

マイクロ波を利用した非接触による水の比誘電率測定*

熊谷 隆美**、大坊 真洋***

6GHz ~ 12GHz のマイクロ波を利用したタイムドメイン法により、非接触での水の比誘電率測定を試みた。この測定結果から計算された水の誘電率は、前報の接触型誘電率測定プローブを用いた測定結果とほぼ同じ値であった。このことから、タイムドメイン法により非接触で水の比誘電率が測定可能であることが示された。

キーワード：マイクロ波、タイムドメイン法、誘電率

Non Contact Measurement of Water's Relative Dielectric Constant by Time-domain Method Using Microwave

KUMAGAI Takami and DAIBO Masahiro

Relative dielectric constant of water is measured by non-contact type probe in microwave frequency range (6GHz to 12GHz). The relative dielectric constant value is evaluated by time-domain method and is agreed with our previous report on contact type dielectric probe measurement. Therefore, non-contact method is applicable to measure the relative dielectric constant of water.

keywords: microwave, time-domain method, dielectric constant

1 緒 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分極に基づく誘電率がある。誘電率は絶縁体個々の特性を表す指針となるものであり、そのため誘電率の測定には種々の方法が考案されている¹⁾。しかし、応用となると電波吸収体の材料定数の測定²⁾など限られた分野にしか利用されていない。

前々報³⁾及び前報⁴⁾において、著者は誘電率の変化を食品などの等級選別に应用することを目的に、マイクロ波を利用した市販の接触型誘電率測定プローブを使用し、エチレングリコール水溶液およびブドウ糖水溶液の濃度と誘電率の相関について調べた。その結果両者ともに相関があることがわかり、誘電率の変化を食品などの等級選別に利用できる可能性を示した。しかし、等級選別に应用するためには、非破壊・非接触で誘電率を測定することが求められる。

本報では前報の結果を踏まえて、非接触で誘電率の測定が可能かどうかを確認するため、誘電率が既知である水を測定対象物として、マイクロ波による誘電率の測定を試みた。測定にはタイムドメイン法を使用し、マイクロ波の反射時間差から屈折率を測定し、その屈折率から

比誘電率を計算した。その結果、良好な結果が得られたので以下にその概要を報告する。

2 実験方法

2 - 1 原理

2 - 1 - 1 伝搬時間と屈折率

図1において、マイクロ波が大気中や試料中を伝搬したとき、受信波の到達時間差と屈折率の関係は、試料の複素屈折率を n とすると、その実部 n' と虚部 n'' を用いて $n = n' - j n''$ と表される。そして、厚みが D の試料を透過するときの伝達時間を t とすると

$$t = n' D / c \quad (1)$$

となる。ここで c は光の速度である。

次に試料の各層境界からの反射波の到達時間を t_1 、 t_2 とし、試料の厚みを D としたとき、 t_1 、 t_2 と n' 、 c の関係は次式で与えられる。

$$t_0 - t_1 = 2 D / c \quad (2)$$

$$t_2 - t_0 = 2 (n' - 1) D / c \quad (3)$$

* アクティブセンシングによる非破壊検査システムの開発（第1報）（地域活性化連携促進事業補助金技術開発研究事業）

** 電子機械部（現在 岩手県立産業技術短期大学校電子技術科）、*** 電子機械部

ここで、 t_0 は試料が無い場合の金属板からの反射波の到達時刻である。 t_0 を基準としたときの相対的な到達時間をそれぞれ t_1' 、 t_2' として、上の2式より D を消去すると、式(4)が得られる。

$$n' = 1 - t_2' / t_1' \quad (4)$$

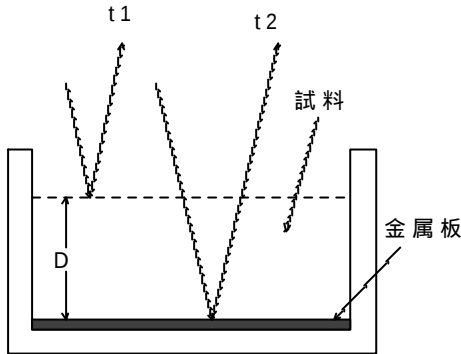


図1 円形容器を用いた屈折率の測定

よって、到達時間 t_0 、 t_1 、 t_2 を計測することにより、 n' が求められる⁵⁾。

2-1-2 侵入の深さ

侵入の深さ δp とは、電波が試料中に侵入し伝搬するとき、電波の電力が $1/e$ に減衰する深さを示す。 $k(z)$ を深さ z の点における減衰定数とすると、 z 点での電力は次式のようにになる。

