

<研究ノート>

# 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 —

松 村 敬 治

How to Develop a Computer Program to Analyze the Interference Spectrum  
as a Demonstration Teaching Material: A Method to Measure Thickness of  
Soap and Soap-Bubble Films Using Excel VBA Program

Keiji Matsumura

干渉スペクトルの測定からシャボン玉やセッケン膜などの膜厚が精度良く決定できる事についてはすでに報告しているが、本稿は、そのときに用いた解析ソフトの作成法を初心者向けに詳しく紹介することを目的とする。本稿で用いたプログラム言語は、多くのパソコンで使用可能な Excel VBA を用いた。この言語を用いると、VBA のプログラムをエクセルの中に組み込むことで、エクセルのいろいろな機能を引き出して作動させることができるので、150kB 程度のコンパクトなプログラムに仕上げることができる。シャボン玉やセッケン膜などの膜厚を決定する方法としては、干渉スペクトルの測定値の曲線に計算値の曲線をグラフィカルにフィットさせる方法を採用したが、この方法は、グラフの動きが面白いので演示実験に適しているだけでなく、精度の高い方法でもある。最近、廉価版の分光器も市販されるようになったので、本稿が、シャボン玉の干渉実験の普及のための一助となることを期待する。

## はじめに

干渉スペクトルを用いたシャボン玉とセッケン膜の膜厚の測定結果については、すでに報告している[1-5]。本稿は、そのときの解析に用いた Excel VBA (エクセル 2013) の

プログラムの作り方について解説することを目的としている。

シャボン玉やセッケン膜の干渉スペクトルの測定では、膜厚の変化に素早く対応できる高速で動作するマルチチャンネル型の分光器の使用が適している[1]。そこでの測定データはテキストファイルで与えられることが多いが、データの格納形式は分光器のオペレーティングソフトによって微妙に異なる。しかし、いずれの場合も、各ピクセルにおける波長と透過率のデータがファイル内に保存されるので、この情報をもとにスペクトルを再現して解析することができる。

本稿では、できるだけたくさんの人に利用してもらえるように、干渉スペクトルの解析プログラムの作成手順を過剰なくらい詳しく解説しようと思う。ただし、ここでは分光測定データが存在することを前提として書いているので、測定データが無い場合は、疑似データを使って解析の練習をする程度のことしかできないことを留意する。

プログラム言語として Excel VBA を選ぶ利点は 2 つある。1 つ目は、この言語がエクセルに付属するプログラム言語であり、殆ど全てのパソコンで使用が可能なことである。2 つ目はエクセルの機能を活用することにより、スペクトルの作図や解析や印刷を小さなサイズのプログラムで実行できることが挙げられる。これらの利点は、良い解析プログラムを作れば、シャボン玉などの干渉実験の普及につながるので重要である。

本稿は、最初にセッケン膜やシャボン玉の干渉スペクトルの解析のための理論的な背景について述べ、続いて、Excel VBA のプログラミングの練習を兼ねて、実験データファイルの読み込みのためのソフト作成法について解説する。その後、シミュレーションにより干渉スペクトルを再現して膜厚を決定する方法について解説し、最後に解析ソフトを完成させる。

## 1 薄膜の干渉スペクトルの解析のための理論的な背景

この章では、最初に、シャボン玉やセッケン膜などの薄膜に起きる光の干渉の基礎的な理論[4]について簡単に述べる。その後、干渉スペクトルの測定から決定できるパラメータについて解説することで、解析ソフト作成のための準備を行う。

### A 薄膜を透過する光の干渉の解析

厚さ  $d$ 、屈折率  $n$  の薄膜に垂直に入射して透過した波長  $\lambda$  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、次式の干渉の条件式を用いて議論することになる。

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

ここで、 $m$  は光路差の中に生成する光の波の数（実数）で、広義の干渉次数（以後、干渉次数）と呼ぶことにする。（1）式において、 $m$  の値が変化するにつれて、干渉は明るくなったり、暗くなったりを繰り返す。高校物理の教科書[6]にも記載されている通り、 $m$  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。膜厚が一定の条件で薄膜の分光測定を行うとき、この明線と暗線の繰り返しがうねりとなるが、このうねりを干渉スペクトルのフリンジ（fringe）と呼ぶことにする。

薄膜に透過する光の干渉スペクトルの測定は、波長  $\lambda$  の光に対する透過率  $T$  を測定することになるが、理論的には、次式で表現できる[4]。

$$T = a \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\right) + b \quad (2)$$

ここで、 $a$  と  $b$  は、それぞれ、フリンジの振幅と平均の透過率で、理論的には屈折率を用いて数式で表現することができる[4]。また、測定領域で光の吸収が無ければ、 $a + b = 1$  となる。（2）式を用いてシミュレーションを行うときは、 $a$  と  $b$  の値を適当に選んで、 $nd$  をパラメータとして実測スペクトルにフィットさせることになる。

シミュレーションの精度を上げるためには、次式に示す屈折率の波長依存性を考慮する必要がある[4]。

$$n = n_0 \left(1 + \frac{A}{\lambda^2}\right) \quad (3)$$

ここで、 $n_0$  と  $A$  は物質固有の定数である。（3）式は、最小二乗法などのフィッティングに適するようにコーシーの分散公式を変形したものである[2,4]。シミュレーションは、（3）式を（2）式に代入して、 $n_0$  は文献値を用いて行う。具体的には、最初に、 $a$  と  $b$  の値を適当に選んで、 $n_0d$  をパラメータとして実測スペクトルに仮にフィットさせて、続いて、 $A$  を動かして、 $a$  と  $b$  と  $n_0d$  を微調整して実測スペクトルにフィットさせると良い。

一方、干渉スペクトルのフリンジの振幅は、短波長側で小さくなる傾向がある。これは、膜厚の不均一度  $\Delta d$  や分光器の分解能  $\Delta \lambda$  が原因となって起きる。フリンジの振幅  $a$  の波

長依存性は次式で与えられる[4]。

$$a = a_0 \left( 1 - \frac{8\pi^2 n^2}{\lambda^2} \Delta d^2 - \frac{8\pi^2 n^2 d^2}{\lambda^4} \Delta \lambda^2 \right) \quad (4)$$

ここで、 $a_0$  は膜厚の不均一度や分光器の分解能の影響が無視できるときのフリンジの振幅である。シミュレーションは、(3)式と(4)式を(2)式に代入して、 $n_0$  は文献値を用い、 $\Delta \lambda$  は分光器の仕様書にある分解能の値を参考にして設定する。具体的には、最初に、 $a_0$  と  $b$  と  $A$  の値を適当に選んで、 $n_0 d$  をパラメータとして実測スペクトルに仮にフィットさせて、続いて、 $\Delta d$  と  $\Delta \lambda$  を動かして、 $a_0$  と  $b$  と  $n_0 d$  を微調整して実測スペクトルにフィットさせることになる。

以上、セッケン膜などの薄膜に1回透過する光の干渉スペクトルの解析について述べた。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回透過した光を分光して得られるのでフリンジの強度は約2倍になるが、その解析は1枚の薄膜の場合と同じ式で扱うことができる[4]。

## B 薄膜から反射する光の干渉の解析

波長  $\lambda$  の光が、厚さ  $d$ 、屈折率  $n$  の薄膜に垂直に入射して、反射したときに示す干渉は、膜の表面で反射する1つ目の光と、膜の内側で1回反射した後に出てくる2つ目の光が重なるときの干渉なので、光路差は  $2nd$  となり、(1)式の干渉の条件式を用いて議論することになる。ただし、1つ目の光の反射は固定端での(屈折率の大きな表面での)反射になるので、光の位相が  $\pi$  だけずれる。それゆえ、高校物理の教科書[6]にも記載されている通り、光の干渉は  $m$  が自然数になるとき暗線となり、半整数のとき明線となる。膜厚が一定の条件で薄膜の分光測定を行うとき、この暗線と明線の繰り返しがうねりとなり、干渉スペクトルのフリンジとなる。

薄膜の干渉スペクトルの測定は、波長  $\lambda$  の光に対する反射率  $R$  を測定することになるが、理論的には、次式で表現できる[4]。

$$R = -\alpha \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\right) + \beta \quad (5)$$

ここで、 $\alpha$  と  $\beta$  は、それぞれ、反射光のフリンジの振幅と平均の反射率で、理論的には屈折率を用いて数式で表現することができる[4]。また、測定領域で光の吸収や蛍光の影響が無ければ、 $\beta - \alpha \neq 0$  となる。(5)式を用いてシミュレーションを行うときは、 $\alpha$  と  $\beta$  の

値を適当に選んで、 $nd$  をパラメータとして実測スペクトルにフィットさせることになる。

シミュレーションの精度を上げるためには、(3)式に示す屈折率の波長依存性を考慮する必要がある。そこでのシミュレーションは、(3)式を(5)式に代入して、 $n_0$  は文献値を用いて行う。具体的には、最初に、 $\alpha$  と  $\beta$  の値を適当に選んで、 $n_0d$  をパラメータとして実測スペクトルに仮にフィットさせて、続いて、 $A$  を動かして、 $\alpha$  と  $\beta$  と  $n_0d$  を微調整して実測スペクトルにフィットさせることになる。

反射光の干渉の場合も、干渉スペクトルのフリッジの振幅は、短波長側で小さくなる傾向がある。これは、膜厚の不均一度  $\Delta d$  や分光器の分解能  $\Delta\lambda$  が原因となって起きる。フリッジの振幅  $\alpha$  の波長依存性は次式で与えられる[4]。

$$\alpha = \alpha_0 \left( 1 - \frac{8\pi^2 n^2}{\lambda^2} \Delta d^2 - \frac{8\pi^2 n^2 d^2}{\lambda^4} \Delta \lambda^2 \right) \quad (6)$$

ここで、 $\alpha_0$  は膜厚の不均一度や分光器の分解能の影響が無視できるときのフリッジの振幅である。シミュレーションは、(3)式と(6)式を(5)式に代入して、 $n_0$  は文献値を用い、 $\Delta\lambda$  は分光器の仕様書にある分解能の値を参考にして設定する。具体的には、最初に、 $\alpha_0$  と  $\beta$  と  $A$  の値を適当に選んで、 $n_0d$  をパラメータとして実測スペクトルに仮にフィットさせて、続いて、 $\Delta d$  や  $\Delta\lambda$  を動かして、 $\alpha_0$  と  $\beta$  と  $n_0d$  を微調整して実測スペクトルにフィットさせることになる。

