検出部にも使用されているので高速・高感度で比較的安価であるが、一般の検出器に比べてノイズが大きいという欠点を持つ。いずれにしても、ダイオードアレイ式の分光器や CCD アレイ式の分光器を用いると、干渉次数の決まるスペクトルを観測することが期待できる。

## シャボン玉膜の干渉スペクトルの測定実験

測定には 200 nm から 1050 nm の波長領域で動作する CCD アレイ検出器を搭載したオーシャン옵ティクス社製の小型マルチチャンネル分光器 USB 2000+XR1-ES を用いた。この分光器は写真 1 に示すように、正面右側の SMA 905 コネクタの穴に入射させた光を波長分解能 1.5 nm で分光した結果を右側の USB ポートからパソコンに出力する構造になっている。オーシャン옵ティクス社は測定領域や分解能に応じて様々な分光光度計を提供しているが、USB 2000+シリーズは、波長範囲が広く、高感度で高速データ取り込み可能という特徴がある。本研究では、この分光器を用いて、シャボン玉膜の干渉スペクトルを測定するために、写真 2 に示すような測定系を用意した。写真 2 には、中央にコリメータレンズホルダー (74-ACH) を置き、その左側に分光器、右側にタングステンハロゲン光源 (SEC2000-TH) を配置して、それらの間をグラスファイバーでつないだ様子が見える。この測定系は、光源から出た光が、グラスファイバーを通してコリメータレンズホルダーの右側の柱のコリメータレンズに達して、スポットサイズが直径 5 mm のビームとして空間に放射され、シャボン玉の膜を透過した後、左側の柱のコリメータレンズに集められてグラ



写真 1 小型マルチチャンネル分光器 USB2000+XR1-ES の外観



写真2 シャボン玉膜の干渉スペクトルを測定するための測定系



写真3 シャボン玉の膜を作るために用意したビニール被覆針金製の棒

スファイバーを通して分光器に入射して分光されるシステムになっている。コリメータレンズホルダーの柱の間隔は6cmに固定して、その間に写真3に示すようなビニール被覆の針金で作った楕円の枠をクランプで挟んで設置した。測定に使ったシャボン玉膜は、この枠をナリカのシャボン玉液<sup>6)</sup>に浸して作った。また、光源から出る光の波長分布の偏りを小さくするために、コリメータレンズの出射側と入射側に青色のビニールフィルムを貼り付けてフィルターの代わりとした。実際の測定は、室温22℃の実験室内で、パソコンソフトのOPwave+<sup>7)</sup>を用い、光源が安定している450nmから950nmの波長範囲で、積算時間3ms、スムージング3に設定して、ストップウォッチで時間を計りながら行った。この設定では、1回の干渉スペクトルの測定にかかる時間は、積算時間の設定値から、0.003秒になる。

図1と図2の下段に、測定により得られた干渉スペクトルを示す。どちらも縦軸が透過率(%)、横軸が波長(nm)である。図1と図2は、それぞれ、シャボン玉膜ができてから10秒後と38秒後の干渉スペクトルに対応しているが、干渉フリンジのうねりの間隔が後者のスペクトルの方が大きく広がっていることから、膜が時間と共に急激に薄くなっていることがわかる。シャボン玉膜は、図2のスペクトルの測定後に割れたので、今回はこの2つの干渉スペクトルに対して解析を行った。

### 干渉次数の帰属と膜厚の決定

シャボン玉膜に対する測定結果を表2にまとめて示す。この表の2列目に図1と図2の干渉フリンジの極小値と極大値から読み取った波長をリストし、1列目に、それらの波長に対して帰属した干渉次数を示す。ここで、フリンジの極小値の波長に対しては半整数の干渉次数を割り当てている。表2の3列目と4列目には、それぞれ、(5)式と(3)式から決定した $nl$ の値を示す。干渉次数を用いて決定した4列目の値の方が、3列目のものより数値のふらつきが小さくなっており、精度が上がっていることがわかる。4列目の数値の平均をとることにより、シャボン玉の膜ができてから10秒後と38秒後の $nl$ の値として、それぞれ、 $2.936(10)\mu\text{m}$ と $1.227(8)\mu\text{m}$ を決定した。これらの値から、

