

# 円筒キャビテを用いた液体の誘電率測定法に関する研究

串崎 栄紀<sup>†</sup> チャカロタイ ジェドヴィサノプ<sup>†</sup> 陳 強<sup>†</sup> 澤谷 邦男<sup>†</sup> 鈴木 誠<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: <sup>†</sup> {eiki, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

**あらまし** 液体の誘電率測定には同軸プローブ法が実用上広く用いられている。これは半無限モデルを想定しており、試料が十分に存在しない場合はその結果が正しいかどうか保証がない。また、試料が少なければ少ないほど良いという要望もある。そこで、本研究では小容量円筒キャビティを用いた液体の誘電率測定手法を考案し、その効果を検討した。

**キーワード** 液体, 誘電率測定, 小容量, 同軸プローブ

## A Study on Measurement of Permittivity of Liquid Using a Cylindrical Cavity

Eiki KUSHIZAKI<sup>†</sup> Jerdvisanop CHAKAROTHAI<sup>†</sup> Qiang CHEN<sup>†</sup> Kunio SAWAYA<sup>†</sup> and Makoto SUZUKI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Graduate school of Engineering, Tohoku University 6-6-05 Aoba, Aramaki-za, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {eiki, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** Method of permittivity of measurement for liquid by using a coaxial probe is often practically used. This method assumes that structure of sample is infinite, so there is no guarantee that the result is correct or not in case there is plenty of sample. Besides, it is needed that sample size should be small. Therefore, in this research, the effect of method of permittivity measurement for liquids by using cylindrical cavity whose volume is small is studied.

**Keyword** permittivity, liquid, small size, coaxial probe

### 1. まえがき

筋肉収縮メカニズムを解明するためには、その球状タンパク分子の水溶液の誘電スペクトルを知る必要がある[1]。水溶液の誘電スペクトルを温度 20.00°C で制御した上で 0.2 ~ 50 GHz に亘る広帯域に、また誘電率の値を 0.01 オーダーの精度で測定するという要求がある。水溶液の誘電率を調べる際に用いられる方法として同軸プローブ法がある[2]。この手法におけるモデルは終端開放型同軸線路とその端面には半無限長導体があるとしてサンプルの大きさも半無限であると仮定している。サンプルが 200ml といった十分な量が推奨されている[2]。一方、文献[1]ではタンパク質が人工遺伝的に作られるため、1ヶ月に数 ml しか作れない。したがって、半無限モデルを仮定した同軸プローブ法で測定した小容量液体の誘電スペクトルの精度が不明である。また、小容量で水溶液の誘電スペクトルを測る方法が望まれている。

本研究では小容量液体の誘電率を高精度かつ広帯域に亘って測定する手法を確立することが最終的な目標とし、半無限モデルではなく小容量円筒キャビティ

モデルによる誘電率測定法を取り上げ、その効果について検討した結果を報告する。図1に半無限モデルと円筒キャビティモデルの両方を示す。

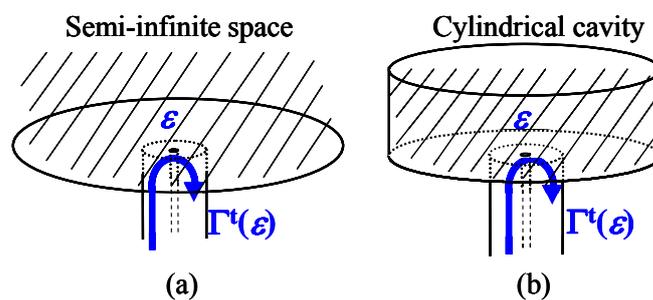


図 1. 解析モデル

(a) 半無限モデル (b) 円筒キャビティ

### 2. 誘電率測定の原理

誘電率の測定系を図2に示す。第一に、解析モデルに応じた反射係数の理論値  $\Gamma^t(\epsilon)$  を導出する。まず、試料からの反射係数  $\Gamma^m$  をベクトルネットワークアナラ

イザによって測定する．この際に，反射係数の値は短絡，空気，純水によって校正した結果を用いて反射係数を求める．次に，反射係数の理論値 $\Gamma^l(\varepsilon)$ と測定値 $\Gamma^m$ が等しくなるような誘電率を探索する．