### C 干渉スペクトルの干渉次数の帰属の仕方と膜厚の近似的な決定法

次に、文献5に従って、膜厚の見積もり方と干渉スペクトルの干渉次数の帰属の仕方について解説する。

最初に、膜の厚さ  $d$  の薄膜の透過光の干渉実験により、図1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。ここで、縦軸は透過率で、横軸に示した光の波長領域は、短波長側の  $\lambda_s$  から始まり長波長側の  $\lambda_L$  で終わるとする。即ち、 $\lambda_s < \lambda_L$  が成立するとする。また、 $\lambda_s$  と  $\lambda_L$  における干渉次数を、それぞれ、 $m_s$  と  $m_L$  とする。ここでは、屈折率  $n$  の波長依存性は無視できるものとする。図1は膜厚  $d$  が変動しない条件で測定したチャートなので、この条件を(1)式に代入して整理すると次式が成立する。

$$m_s \lambda_s = m_L \lambda_L = 2nd \quad (7)$$

図1のような干渉スペクトルの画面に現れるフリッジの数  $N_f$  を、次式で定義する。

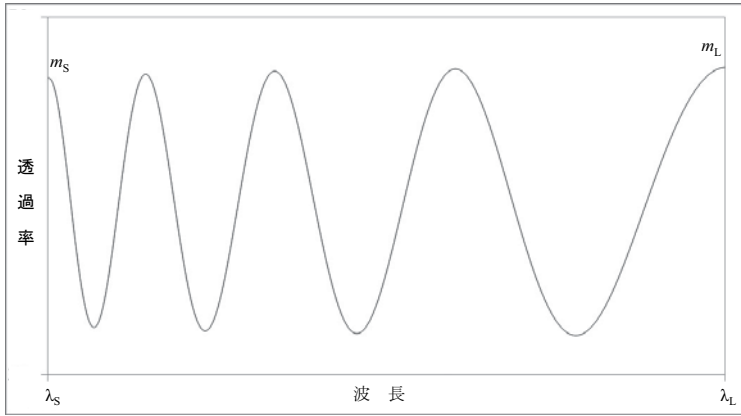


図1 干渉スペクトルを説明するための概念図

$$N_f = m_s - m_L \quad (8)$$

膜厚  $d$  は、(7)式と(8)式から  $m_s$  および  $m_L$  を消去することにより、次式で得られる。

$$nd = \frac{\lambda_L \lambda_s}{2(\lambda_L - \lambda_s)} N_f \quad (9)$$

(9)式は、膜の厚さが干渉スペクトルのフリンジの数  $N_f$  に比例することを示す。

次に、干渉スペクトルの帰属の方法について解説する。光の波長  $\lambda_p$  における干渉次数  $m_p$  は、(9)式で求めた  $nd$  を用いて(1)式から次のように見積もることができる。

$$m_p = \frac{2nd}{\lambda_p} \quad (10)$$

干渉次数  $m_p$  は、光路差の中に入る波長  $\lambda_p$  の光の波の数と解釈できる。計算の過程で、 $m_p$  の値が近似値になっても、 $\lambda_p$  の近傍のフリンジの極大値に対応する干渉次数が自然数になるので、(10)式から干渉スペクトルの帰属を正確に行うことができる。

干渉スペクトルの表示画面の範囲が次式を満たす場合、スペクトルの解釈が簡単になる。

$$\lambda_L = 2\lambda_s \quad (11)$$

この場合、(11)式を(7)式や(8)式に代入すると次式を得る。

$$m_L = N_i, \quad m_S = 2N_i \quad (12)$$

図1の干渉スペクトルの概念図にはフリンジが4個あるので、 $N_i=4$ になる。もし、図1の画面が(11)式を満たしている場合、 $m_L=4$ 、 $m_S=8$ となり、干渉次数が簡単に決まる。

演示実験でシャボン玉やセッケン膜の干渉スペクトルを実演するときは、測定波長領域を450nm～900nmに設定すると測定と解説の両方が容易になる[3,5]。

測定領域を広く取れない場合は、500nm～800nmの設定がお勧めである。この場合、(9)式から膜厚 $d$  ( $\mu\text{m}$ )が $0.5N_i$ となり、波長が666.7nmの位置の干渉次数が $2N_i$ となるので、演示実験の解説が簡単になる。

次の章からは、以上述べたことを盛り込んで解析ソフトを作成する。

## 2 データファイルを読み込むプログラム (ChkFile) の作成

この章では、分光データファイルをエクセル上に読み込むプログラム (ChkFile) の作成方法について解説する。勿論、分光データファイルの内部を参照したければ、このプログラムを作成しなくても、エクセルを立ち上げて、[ファイル]タブの[開く]をクリックして、[ファイルを開く]ダイアログボックスを開いて、[すべてのファイル(\*.\*)]の中から目的ファイルを開いて参照することもできる。また、このプログラムは、後の章で述べる解析プログラムと共通する部分もあるので、大半の読者は読み飛ばしてもらっても差し支えない。しかし、このプログラムを作成することは、Excel VBAの使い方に慣れることと、データファイルの構造を確認することにつながるので、プログラム作成の第一段階としての意味がある。

表1に分光データファイルをエクセル上に読み込むVBAのプログラム(マクロ)を示す。このプログラムを実行可能な段階にするためにはいくつかの手続きを必要とする。通常のエクセルの操作は画面上部にあるリボンに表示されているコマンドだけを使って行うことができるが、Excel VBAを使うためには、最初に一度だけ、[開発]タブをリボンに表示させるための手続きを行う必要がある。リボンに[開発]タブを表示させる方法は、エクセルを立ち上げて、リボンにある[ファイル]タブをクリックして、メニューの中の[オプション]をクリックして「Excelのオプション」のウィンドウを開き、[リボンのユーザー設定]をクリックして、「メインタブ」のリストにある[開発]にチェックを入れて、[OK]

表 1 Sub プロシージャ「ChkFile」のステートメント

行番号	ステートメント
1	Sub ChkFile()
2	
3	Dim dum(2248) As String, buf As String, tmp As Variant
4	Dim pname As String, tspath As String, comm As String
5	Dim dum1 As String, i As Integer, n1 As Integer
6	
7	tspath = ThisWorkbook.Path 'このブックの属するフォルダへの絶対パス
8	pname = tspath + "¥*.*)"
9	dum1 = Dir(pname) 'p.351 ファイル名のリストづくり
10	
11	Do While dum1 <> ""
12	comm = comm + dum1 + ", "
13	dum1 = Dir()
14	Loop
15	
16	dum1 = InputBox("ファイル名のリスト(" + vbCr + comm + vbCr + "以上)", _
17	"リストの中からファイル名を入力してください", _
18	"この位置にファイル名を入力")
19	pname = tspath + "¥" + dum1
20	buf = Space(FileLen(pname)) 'p.359 変数 buf の大きさを"pname"の大きさにする
21	
22	Open pname For Binary As #1
23	Get #1, , buf
24	Close #1
25	
26	tmp = Split(buf, vbLf) 'p.360
27	
28	For i = 0 To UBound(tmp)
29	dum(i + 1) = tmp(i)
30	Next i
31	
32	n1 = i - 1
33	MsgBox "ファイル内のデータの行数:" + Str(n1)
34	Cells(2, "G") = "ファイル名:" + dum1
35	
36	For i = 1 To n1
37	Cells(i, "A") = dum(i)
38	Next i
39	
40	End Sub


ボタンをクリックすることで行う。

エクセルのリボンに[開発]が表示されたことを確認した後に、[ファイル] → [新規] → [空白のブック]をクリックして新しいブックを立ち上げて、VBAのエディターを開いて、表 1 のプログラムを記入する。具体的には、[開発]タブをクリックして、[Visual Basic]のアイコンをクリックするとVBエディター (Visual Basic Editor) が立ち上がる。VBエディターのメニューバーの[挿入] → [標準モジュール]を選択すると、Module 1のコードウィンドウが現れるので、このウィンドウに表 1 の内容を記入すれば良い。勿論、表 1 の



内容をワードやメモ帳などに入力したものを、コピー&ペーストで貼り付けても良い。

表1の内容を記入したら、VB エディターのツールバーの左端にある [Excel] ボタンをクリックしてエクセルのシートの画面に戻り、「名前を付けて保存する」でファイルを保存する。このとき、ファイルを格納するフォルダーには、分光データが入っているフォルダーを指定して、ファイル名をここでは「ChkFile」とし、ファイルの種類は「Excel マクロ有効ブック (\*.xlsm)」で保存する。この段階で ChkFile.xlsm が保存できたので、ファイルを一旦閉じて良い。しかし、再度ファイルを開くときは、セキュリティの警告が表示されるので、1 回だけ [コンテンツの有効化] ボタンをクリックしないと作業を続行することができない。

ChkFile.xlsm を実行する方法は 3 つある。1 つ目は、VB エディターを表示した状態で、エディターのツールバーの実行ボタン  をクリックして行う方法である。プログラムの実行が始まると、エクセルのシートの画面が現れて、表1の16行目で指定した入力用のダイアログボックスが現れる。このダイアログボックスの中にフォルダー内のファイルのリストが表示されるので、その中から目的のデータファイル名を拡張子付きで所定の場所に入力して [OK] ボタンをクリックすると、データファイルの行数がメッセージボックスに表示される。その数値を確認して [OK] ボタンをクリックすると、プログラムの実行が完了して、VB エディター画面に戻る。データファイルが正しく読み取られているかは、エクセルのシート画面に切り替えて確認すれば良い。この実行方法は、プログラムがデバッグ段階では都合が良いが、完成後は、エクセルのシート画面への切り替えが面倒になってくる。

2 つ目は、エクセルのシート画面から操作する方法である。リボンの [開発] タブをクリックして [マクロ] のアイコンをクリックすると「マクロ」のダイアログボックスが開くが、「ChkFile」が選ばれていることを確認して [実行(R)] をクリックするとプログラムの実行が始まる。その後の動作は、VB エディター上で実行したときと同じであるが、プログラムが終了したときもエクセルのシート画面なので実行結果を直接見ることができる。この方法は、エクセルのグラフ機能を併用するときや、プログラムを何度も使用するときは、リボンを [開発] タブに戻す操作が少し面倒になる。

3 つ目は、スタートボタンを使用する方法である。前準備として、エクセルのシート画面が出ている状態で、リボンの [開発] タブをクリックして [挿入] のアイコンをクリックす



れる。そこで、メッセージボックス内の[デバッグ]ボタンをクリックすると、デバッグモードに入り、問題の生じた箇所がハイライトされるので、その箇所を手掛かりに対策を行う。デバッグモードから抜け出す方法はいくつかあるが、その1つは、VB エディターのメニューバーのリセットボタン（青色の■）をクリックする方法がある。

