

マイクロ波を利用した誘電率測定による エチレングリコール濃度の測定

熊谷 隆美*

市販の接触型誘電率測定プローブを使用したネットワークアナライザーで、エチレングリコール水溶液の誘電率を測定したところ、濃度と誘電率の間に相関があることがわかった。

キーワード：マイクロ波、誘電率、濃度

Concentration Measurement of Ethyleneglycol by Dielectric Constant Measurement Using Microwave

KUMAGAI Takami

In this paper, it is described that the correlation was observed between the concentration and dielectric constant of a water solution of ethyleneglycol by means of making the measurement of dielectric constant using network analyzer with the contact-type microwave probe.

key words : microwave, dielectric constant, concentration

1 緒 言

近年果実の糖度分析などに非接触分析として近赤外線を利用する方法が実用化されている。しかし赤外線到達深度は約10mmであり¹⁾、果皮の厚いメロン等には活用が困難である。一方、ネルソンらはマイクロ波利用による桃の糖度測定を接触型誘電率測定で検討している²⁾。マイクロ波は近赤外線に比べ長波長であり、厚い果皮等の果実も透過でき、近赤外線法の欠点を補える方法と考える。また、マイクロ波による誘電率は接触型及び非接触型プローブにより測定される。本報ではマイクロ波による果実の糖度分析法確立のため、市販の接触型誘電率測定プローブを用いて誘電率測定による水溶液濃度測定の可能性について検討した。接触型誘電率測定プローブの測定精度評価も兼ねるため、測定試料として誘電率が既知であるエチレングリコールを用いた。その結果、誘電率から算出される誘電正接とエチレングリコール濃度には0.995~0.999の高い相関が得られた。以下にその概要を説明する。

2 実験方法

2-1 原理

一般に、物質の誘電率は周波数特性をもち、以下のよう複素誘電率 ϵ^* で表される。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon'' \quad (1)$$

ここで実部 ϵ' は誘電率、虚部 ϵ'' は誘電損率、 j は虚数単位である³⁾。

また、誘電率 ϵ' と誘電損率 ϵ'' の間には以下の関係がある。

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (2)$$

ここで、 δ は損失角と呼ばれ、また $\tan \delta$ のことは誘電正接と呼ばれている³⁾。なお、誘電正接はコンデンサーの性能の尺度を表す誘電正接と同じである。

よって、式(2)を用いて式(1)は以下のように表される。

$$\epsilon^* = \epsilon' (1 - j \tan \delta) \quad (3)$$

* 電子機械部

次に、今回使用した接触型誘電率測定プローブの原理について説明する。図1に示すような同軸ケーブルの中心導体先端部を長さLだけ露出したような形状のモノポールアンテナの入力インピーダンス $Z(\omega, \epsilon_0)$ は、Lが波長 λ に比較して十分短くしかもaより大きいとして、自由空間では式(4)のように表される⁴⁾。

$$Z(\omega, \epsilon_0) = A\omega^2 + \frac{1}{j\omega C} \quad (4)$$

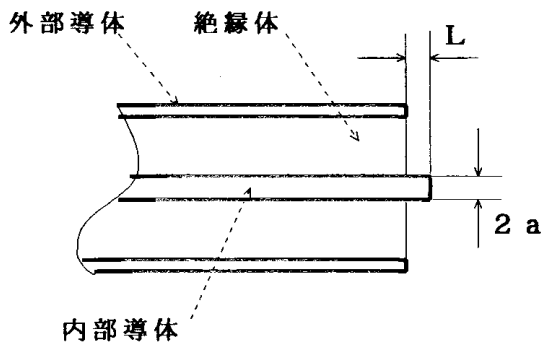


図1 モノポールアンテナの構造

ここで、 ω は角周波数($=2\pi f$)、 ϵ_0 は真空中の誘電率であり、AとCはアンテナ形状から定まる形状係数である。

次に、さらにLを短くしていくと式(4)の第1項は第2項に比較して十分小さくなり式(5)のように表される⁴⁾。

$$Z(\omega, \epsilon_0) = \frac{1}{j\omega C} \quad (5)$$

さて、このアンテナが複素誘電率 ϵ^* の媒質中に置かれたときの入力インピーダンス $Z(\omega, \epsilon^*)$ は式(6)のように表される⁴⁾。

$$Z(\omega, \epsilon^*) = \frac{1}{j\omega C \epsilon r' (1 - j \tan \delta)} \quad (6)$$

ここで、 $\epsilon r'$ は ϵ' を ϵ_0 で割ったもの($\epsilon r' = \epsilon' / \epsilon_0$)であり比誘電率と呼ばれている。同様に $\epsilon r'' (= \epsilon'' / \epsilon_0)$ を比誘電損率と呼ばれている。

