

高等教育を目的とした電気電子材料の複素誘電率を測定する実習プログラムの策定*

柴田 幸司†

Development of a Practical Program for Dielectric Measurement of Electric and Electronic Materials for Higher Education Purposes

Kouji SHIBATA

ABSTRACT

In this paper, considerations were made for the establishment of an experimental procedure to measure the complex dielectric constant of liquids through comparison with a reference material using the cutoff cylindrical waveguide reflection method. The following steps were taken:

1. Organization of measurement theory and procedure.
2. Creation of a spreadsheet using Microsoft Excel that allows even beginners to estimate unknown substances from measured values of electrical constants.
3. Construction of a measurement system using a Vector Network Analyzer (VNA) capable of measuring electrical properties of electronic components, such as those in the high-frequency range, which has become readily available at a low cost in recent years.

Subsequently, using the measurement systems, spreadsheets, and procedures outlined in items 1-3, it was demonstrated that the complex dielectric constant of liquids can be conveniently measured in the frequency range of approximately 30 to 1000MHz.

Key Words: Dielectric measurement, Impedance measurement, Cut-off circular waveguide reflection method, Radio frequency

キーワード: 誘電率測定, インピーダンス測定, 遮断円筒導波管反射法, 高周波

1. はじめに

筆者は 2004 年に八戸工業大学の教員として着任以来, 高周波帯およびマイクロ波帯における簡便で高精度な電気電子材料の電気定数の測定法の開発に取り組んでいる. その一環として 2010 年に遮断円筒導波管反射法と呼ばれる, 液体の複素誘電率測定法を考案した[1]. この手法では, 終端を開放した同軸給電の遮断円筒導波管に少量の液体を充填し, 反射波から広帯域かつ高精度な液体の誘電率を測定できる[1]. その際, 電気定数は遮断円筒導波管における TM_{01} モードの遮断周波数以下で測定する為, 試料挿入部が開放状態でも電磁波が挿入孔から漏れず, 少量の液体の高精度な

* 令和 5 年 12 月 1 日 受付

† 工学研究科工学専攻・教授

誘電率測定が実現できる。その後、本手法の低周波帯での測定可能性、簡便な公式での推定法、測定精度の改善法、不確かさの計算法も示した[2] - [8]。更に、液体の誘電率を測定前の VNA(vector network analyzer)での 3 つの基準物質や SOM (short, open 及び 1 種類の material (基準物質)) を用いた試料前面での S_{11} の校正法も考案し[9], [10], その後の誘電率推定法も含め妥当性を確認した[11], [12]。また, S_{11} の校正時に short 終端を確実に実現する段差付遮断円筒導波管の構造と補助治具も提案し[13], SOM 校正理論[10]で治具を校正後に各種液体を挿入時の S_{11} の測定値から誘電率を推定した[14]。その際, 同軸線路と遮断円筒導波管の段差を忠実に表現したモード整合法[15]の解析モデルで S_{11} を厳密に計算した。更に, 従来構造と測定手順の推定値に含まれる誤差も定量的に評価し, 提案構造での S_{11} の校正法や誘電率測定法の有効性を確認した[14]。以上筆者は, 2010 年に発案した誘電率測定法の公式による推定の簡便化, S_{11} の校正法, 構造や治具の改良などの提案を追加組み合わせ, 2020 年には 0.50 - 3.0GHz 程度のマイクロ波帯で少量な液体の複素誘電率を簡便かつ高精度に計測する手法と手順を確立したと考える。今後, 測定可能な周波数帯域の拡張が必要だが, RF I-V 法に基づく測定器では, インピーダンスの測定精度の向上に伴う誘電率の精度の改善や, 特に低周波での測定周波数帯域の拡張が期待される[16] - [18]。そこで筆者は, RF I-V 法に基づく測定器の入力インピーダンスの校正に, VNA で用いる SOM と比較する S_{11} の校正法が適用できることも実証した[19]。更に, SOL 校正後の同軸端に N コネクタで給電された遮断円筒導波管の治具を取り付け, SOM (ここで基準物質は純水) 及び, 未知物質としてメタノールとエタノールを治具に挿入時の各終端条件で S_{11} を測定後, SOM 終端条件でのインピーダンスと比較する公式[4]に上記の測定値を直接に代入すれば, SOM との比較で S_{11} の校正を行わず 10 - 1000MHz の周波数帯域で確からしい誘電率の推定(即ち SOM との比較にて誘電率を推定する公式は S_{11} の校正手順も内包すること)も確認し, 手順を大幅に簡略しつつ下限周波数を 10MHz 程度まで下げた[20]。更に筆者らは, リチウム塩を含むカーボネート溶液や水溶液の誘電率を 10MHz - 1.0 GHz の周波数帯域で測定し, 導電率と誘電損失を分離して評価した [21], [22]。