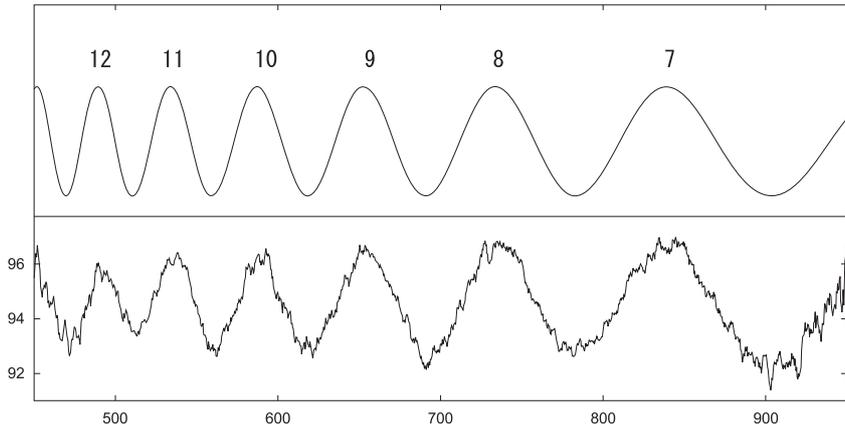


図1 シャボン玉膜ができてから10秒後の干渉スペクトル（下側）とそのシミュレーションスペクトル（上側）。図の横軸は波長（nm）、縦軸は透過率（%）。シミュレーションスペクトルの上を示した整数は帰属した干渉次数。

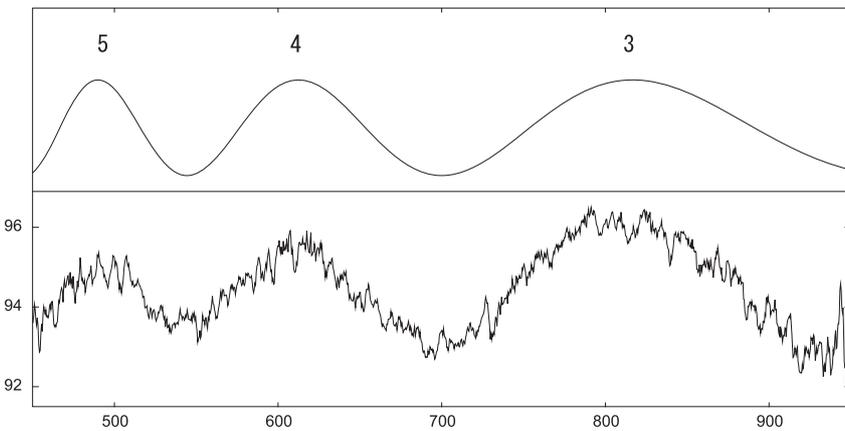


図2 シャボン玉膜ができてから38秒後の干渉スペクトル（下側）とそのシミュレーションスペクトル（上側）。図の横軸は波長（nm）、縦軸は透過率（%）。シミュレーションスペクトルの上を示した整数は帰属した干渉次数。

表2 測定した干渉スペクトルに対する干渉次数の帰属と膜厚の決定

干渉次数 $m$	波長 (nm)	$nl^a$ ( $\mu\text{m}$ )	$nl^b$ ( $\mu\text{m}$ )
10 秒後の干渉スペクトル (図 1) から			
13	450	2.636	2.925
12	492	3.061	2.952
11	535	3.130	2.943
10	585	2.925	2.925
9	650	2.901	2.925
8	732	2.967	2.928
7	835		2.923
12.5	472	3.021	2.950
11.5	512	2.987	2.944
10.5	560	2.983	2.940
9.5	618	2.961	2.936
8.5	690	2.851	2.933
7.5	785	2.960	2.944
6.5	905		2.941
		平均	2.936(10) <sup>c</sup>
38 秒後の干渉スペクトル (図 2) から			
5	495	1.268	1.238
4	615	1.244	1.230
3	817		1.226
4.5	545	1.263	1.226
3.5	695		1.216
		平均	1.227(8) <sup>c</sup>