$$P(z) = P(0+) \exp \left\{ - \int_0^z k(z) dz \right\} \quad (5)$$

ここで、 $P(0+)$ は試料の表面直下($z = 0+$)の点における電力である。これより、侵入の深さの定義から、

$$P(\delta p) / P(0+) = 1 / e \quad (6)$$

と表される。さらに、試料が均一で減衰定数が k と見なせるとき $k(z) = k$ とおけるので、式(5)は次式のようにになる。

$$P(z) = P(0+) \exp(-kz) \quad (7)$$

さらに、両辺をデシベル表示すると次式のようにになる。

$$10 \log P(0+) - 10 \log P(z) = 4.343 k z \quad (8)$$

上式の右辺は、表面から深さ z に侵入したときの電波の減衰量をデシベル表示したものとなる。これを Δ (dB)とすると、侵入の深さ δp の定義より

$$\delta p = 1 / k = 4.343 z / \Delta \quad (9)$$

で与えられる。よって、侵入の深さは式(9)の z に電波が試料を通過した距離 D と、そのとき受ける減衰量(dB)を Δ に代入して求めることができる⁵⁾。

2-1-3 複素誘電率の計算

複素比誘電率 ϵ_r を実部 ϵ_r' と虚部 ϵ_r'' を用いて $\epsilon_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r''$ と表すと、これらは次の近似式で求められる⁵⁾。

$$\epsilon_r' = (n')^2 \quad (10)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{\lambda \sqrt{\epsilon_r'}}{2 \pi \delta p} \quad (11)$$

ここで、 λ は電波の波長である。

2-2 屈折率測定方法

測定方法は、図1のように底面に金属板を貼付けた容器を用意し、水がある場合と無い場合のマイクロ波の反射時間をネットワークアナライザのタイムドメイン計測で測定し、反射時間の差から水の屈折率を求め、屈折率から誘電率を計算した。円形容器はアクリル樹脂製で外径30cm、内径29cm、深さ5cmで、底にはステンレス板を貼ってある。

測定周波数は6GHzから12GHzとし、送信出力は約10dBmとした。まず、ネットワークアナライザのポート1とポート2のケーブルを接続し、レスポンス校正のスルーの項目でキャリブレーションをとる。次にケーブルをホーンアンテナに接続し、水を入れない容器をホーンアンテナの中央に置き、一方のホーンアンテナから照射したマイクロ波が容器の金属底板に反射し、他のホーンアンテナで受信できるようにし、反射したマイクロ波の到達時間と強度を測定する。次に容器に試料の水を入れ、水面からの反射波と水を透過し金属底板からの反射波の到達時間と強度を測定する。このようにして、マイクロ波の到達時間の差と強度の差を計測する。なお、不要な電波の反射を避けるため、内部に電波吸収体を貼った電波無響箱内で測定を行った。実験に使用した機器を表1、実験装置の概要を図2、実験装置の写真を図3に示す。

表1 実験に使用した機器

項目	内容
測定周波数	6 GHz ~ 12 GHz
送信出力	約 10 dBm
ネットワークアナライザ	hp 8719D
出力増幅アンプ	hp 83006A
ホーンアンテナ	アステック 3115
使用ケーブル	sucoflex SF104-18