そして更に, SOM と比較する公式にて基準物質に固体を用い, 校正に液体を用いない液体の誘電率推定の提案もされた[23]。高効率な二次電池の電解液の探索に, 更に低周波帯からの溶液の精密な誘電率の測定が必要だが, 電解液や人体組織は大きな導電率を有し, 電極付近にイオンが集積する電極分極の影響により低周波帯では確からしい誘電率の測定が困難となる[24]。その為, 様々な形状の電極や測定法による導電性液体の誘電率の推定値の差異の検証が必要となる。その為, 文献[25]では遮断円筒導波管反射法および容量法にて様々な濃度の電解質溶液(塩水)の複素誘電率を測定し, 溶液の導電率の影響を分離した誘電損失の周波数特性としても評価した。

これらの研究成果のうち特に文献[20]では, 測定器を SOL 校正後に終端が開放された遮断円筒導波管の治具を取り付ければ, 治具内の同軸線路の先端が short, open, 基準物質(例えば純水)および未知物質での S_{11} の測定値を行列演算等が用いられない簡便な公式に代入するだけで, 未知物質(液体)の複素誘電率を瞬時に測定できる簡素化された測定手順を確立したと考える。

これに及んで筆者は, 当該測定法が高等教育を目的とした電気電子材料の複素誘電率を測定する, 例えば大学生の実験テーマなどにも応用できるのではと考えた。

そこで本稿では、文献[20]の遮断円筒導波管反射法による基準物質との比較にて液体の複素誘電率を測定する 1. 測定理論と手順を整理し、2. 初学者でも容易に電気定数の測定値から未知物質が推定できる Microsoft Excel によるスプレッドシートを作成した。更に 3. 近年、安価に入手が可能になった高周波帯での電子部品などの電気特性が計測できる Vector Network Analyzer (VNA)を用いて測定系を構築した。そして実際に、項目1–3で示された測定系やスプレッドシートおよび手順を用い、30–1000MHz 程度の周波数帯域で液体の複素誘電率が簡便に推定できることを示した。

2. 遮断円筒導波管反射法による液体の複素誘電率の測定手順と理論の整理

筆者は2010年から2023年に至る一連の高周波・マイクロ波帯での液体の誘電率測定に関する研究成果として、当該治具と手順により、解析的な積分を含む煩雑な定式化[1], [14], [15], 行列演算を伴う複雑な数値計算[1], [14], [15]や事前の治具の校正[9], [10]を行わずとも、10–1000MHz程度の周波数にて相応の精度で少量な液体の複素誘電率を推定できることを示した[20]。そこで本章では、初学者でも簡便に高周波帯で液体の複素誘電率を推定する手順と理論を整理した。

まず、本手法に用いる測定治具には、図1のNコネクタの同軸線路で給電される外導体内径が $2a = 10.2\text{mm}$ 、内導体外径が $2b = 3.1\text{mm}$ 、深さが $d = 10.0\text{mm}$ の終端開放遮断円筒導波管を用いた。この治具は、試料挿入部の内径がNコネクタの外導体内径よりも若干大きく設計されており、外径が10.0mm程度の金属製のshort棒を試料挿入部へ挿入すれば、shortでの確実な校正が可能となる[14]。