<sup>a</sup>(5)式から計算

<sup>b</sup>(3)式から計算

<sup>c</sup>括弧内の数値は標準誤差

シャボン玉膜の屈折率を  $n = 1.34$  と仮定<sup>1)</sup>することにより、10 秒後と 38 秒後の膜厚として、それぞれ、 $l = 2.191(7) \mu\text{m}$  および  $0.916(6) \mu\text{m}$  を決定した。ここで、括弧内の数値は標準誤差を示す。

干渉スペクトルが透過率で表示されている場合、そのシミュレーションスペクトルは (6) 式の位相を  $\pi$  だけずらした式をもとに描くことができる。図 1 と 2 の上段にはシミュレーションにより得られた干渉スペクトルと干渉次数を実測スペクトルと対比して示す。両者を比較すると、シミュレーションスペクトルの位相が実測スペクトルと良く一致していることがわかり、今回の測定と解析が妥当なものであることがわかる。

### フーリエ変換法による膜厚決定

干渉スペクトルのフリンジのピークの位置がノイズなどの影響で読み取り難くなったときのために、干渉スペクトルのフーリエ変換から直接膜厚を決定する方法について考える。ここでは、議論を簡単にするために、屈折率  $n = 1$  として話を進めて行く。

波数軸で表現した干渉スペクトル  $x(k)$  と膜厚関数  $X(l)$  は次式のようにフーリエ変換の関係にある。

$$X(l) = \int_{-\infty}^{\infty} x(k) e^{-4\pi i l k} dk \quad (11)$$

ここで、変数  $k$  および  $l$  は、それぞれ、波数および膜厚である。一般に、フーリエ変換したものをパワースペクトルと呼ぶことがあるので、(11) 式のようにして得られた膜厚関数  $X(l)$  のことを膜厚スペクトルと呼ぶことにする。

実際の測定では、特定の波数  $k_i$  における吸光度  $x(k_i)$  (あるいは透過率  $x(k_i)$ ) を測定信号として、波数間隔  $\Delta k_i$  ごとに  $N$  個サンプリングしたものを干渉スペクトルのデータとするから、(11) 式の代わりに次式に示す離散フーリエ変換 (DFT: discrete Fourier transform) の式を用いることになる。

$$X(l) = \sum_{i=1}^N x(k_i) e^{-4\pi i l k_i} \Delta k_i \quad (12)$$

を使うことになる。ここで、 $k_i$  は  $i$  の順に大きくなるものとし、サンプリング

間隔  $\Delta k_i$  は次式で定義されるものとする。

$$\Delta k_i = k_{i+1} - k_i \quad \text{ただし} \quad \Delta k_N = \Delta k_{N-1} \quad (13)$$

通常はサンプリング間隔が一定となるように測定条件を設定するが、任意の間隔で測定することもあるので、いずれの場合にも対応できるように、(13)式を定義した。

今回の測定で使用した CCD アレイ式の分光器は、干渉スペクトルが波長軸で出力され、サンプリング間隔も波長によって微妙に変動している。波長  $\lambda_i$  での干渉スペクトルのデータを  $x(\lambda_i)$  とすると、膜厚関数  $X(l)$  は(2)(12)(13)式から、次式で表現される。

$$X(l) = \sum_{i=1}^N x(\lambda_i) e^{-\frac{4\pi i l}{\lambda_i}} \frac{\Delta \lambda_i}{\lambda_i^2} \quad (14)$$