ここで、プログラムの内容について簡単に解説する。表1において、7行から14行目までが、フォルダー内のファイル名のリストづくりのための手続きをする場所である。16行目で読み込むべきデータファイル名を指定して、そのファイルの読み込みは24行目で完了する。読み込んだデータのかたまりは、Split 関数を用いて一行ごとに文字列型のデータとして配列変数の **dum** に格納される。その後、33行目の MsgBox 関数を用いてデータの行数を表示し、G2セルにファイル名を表示する。ファイル内のすべてのデータは、36行目からのコマンドを用いて、ワークシートのA列のセルに出力される。尚、表1のプログラム文において、「'」（アポストロフィ）の後のコメント欄には、参考にした文献[7]のページ数を記した。また、16行と17行の行末の「\_」（半角スペース、アンダーバー）は、16行から18行までが継続行であることを示す。

ChkFile.xlsm で読み取った7種類のデータファイルを表2に示す。表の見方については、次の章で解説する。

### 3 ChkFile で見た各種分光データファイルの構造

この章では、干渉スペクトルの測定で得られるデータファイルがどのような構造をしているか、いくつかの測定例を挙げて、解説する。

表2-1から表2-7までの7つの表は、手許にある4種類のマルチチャンネル分光器を用いて測定した透過率の分光データファイルを ChkFile.xlsm で読み取った結果を示している。それぞれの表は、見た目はかなり違うが、少なくとも、分光器の波長と透過率の値がデータとして与えられていることがわかる。

表2-1と表2-2は、Ocean Optics 社の分光器 USB2000+XR1-ES を Ocean Optics 社のオペレーティングソフトの OceanView を用いて測定した干渉スペクトルの測定データである。OceanView は、前身の SpectraSuite に比べて、操作性が向上して、軽快に動作するようないくつかの工夫が為されている。また、パソコンに1回だけインストールしておけば、殆どすべての Ocean Optics 社の分光器を作動させることが可能なので便利であ

表 2-1 データファイルの中身 (OceanView ヘッダー付きデータ)

行番号	ChkFile.xlsx で見たデータファイルの中身
1	Data from Transmission_1.txt Node
2	Date : Fri Oct 28 16 : 03 : 14 JST 2016
3	User : keiji
4	Spectrometer : USB2+H09968
5	Trigger mode : 0
6	Integration Time (sec) : 8.125000E-2
7	Scans to average : 1
8	Electric dark correction enabled : true
9	Nonlinearity correction enabled : false
10	Boxcar width : 8
11	XAxis mode : Wavelengths
12	Number of Pixels in Spectrum : 2048
13	>>>>Begin Spectral Data<<<<<
14	187.01354.7
15	187.47533.48
16	187.93836.48
17	188.40142.13
18	188.863-41.62
:	:
:	:
593	448.30498.45
594	448.74397.54
595	449.18297.6
596	449.62196.69
597	450.0696.31
598	450.49996.28
599	450.93895.83
600	451.37696.05
601	451.81595.92
602	452.25495.48
603	452.69395.59
604	453.13195.31
605	453.5794.96
:	:
:	:
1180	697.92894.76
1181	698.33994.95
1182	698.74995.14
1183	699.1695.48
1184	699.5795.62
1185	699.98195.5
1186	700.39195.6
1187	700.80195.54
1188	701.21295.9
1189	701.62296.07
1190	702.03296.03
1191	702.44296.15
1192	702.85296.11
:	:
:	:
2056	1036.003-353.16
2057	1036.362879.1
2058	1036.722-89.87
2059	1037.081-49.63
2060	1037.44-598.7
2061	1037.799-610.27

ファイル名 : Transmission\_1.txt

表 2-2 データファイルの中身 (OceanView ヘッダーなしデータ)

行番号	ChkFile.xlsm で見たデータファイルの中身
1	187.013-91.74
2	187.475-56.78
3	187.938-85.41
4	188.401-109.22
5	188.863-4.79
6	189.326-80.4
7	189.788-77.56
8	190.251-36
9	190.713-154.73
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
578	447.42574.52
579	447.86574.55
580	448.30474.6
581	448.74374.59
582	449.18274.57
583	449.62174.56
584	450.0674.43
585	450.49974.4
586	450.93874.37
587	451.37674.22
588	451.81574.08
589	452.25473.97
590	452.69373.82
591	453.13173.63
592	453.5773.47
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
1165	697.10780.69
1166	697.51880.87
1167	697.92881.02
1168	698.33981.19
1169	698.74981.33
1170	699.1681.43
1171	699.5781.54
1172	699.98181.61
1173	700.39181.78
1174	700.80181.91
1175	701.21282
1176	701.62282.17
1177	702.03282.31
1178	702.44282.41
1179	702.85282.52
1180	703.26282.59
1181	703.67282.62
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
2040	1034.92479.33
2041	1035.28379.61
2042	1035.64379.8
2043	1036.00380.41
2044	1036.36280.57
2045	1036.72281.42
2046	1037.08181.25
2047	1037.4481.62
2048	1037.79982.39

ファイル名 : Transmission\_2.txt





表 2-5 データファイルの中身 (ezSpectra)

行番号	ChkFile.xlsx で見たデータファイルの中身
1	Wavelength,Intensity
2	311.95,
3	314.34,
4	316.72,
5	319.11,
:	:
:	:
73	476.03,
74	478.23,
75	480.43,
76	482.62,
77	484.81,81.0978650005232
78	486.99,81.463022636110423
79	489.17,83.5908870974173
80	491.35,82.609837273024112
81	493.52,82.849462753003849
82	495.69,82.379909427371473
83	497.86,82.412364534665755
84	500.02,81.894016637148567
85	502.17,79.815169823429784
86	504.33,78.785077452682941
87	506.47,76.412749791529592
88	508.62,77.860888742213973
89	510.76,76.695541088308346
90	512.89,76.417296414446767
91	515.02,77.402170901714356
92	517.15,76.67871368676748
93	519.27,77.278591946380672
94	521.39,78.356797430447031
95	523.51,78.969522094691953
96	525.62,79.708124137546449
97	527.72,80.4042256128192
:	:
:	:
236	773.77,73.916721952383
237	775.18,73.741540649498788
238	776.59,73.491699617401437
239	778.00,73.710015509281448
240	779.40,73.884076799444813
241	780.79,74.2828352140433
242	782.18,74.34534449197227
243	783.56,74.808650374781834
244	784.94,75.1774310471533
245	786.31,75.311190094833364
246	787.68,75.452980446297772
247	789.04,75.730781746386668
248	790.40,76.018754071356113
249	791.75,76.02626894400801
250	793.09,76.905746644709367
251	794.44,76.7083675068186
252	795.77,77.184667322321417
253	797.10,77.056885426547638
254	798.43,77.457806456931735
255	799.75,77.76859384317774
256	801.06,78.108142752477889
257	802.37,78.714715938424433

ファイル名: ezData5.csv



表 2-6 データファイルの中身 (VisualSpectra)

行番号	ChkFile.xlsm で見たデータファイルの中身		
1	ALS Spectrometer Data File		
2	--- Measurement Setting ---		
3	Type :	Transmittance Spectrum	ファイル名 : AlsData6.trans
4	Date :	Wed Nov 02 11 : 44 : 15 2016	
5	User :	(Reserved by ALS)	
6	Serial :	(Reserved by ALS)	
7	Channel :	No. 11	
8	Integration Time :	1	
9	Average :	5	
10	Boxcar :	5	
11	Electrical Dark :	No-corrected	
12	Time Normalize :	(Reserved by ALS)	
13	Dual-beam :	(Reserved by ALS)	
14	Reference Ch :	(Reserved by ALS)	
15	--- Measurement Data ---		
16	Pixel	Wavelength	Intensity
17	0	161.7	7.92899
18	1	162.182	8.85572
19	2	162.663	13.3061
20	3	163.145	15.5556
21	4	163.626	15.5932
:	:	:	:
:	:	:	:
1245	1228	695.434	79.7425
1246	1229	695.807	79.8859
1247	1230	696.179	80.0245
1248	1231	696.551	80.1615
1249	1232	696.922	80.3292
1250	1233	697.294	80.5299
1251	1234	697.666	80.7079
1252	1235	698.037	80.8488
1253	1236	698.408	80.9808
1254	1237	698.779	81.0926
1255	1238	699.15	81.1516
1256	1239	699.521	81.2575
1257	1240	699.892	81.3857
1258	1241	700.263	81.4707
1259	1242	700.633	81.5565
1260	1243	701.004	81.6127
1261	1244	701.374	81.6321
1262	1245	701.744	81.6422
1263	1246	702.114	81.6612
1264	1247	702.484	81.6684
1265	1248	702.853	81.6795
1266	1249	703.223	81.7135
1267	1250	703.593	81.7452
1268	1251	703.962	81.7973
1269	1252	704.331	81.9077
1270	1253	704.7	82.0932
:	:	:	:
:	:	:	:
2060	2043	951.13	-100
2061	2044	951.378	-100
2062	2045	951.626	-100
2063	2046	951.874	-100
2064	2047	952.122	-47.6712



る。OceanView による測定では、測定情報を記したヘッダー付きのデータとヘッダー無しのデータの 2 種類が選択できる。ファイルの拡張子はいずれも txt である。

表 2-1 はヘッダー付きのデータで、1 行から 13 行目までがヘッダーになっている。この中で 2 行目には測定時間に関する情報が書かれている。13 行目は、14 行目からの分光データの始まりを予告している。14 行から 2061 行までの 2048 個の行は、分光器の 2048 個のピクセルのデータに対応している。各ピクセルのデータは、波長の値と透過率の値がタブ (tab) で区切られて記入されているが、ChkFile.xlsx の読み取り結果の表示では区切りが見えていない。この 2 つのデータを分離して表示するためには、後に示すような VBA のプログラムを用いる他に、このデータファイルを表示したエクセルの画面で、A 列を選び、リボンの[データ]タブをクリックして、[区切り位置]のアイコンをクリックして「区切り位置指定ウィザード」を起動させて分離させる方法がある。そのウィザードでは、「カンマやタブなどの区切り文字によってフィールドごとに区切られたデータ」を選択し、「タブ」にチェックを入れて、ウィザード内の「データのプレビュー」の画面に目的の区切り線が表示されることを確認して[完了]ボタンをクリックすれば波長と透過率の値を分離して見ることができる。OceanView は、分光器の全ピクセルのデータを一括してファイルに転送するため、表 2-1 の短波長と長波長側の透過率に光源の光量不足によるデータの異常が見える。実際の解析ではこうしたデータは削除するか、あるいは無視して行うことになる。

表 2-2 は、OceanView のヘッダー無しのデータで、1 行目からいきなり測定データの行がはじまっている。このファイルの行数は、分光器のピクセル数に対応して、2048 行となっている。各行は、波長と透過率の値がタブで区切られて記入されている。