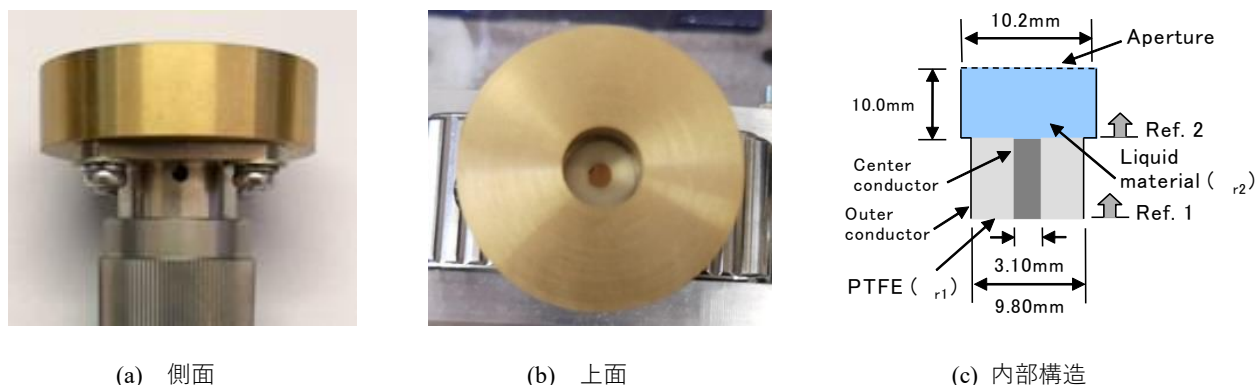


図1 Nコネクタで給電される同軸給電型遮断円筒導波管の治具

この治具を用いた測定系での S_{11} の校正と測定および液体の複素誘電率の推定手順は以下の通り。

1. 測定器 (VNA) に接続された S_{11} を校正後の同軸ケーブル先端に N コネクタ (同軸線路) で給電する図1の遮断円筒導波管の治具を装着
2. 治具の同軸線路前面が short, open 時および治具に基準物質または未知物質を挿入時の S_{11} を図1(c)の SOL 校正面 (Ref. 1) で測定 (short 時は $\phi 10.0\text{mm}$ の金属円筒棒を治具に挿入[14])
3. 上記の各終端面での S_{11} の測定値を次ページの(1)式に代入して未知な液体の複素誘電率を推定

その際に重要な事項は、本手順は治具の S_{11} の校正も含む為、SOL 校正後に更に Ref. 2 での治具の校

正が不要なことである。これにより、従来よりも手順を大幅に簡略化した。なお、 S_{11} はマイクロ波回路における信号の入出力を示す S パラメータのうち、治具等に電磁波を励振時の入射波と反射波の比（いわゆる電圧反射係数）を電力で表したもので、**図 1** の Ref. 1 から負荷側を見た時に Port 1 から入射して Ref. 1 での治具での不整合により Port 1 に戻ってくる反射電力波との比を意味する。また、今回は基準物質に純水を選定した。そして、これら各条件での S_{11} の測定結果および基準物質の複素誘電率を下記の式(1)に代入し、未知物質（液体）の複素誘電率を推定する[20]。

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{\dot{\epsilon}_{ra} (\dot{S}_{11m} - \dot{S}_{11o}) (\dot{S}_{11s} - \dot{S}_{11a}) + (\dot{S}_{11m} - \dot{S}_{11a}) (\dot{S}_{11o} - \dot{S}_{11s})}{(\dot{S}_{11m} - \dot{S}_{11s}) (\dot{S}_{11o} - \dot{S}_{11a})} \quad (1)$$

ここで、 S_{11s} および S_{11o} はそれぞれ治具の観測面が short と open での S_{11} の測定値、 ϵ_{ra} および S_{11a} は比較の為の基準物質の複素誘電率と、基準物質を治具に充填時の S_{11} の測定値、また S_{11m} は治具に未知物質を充填時の S_{11} の測定値である。

3. 高周波帯での簡便な液体の複素誘電率の推定のため構築した測定系

これら簡便な手順および理論を用い初学者が液体の複素誘電率を推定するには、測定系も簡素で安価な方が良いと考えた。本稿では、高周波帯での S パラメータ (S_{11}) の測定に中国製造の安価な機器を用いた。具体的には、本目的に必要な S_{11} を計測する装置として nanoVNA v2 (S-A-A-2) なる電子機器を選定した。本器は edy555 こと高橋知宏氏が趣味で開発した VNA (nanoVNA) にインスパイアされた中国人により nanoVNA のファームウェアを閲覧して設計開発されたもので、2023 年の時点で公式サイトその他、そのクローンがアリババ集団 (AliExpress) や Amazon 等でも購入できた。そこで、この機器を**図 2**に示すように VNA や同軸ケーブル (セミリジッドケーブル) および中継コネクタ類を木板やスペーサで固定し、より安定した測定が出来るよう工夫した。