ここで、 $\lambda_i$  は  $i$  の順に大きくなるものとし、サンプリング間隔  $\Delta \lambda_i$  は次式で定義されるものとする。

$$\Delta \lambda_i = \lambda_{i+1} - \lambda_i \quad \text{ただし} \quad \Delta \lambda_N = \Delta \lambda_{N-1} \quad (15)$$

今回測定したデータを、(14)式を用いてフーリエ変換したところ、図1および図2の干渉スペクトルから、それぞれ、図3および図4に示す膜厚スペクトルを得た。ただし、これらの図は、横軸に  $nl$  (屈折率×膜厚) を採り、縦軸に膜厚関数  $X(l)$  の絶対値  $|X(l)|$  を採ってプロットしたものである。図3のピークの値を読み取ると、 $nl = 2.958 \mu\text{m}$  となり、表2の値  $nl = 2.936(10) \mu\text{m}$  よりも  $0.022 \mu\text{m}$  だけ大きな値となった。これに対して、図4のピークからの値は  $nl = 1.285 \mu\text{m}$  となり、表2からの値  $nl = 1.227(8) \mu\text{m}$  に比べて  $0.058 \mu\text{m}$  も大きな値となった。図5と図6の上段には離散フーリエ変換の結果を基にしたシミュレーションスペクトル示し、中段と下段には、それぞれ実測の干渉スペクトルと表2の値を基にしたシミュレーションスペクトルを示す。これらのスペクトルを比較すると、特に図6において、離散フーリエ変換の結果を基にしたシミュレーションスペクトルが実測スペクトルを再現できていないことがわかる。この食い違いは、離散フーリエ変換による膜厚決定法の限界を示していると思われるが、詳細については検討中である。

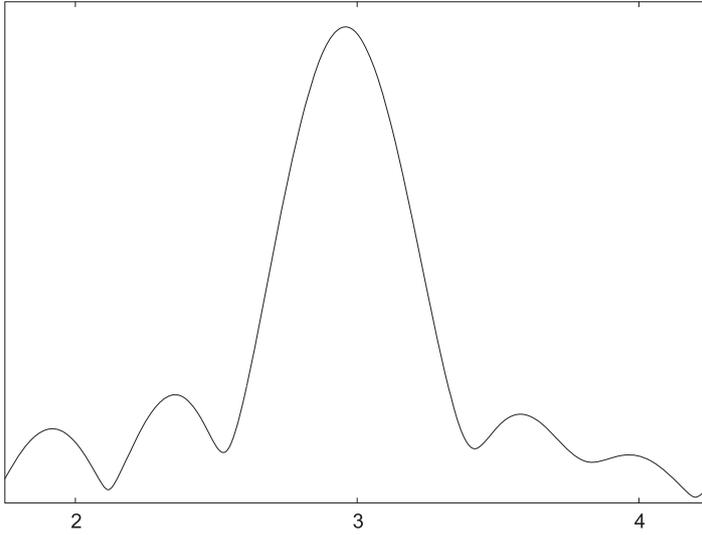


図3 離散フーリエ変換により得られた膜厚 ( $nl$ ) のスペクトル。横軸の単位は  $\mu\text{m}$ 。中央のピークの値は  $nl = 2.958\mu\text{m}$ 。