表 2-3 と表 2-4 は、Ocean Optics 社の分光器 USB2000+XR1-ES をオーシャンフォトリクス社のオペレーティングソフトの OPwave+ を用いて測定した干渉スペクトルの測定データである。OPwave+ は分光器のシリアル番号を指定して販売されるので、分光器を追加購入するごとにソフトを購入してインストールする必要がある。OPwave+ には、個別計測と連続計測の 2 種類の測定モードがあり、ファイルの拡張子はいずれも txt である。表 2-3 は、連続計測で一括して保存したデータファイルで、ヘッダーが 12 行ある。1 行目には分光器のシリアル番号が記入され、12 行目には測定時間が記入されている。表 2-4 は、個別計測のデータファイルで、ヘッダーが 60 行ある。1 行目には測定時間が、2 行目

には分光器のシリアル番号が記されている。OPwave+は測定領域を選ぶことができるので、ファイルサイズを小さくすることができ、多数のデータファイルを扱うときに便利である。表2-3と表2-4は、450nmから900nmに波長範囲を指定して測定したときのデータファイルで、両者は用いた分光器が異なっているため、各ピクセルの波長も微妙に異なっている。分光データは、波長と透過率の値がタブで区切られて記入されている。

表2-5は、檜ノ木技研の分光器 ezSpectra 815V を付属のオペレーティングソフトの ezSpectra を用いて測定した干渉スペクトルの測定データである。この分光器は、マルチチャンネル分光器の中で最も廉価な分光器に属する。ヘッダーは1行だけで、2行目から257行目までのデータが256ピクセル分の測定データに対応している。各ピクセルの分光データは、波長と透過率の値がコンマで区切られており、ファイルの拡張子は csv となっている。表2-5において、光源の光度が安定していないところに対応するピクセルの分光データは ezSpectra が自動的に消去していることがわかる。

表2-6は、ビー・イー・エス株式会社が代理店となるイー・エル・エス社の分光器 SEC2000 (UV-VIS) を付属のオペレーティングソフトの VisualSpectra を用いて測定した干渉スペクトルの測定データである。ファイルの拡張子は、trans となっている。ヘッダーは16行あり、4行目に測定時間が記入されている。分光器が与える2048ピクセル分の測定データは、17行目から2064行目までに固定長データ形式で記入されているが、この中には光源の光度が不十分なところのデータも含まれている。各ピクセルの分光データは、基本的には空白で区切られている。具体的には、5字分のフィールドにピクセル番号を記して、その後、波長データと透過率のデータがそれぞれ13字分のフィールドに記入されている。

表2-7は、コニカミノルタが代理店となっていた B&W Tek 社の分光器 Cypher H (Vis-NIR) をオペレーティングソフトの VisualSpectra を用いて測定した干渉スペクトルの測定データである。ファイルの拡張子は、txt となっている。ヘッダーは80行あり、2行目に測定時間が記入されている。分光器が与える512ピクセル分の測定データは、81行目から592行目までにセミコロンで区切って記入されている。各行の2列目には波長が記入され、9列目には透過率が記入されているが、この表のデータは、測定範囲を380nmから1050nmに指定したときの測定データなので、その範囲を外れた数値欄は空白になっている。

#### 4 シャボン玉の解析プログラム (ShabonSP.xlsm) の作成

これまで VBA のプログラムのことを「マクロ」と呼んできたが、マクロとはエクセルのようなアプリケーションの作業を自動化するプログラムに対する名称である。通常 VBA の世界ではマクロのことをプロシージャ (procedure) と呼んでいる。そこで本稿でも、今後は「マクロ」ではなく「プロシージャ」という表現を使うことにする。

シャボン玉の解析プログラム (ShabonSP) は 2 つの sub プロシージャからできている。1 つ目はファイルを読み込んで、所定のセルにデータを格納する「ReadSPFL」プロシージャで、2 つ目は干渉スペクトルの解析をサポートする「FringelIN」プロシージャである。

##### A Sub プロシージャ「ReadSPFL」の作成

表 3 に「ReadSPFL」プロシージャのステートメントを示す。このプロシージャの主な働きは、色々なタイプの分光データファイルを読み込んで、シート上の A 列のセルに波長データを、B 列のセルに透過率の測定データを出力することである。

データファイルは表 2 に示した通り。いろいろな形式を持つが、共通点を抜き出すと図 3 のように集約される。即ち、測定条件などを表記した「Header」部、測定データを記した「分光データ」部、測定情報を追記した「Ending」部である。「ReadSPFL」プロシ

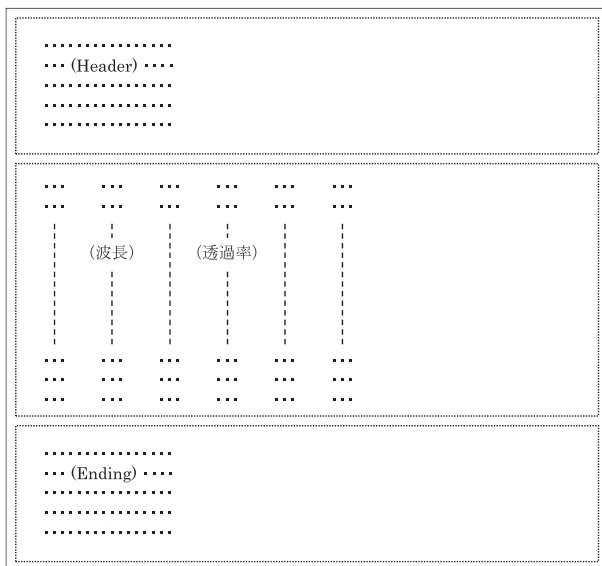


図 3 データファイルの形式

表 3 Sub プロシージャ「ReadSPFL」のステートメント

行番号	ステートメント
1	Sub ReadSPFL()
2	
3	Dim dum (2248) As String, buf As String, tmp As Variant, _
4	pname As String, tspath As String, comm As String
5	Dim cDname As String, cExten As String, cDelimit As String, nHeader As Integer, _
6	nRetuW As Integer, nRetuD As Integer, nTime As Integer, nEnding As Integer
7	Dim dum0 As String, dum1 As String, dum2 As String, _
8	i As Integer, i1 As Integer, n As Integer, n1 As Integer, n2 As Integer
9	
10	tspath = ThisWorkbook.Path 'このブックの属するフォルダへの絶対パス p.361
11	
12	cDname = Cells(31, "F"): cExten = Cells(32, "F")
13	nHeader = Cells(33, "F"): nEnding = Cells(38, "F")
14	nRetuW = Cells(34, "F"): nRetuD = Cells(35, "F")
15	cDelimit = Cells(36, "F"): nTime = Cells(37, "F")
16	
17	pname = tspath + "¥*" + cExten + "?"
18	dum1 = Dir(pname) 'p.351 ファイル名のリストづくり
19	
20	Do While dum1 <> ""
21	comm = comm + dum1 + ", "
22	dum1 = Dir()
23	Loop
24	
25	dum1 = InputBox("有効ファイル名のリスト(" + vbCr + comm + vbCr + "以上)", _
26	"リストの中から拡張子を省いたファイル名を入力してください", cDname)
27	pname = tspath + "¥" + dum1 + "." + cExten
28	buf = Space(FileLen(pname)) 'p.359 変数 buf の大きさを"pname"の大きさにする
29	
30	Open pname For Binary As #1 'p.360
31	Get #1, , buf
32	Close #1
33	tmp = Split(buf, vbLf)
34	
35	For i = 0 To UBound(tmp) 'UBound 関数 p.34 引数の最大値
36	dum(i + 1) = tmp(i)
37	Next i
38	
39	n1 = i - 1 'n1=ファイル内のデータの行数
40	i1 = nHeader + 1 'i1=分光データが始まる行番号
41	
42	If nTime < 1 Then comm = " - -" Else comm = dum(nTime)
43	
44	Cells(1, "A") = "# x": Cells(1, "B") = "Obs."
45	Cells(1, 12) = "ファイル:" + dum1 + ".": Cells(2, 12) = "測定時間:" + comm
46	
47	For i = i1 To n1 - nEnding
48	
49	n = nRetuW - 1: n2 = nRetuD - 1
50	dum0 = dum(i)
51	
52	If cDelimit = "vbTab" Then
53	dum1 = Split(dum0, Chr(9))(n): dum2 = Split(dum0, Chr(9))(n2)
54	Elseif Left(cDelimit, 1) = "" Or Left(cDelimit, 1) = " " Then
55	dum0 = Trim(dum0)

表 3 (つづき)

行番号	ステートメント
56	Do While InStr(dum0, " ") > 0
57	dum0 = Replace(dum0, " ", "")
58	Loop
59	dum1 = Split(dum0, " ") (n) : dum2 = Split(dum0, " ") (n2)
60	Else
61	dum1 = Split(dum0, cDelimit) (n) : dum2 = Split(dum0, cDelimit) (n2)
62	End If
63	
64	Cells(i - i1 + 2, "A") = Val(dum1)     'P.82 P.546
65	Cells(i - i1 + 2, "B") = Val(dum2)
66	
67	Next i
68	
69	n2 = n1 - nHeader - nEnding             'n2=分光データの行数
70	MsgBox "分光データ数:" + Str(n2) + "/読み取りデータ数:" + Str(n1)
71	
72	End Sub

ジャは、測定データの読み取りが目的なので、「分光データ」部の内容を正しく読み取って、シート上の所定のセルに書き出すことが作業の中心となる。「分光データ」部の各行には、各ピクセルの波長や透過率などの情報が入っているが、メーカーごとに固有の区切りの記号（デリミタ；delimiter）を用いている。

「ReadSPFL」プロシージャは、初期設定で与える 8 つの変数を用いて、色々なタイプの分光データファイルを読み込むことを可能にしている。初期設定は、データファイルの形式に応じた数値や文字を、F31 セルから F38 セルまでの 8 つのセルに入れておくことで行われる。表 3 のプログラムでは、それら 8 つの値を、cDname、cExten、nHeader、nRetuW、nRetuD、cDelimit、nTime、および nEnding に受け渡して、ファイルを読み込む作業やシート上の所定のセルにデータを出力する作業を行っている。

初期設定で使用するセルの番地、対応する変数名、および、その内容の説明を表 4 にま

表 4 初期設定を行うセルの番地とその内容

セル番地	変数名	内容
F31	cDname	データファイル名またはそのベース名 (base - name)
F32	cExten	データファイルの拡張子
F33	nHeader	ヘッダー (Header) の行数
F34	nRetuW	波長データが入っている列番号
F35	nRetuD	分光データ (透過率) が入っている列番号
F36	cDelimit	行内のデータを区分するデリミタ
F37	nTime	測定時間が入っている行番号
F38	nEnding	後付けの (Ending) 行数