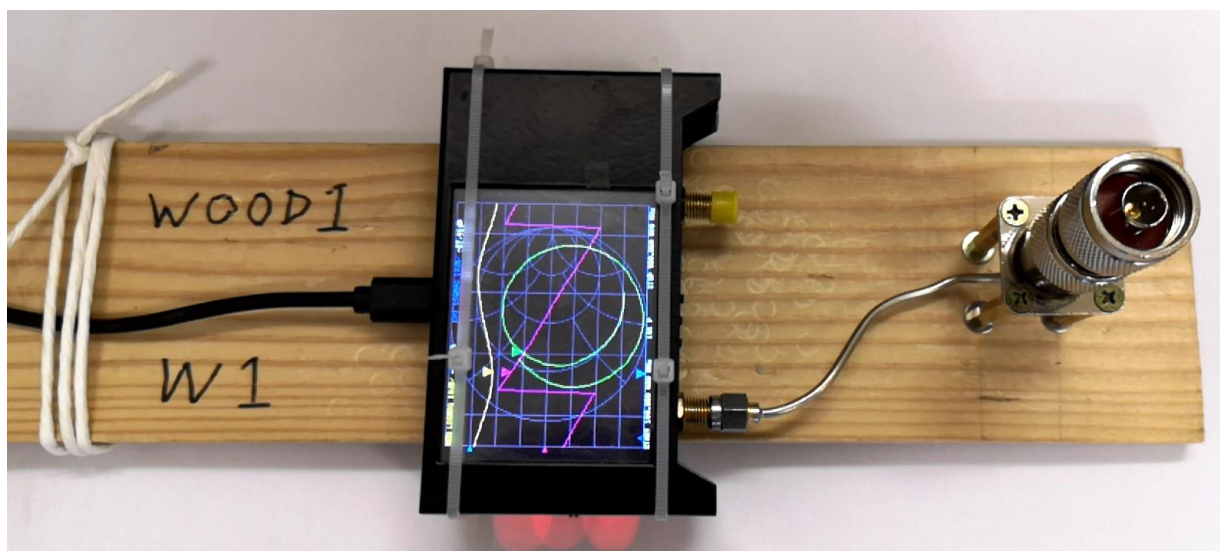


図 2 木板やスペーサで固定された測定系

当該測定での簡便性や実用面を考えると、 S_{11} の電子データは周波数特性も含め PC 等で直接取得できると望ましい。本検討では、VNA に USB ケーブル経由で接続された Microsoft Windows 10 が稼働するコンピュータ上で動作する、nanoVNA v2 の開発者自身による公式なソフトウェア (NanoVNA-QT) にて S_{11} データを取得した。その際、本ソフトウェアにて事前に図 2 の測定系で図 1 の治具を取り付ける前に SOL 校正器 (short, open および load) を用いて図 1 (c) の Ref. 1 面における S_{11} の校正後に治具を取り付け、各終端条件にて S_{11} の測定を行う。実際に 10 – 1000MHz の周波数帯域にて SOL 校正直後の同軸線路先端 (Ref. 1) で S_{11} を測定した例を図 3 に示す。これより、治具を取り付ける前は全ての周波数で open (インピーダンスが無限大) として観測されている。

