

## マイクロ波を利用した誘電率測定によるブドウ糖濃度の測定

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、ブドウ糖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。また、高精度な測定を行うためには、測定周波数を5GHz以上に設定する必要がある。

キーワード：マイクロ波、誘電率、濃度

## Concentration Measurement of Grape Sugar by Dielectric Constant Measurement using Microwave

KUMAGAI Takami

In this paper, it is described that the correlation is observed between the concentration and dielectric constant of a water solution of grape sugar by means of making the measurement of dielectric constant using network analyzer with the contact-type microwave probe. And, it is necessary for accurate measurement to set up measurement frequency over 5GHz.

key words : microwave, dielectric constant, concentration

### 1 結 言

一般に、導体の物性定数として導電率があるのと同様に、絶縁体（誘電体とも言う）には、電界中に置いた時に物質の内部構造に応じて生じる電子分極に基づき誘電率が定義されている。誘電率の測定には種々の方法があるが、そのひとつとして絶縁体を2枚の電極間に挟みその静電容量を測ることで求められる。誘電率は物質の内部構造に大きく依存する定数と考えられることから、ブドウ糖の糖度も誘電率に大きく反映されているものと考えられる。前報<sup>1)</sup>において、著者はマイクロ波による果実の糖度分析技術確立研究として濃度の異なるエチレングリコール水溶液を用い、エチレングリコール濃度と各マイクロ波周波数における誘電正接の間には高い相関があることを報告した。

本報では前報の結果を踏まえて、果実の糖度分析により近いブドウ糖水溶液で濃度と誘電率の相関について検討した。その結果、エチレングリコール水溶液とは傾向が異なるもののブドウ糖水溶液濃度と誘電率の間に0.952~0.992の相関があることがわかった。また、測定周波数が高いほど高い相関が得られることがわかった。以下にその概要を報告する。

### 2 実験方法

#### 2-1 複素誘電率について

物質にマイクロ波等の電場を印加したときに電気分極を生じる性質を誘電性という。誘電性の起源としては永久双極子による配向分極、正負のイオンによるイオン分極、および原子の軌道電子の分布が原子核に対し相対的に変化することによる電子分極がある<sup>2)</sup>。この電気分極の強弱を表す係数として誘電率 $\epsilon$ が定義されている。

接触型誘電率測定プローブの例として図1のような半径 $b$ の外皮導体と半径 $a$ の中心導体の同軸円筒コンデンサーについて説明する。この2つの導体の間に誘電率 $\epsilon$ の物質を充填した場合の単位長さあたりの静電容量 $C$ は以下の式で表される<sup>3)</sup>。

$$C = \epsilon \frac{2\pi}{\log(b/a)} \quad (1)$$

よって静電容量 $C$ を測定することより誘電率 $\epsilon$ が計算できる。

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 $\epsilon^*$ で表される。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon'' \quad (2)$$

ここで実部 $\epsilon'$ は誘電率、虚部 $\epsilon''$ は誘電損率、 $j$ は虚数単位である<sup>4)</sup>。

\* 電子機械部

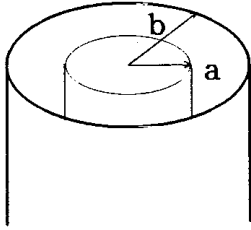


図1 同軸円筒コンデンサーの構造

また、誘電率  $\epsilon'$  と誘電損率  $\epsilon''$  の間には以下の関係がある。

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (3)$$

ここで、 $\delta$  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<sup>4)</sup>。ここで、実部  $\epsilon'$  は誘電体に交流電場を印加した場合、交流電場の変化に対しに同位相で追随する電気分極を表し、虚部  $\epsilon''$  は交流電場の変化に対し90度の位相遅れで追随する電気分極を表す<sup>5)</sup>。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(3)を用いて式(2)は以下のように表される。

$$\epsilon^* = \epsilon' (1 - j \tan \delta) \quad (4)$$

なお、誘電率  $\epsilon'$  を真空中の誘電率 ( $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ) で割ったものを比誘電率  $\epsilon_r'$  といい、誘電損率  $\epsilon''$  を真空中の誘電率で割ったものを比誘電損率  $\epsilon_r''$  という。