反射係数の理論値 $\Gamma^l(\varepsilon)$ は図3に示すように同軸線路と円筒キャビティで構成されるモデルに対して解析的に求めた．同軸線路内における電磁界は方位角方向に変化しないTEMモードとし，円筒キャビティ内における電磁界はダイアディックグリーン関数を用いて高次モードまで考慮した[3]．同軸線路と円筒キャビティの接合部，すなわち端面で磁界が連続という境界条件を用いて得られる積分方程式を解くことにより，以下のような反射係数の理論値 $\Gamma^l(\varepsilon)$ が導出された．

$$\Gamma^l(\varepsilon) = \frac{Y_0 - Y_{11}(\varepsilon)}{Y_0 + Y_{11}(\varepsilon)} \quad (1)$$

$$Y_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 - 2\pi}{\mu_0}} \ln \frac{b_2}{b_1} \quad (2)$$

$$Y_{11}(\varepsilon) = \frac{j4\pi\omega\varepsilon}{\left(a \ln \frac{b_2}{b_1}\right)^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\{J_0(\lambda_m b_2) - J_0(\lambda_m b_1)\}^2 \cos k_{z_m} d}{\lambda_m^2 J_1^2(\lambda_m a) k_{z_m} \sin k_{z_m} d} \quad (3)$$

ここで， $\varepsilon$ は液体試料の複素誘電率を， $\varepsilon_1$ は同軸線路の誘電率をそれぞれ表す．透磁率は $\mu_0$ とした．また， $b_1$ は同軸線路の内導体外径， $b_2$ は同軸線路の外導体内径， $a$ は円筒キャビティの内半径， $d$ は円筒キャビティの厚みを表す． $J_n$ は第 $n$ 次ベッセル関数であり， $\lambda_m$ は横方向の波数， $k_{z_m}$ は $z$ 方向の波数を表す．

次に，反射係数の測定について述べる．図2に示すネットワークアナライザによって測定される反射係数はPort 1の根元の部分の値であり，液体試料の間にある同軸線路の電気長などを補正する必要がある．基準試料短絡，空気，純水の3種類を用いた．反射係数の校正前と校正後のデータの一例を図4に示す．

誘電率の探索については，式(1)～(3)による反射係数の理論値 $\Gamma^l(\varepsilon)$ と測定値 $\Gamma^m$ の差の絶対値 $|\Gamma^l(\varepsilon) - \Gamma^m|$ が最小となる $\varepsilon$ をGenetic Algorithm法を用いて求めた．

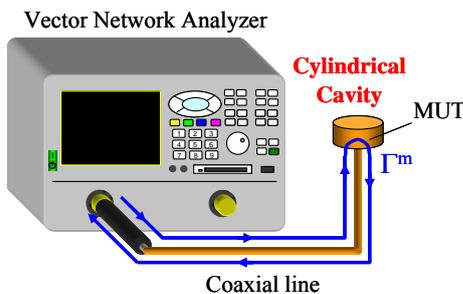


図2 円筒キャビティを用いた誘電率測定システム

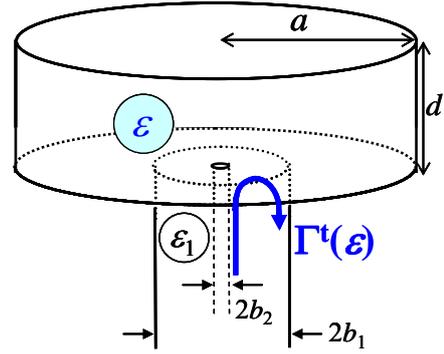


図3 同軸線路と円筒キャビティ

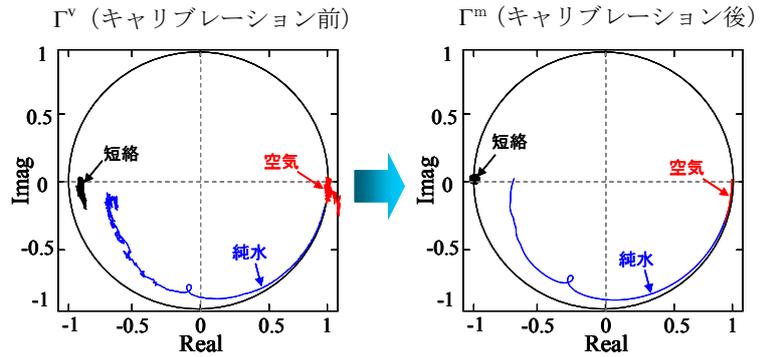


図4 キャリブレーションの一例

### 3. 誘電率測定の結果

測定に必要な主要パラメータを表1に示す．重量濃度10%のエタノールの複素比誘電率 $\varepsilon_r'$ ， $\varepsilon_r''$ の測定結果を図5に示す．これらは，最適解探索の判断基準を