表5 各種オペレーティングソフトのデータファイルに対する初期設定値

セル番地	オペレーティングソフト名 (データファイルの表番号)						
	OceanView (表2-1)	OceanView (表2-2)	OPwave+ (表2-3)	OPwave+ (表2-4)	ezSpectra (表2-5)	VisualSpectra (表2-6)	BwSpec (表2-7)
F31	Transmission_	Transmission_	OpData	OpData	ezData	AlsData	B&wData
F32	txt	txt	txt	txt	csv	trans	txt
F33	13	0	12	60	1	16	80
F34	1	1	1	1	1	2	2
F35	2	2	2	2	2	3	9
F36	vbTab	vbTab	vbTab	vbTab	,	□(空白)	;
F37	2	0	12	1	0	4	2
F38	0	0	0	0	0	0	0

とめて示す。

表5には、これらの変数が表2の7つのデータファイルに対して、具体的にどのような値を取るかを示す。subプロシージャの**ReadSPFL**を実行するときは、あらかじめワークシートのF31セルからF38セルまでにこれらの値を入れておかないといけない。

ここでは、表2-1のデータを例に、初期設定のやり方を解説する。F31セルにデータファイル名のベースとなる文字列を入れておくと、解析ソフトを使うときに入力の手間が省ける。例えば、OceanViewを用いて測定をする場合、ファイル名が、Transmission\_1.txt、Transmission\_2.txt、Transmission\_3.txt、……とファイルカウンタだけで区別されるたくさんのデータが作成されるので、F31セルに「**Transmission\_**」と入力しておけば、ファイルカウンタのみを入力するだけで、目的ファイルを呼び出して、解析作業を始めることができる。F36セルには、波長の値と透過率の値がタブ区切られているので「**vbTab**」を入れておく。一般に、測定データが「,」や「:」で区切られていれば、F36セルには、その文字をそのまま入力しておけば良いが、タブ区切りの場合は「**vbTab**」を、固定長データの場合は「□」(blank)を1字入れておく必要がある。F37セルは、測定時間の表示をしないときは無記入でも良い。F38セルは、データに「Ending」部が無いので、無記入とするか、「0」とする。

ともかく、ここでは、エクセルを新規作成で開いて、表3の内容をVBAエディターのコードウィンドウに記入する。具体的には、[開発]タブをクリックして、[Visual Basic]のアイコンをクリックするとVBエディターが立ち上がる。VBエディターのメニューバーの[挿入]→[標準モジュール]を選択すると、Module 1のコードウィンドウが現れるので、このウィンドウに表3の内容を記入する。



表3の内容を記入したら、VB エディターのツールバーの左端にある [Excel] ボタンをクリックしてエクセルのシートの画面に戻り、「名前を付けて保存する」でファイルを保存する。このとき、ファイルを格納するフォルダーには、分光データが入っているフォルダーを指定して、ファイル名をここでは「ShabonSP」とし、ファイルの種類は「Excel マクロ有効ブック (\*.xlsm)」で保存する。この段階で ShabonSP.xlsm を保存できたので、ファイルを一旦閉じてもいい。

ここで、表3のプログラムの内容について簡単に解説する。表3において、37行目までは、12行から15行目までの初期設定を除けば、表1の「ChkFile」プロシージャとほぼ同じ内容を持っている。即ち、データファイル名を指定して、読み込んだデータは、一行ごとに文字列型のデータとして配列変数の **dum** に格納される。その後、47行目から67行目までのコマンドを用いて、配列内の各行の文字列型のデータを Split 関数で分割し、その中から波長データと透過率データを抜き出して、それぞれ、A列とB列の所定のセルに、数値データとして出力する作業を行う。そして、70行目の MsgBox 関数を用いて有効データの行数を表示して作業を終了する。

表3のプロシージャの実行方法に関しては後の節で解説する。

## B Sub プロシージャ「FringelN」の作成

表6に「FringelN」プロシージャのステートメントを示す。このプロシージャの働きは、

表6 Sub プロシージャ「FringelN」のステートメント

行番号	ステートメント
1	Sub FringelN()
2	'
3	Dim nLS As Integer, nLL As Integer
4	Dim rLambS As Single, rLambL As Single
5	Dim rNf As Single, rnd As Single
6	'
7	rLambS = 450 : rLambL = 900 ' <----表示画面の設定 波数(nm)
8	'
9	nLS = rLambS : nLL = rLambL
10	Beep
11	rNf = InputBox(CStr(nLS) + "nm~" + CStr(nLL) + "nmの範囲に現れた" + _
12	"フリンジの数を入力してください。", "フリンジの数の入力", 5)
13	rnd = rNf * rLambL * rLambS / (rLambL - rLambS) / 2
14	Cells(2, "F") = rnd ' <--- rnd = 屈折率×膜厚(nm)
15	Calculate
16	Beep
17	'
18	End Sub

薄膜の膜厚の近似値を与えることで、干渉スペクトルのシミュレーションを助けることである。

ここでは、前節で作成した ShabonSP.xlsm を開いて、表 6 の内容を VBA のエディターのコードウィンドウに記入する。具体的には、[開発] タブをクリックして、[Visual Basic] のアイコンをクリックすると VB エディターが立ち上がる。VB エディターのメニューバーの [挿入] → [標準モジュール] を選択すると、Module2 のコードウィンドウが現れるので、このウィンドウに「FringelN」プロシージャのステートメントを記入する。記入を終えたら、上書き保存しておく。

表 6 のプログラムは、薄膜の測定の日データファイルを読み取って作成した干渉スペクトルのグラフが図 1 のように描き出された場合に、フリンジの数を入力することで、膜厚の概算値を F2 セルに代入する作業を行う。表 6 の 7 行目は初期設定の行で、変数の  $rLambS$  と  $rLambL$  が、それぞれ、図 1 の  $\lambda_s$  と  $\lambda_L$  に対応している。表 6 では、図 1 の表示波長領域を 450nm~900nm として初期設定を行っているが、表示波長領域を変える場合は、必要に応じて 7 行目の値を変更する必要がある。表 6 の 11 行目は、フリンジの数を入力するためのコマンドである。13 行目で膜厚の概算値を (9) 式から求め、その値を 14 行目で F2 セルに出力している。F2 セルは、次の節で述べるように、B 列セル全体の計算に関わるスピノボタンにリンクしたセルになっている。そこで、15 行目の **Calculate** は、ここでは、「F2 セルの新しい値を使って B 列セル全体を再計算しなさい」という意味になる。

### C Sub プロシージャを組み合わせる解析プログラム (ShabonSP.xlsm)

この節で、解析プログラム (ShabonSP) の作成の仕上げにとりかかる。ここでのやり方は、エクセルのグラフ機能を最大限に引き出してシミュレーションプログラムを作成するという方法を採用する。

ここでは、「ShabonSP.xlsm」が入っているフォルダーに、表 2-3 のデータファイルが「OpData3.txt」という名前が入っている場合についての解析ソフトの作成法を説明するが、別のデータファイルを用いても同様に作成できる。また、一旦完成した解析ソフトは、後述するように、エクセル上で初期設定値を変更することにより、簡単に別のデータファイルに最適化することができる。

解析プログラム (ShabonSP) の作成は図 4 に示すように、9 つのステップを踏んで行う。ここでは、Step 1 から順番に詳しく解説する。

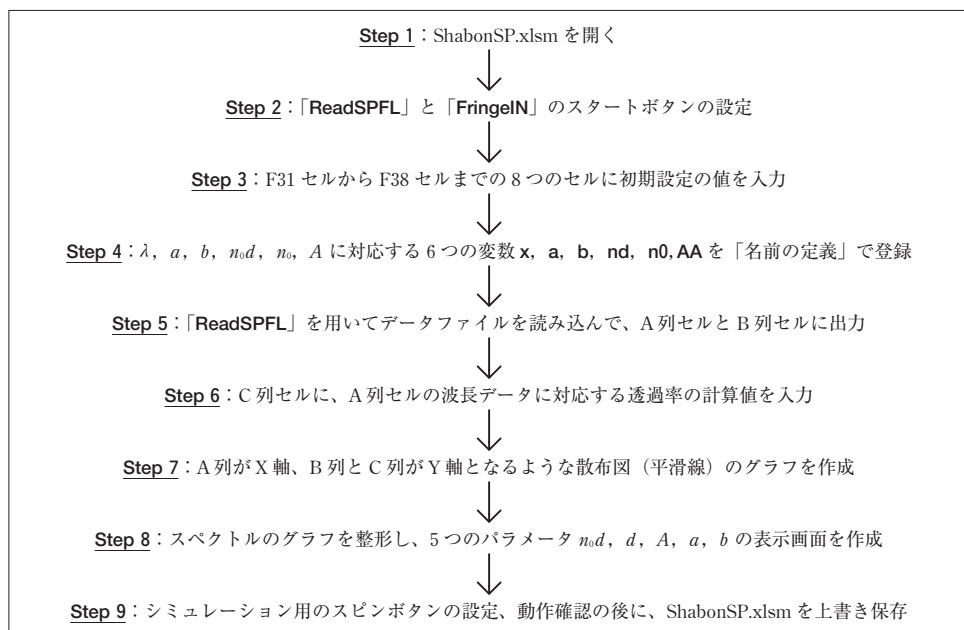


図4 解析プログラム (ShabonSP) の仕上げのための手順

**Step 1** : 最初に、前節で作成した ShabonSP.xlsm を開く。ここで、シート名を「Sheet 1」から「スペクトル」に変更しておく。

**Step 2** : 「ReadSPFL」プロシージャと「FringelIN」プロシージャに対応する2つのスタートボタンを設定する。具体的には、2章でも述べたように、エクセルのシート画面が出ている状態で、リボンの[開発]タブをクリックして[挿入]のアイコンをクリックするとメニューが出てくる。その中にある[ボタン (フォームコントロール)]のアイコンをクリックして、マウスのポインタをシート上の右上の適当な位置に置いてクリックすると、「マクロの登録」のダイアログボックスが現れる。そのダイアログボックスの中の「マクロ名 (M):」のリストの「ReadSPFL」をクリックして[OK]ボタンをクリックすると、シート上に**ボタン1**が現れる。その状態で、適当な空白のセルをクリックすると**ボタン1**が有効になる。このスタートボタンを右クリックすると**ボタン1**のレイアウトに対して色々な編集が可能になるが、ここでは、**New File**と変更して、さらにK3セルとK4セルの中間あたりの位置に移動させておく。同様にして、「FringelIN」プロシージャに対応する

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1				7.5	91.5	2.5	1.331							
2							2400							
3														
4											New File		Fringe In	
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														
30														
31						OpData								
32						txt								
33							12							
34							1							
35							2							
36						vbTab								
37							12							
38							0							
39														
40														
41														
42														

図5 Step 3 から Step 4 における画面

スタートボタンを設定する。具体的には、「マクロの登録」のダイアログボックスの中の「マクロ名(M):」のリストの「FringeIn」をクリックして[OK]ボタンをクリックすると、シート上に「ボタン2」が現れる。このスタートボタンに対してもレイアウトの編集を行い、ここでは、「Fringe In」と変更して、さらに M3 セルと M4 セルの中間あたりの位置に移動させておく。