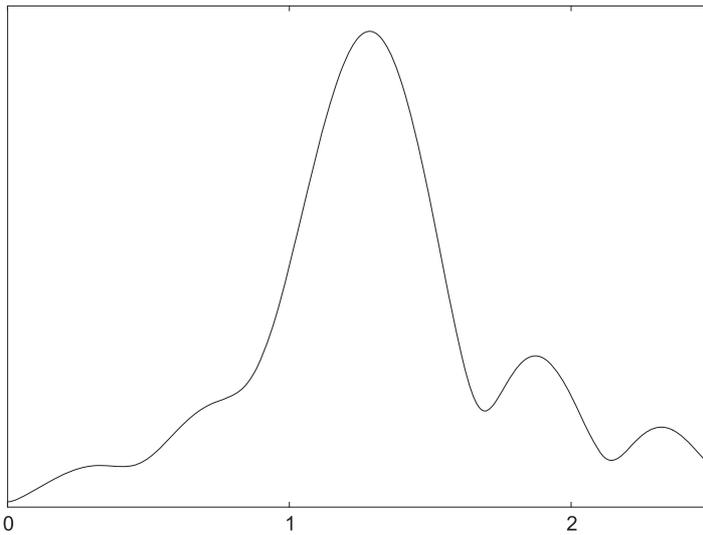


図4 離散フーリエ変換により得られた膜厚 ( $nl$ ) のスペクトル。横軸の単位は  $\mu\text{m}$ 。中央のピークの値は  $nl = 1.285\mu\text{m}$ 。

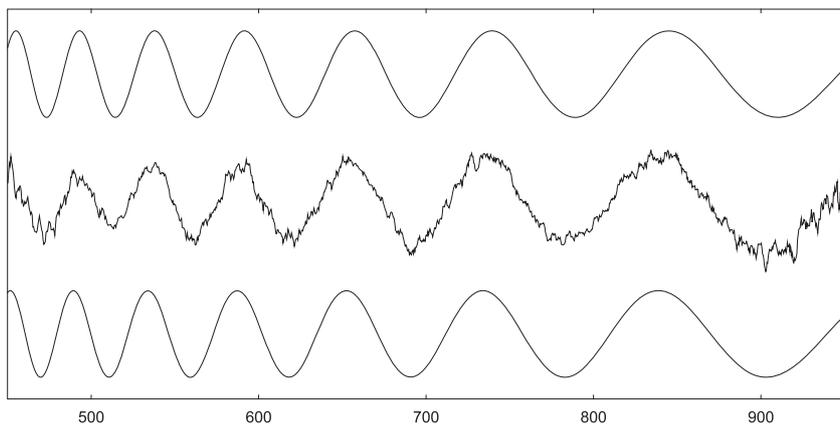


図5 シャボン玉膜ができてから10秒後の実測スペクトル（中央）と2つのシミュレーションスペクトル。横軸は波長で単位はnm。

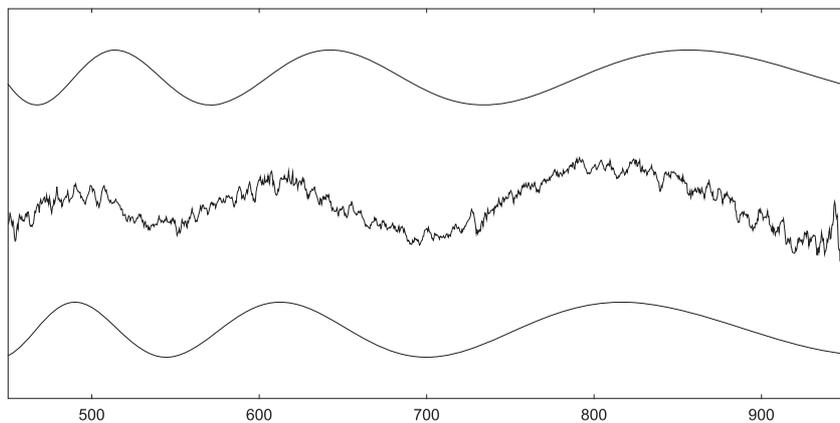


図6 シャボン玉膜ができてから38秒後の実測スペクトル（中央）と2つのシミュレーションスペクトル。横軸は波長で単位はnm。

## おわりに

今回、ナリカのシャボン玉液<sup>6)</sup>を用いて実験を行い、シャボン玉ができてから10秒後と38秒後の膜厚として、 $l=2.191(7)\mu\text{m}$ および $0.916(6)\mu\text{m}$ を決定した。この結果をもとに(7)式に示す膜厚の時間変動を仮定して、 $t=0$ のときの膜厚と時定数を決定すると、 $l_0=3.0\mu\text{m}$ と $\tau=32\text{s}$ になった。この値は、文献1の値に比べて膜厚の初期値は一致しているが、時定数は10分の1以下の値になった。このことは、文献1の測定が $8^\circ\text{C}$ で行われたのに対し、今回は $22^\circ\text{C}$ で測定したことが影響していると思われる。それゆえ、シャボン玉を研究対象にする場合は温度管理が大切であることがわかる。また、今回の時定数を(10)式に代入して計算した許容測定時間は、図1と図2のスペクトルに対して、それぞれ、0.15秒と0.35秒となり、今回の測定でCCDアレイ式の分光器を採用したことが妥当であったことがわかる。