$$|\Gamma^l(\varepsilon) - \Gamma^m| < 0.001 \quad (4)$$

として得られた値である．また比較のために，Agilent製の同軸プローブ(High Temperature Probe, 解析ソフトは85070E)による測定結果を同図に示す．この解析ソフトでは，同軸線路と半無限空間の構造(半無限モデル)における反射係数の厳密解が用いられている[2][4]．図5の結果より，一部の周波数では差はあるものの，円筒キャビティモデルと半無限モデルで得られた誘電率結果は概ね一致している．また同様に，塩化カリウム溶液(モル濃度0.2mol/l)の誘電率測定結果を図6に示す．これらの結果より，本稿で提案している円筒キャビティを用いた誘電率測定法が有効であることがわかった．

表1 各パラメータの値

周波数 $f$	0.2 – 18 GHz
温度	約 20 °C
円筒キャビティの半径 $a$	6.0 mm
円筒キャビティの厚み $d$	5.0 mm
容積	0.565 ml
内導体外径 $b_1$	0.5 mm
外導体内径 $b_2$	1.7 mm

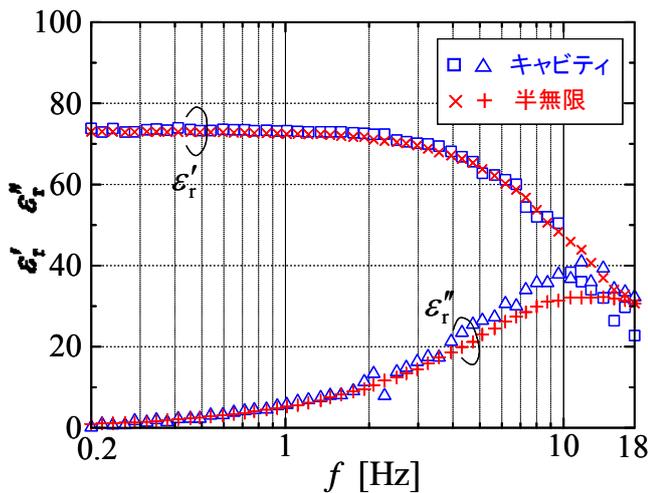


図5 エタノールの誘電率測定結果

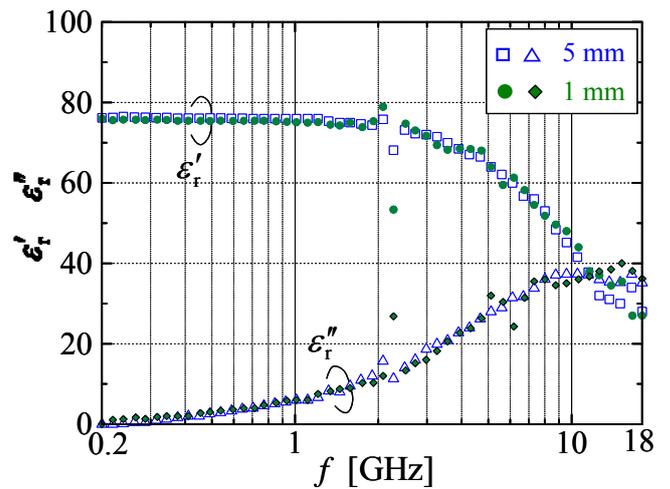


図7 エタノールの誘電率測定結果  
(寸法の違いによる比較)