以上のことより、式(6)においてCの値が既知であれば、入力インピーダンスの実部と虚部をネットワーク

アナライザーで測定することにより、 $\epsilon r'$ と $\tan \delta$ が計算できる。さらに $\epsilon r'$ と $\tan \delta$ がわかれば、式(2)の関係は $\epsilon r'$ と $\epsilon r''$ にも当てはまるため、 $\epsilon r''$ も計算できる。

2-2 誘電率測定方法

測定に使用したエチレングリコール溶液の濃度は、100, 80, 60, 40, 20% (容量%)である。その他に誘電率測定プローブの校正も兼ね純水も測定した。測定周波数は0.3~3GHzとし、測定項目は比誘電率と比誘電損率である。エチレングリコール溶液の濃度と測定周波数により、比誘電率と比誘電損率がどのように変化するか調べた。実験に使用した機器および試料は表1のとおりである。また、実験装置の概略を図2に示す。

表1 実験に使用した機器、試料

項目	内容
誘電率測定プローブ	HP 85070B
ネットワークアナライザー	HP 8719D
測定周波数	0.3~3GHz
測定試料	純水 エチレングリコール水溶液 (濃度は、100, 80, 60, 40, 20%)

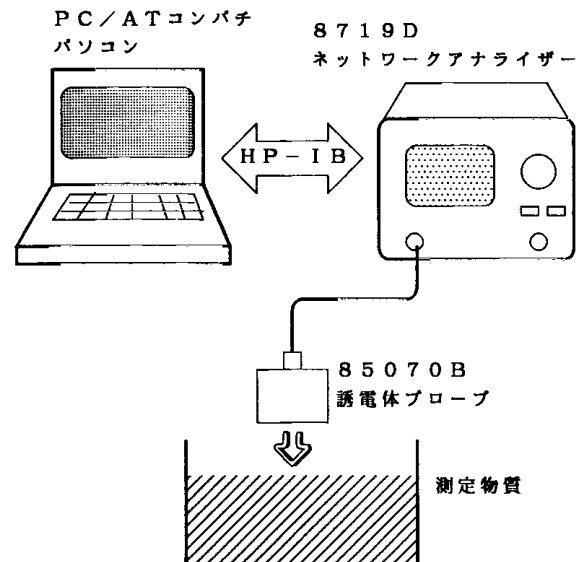


図2 実験装置の概略

3 実験結果

図3に比誘電率の測定結果を、図4に比誘電損率の測

マイクロ波を利用した誘電率測定によるエチレングリコール濃度の測定

定結果を示す。なお、グラフの凡例のEGはエチレングリコールの略である。図3より、周波数が高くなるにしたがい比誘電率が低下すること、エチレングリコール溶液の濃度が高くなるにしたがい比誘電率が低下することがわかる。また、図4より周波数が高くなるにしたがい比誘電損率が上昇すること、エチレングリコール溶液の濃度が高くなるにしたがい比誘電損率が上昇することがわかる。ただし、100%濃度のエチレングリコールでは、1.5GHz付近から比誘電損率がふたたび低下している。なお比誘電率の測定結果において、2.7GHz付近で測定値が小さくなるのは、測定に使用したネットワークアナライザの状態が完調ではなかったためと考えられる。

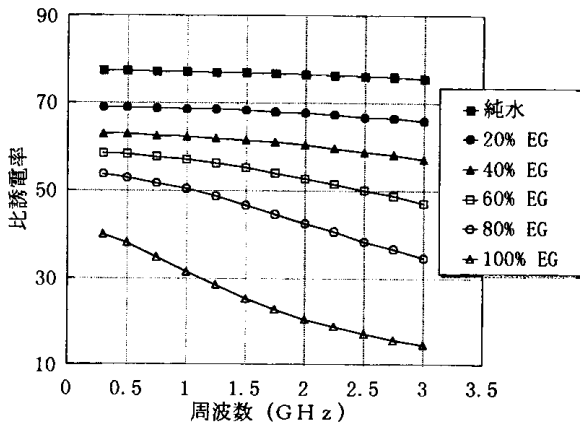


図3 比誘電率の周波数特性

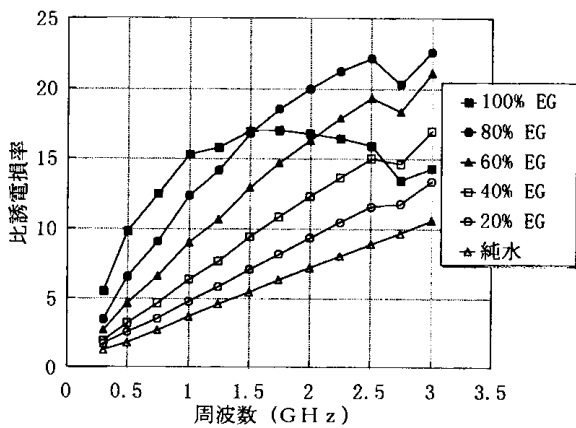


図4 比誘電損率の周波数特性

4 考察

4-1 接触型誘電率測定プローブの精度

純水と100%濃度のエチレングリコール溶液で、85070B型誘電率測定プローブの精度を比誘電率により評

価してみた。結果を表2に示す。測定に使用したネットワークアナライザの測定周波数範囲の問題もあり、周波数が同一ではないため正確な比較はできない。しかし図3より純水の場合、周波数により比誘電率がほとんど変化しないことを考慮すると精度は高いといえる。