一方、CCDアレイ検出器の弱点のノイズが今回の実験で問題となった。図1や図2の干渉スペクトルは、シャボン玉膜が均一になった、比較的條件の良いときのスペクトルであるが、フリッジのピークの位置がノイズのために読み取り難いスペクトルもしばしば観測された。こうしたときの対策として、今回、干渉フリッジの測定データをそのまま離散フーリエ変換して得られるパワースペクトルから膜厚を決定する方法を試みたが、この方法で決定した膜厚は、実験誤差を大きく超えていた。この食い違いの理由は、「フーリエ変換は膜厚スペクトルを決定する方法ではなく、膜厚スペクトルを推定する方法である」という言葉で片付けられるかも知れないが、推定したスペクトルには一定の傾向が現れていることもわかった。具体的には、離散フーリエ変換の推定値は実際よりも大きく現れ、フーリエ変換の対象となるフリッジの数が少ない程この傾向が強くなり、しかも、(6)式のモデル関数を実験データに見立てて離散フーリエ変換しても同じ傾向が現れた。このことは、離散フーリエ変換による膜厚の推定値を補正することにより推定の精度が上がる可能性を示している。これに関する詳細な議論については、稿を改めて報告する予定である。

本研究は、シャボン玉の科学の教材化<sup>8)</sup>の一環として行っているものである。今回、CCDアレイ検出器を搭載した分光器を用いて紫外・可視領域の高速分

光システムを構築することにより、シャボン玉膜に対してテキスト教材になるような干渉スペクトルを観測することができた。得られたスペクトルは干渉次数が正確に定まるので、シミュレーションによってスペクトルを再現することや、高精度に膜厚を決定することが可能になった。

干渉測定は、自然科学の中の最も基本的な測定の一つであるが、学校教育では高校物理で学ぶことになっている。本研究で開発した実験法は、シャボン玉という身近な材料を用いて、干渉次数の定まる実験や、シミュレーションで追試できる実験を可能とするので、教育の現場に最適な実験教材として提供できる。また、干渉スペクトルの解析から膜厚決定までは高度な計算を必要とせず加減乗除の演算だけで行えるので、今回の実験法は小・中学校における発展学習や自由研究のテーマとしても利用されることが期待できる。

## 謝辞

本稿は日本学術振興会科学研究費助成事業、基盤研究C（課題番号23501037）の助成を受けて執筆したものである。

## 参考文献および注

- 1) 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 第5巻2号 pp.13-33 (2010).
- 2) A. Chattopadhyay, "Time-Dependent changes in a shampoo bubble," J. Chem. Educ., 77, 1339-1342 (2000).
- 3) 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, 6399-6403 (2001).
- 4) NHK-BS hi の番組「アインシュタインの眼 シャボン玉～美しさに秘められた謎」 2008年7月29日(火) 19:00~19:45放送
- 5) Y. D. Afanasyev, G. T. Andrews, and C. G. Deacon, "Measuring soap bubble thickness with color matching," Am. J. Phys. 79, 1079-1082 (2011).
- 6) シャボン玉液は株式会社ナリカ製：カタログ No. S77-1405
- 7) オーシャンフォトンクス株式会社製の測定用ソフト OPwave+
- 8) 松村敬治「シャボン玉の科学の教材化 (1) —加法混色・減法混色と色の見え方について—」 西南学院大学人間科学論集 第7巻2号 pp.147-165 (2012).