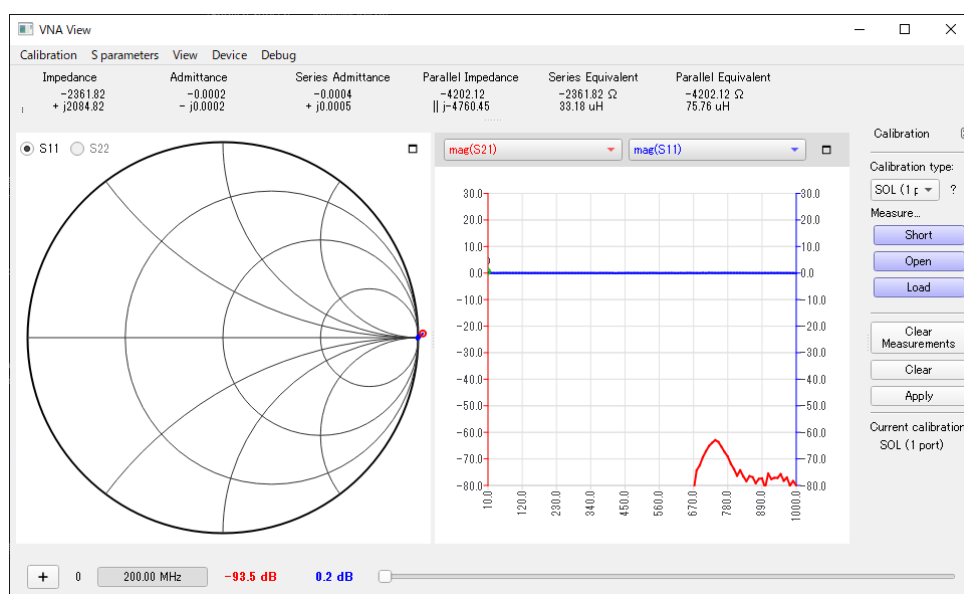


図 3 NanoVNA-QT での S_{11} データの取得の様子

4. 各終端条件の S_{11} の測定値から液体の複素誘電率を推定する Excel スプレッドシート

更に、これらの手順、測定系およびソフトウェアにて取得した各終端条件での S_{11} の測定値から液体の複素誘電率を推定する Microsoft Excel のスプレッドシートも作成した。筆者はこれまで、当該作業を Fortran 77 言語にて作成したプログラムを都度コンパイルして実行していた。その際、測定器から取得された様々な形式の電子ファイルを Fortran 77 のプログラムで読み取れるようファイル形式の変換も行っており、一連の作業に不便を感じていた。しかし、最近の測定器 (VNA) は USB にケーブルで接続した Windows PC 等を経由して S パラメータのデータを CSV 形式として取得できる場合が多い。その為、ここでは新たに各終端条件の S_{11} の測定値から液体の複素誘電率を推定する Microsoft Excel のスプレッドシートを作成して当該作業の簡略化を試みた。なお、誘電率の推定に用いた Excel の関数は以下の通り。

COMPLEX (A1,B1,"i")	: セル番号 A1, B2 の各実数を複素数に変換
IMSUM (A1,B1)	: セル番号 A1, B2 の各複素数同士の和
IMSUB (A1,B1)	: セル番号 A1, B2 の各複素数同士の差
IMPRODUCT(A1,B1,C1)	: セル番号 A1, B1, C1 の各複素数同士の積
IMDIV(A1,B1)	: セル番号 A1, B1, C1 の各複素数同士の商
IMREAL(A1)	: セル番号 A1 の複素数からの実部の抽出
IMAGINARY(C4)	: セル番号 A1 の複素数からの虚部の抽出

(1)式にて定義される各 S_{11} の値（入力インピーダンスでは無い）は、本検討で作成した Excel シートの場合、左下のタブで切り替えられるシート「data」における表 1 で示したセル内に配置する。

表 1. シート（data）の値とセルの関係

物理量の名称	セル番号	
	実部	虚部
Frequency	B4	
S_{11} for short	C4	D4
S_{11} for open	E4	F4
S_{11} for Reference	G4	H4
S_{11} for Unknown	I4	J4
Permittivity for Reference	K4	L4

そこで先ず、これらシート「data」に保存された各物理量の実部と虚部に相当する各実数を引用し、表 2 に対応したシート「calc1」の各セルにて複素数に変換する。

表 2. シート（calc1）の値とセル番号および計算式の関係

物理量の名称	(1)式での関数名	セル番号	Excel での計算式
Frequency		B4	=data!B4
S_{11} for short	S_{11s}	C4	=COMPLEX(data!C4,data!D4,"i")
S_{11} for open	S_{11o}	E4	=COMPLEX(data!E4,data!F4,"i")
S_{11} for Reference	S_{11a}	G4	=COMPLEX(data!G4,data!H4,"i")
S_{11} for Unknown	S_{11m}	I4	=COMPLEX(data!I4,data!J4,"i")
Permittivity for Reference	ϵ_{ra}	K4	=COMPLEX(data!K4,data!L4,"i")

更に、表 2 に示す配置でシート名「calc1」に配置された各値を引用し、以下の(2)式に従い複素誘電率の推定に必要な下記の表 3 に示す式中の各項をシートの「calc2」にて計算する。

$$\dot{\epsilon}_{rm} = \frac{\text{term1} + \text{term2}}{\text{term3}} \quad (2)$$

表 3. 式(2)に対応するシート (calc2) の各セルへの計算式の配置

関数名	セル番号	Excel での計算式
term1	C4	=IMPRODUCT(calc1!K4,IMSUB(calc1!I4,calc1!E4),IMSUB(calc1!C4,calc1!G4))
term2	D4	=IMPRODUCT(IMSUB(calc1!I4,calc1!G4),IMSUB(calc1!E4,calc1!C4))
term3	E4	=IMPRODUCT(IMSUB(calc1!I4,calc1!C4),IMSUB(calc1!E4,calc1!G4))