**Step 3**：F31 セルから F38 セルまでの 8 つのセルに、表 5 を参考にして、データファイルに対応する初期設定の値を入力する。(図 5 参照：ただし、この図は表 2-3 のデータファイルに対する設定値を代入している。また、この図は Step 4 の内容も含む。)

**Step 4**：(2)式と(3)式の  $\lambda$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $n_0d$ 、 $n_0$ 、および  $A$  に対応する 6 つの変数  $x$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $nd$ 、 $n0$ 、および  $AA$  を、それぞれ、シート上の A 列セル、D1 セル、E1 セル、F1 セル、G1 セル、および G2 セルに関連付けて「名前の定義」を用いて登録する。具体的には、A 列セルをクリックして選択した状態で、[数式]タブの中の[名前の定義]をクリックすると「新しい名前」のダイアログ表示が表示されるので、「名前(N)」の欄に「x」を記入して[OK]をクリックすると変数  $x$  が登録される。同様に、D1 セル、E1 セル、F1 セル、G1 セル、および G2 セルを順次選んで変数  $a$ 、 $b$ 、 $nd$ 、 $n0$ 、および  $AA$  を登録する。続いて、変数  $a$ 、 $b$ 、 $n_0d$ 、 $n_0$ 、および  $A$  の初期値 7.5、91.5、2.5、1.331、および 2400 を、D1 セル、E1 セル、F1 セル、G1 セル、および G2 セルに入力する。ここで、変数の単位は、

$a$  と  $b$  に対して%、 $n_0d$  に対して  $\mu\text{m}$ 、 $A$  に対して  $\text{nm}^{-2}$  である。ここで指定した初期値はシャボン玉の透過光の干渉に対する標準の値を使ったもので、必要に応じて、別の値を用いても良い。(図5参照)

**Step 5** : 「ReadSPFL」 プロシージャを実行して、データファイルを読み込んで、シート上のA列のセルに波長データを、B列のセルに透過率の測定データを出力する。具体的には、シート上の **New File** ボタンを押すと、入力ダイアログボックスに、データファイルのリストと共に、「リストの中から拡張子を省いたファイル名を入力してください」というメッセージが出るので、「OpData3」と入力して[OK]をクリックすると、読み取りデータ数に関するメッセージが出る。再び[OK]をクリックすると、A列のセルに波長データ、B列のセルに透過率の測定データが出力されて、プロシージャの実行が終了する。(図6参照：ただし、この図は、Step 6の内容も一部も含む。)

**Step 6** : C列のセルに、A列のセルの波長データに対応する透過率を(2)式と(3)式を用いて計算して出力する。具体的には、C1セルに「Calc.」と記入して、C2セルを選択して、数式バーに次の数式

$$=a * \text{COS}(4000 * \text{PI}() * nd * (1 + AA/x^2)/x) + b \quad (13)$$

を記入して $\square$ を押すと、C2セルに計算値が現れる。ここで、(13)式のcosの括弧内が、(2)式と比べて1000倍違うのは、膜厚の単位を $\mu\text{m}$ とし、光の波長の単位をnmとしたからである。C2セルを再び選択すると、図6のような画面になる。この状態で、C2セルの右下に現れたフィルハンドル(黒い小さな■)をダブルクリックすると、B列に対応する計算値がすべて表示される。(図7参照：ただし、この図は、Step 7までの内容も含む。)

**Step 7** : A列がX軸、B列とC列がY軸の値となるように散布図(平滑線)のグラフを作成する。具体的には、A、B、Cの3列を選択して、[挿入]タブの「グラフ」の中の[散布図]のアイコンをクリックするとメニューが現れるので、その中から[平滑線]のアイコンをクリックすると図7のグラフが現れる。今後、図7のようなグラフにおいて、B列のグラフをObs曲線と呼び、C列のグラフをCalc曲線と呼ぶことにする。

**Step 8** : グラフの表示画面を整形し、5つのパラメータ  $n_0d$ 、 $d$ 、 $A$ 、 $a$ 、および  $b$  の表示画面をつくる。具体的には、グラフ画面を図8のように移動して拡大し、グラフツールの[書式]タブを利用して、x軸(波長軸)の範囲を450~900(nm)に変更する。また、Obs

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	# x	Obs.	Calc.	7.5	91.5	2.5	1.331							
2	449.62	93.25	91.3811				2400							ファイル: OpData3.txt
3	450.06	92.92												測定時間: 20.050
4	450.5	92.52												
5	450.94	92.18												
6	451.38	91.62												
7	451.82	91.23												
8	452.25	90.85												
9	452.69	90.49												
10	453.13	90.09												
11	453.57	89.7												
12	454.01	89.48												
13	454.45	88.91												
14	454.89	88.66												
15	455.32	88.08												
16	455.76	87.71												
17	456.2	87.42												
18	456.64	87.24												
19	457.08	86.91												
20	457.52	86.55												
21	457.95	86.27												
22	458.39	85.97												
23	458.83	85.84												
24	459.27	85.79												

図6 Step 5 から Step 6 における画面

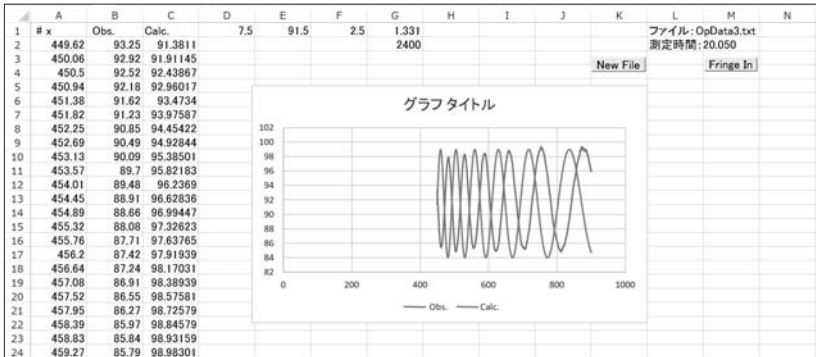


図7 Step 6 から Step 7 における画面

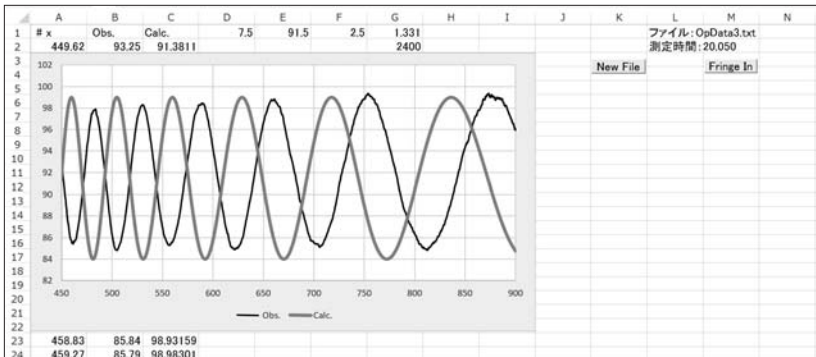


図8 Step 8 における画面 (グラフの整形)

曲線を 1.5pt の太さの黒線にし、Calc 曲線を 3pt の太さのオレンジの曲線に変更する (Calc 曲線の色については図 9 や図 10 のカラー表示の図を参照のこと)。グラフの y 軸の表示範囲は、ここでは自動スケールにしているが、測定データの状況によっては、70~100 (%) の範囲にセットしておいた方がよい場合がある。

続いて、図 9 のように、グラフ画面の横に膜厚などの変数を表示する画面をつくる。具体的には、「セルの結合」や文字のポイントの変更を行って、 $n_0d$ 、 $d$ 、 $A$ 、 $a$ 、および  $b$  の表示画面 (以後、変数表示画面と呼ぶことにする) をつくる。変数  $n_0d$ 、 $d$ 、 $A$ 、 $a$ 、および  $b$  の値は、変数の右側に隣接するセルをクリックして、数式バーに、それぞれ、「= $nd$ 」、「= $nd/n0$ 」、「= $AA/100$ 」、「= $a$ 」、および「= $b$ 」を入力して  $\square$  を押すと、F1 セル、F1 割る G1 セル、G2 セル、D1 セル、および E1 セルに対応した数値が代入される。ただし、小数点以下の桁数が多すぎる場合は「セルの書式設定」で変更する。図 9 では、変数表示画面を見易くするために、いくつかのセルを薄い緑色で塗りつぶす操作を行っている。

次に、450nm の位置の干渉次数  $m_s$  を (10) 式から計算する。図 9 の I1 セルの値は、セルの数式バーに「= $2000 * nd/450$ 」を入力して求めたものである。同様に、900nm の位置の干渉次数  $m_L$  を計算して K1 セルに表示する。

ここまでの入力が終わった段階で、F1 セルの値を 2.5 から他の値、例えば 1.5 などに変更してみる。その変更に伴って C 列の値とグラフ画面の Calc 曲線が変化し、変数表示画面の  $n_0d$  や  $d$  などの値も変化することを確認する。以上の確認を終えたら、F1 セルの値を 2.5 に戻して次のステップに移る。

**Step 9:** シミュレーション用のスピンドットを設定し、動作の確認を行った後に、ShabonSP.xlsm を上書き保存する。

最初に、干渉スペクトルのシミュレーションを行うためのスピンドットを設定する。図 9 の Calc 曲線は、(2) 式と (3) 式を使って描かれるが、それらの式に含まれる 4 つの変数  $a$ 、 $b$ 、 $n_0d$ 、および  $A$  をスピンドットで変化することができれば、Calc 曲線を Obs 曲線に重なるように動かすことができるはずである。しかし、スピンドットが与える数値は 30000 までの自然数なので、実数の変数にリンクさせるには工夫が必要である。そこで、あらかじめ D2 セル、E2 セル、および F2 セルに、それぞれ、75、915、および 2500 の数値を入力してスピンドットのリンクに備える。また、D1 セル、E1 セル、および F1 セル

を個別に選択して、それぞれ、「=D2/10」、「=E2/10」、および「=F2/1000」を入力しておく。

これとは別に、図 10 に示すように、5つのスピンドットを変数表示画面の各変数の横に配置する。具体的には、リボンの[開発]タブをクリックして[挿入]のアイコンをクリックするとメニューから出てくる。その中にある[スピンドット (フォームコントロール)]のアイコンをクリックして、マウスのポインタを変数表示画面上の変数  $n_d$  の横に置いてクリックすると、大きめのスピンドットが現れるので、適当な大きさにして配置する。これと同じ操作を他の4つのスピンドットに対して行い、図 10 のように配置する。ここで、変数  $n_d$  の横に置いた2つのスピンドットのうち左側のものは幅を大きめにする。