### 2-2 誘電率測定方法

測定に使用したブドー糖水溶液の濃度は飽和溶解度が30%前後であることを考慮して、5, 10, 15, 20, 25% (重量%) の5種類である。また、ブドー糖水溶液との比較のため純水も測定した。測定周波数は1~10GHzとし、測定項目は比誘電率  $\epsilon_r'$  と比誘電損率  $\epsilon_r''$  である。ブドー糖水溶液の各濃度について、周波数に対し比誘電率  $\epsilon_r'$  と比誘電損率  $\epsilon_r''$  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に示す。また、実験装置の概略図を図2に示す。

### 3 実験結果

図3に比誘電率  $\epsilon_r'$  の周波数特性の測定結果を、図4に比誘電損率  $\epsilon_r''$  の周波数特性の測定結果を示す。図3の結果では、いずれの濃度の場合でも周波数が高くなると比誘電率  $\epsilon_r'$  が低下すること、ブドー糖水溶液の濃度が高くなると比誘電率  $\epsilon_r'$  が低下することがわかる。また、図4の結果では周波数が高くなると比誘電損率  $\epsilon_r''$

が上昇すること、ブドー糖水溶液の濃度が高くなると比誘電損率  $\epsilon_r''$  が上昇傾向を示したが、比誘電率  $\epsilon_r'$  の場合に比較し比誘電損率  $\epsilon_r''$  の変化は小さくことが判った。これは前年度実験したエチレングリコール溶液の場合の比誘電損率  $\epsilon_r''$  のような大きな変化とは異なることが判った<sup>1)</sup>。

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	1~10GHz
測定試料	純水 ブドー糖水溶液 (濃度は、5, 10, 15, 20, 25%)

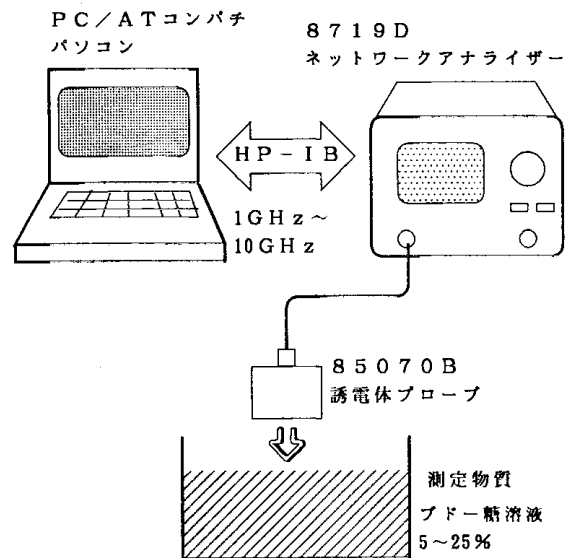


図2 実験装置の概略

### 4 考察

図3と図4の結果より式(3)を用いて誘電正接  $\tan \delta$  を計算した。結果を図5に示す。図5より、5~25%濃度のブドー糖水溶液では、濃度が高くなるにしたがい誘電正接  $\tan \delta$  の値が直線的に増加していることがわかる。また、前回測定したエチレングリコール溶液の誘電正接特性<sup>6)</sup>の傾向とは異なることがわかる。これは、ブドー糖の分子式が  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ <sup>7)</sup> であり分子量が180であるのに対