マイクロ波を利用した非接触による水の比誘電率測定

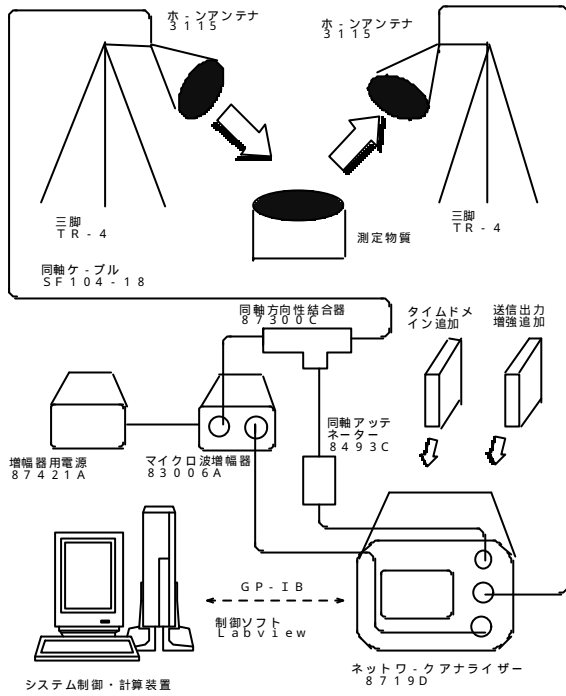


図2 実験装置の概要

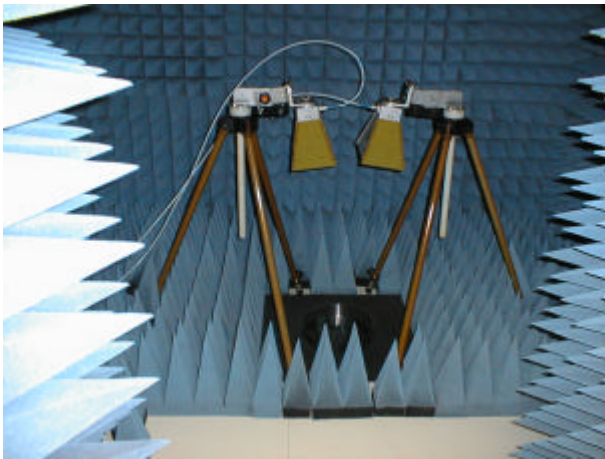


図3 実験装置の写真

3 実験結果

図4に容器が空の場合のタイムドメイン計測の結果を示す。横軸は送信アンテナから放射されたマイクロ波が反射し受信アンテナに到達するまでの時間を示す。縦軸は受信したマイクロ波の強度を示す。図4のピークM0は容器の金属底板で反射したマイクロ波を示しており、到達時間は12.593ns、受信強度は-57.74dBである。

図5に容器に水を入れた場合のタイムドメイン計測結果を示す。ピークM1が図4のM0より早い時間に計測されているが、これが水の表面で反射したマイクロ波であり、到達時間は12.401ns、受信強度は-59.82dBである。また、ピークM2は最も時間がかかっているため、水を透過し金属底板で反射したマイクロ波であり、到達時間は14.100ns、受信強度は-77.32dBである。以上の結果を表2にまとめて示す。

表2 各境界からの受信時間と受信強度

項目	記号	受信時間 (ns)	受信強度 (dB)
水が無い場合の金属板からの反射	M0	$t_0 = 12.593$	-57.74
水表面からの反射	M1	$t_1 = 12.401$	-59.82
水を透過し金属板からの反射	M2	$t_2 = 14.100$	-77.32