以上の準備ができれば、5つのスピンドットを、一つずつ、次に述べる方法で、D2セル、E2セル、G2セル、およびF2セルにリンクさせる。

D2セルとスピンドットにリンクさせるには、変数表示画面の変数  $a$  の横のスピンドットを右クリックして、出てきたメニューの中にある[コントロールの書式設定]をクリックして「コントロールの書式設定」のダイアログボックスを開く。その中の「リンクするセル」の入力欄をクリックしてD2セルをクリックすると「\$D\$2」が入力される、さらに「現在値」の欄にD2セルと同じ値の「75」を入力して[OK]をクリックすると1つ目のリンクが完了する。

同様にして、E2セルと変数表示画面の変数  $b$  の横のスピンドットをリンクする。ただし、このときは、「コントロールの書式設定」のダイアログボックスの中の「リンクするセル」の入力欄には「\$E\$2」と入力し、「現在値」の欄にE2セルと同じ値の「915」を入力してリンクさせる。また、G2セルと変数表示画面の変数  $A$  の横のスピンドットをリンクさせるには、「コントロールの書式設定」のダイアログボックスの中の「リンクするセル」の入力欄に「\$G\$2」と入力し、「現在値」の欄にG2セルと同じ値の「2400」を入力し、「変化の増分」の欄に「100」を入力して[OK]をクリックしてリンクさせる。

F2セルと変数表示画面の変数  $n_d$  の横の大きい方のスピンドットをリンクさせるには、「コントロールの書式設定」のダイアログボックスの中の「リンクするセル」の入力欄に「\$F\$2」と入力し、「現在値」の欄にF2セルと同じ値の「2500」を入力し、「変化の増分」の欄に「50」を入力して[OK]をクリックしてリンクさせる。一方、小さい方のスピンドットに対しても同様な操作を行うが、このときは「変化の増分」の欄に「2」を入力して



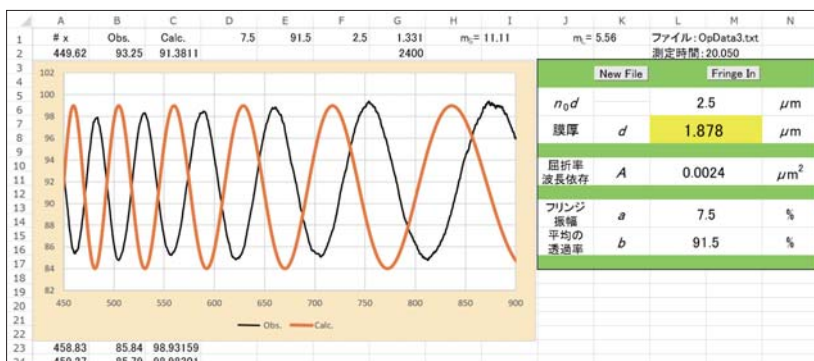


図9 Step 8における画面 (変数表示画面)

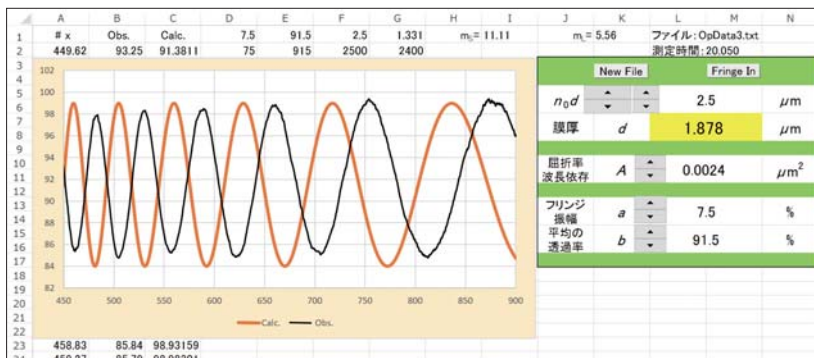


図10 Step 9における画面 (スピンの配置)

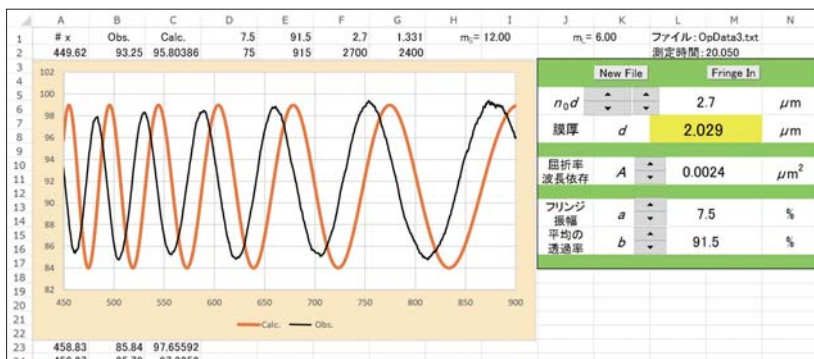


図11 Step 9における画面 (「Fringeln」実行後)

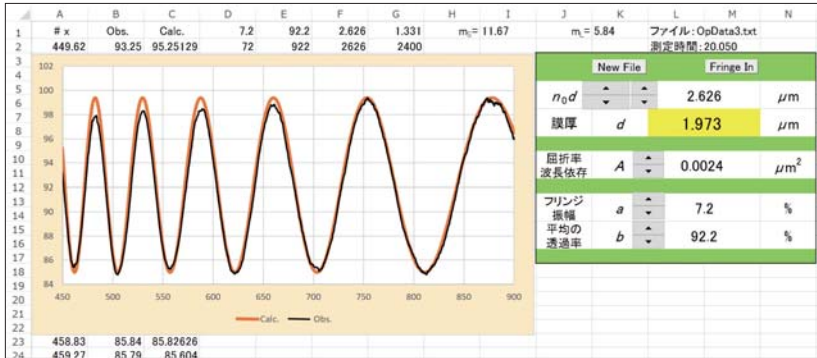


図 12 Step 9 における画面 (Calc 曲線を最適化)

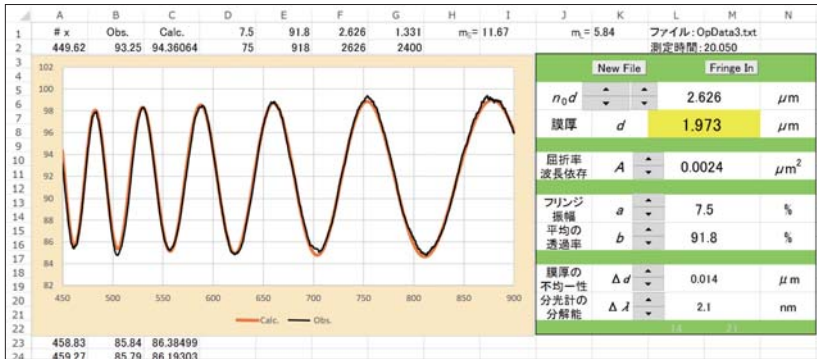


図 13 Step 9 (図 12) に  $\Delta d$  と  $\Delta \lambda$  も最適化したときの画面

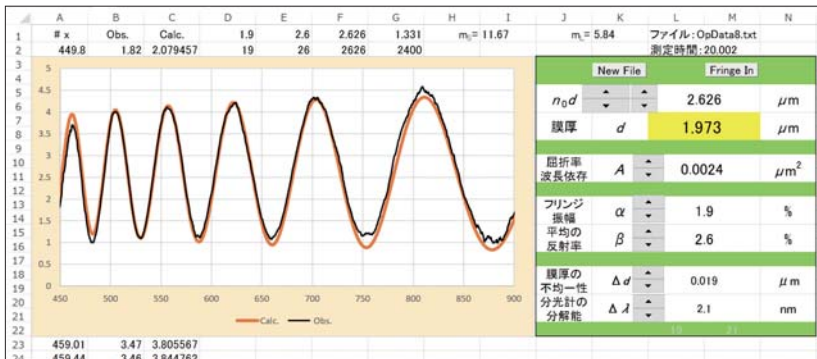


図 14 シャボン玉の反射光の干渉スペクトルの解析画面

リンクを行う。

続いて、グラフ表示画面の変更を行う。図9のグラフを見ると、Calc 曲線が Obs 曲線の上に表示されている。これは、エクセルのグラフが、B 列セルの実測値のプロットを行った後に、C 列セルの計算値のプロットを上書きしたからである。しかし、この表示方法ではシミュレーションが進むと、Obs 曲線が Calc 曲線の陰に隠れて、解析し難くなる。そこで、「データソースの選択」を利用して Obs 曲線を前面に、Calc 曲線を背面に移動させる。具体的には、グラフ画面上で右クリックしてメニューの中の[データの選択(E)]をクリックすると「データソース選択」のダイアログが表示される。その中の「凡例項目 (系列)」の中で「Obs.」が選択されていることを確認して  をクリックすると Obs 曲線が前面に表示されるので、それを確認した後に[OK]をクリックして操作を終了する。(図10 参照)

最後に、作成した解析プログラムの動作チェックを2通りの方法で行う。1つ目のチェックは、図10のグラフの状態で、5つのスピンドボタンのそれぞれについて  と  をクリックして、パラメータの数値が適切に変化するかどうかを調べ、Calc 曲線が動くかどうかを確認する。2つ目のチェックは、Calc 曲線を Obs 曲線にフィットできるかどうかを調べる。図10の Obs 曲線には、フリンジの数が約6個あるので、**Fringe In** をクリックして「6」を入力して[OK]をクリックすると、図11に示すとおり、Calc 曲線が Obs 曲線にだいぶ近づいて表示される。そこで、 $n_0d$  の横の大きい方のスピンドボタンをクリックして大まかに動かし、その後、小さい方のスピンドボタンをクリックして微調整を行うと、Calc 曲線のフリンジの周期と Obs 曲線のフリンジの周期を一致させることができる。このとき  $a$  と  $b$  の横にあるスピンドボタンも適宜操作すると図12のように Calc 曲線を Obs 曲線にほぼ重ねることができる。ここで、 $A$  の横のスピンドボタンは、シャボン玉に対しては  $A = 0.0024\mu\text{m}^2$  となる [2,3] ので、そのままにしておく。

以上の操作で、解析プログラム (ShabonSP) の動作チェックが完了するので、ShabonSP.xlsm を上書き保存しておく。ここで作成した解析プログラムは、表2-3と同じオペレーティングソフト (測定ソフト) で測定したデータファイルであれば、**New File** ボタンを押すことで、フォルダー内の別のデータを読み込んで、膜厚の解析を行うことができる。

## 5 その他のデータファイルに対する解析プログラムの最適化

前の章では、1種類のデータファイルに対して膜厚を決定するための解析プログラム (ShabonSP) を完成させた。一旦、このような解析プログラムが完成すれば、別の形式のオペレーティングソフトで測定したデータファイルが解析できるようにプログラムを最適化することは容易である。この最適化を行うためのステップは、「①初期設定の変更」、「②グラフの表示画面の最適化」、および「③別のファイル名で保存」の3つのステップで行う。ここでは、データ長が表2-3のデータよりも短い場合と、長い場合の2つに分けて最適化の方法を解説する。いずれも、出発点は、前の章で作成した ShabonSP.xlsm の開始画面であるとする。