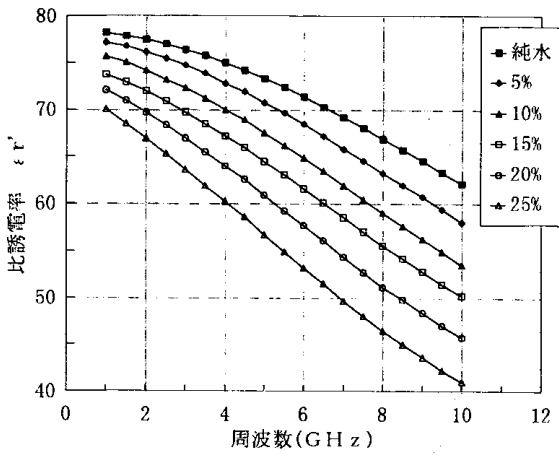


図3 各ブドウ糖濃度による比誘電率の周波数特性

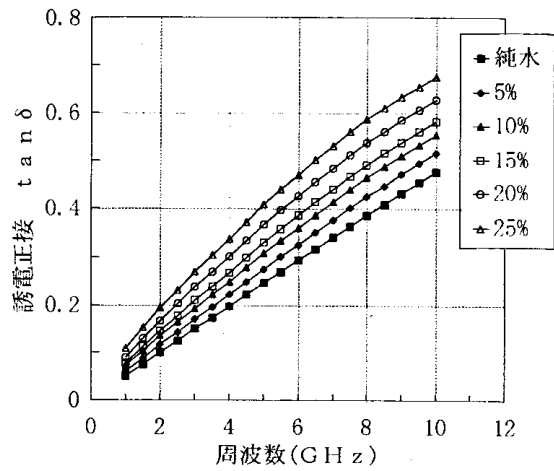


図5 各ブドウ糖濃度による誘電正接の周波数特性

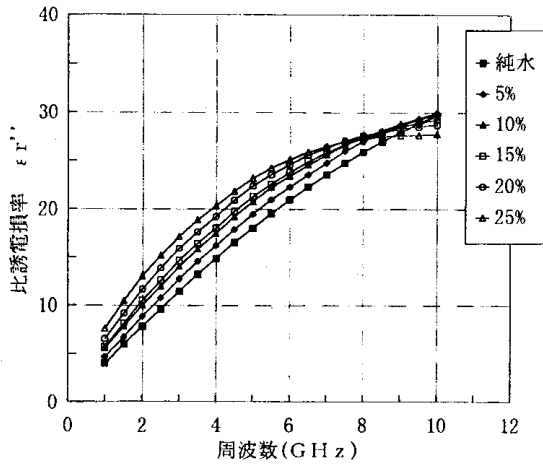


図4 各ブドウ糖濃度による比誘電損率の周波数特性

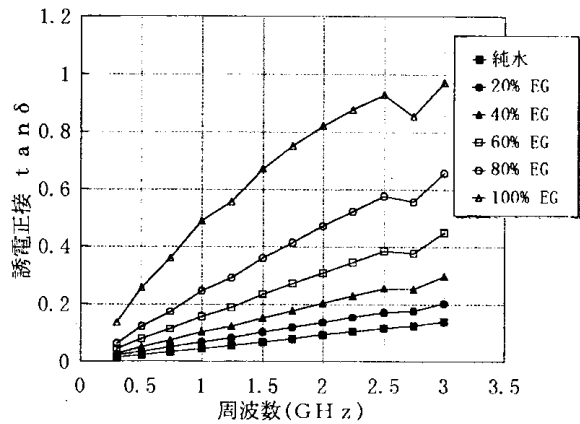


図6 エチレングリコール溶液の誘電正接

し、エチレングリコールの分子式が $C_2H_6O_2$ <sup>8)</sup>であり分子量が62の違いによると考えられる。即ち、誘電正接  $\tan \delta$  は溶媒と溶質の分子量差が大きければ周波数変化に対し大きく変化すると考えられる。次に、周波数をパラメーターとして誘電正接  $\tan \delta$  とブドウ糖水溶液濃度の関係をプロットしてみた。結果を図7に示す。図7から直線的関係になることが判った。相関係数を計算したところ0.952~0.992の範囲にあり、ブドウ糖水溶液でも誘電正接  $\tan \delta$  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。