そして、これら(1)および(2)式に対応したシート「calc2」各項の計算結果を引用し、下記の表 4 に示す式中の各項をシートの「estimation」にて計算する。

表 4. 式(2)に対応するシート (estimation) の各セルへの計算式の配置

物理量	セル番号		Excel での計算式	
	実部	虚部	実部	虚部
推定値 (複素数)	C4		=IMDIV(IMSUM(calc2!C4,calc2!D4),calc2!E4)	
推定値 (実部と虚部)	E4	F4	=IMREAL(C4)	=IMAGINARY(C4)

その結果、シートの「estimation」のセル番号 E4 および F4 には、推定された複素誘電率の実部と虚部が表示される。これらの手順に従い作成した Microsoft Excel のスプレッドシートを図 4 に示す。

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled 'methanol5a.xlsx'. The active sheet is 'estimation'. The formula bar displays the formula for cell C4: $\text{=COMPLEX}(\text{data!C4}, \text{data!D4}, "i")$. The spreadsheet has columns for Frequency (MHz), Short, Open, Reference material, Unknown material, and Permittivity of ref. material. The data rows show various frequency values and corresponding complex permittivity values for different materials.

図 4 Microsoft Excel への S_{11} の代入の様子

5. 誘電率推定の実際

そこで実際に、図 2 の測定系に図 1 の治具を装着し、図 3 のソフトウェアにて取得した各終端条件での S_{11} を図 4 の Microsoft Excel のスプレッドシートに代入することで、各液体の複素誘電率を推定した。用いたシートでは、タブ「data」に short, open, 基準物質, 未知物質での S_{11} および基準物質の複素誘電率を代入すると、タブ「Calc1」, 「Calc2」での計算結果を踏まえ、タブ「estimation」に複素誘電率の推定結果が表示される。一例として、治具にメタノールを挿入時の複素誘電率の推定結果を図 5 に示す。これより、10 - 160MHz にかけて実部は 36.8 - 34.78, 虚部は 4.6 - 0.7 の複素誘電率の変化が確認できる。なお、低い周波数での虚部の増加の要因は、用いた機器 (VNA) の測定精度

に起因すると考える。更に、液体へのイオンの混入も考えられる。誘電率の推定に Microsoft Excel を用いれば、図 6 のように複素誘電率の周波数特性の作図も容易である。なお 950MHz 辺りに確認できる不連続は、機器（nanoVNA v2 (S-A-A-2)）の電気性能に起因すると思われる。しかし、このような安価な機器の組み合わせでも、相応の精度で液体の複素誘電率が推定されており、液体の誘電率測定教材（練習用）に利用できると思われる。

Freq. [MHz]	Complex value	Freq. [MHz]	Real	Imag.
10	36.8138723313745-4.6219406935078i	10	36.814	4.622
20	34.4858806362362-1.7912948350599i	20	34.486	1.791
30	34.6145345441532-1.11900174301648i	30	34.615	1.119
40	34.8214060187336-0.675474437477752i	40	34.821	0.675
50	34.9826084979208-0.412171457698984i	50	34.983	0.412
60	34.8757644867274-1.10649183847936i	60	34.876	1.106
70	34.7236563045314-0.715599014454565i	70	34.724	0.716
80	34.6746144642797-0.784418099650965i	80	34.675	0.784
90	34.9709036963526-1.48707408006118i	90	34.971	1.487
100	34.7053225140437-0.886331207086664i	100	34.705	0.886
110	34.8359187446967-1.27972113350047i	110	34.836	1.280
120	34.6317781706625-1.32688531556357i	120	34.632	1.327
130	34.8123646593056-1.30197844767663i	130	34.812	1.302
140	34.841859377456-1.49027935469841i	140	34.842	1.490
150	34.8106540807356-1.5722131103874i	150	34.811	1.572
160	34.7841169239335-1.77131168726545i	160	34.784	1.771