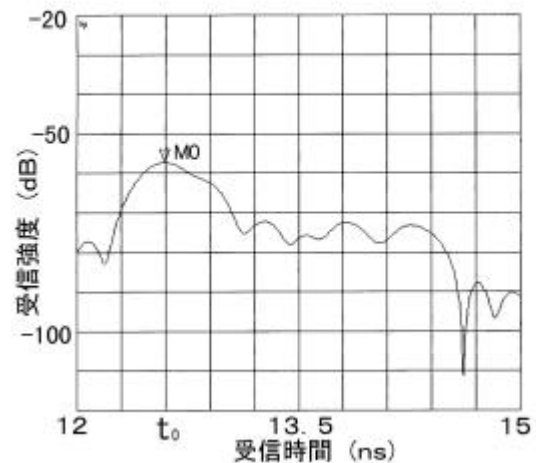


図4 水が無い場合のタイムドメイン計測結果

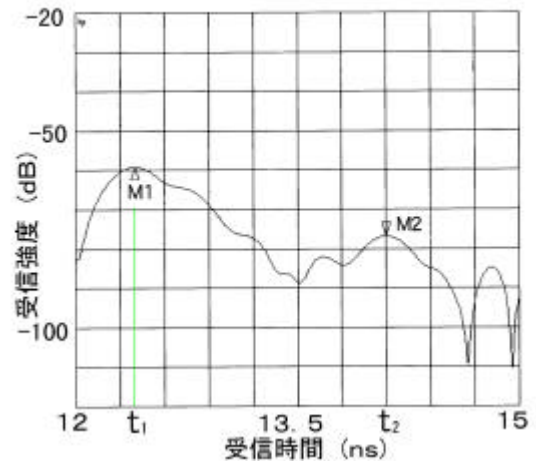


図5 水を入れた場合のタイムドメイン計測結果

4 考 察

以上の実験結果から、比誘電率の計算を行った。図4の水がない場合の反射時間 t_0 を基準とした場合、図5の水の水面からの反射到達時間は次のようになる。

$$t_1' = 12.401 - 12.593 = -0.192\text{ns} \quad (12)$$

また、図5の水を透過した反射到達時間は次のようになる。

$$t_2' = 14.100 - 12.593 = 1.507\text{ns} \quad (13)$$

式(12)と式(13)の結果を式(4)に代入すると複素屈折率の実部 n' は次式のようになる。

$$n' = 1 - 1.507 / (-0.192) = 8.85 \quad (14)$$

この値を式(10)に代入すると、水の比誘電率の実部 ϵ_r' は次式のようになる。

$$\epsilon_r' = (8.85)^2 = 78.32 \quad (15)$$

次に、図5のM1とM2のマイクロ波受信強度の差は、水を透過したことによるマイクロ波の減衰量(dB)である。従って Δ は次のようになる。

$$\Delta = 77.32 - 59.82 = 17.50\text{dB} \quad (16)$$

また、実験に用いた水の深さは13.5mmであったため式(9)より侵入の深さ δp は次式のようになる。

$$\delta p = 4.343 \times 2 \times 13.5 / 17.50 = 6.70\text{mm} \quad (17)$$

よって式(11)より水の比誘電率の虚部 ϵ_r'' は次式のようになる。

$$\epsilon_r'' = \frac{3 \times 10^8 / 9 \times 10^9 \times (78.32)^{1/2}}{2\pi \times 6.70 \times 10^{-3}} = 7.01 \quad (18)$$

ここで、マイクロ波の波長 λ は測定周波数を6GHzから12GHzとしたため、中間の9GHzの値とした。純水の比誘電率は実部が約80、虚部が約 $12^{(3)}$ であることから、マイクロ波を使用し非接触で比誘電率の測定が可能といえる。

なお、図4及び図5において反射波のピークがなだらかで明確なピークを捉えにくい。これは、タイムドメイン法が周波数領域を時間領域に逆フーリエ変換していることに起因する。すなわち、分解能を上げるには掃引周波数の範囲を広げる必要があり、これにより測定精度の向上が期待できる。

5 結 語

今回の実験から、タイムドメイン法を使用して複素屈折率を求め、複素屈折率から複素誘電率を計算することで非接触で水の誘電率が測定可能であることがわかった。

今後、測定周波数範囲を広げてより高精度な測定を可能にするとともに、様々な誘電率や形状の測定対象についてデータを蓄積し、非接触検査法としての可能性について検討を行う予定である。

最後に、本研究を進めるにあたり種々の指導を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。

なお、本研究は中小企業庁地域活性化連携促進事業補助金技術開発研究事業により行われたものである。

文 献

- 1) 清水 康敬、杉浦 行：“電磁妨害波の基本と対策”(社)電子情報通信学会 PP.101-118(1995)
- 2) 橋本 修：“電波吸収体入門”森北出版(株) PP.78-89(1997)
- 3) 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)
- 4) 熊谷 隆美：“岩手県工業技術センター研究報告第6号” PP.25-28(1999)
- 5) 橋本 修：“マイクロ波・ミリ波帯における測定技術”(株)リアライズ社 PP.125-130(1998)