1つ目の、データ長が表2-3のデータよりも短い場合の例として、表2-5のデータに対する最適化について解説する。「①初期設定の変更」では、表5の6列目の値をF31セルからF38セルまでの8つのセルに代入する。続いて、シート上の **New File** ボタンを押して、入力ダイアログボックスに、「ezData5」を入力して表2-5のデータを読み込ませる。この段階では、エクセルシートは、表2-3の分光器の1095個のデータに、表2-5の256個のデータが上書きされた状態になっているので、グラフの表示画面のObs曲線とCalc曲線は、表2-5のグラフに加えて、表2-3の一部に対するグラフも表示された形になっている。そこで、「②グラフの表示画面の最適化」を行うために、シート上で258行から1096行までの範囲を選んで、[削除]を実行することで、余分なデータを取り除く。この段階で、グラフ画面は正常になるはずである。ただし、グラフ画面の表示領域をObs曲線に合わせて適宜変更する必要があることに留意する。「③別のファイル名で保存」では、スピンボタンをクリックして、Calc曲線をObs曲線に近づける動作確認を行った後に、「名前を付けて保存」で別のファイル名、例えば Shabon\_ez.xlsm で保存する。

2つ目の、データ長が表2-3のデータよりも長い場合の例として、表2-1のデータに対する最適化について解説する。「①初期設定の変更」では、表5の2列目の値をF31セルからF38セルまでの8つのセルに代入する。続いて、シート上の **New File** ボタンを押して、入力ダイアログボックスに、「Transmission\_1」を入力して表2-1のデータを読み込ませる。この段階では、エクセルシートは、表2-3の1095個のデータから、表2-1の2048個のデータに置き換えられるが、グラフの表示画面のObs曲線とCalc曲線は、表2-1の2048個のうちの1095個までのデータの表示設定のままなので、グラフが途中で

切れた状態になっている。そこで、「②グラフの表示画面の最適化」では、グラフの表示画面を 1095 個のデータに対応するものから 2048 個のデータに対応するものに設定の変更を行う。具体的には、次の手順を踏む。グラフ画面の Obs 曲線に対しては、まず、その曲線上にカーソルを置いてクリックすると、数式バーに次の数式が現れる。

**=SERIES(スペクトル!\$B\$1, スペクトル!\$A\$2:\$A\$1096, スペクトル!\$B\$2 : \$B\$1096, 2)**

この数式の中に 2ヶ所ある「1096」の値を「2049」に変更して $\leftarrow$ を押すと、Obs 曲線のグラフが正常になることが確認できる。ここで、数式バーへの入力作業中に操作を中断するときは、グラフ画面のフレームをクリックして数式バーの数式欄を非表示にする必要があることに留意する。一方、グラフ画面の Calc 曲線に対しては、少し手続きが加わる。先ず、C 列の計算値のデータを 1095 個から 2048 個に増やす操作を行う。具体的には、C2 セルを選択して、C2 セルの右下に現れたフィルハンドル (黒い小さな■) をダブルクリックすると、C2049 セルまで計算値が現れる。続いて、グラフ画面の表示対象を C2049 セルまで拡張する。具体的には、Calc 曲線にカーソルを置いてクリックすると、数式バーに次の数式が現れる。

**=SERIES(スペクトル!\$C\$1, スペクトル!\$A\$2 : \$A\$1096, スペクトル!\$C\$2 : \$C\$1096, 1)**

この数式の中に 2ヶ所ある「1096」の値を「2049」に変更して $\leftarrow$ を押すと、Calc 曲線のグラフが正常になることが確認できる。この操作で、グラフ画面は正常になるはずである。

「③別のファイル名で保存」では、スピノボタンをクリックして、Calc 曲線を Obs 曲線に近づける動作確認を行った後に、「名前を付けて保存」で別のファイル名、例えば ShabonOV.xlsm で保存する。

### おわりに：解析ソフトの改良などについて

シャボン玉などの薄膜を決定する解析ソフトの基本的な部分の作り方については、すでに解説したので、ここでは、その解析ソフトを改良したり、転用したりする方法について紹介する。

最初に、シミュレーションの精度を上げる方法について述べる。これまで述べた方法用いると、Calc 曲線によるシミュレーションは、図 12 に示すように、フリンジの周期は再現するが、フリンジの振幅は、Obs 曲線が短波長側で小さくなる傾向に対して、再現できていない。これは、膜厚の不均一度  $\Delta d$  や分光器の分解能  $\Delta \lambda$  が原因となっているので、

(4)式を用いると改善される[4]。具体的には、 $\Delta d$  と  $\Delta \lambda$  に対応する2つのパラメータ、**DD** と **DL** を適当なセルに関連付けて「名前の定義」をして、そのセルに連結するセルにスピノボタンをリンクさせた後に、C2セルの数式バーに、(13)式の代わりに次の式を代入すれば良い。

$$=a * (1 - 8 * (\text{PI}() * n0 * \text{DD} * 1000/x)^2 - 8 * (\text{PI}() * nd * \text{DL} * 1000)^2/x^4) * \text{COS}(4000 * \text{PI}() * nd * (1 + AA/x^2)/x) + b \quad (14)$$

図13は(14)式で計算したCalc曲線を、スピノボタンを使って最適化した結果で、図12に比べてシミュレーションが改善していることがわかる。

続いて、反射光の干渉の解析法について述べる。高校物理の教科書[6]の光の干渉の単元では、薄膜からの反射光の干渉について詳細な解説が行われている。我々のグループもシャボン玉の反射光の干渉スペクトルの測定[2,3]を行っているが、そのときの解析には、透過光に対する(2)式の代わりに、反射光に対する(5)式を用いた。シミュレーションにおいては、(5)式の $\alpha$ と $\beta$ に対応する2つの変数として、図4のStep4で用いた**a**と**b**をそのまま用いることができるので、C2セルの数式バーに、(13)式の代わりに次の式を代入すれば良い。

$$=-a * \text{COS}(4000 * \text{PI}() * nd * (1 + AA/x^2)/x) + b \quad (15)$$

ただし、**a**と**b**共に、5%以下の値になることを留意して初期値を設定する必要がある。一方、シミュレーションの精度を上げたフィッティングを行うためには、(14)式にマイナスを付けた次式を用いれば良い。

$$=-a * (1 - 8 * (\text{PI}() * n0 * \text{DD} * 1000/x)^2 - 8 * (\text{PI}() * nd * \text{DL} * 1000)^2/x^4) * \text{COS}(4000 * \text{PI}() * nd * (1 + AA/x^2)/x) + b \quad (16)$$

図14は、シャボン玉の反射光の干渉スペクトルの測定から得られたObs曲線に、(16)式で計算したCalc曲線を、スピノボタンを使って最適化した結果である。図13と図14は同一のシャボン玉に対して同時に測定した、透過光と反射光の干渉スペクトルをフィッティングした結果なので、両者を比較すると、いろいろ面白いことが分かるが、その議論については、ここでは割愛する。

本稿で作成した解析ソフトは、現有の日本分光の紫外可視分光光度計 V-650、日本分光のフーリエ変換型分光光度計 FT/IR6300、日立の紫外可視分光光度計 UH5300、およびシマズの紫外可視分光光度計 UV2400PC などのテキストデータにも使用することができた。ただし、測定値のデータ量に対しは注意する必要がある。本稿ではデータ量の上限を 2048 個に設定しているのので、例えばピクセル数が 4096 個の分光器で測定したデータファイルを扱うためには、表 1 の行番号 3 と表 3 の行番号 3 の「**dum(2248)**」を「**dum(4296)**」に変更しないとイケない。一般に、データ数より 200 だけ大きいサイズのディメンションを確保すれば本稿の解析ソフトによる取り扱いが可能になる。

本稿では、薄膜の膜厚を決定する方法として、演示実験に適するように、干渉スペクトルの Calc 曲線を Obs 曲線にグラフィカルにフィッティングする方法を採用したが、この方法は、Calc 曲線のグラフの動きが面白くて初心者でも簡単に操作できる利点に加えて、与えられたデータに対して高精度に膜厚を決定する方法でもある。膜厚を決定する方法には、この他に、干渉フリンジの極大値を読む方法もあるが、その方法は、極大値の位置を決めるときの誤差がかなり大きくなるので、精度は限られる。今回の方法は、干渉スペクトルに現れたフリンジ全体に対してフィッティングする方法なので、きれいなフリンジが現れたシャボン玉に対しては、 $\pm 0.002\mu\text{m}$  の精度で膜厚が決定できる。また、そのときは、屈折率の波長依存性も決定可能となる[2]。一方、筆者はこれまでに色々な最小二乗法を行ってきたが、Calc 曲線を Obs 曲線に数値的に最小二乗法でフィッティングするやり方は、微妙な問題を含んでいるので、現段階では困難であると考えている。

本稿は、シャボン玉の干渉実験の普及のために、高等学校の物理担当者だけでなく、小・中学校の理科の担当者にも、児童・生徒にシャボン玉の楽しさと膜厚決定の楽しさを伝えることができるように、解析ソフトの作成法を過剰なくらい詳しく書いた。作成したプログラムの大きさは、測定データの個数にもよるが、150kB 程度である。このように小さくできるのは、VBA のプログラムをエクセルの中に組み込んで、エクセルのいろいろな機能を引き出して作動させているからである。ここでは、エクセル 2013 を使ったプログラミングについて紹介したが、初歩的な機能のみ用いたので、エクセル 2003 でも動くはずである。エクセル 2003 でプログラムを作成しようと思う人は、文献[8]を参照されることをお勧めする。

シャボン玉の干渉実験は、この研究を開始した当初は、分光器と光源で合わせて約 100

万円の費用を必要としたが、最近、5万円の分光器と市販の懐中電灯を用いて廉価版の演示実験が実施できるようになった[9]。そのときも、今回紹介した解析ソフトが役に立った。それ故、本稿が、シャボン玉の干渉実験の普及のための一助となれば幸いである。

### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費の基盤研究 (C) (一般) (課題番号: JP16K00980) の助成を受けて行ったものである。

### 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:「シャボン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:「シャボン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、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 (2015), 83-100.
- [6] 國友正和ほか 10 名:『物理 (平成 24 年 3 月検定済)』数研出版 (2013).
- [7] 田中亨:『Excel VBA 逆引き辞典パーフェクト』翔泳社 (2013).
- [8] 田沼晴彦:『Excel で遊ぶ手作り数学シミュレーション—』B1430 講談社 (2004).
- [9] 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