図 5 Microsoft Excel でのメタノールの複素誘電率の推定結果

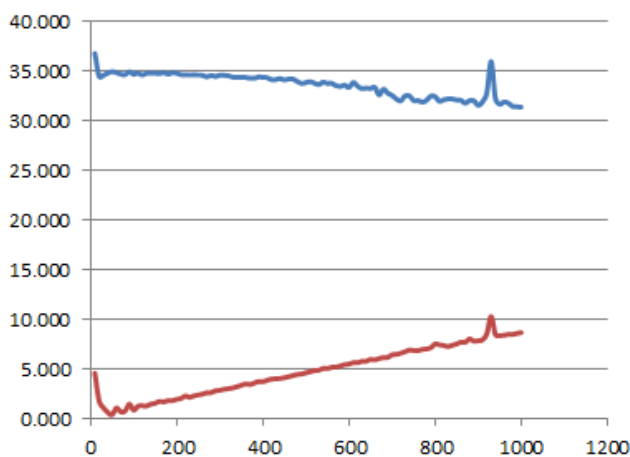


図 6 メタノールの複素誘電率の周波数特性

6. おわりに

本稿では、遮断円筒導波管反射法と nanoVNA v2 (S-A-A-2) および Microsoft Excel 組み合わせた

安価な測定系による、液体の複素誘電率の推定手順を理解する実験教材を構築した。そして実際に、一例として 10 – 1000MHz の周波数帯域でのメタノールの複素誘電率の推定事例を示した。今後は実験教材としてのテキストの作成および、本学の工学部での実験・実習での学生の理解度の調査が必要と考える。また、本手法の JIS 標準化を目指す。

謝 辞

本研究は日本学術振興会の科研費・基盤研究(C) 課題番号 20K04522“機能性物質創成のための温度変化環境下における液体の広帯域複素誘電特性測定法の確立,”に支援されました。この機会を与えて下さいました日本国政府、文部科学省ならびに日本学術推進機構の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] K. Shibata, “Measurement of Complex Permittivity for Liquid Materials Using the Open-ended Cut-off Waveguide Reflection Method,” IEICE Trans. Electron, Vol. E93-C, No. 11, pp. 1,621 - 1,629, 2010-11.
- [2] K. Shibata, “Broadband Measurement of Complex Permittivity for Liquids Using the Open-ended Cut-off Circular Waveguide Reflection Method,” 35th PIERS Proceedings, Guangzhou, China, pp. 2,079 - 2,084, 2014-8.
- [3] K. Shibata and M. Kobayashi, “Broadband Measurement of Complex Permittivity for Liquids via the Open-ended Cut-off Waveguide Reflection Method Using a Large-bore Connector,” Proc. of the 45th European Microwave Conf, EuMC 2015, Paris, France, pp.979 - 982, 2015-9.
- [4] K. Shibata and M. Kobayashi, “Simplification of Liquid Dielectric Property Evaluation Based on Comparison with Reference Materials and Electromagnetic Analysis Using the Cut-off Waveguide Reflection Method,” IEICE Trans. Electron, Vol. E100-C, No. 10, pp. 908-917, 2017-10.
- [5] K. Shibata, “Method for dielectric measurement in liquids using an estimation equation without short termination,” Proc. of 22nd International Microwave and Radar Conference, MIKON 2018, Poznan, Poland, pp. 751 - 754, 2018-5.
- [6] K. Shibata, “Dielectric Measurement in Liquids Using an Estimation Equation without Short Termination via the Cut-Off Circular Waveguide Reflection Method,” IEICE Trans. Electron, vol.E101-C, no.8, pp. 627 - 636, 2018-8.
- [7] K. Shibata, “Improvement in Liquid Permittivity Measurement Using the Cut-off Waveguide Reflection Method,” Proc. of 1st European Microwave Conference in Central Europe, EuMCE 2019, Prague, Czech Republic, 2019-5.
- [8] K. Shibata “Uncertainty Analysis for S11 Calibration of a Coaxial Line with Three Reference Materials without Short Termination,” Proc. of the XXXIII General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science URSI GASS 2020, Rome, Italy, August, 2020.
- [9] K. Shibata, “S11 Calibration Method for a Coaxial Line with Three Reference Materials and no Short Termination Condition for Dielectric Measurement in Liquids,” Proc. of URSI AP-RASC 2019, New Delhi, India, 2019-3.
- [10] K. Shibata, “S11 Calibration Method for a Coaxial-loaded Cut-off Circular Waveguide Using SOM Termination,” Proc. of the 2020 IEEE Sensors Applications Symposium, IEEE SAS 2020, Kuala Lumpur, Malaysia, 2020-3.
- [11] K. Shibata, “S11 Calibration of Cut-off Circular Waveguide with Three Materials and Related Application to Dielectric Measurement for Liquids,” IEICE Trans. Electron, vol. E104- C, No.2, pp. 93 – 101, 2021-2.
- [12] K. Shibata, “Dielectric Measurement in Liquids via the Cut-off Circular Waveguide Reflection Method after S11 Calibration Using SOM Termination,” Proc. of the 23rd International Microwave and Radar Conference, MIKON 2020, Warsaw, Poland, 2020-10.