さらに図7の結果より、測定周波数により相関係数がどのように変化するか調べた。結果を図8に示す。図8より5GHz以上で相関係数がほぼ0.990となり安定していることがわかる。高精度の測定を行うためには、測定周波数を5GHz以上に設定するほうがよいことがわかる。

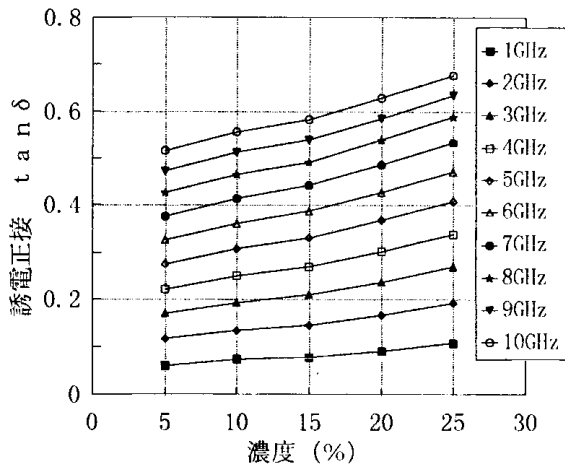


図7 ブドウ糖水溶液濃度と誘電正接の相関

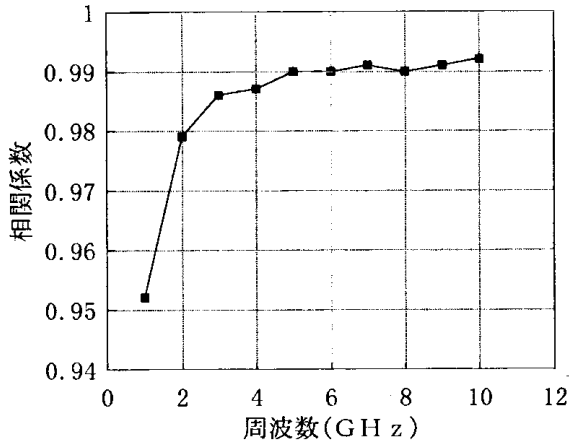


図8 ブドー糖濃度と周波数特性における相関係数変化

### 5 結 語

今回の実験から、ブドー糖水溶液の濃度と誘電正接  $\tan \delta$  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、ブドー糖水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。また、高精度の測定を行うためには、測定周波数を5GHz以上に設定する必要があることがわかった。

なお、本研究には平成9年度日本自転車振興補助物件

にて導入した放射電磁界イミュニティ試験設備を使用した。

最後に、本研究を進めるにあたり種々のご指導を戴いた岩手大学電気電子工学科の久保田 賢二講師、実験を進めるにあたり協力して戴いた電子技術総合研究所 光技術部 小見山 耕司主任研究官に感謝します。

### 文 献

- 1) 熊谷 隆美：“岩手県工業技術センター研究報告 第5号, pp. 31-34 (1998)
- 2) 応用物理学会：“応用物理用語大辞典” オーム社 pp. 970 (1998)
- 3) 後藤 憲一、山崎 修一郎：“詳解 電磁気学演習” 共立出版(株) pp. 58 (1970)
- 4) “85070B 誘電率プローブ・キット ユーザーズマニュアル” ソフトウェアリファレンス 8-7
- 5) 応用物理学会：“応用物理用語大辞典” オーム社 pp. 971 (1998)
- 6) 熊谷 隆美：“岩手県工業技術センター研究報告 第5号, pp. 33 (1998)
- 7) “化学大辞典3” 共立出版(株) pp. 140-141 (1963)
- 8) “化学大辞典1” 共立出版(株) pp. 908 (1963)