表2 85070B型誘電率測定プローブの精度(比誘電率)

項目 試料	実験結果 (0.3GHz, 28℃)	既存値 (0.1GHz, 25℃)	誤差 (%)
純水	77.2	78.0 ⁴⁾	1.0
エチレングリコール	39.9	41.0 ⁵⁾	2.7

4-2 誘電率と濃度の相関

図3と図4の結果より式(2)を用いて誘電正接を計算した。結果を図5に示す。図5より、20~80%濃度のエチレングリコール溶液では、濃度が高くなるにしたがい誘電正接の値が指数関数的に増加していることがわかる。そこで周波数をパラメータとして誘電正接の対数値とエチレングリコール溶液濃度の相関を取ってみた。結果を図6に示す。図6より良い相関が得られていることがわかる。相関係数を計算したところ0.995~0.999の範囲にあり、エチレングリコール溶液では誘電正接を測定することにより、濃度を推定することが可能である。

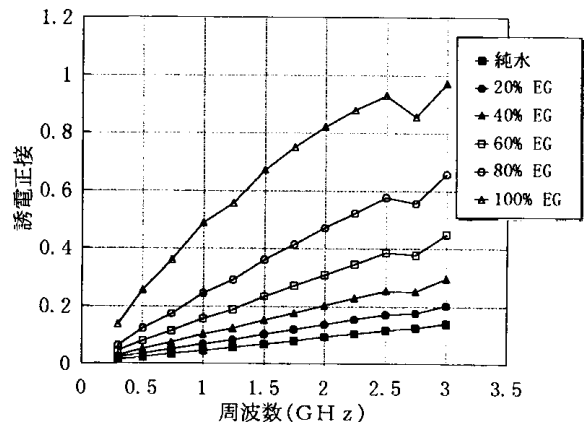


図5 誘電正接の周波数特性

5 結語

今回の実験から、エチレングリコール溶液の濃度と誘電正接の対数値間には直線性の高い相関があり、誘電正接を測定することにより、エチレングリコール溶液の濃

度を推定することが可能であることがわかった。

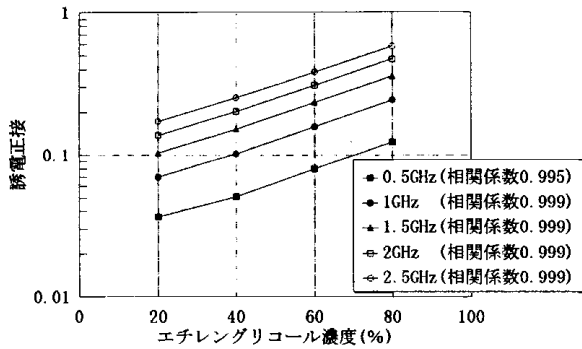


図6 エチレングリコール溶液濃度と誘電正接の相関

今後はショ糖や果糖などの水溶液濃度と誘電率の相関の関係、マイクロ波を用いた非破壊・非接触による誘電率測定方法の果実の糖度測定への応用について検討する予定である。

なお、本内容は中小企業大学校の6ヶ月研修中に電子技術総合研究所にて実習した内容である。また実習に当たり、ご指導戴いた電子技術総合研究所 光技術部 小見山 耕司主任研究官、古屋 克己通商産業技官に感謝致します。

文 献

- 1) 中村 隆一、本木 征治：“近赤外分光法によるトマトの内部品質の測定法” 研究成果情報 北海道農業 VOL. 1995 pp.216 (1996)
- 2) Stuart O. Nelson, W. Roy Forbus, Jr., Kurt C. Lawrence: “Assessment of Microwave Permittivity for Detecting Fruit Maturity” Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 347 pp. 279-280 (1994)
- 3) “85070B 誘電体プローブ・キット ユーザーマニュアル” ソフトウェアリファレンス 8-7
- 4) 宮川 道夫：“微小同軸プローブによる組織誘電特性の測定法” 電子情報通信学会論文誌 D VOL, J71-D No, 11 pp. 2451 (1988-11)
- 5) 工藤 雄一, 井上 浩：“100MHz帯における水の複素誘電率と伝搬定数” 電気学会研究会資料 計測研究会 IM-97-27 pp. 36 (1997)
- 6) 工藤 雄一, 井上 浩：“VHF帯の液体の誘電率の簡易計測” 電気学会研究会資料 計測研究会 IM-96-35 pp. 43 (1996)