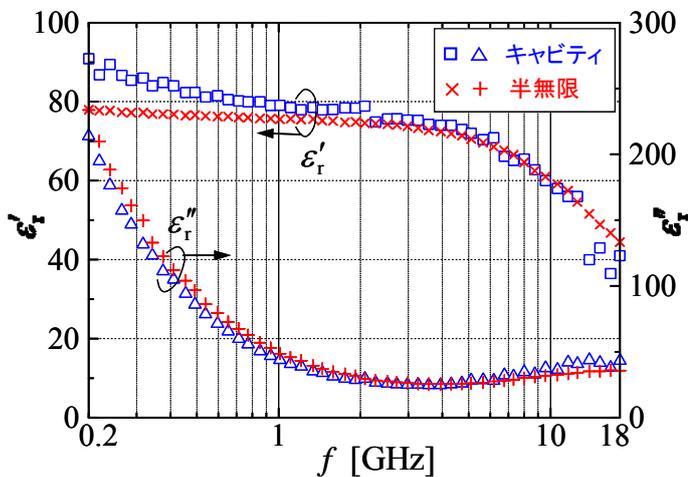


図6 塩化カリウム溶液の誘電率測定結果

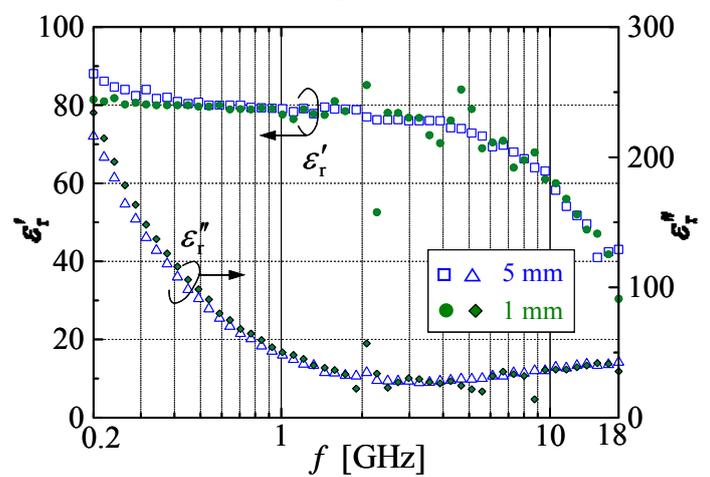


図8 塩化カリウム溶液の誘電率測定結果  
(寸法の違いによる比較)

次に、円筒キャビティの寸法を変えて測定した。厚み  $d$  を 5 mm から 1 mm とした。この寸法でエタノール（重量濃度 10%）の誘電率を測定した結果を図 7 に示す。比較のために厚み  $d = 5$  mm の結果も同時に示す。この結果から、厚み 1 mm と小さくした場合でも誘電率を測定できることがわかった。このとき、容積は 0.117 ml である。同様にして、塩化カリウム溶液（モル濃度 0.2mol/l）の測定結果を図 8 に示す。これらの結果より、円筒キャビティの寸法を変えて、体積を小さくしても誘電率測定は可能であることがわかった。

#### 4. まとめ

本稿では小容量円筒キャビティを用いた液体の誘電率測定システムについて検討した。半無限モデルを用いた誘電率測定システムとの結果を比較し、概ね一致することを確認した。広帯域（0.2–18 GHz）かつ小容量（0.565, 0.117 ml）で測定可能であることがわかった。また、更なる高精度化を図るには、円筒キャビティの

寸法を変えた測定や、透過係数  $S_{21}$  による検討が挙げられる。

#### 文献

- [1] 鈴木 誠, 宮崎 崇, “高分解マイクロ波誘電分光による筋肉タンパク周りの水の回転運動特性と筋肉収縮の分子メカニズム,” 生物物理, Vol.45 No.5, pp.295-301, 2007.
- [2] David V. Blackham, and Roger D. Pollard, “An Improved Technique for Permittivity Measurements Using a Coaxial Probe,” IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 46, No. 5, pp. 1093-1099, Oct. 1997.
- [3] Chen-To Tai, “Dyadic Green Functions in Electromagnetic Theory,” 2<sup>nd</sup> Edition, 1993.
- [4] H. Levine, and C. H. Papas, “Theory of the circular diffraction antenna,” J. Appl. Phys., vol. 22, no. 1, pp. 29-43, 1951.
- [5] Agilent, “誘電体の基礎,” 2005年6月.
- [6] 澤谷邦男, 電磁理論講義ノート, 2006年.
- [7] 安達三郎, 米山務, 電波伝送工学, 1981 初版.
- [8] 伊藤斉志, “遺伝的アルゴリズムの基礎,” オーム社, 1994.

- [9] 藤井勝巳, Sパラメータについて, 2003年5月.
- [10] B. Hasted, "Liquid water: Dielectric properties," in *The Physics and Physical Chemistry of Water: Water - A Comprehensive Treatise*, F. Franks, Ed. New York: Plenum, 1972, vol. 1, ch. 7, pp. 255-309.
- [11] Mingzhong Wu, Xi Yao, Liangying Zhang, "An improved coaxial probe technique for measuring microwave permittivity of thin dielectric materials," *Meas. Sci. Technol*, pp.1617-1622, October 2000.