- [13] K. Shibata, “A Novel Sample Holder for S11 Calibration Using SOM for Dielectric Measurement in Liquids via the Cut-off Waveguide Reflection Method,” Proc. of The 13th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances ISEMA 2021, Kiel, Germany, July, 2021-7.
- [14] K. Shibata, “Calibration of a Coaxial-Loaded Stepped Cut-Off Circular Waveguide and Related Application of Dielectric Measurement for Liquids,” IEICE Trans. Electron, vol. E105- C, No.4, pp. 163 - 171, 2022-4.
- [15] K. Shibata, “S11 Calculation for a Coaxial-loaded Type Stepped Cut-off Circular Waveguide by the Moment Method,” Proc. of International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, ISEE 2021, pp. 84 – 89, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2021-4.
- [16] “Advanced impedance evaluation capability of the RF I-V method compared to the network analysis method,” Agilent Technology Application Note 1369-2, Part No. 5988-0728EN, 2001-7.
- [17] Agilent Impedance Measurement Handbook, “A guide to measurement technology and techniques 4th edition,” part no. 5950–3000, 2009-6.
- [18] R. Yamaguchi, “Impedance Analyzer IM7580,” Hioki Technical Notes, Vol. 36, No. 1, pp. 1 - 6, 2015.
- [19] K. Shibata, K. Tokita and K. Fujiwara, “ Broadband Calibration of Input Impedance for Coaxial Tips Based on RF I-V, and Related Application to Dielectric Evaluation for Liquids,” Proc. of 2022 IEEE 8th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA 2022), Melaka, Malaysia, 2022-9.
- [20] K. Shibata, “A Simplified Measurement Procedure for Dielectric Measurement of Liquids, Including Calibration via the Cut-Off Circular Waveguide Reflection Method,” Proc. of 2023 IEEE Sensors Applications Symposium (IEEE SAS 2023), Ottawa, ON, Canada, 2023-7.
- [21] K. Shibata, E. Otani, J. Han, Y. Umebayashi and K. Fujiwara “Dielectric Evaluation of Ionic Electrolyte Solutions Based on the Cut-off Waveguide Reflection Method,” Proc. of The 14th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA 2023), Brisbane, Australia, 2021-9.
- [22] 柴田幸司, 大谷恵理香, 韓智海, 藤原康平, 時田幸一, 梅林泰宏 “遮断円筒導波管反射法による $\text{Li}(\text{N}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2)$ 水溶液の複素誘電率測定,” 信学技報, vol. 122, no. 207, MW2022-92, pp. 58-63, 2022-10.
- [23] 柴田幸司, “遮断円筒導波管反射法による固体の基準物質との比較による液体の複素誘電率測定 ,” 信学技報, vol. 123, no. 5, MW2023-3, pp. 10 - 15, 2023-4.
- [24] 渡辺 聡一, 佐々木 謙介, 和氣 加奈子, 橋本 修, “生体組織・材料の電気定数測定,” 計測と制御 2014 年 53 巻 3 号 pp. 181 - 186, 2014-3.
- [25] 柴田幸司, “遮断円筒導波管反射法による電解質溶液の複素誘電率測定,” 信学技報, vol. 123, no. 319, MW2023-150, pp. 8 - 13, 2023-12.

要 旨

本稿では、遮断円筒導波管反射法による基準物質との比較にて液体の複素誘電率を測定する 1. 測定理論と手順を整理し、2. 初学者でも容易に電気定数の測定値から未知物質が推定できる Microsoft Excel によるスプレッドシートを作成した。更に 3. 近年、安価に入手が可能になった高周波帯での電子部品などの電気特性が測定できる Vector Network Analyzer (VNA)による測定系を構築した。そして実際に、項目 1 – 3 の測定系やスプレッドシートおよび手順を用い、30 – 1000MHz 程度の周波数帯域で簡便に液体の複素誘電率が測定できることを示した。

キーワード：誘電率測定，インピーダンス測定，遮断円筒導波管反射法，高周波