

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560393

研究課題名（和文） 自然土壌のマイクロ波帯複素誘電率計測システムの開発

研究課題名（英文） Relative dielectric constant measurement system for natural soil in microwave region

研究代表者

木村 宏 (KIMURA HIROSHI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40262753

研究成果の概要（和文）：自然土壌のマイクロ波帯複素比誘電率を計測できる終端開放同軸線路型プローブとデータ処理法を開発した。測定プローブの幾何学に基づいた等価回路を構築し、測定量である反射係数と導波管内に充填する測定媒質の複素比誘電率との間の関係を導出した。この関係を利用して媒質の複素比誘電率を算出する。水分量を変えた試料を用いて、土壌水分に応じた複素比誘電率実部と虚部の変化の計測を確認した。レーダリモートセンシングの分野では土壌水分計測が重要なテーマで、そこではレーダ後方散乱 \leftrightarrow 誘電率 \leftrightarrow 水分量の関係が利用される。誘電率はマイクロ波散乱に直接関係するパラメータであり、さらに本方法は液体の誘電率計測にも適用可能であるため、マイクロ波散乱研究での利用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：An open-ended coaxial probe and its data processing method are developed for measuring the dielectric constant of natural soil. An equivalent circuit of the probe is built based on its geometry, and relations among the reflection coefficient (measurement), the complex dielectric constant of the medium filled in the probe and others are derived. Using the relations, a relative dielectric constant of the medium is calculated. Measurements of real and imaginary parts of the dielectric constant with different water contents are demonstrated. In radar remote sensing, measurement of soil water content is an important issue, where the relation, radar backscatter \leftrightarrow dielectric constant \leftrightarrow water content is utilized. The dielectric constant is directly related to microwave scattering, and furthermore this probe and method are applicable for liquid media. This research is expected to expand its use in the field of microwave scattering.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測工学，誘電体物性，マイクロ波，土壌

1. 研究開始当初の背景

国内・国外のマイクロ波リモートセンシングの分野では、地球環境の監視の一対象とし

て土壌水分への関心が高い。特に欧米では、理論解析および実験解析が精力的に行われていた。土壌水分は複素誘電率に直接関係す

るため、理論解析では土壤水分が複素誘電率に置き換えられて扱われおり、自然状態土壤の複素誘電率計測に対する要求が強かった。また、地中レーダのデータ処理では、最終的品質と計測精度に土壤の誘電率の精度が大きく関係する。さらに通信の分野では、電波の伝搬経路中における反射や減衰は、雨、土、雪、コンクリート等の媒質の電気的特性に大きく依存する。これらは、一般的に不均質な媒質であり、ラボラトリ計測が困難な対象である。自然状態土壤の複素誘電率の計測は、主目的とするマイクロ波リモートセンシング以外の分野においても貢献が大きいと考えられた。

2. 研究の目的

誘電性媒質のマイクロ波帯における複素誘電率は、マイクロ波リモートセンシングや電波技術分野のみならず、基本的な物理量の分野においても重要なテーマである。本研究は、ラボラトリ計測ができない自然状態にある空気、水との混合媒質の代表である自然状態土壤のマイクロ波帯における複素誘電率計測システムの開発を目的とする。

3. 研究の方法

測定媒質を充填した終端開放同軸線路の反射係数が媒質の複素誘電率で決まることを利用する。ネットワークアナライザで周波数を走査して反射係数を計測し、これを周波数-複素比誘電率に変換する。自然状態土壤を主対象にし、下記の課題を解決する。

- (1) プロープ
- (2) 信号処理

4. 研究成果

研究方法で示した2課題についての成果を述べる。

(1) プロープ

プロープの基本形は同軸線路と同一構造である(図1(a))。本構造で基本的な計測法について検討したが、本構造は自然土壤の計測には適さない。そこで、外導体の肉厚を薄くし、かつ開口部を斜めの切り口とした改良形を検討した(図1(b))。同一媒質の計測比較の結果、形状の違いは計測結果に影響しないことを確認した。なお、改良形は基本形に比べて格段に自然土壤への対応が改善したが、特にきめが細かく柔らかい土壤に適し(図1(b))、まだ全ての土壤に対して万能ではない。

(2) 信号処理

(2-a) 等価回路

終端開放同軸線路プロープの等価回路に図2を用いた。



(a) 基本形



(b) 改良形

図1 プロープ

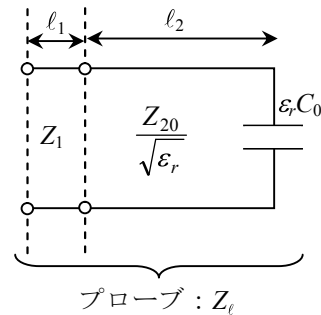


図2 プロープ等価回路

ここで、 Z_1 はプロープ内ケーブルの特性インピーダンス、 Z_{20} は空気を充填した場合のプロープ内伝送線路特性インピーダンス、 l_1 はプロープ内ケーブル長、 l_2 はプロープ内伝送線路長、 ϵ_r はプロープ充填媒質の複素比誘電率、 C_0 はプロープ内伝送線路に空気を充填した場合の開放端静電容量である。

計測量である反射係数 Γ (S11)とプロープへの接続ケーブルの特性インピーダンス Z_0 、プロープ全体の特性インピーダンス Z_l の間には次の関係がある。

$$\Gamma = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0}$$

周波数を f とすれば、各パラメータは次式で表せる。

$$\begin{aligned} Z_l(f, \epsilon_r, Z_1, Z_2, C_0, \beta_1, \beta_2, l_1, l_2) \\ = Z_1 \frac{1 + \Gamma_m(f, \epsilon_r, Z_1, Z_2, C_0, l_2) e^{-j2\beta_1(f)l_1}}{1 - \Gamma_m(f, \epsilon_r, Z_1, Z_2, C_0, l_2) e^{-j2\beta_1(f)l_1}} \end{aligned}$$

$$\Gamma_m(f, \epsilon_r, Z_1, Z_2, C_0, l_2) = \frac{Z_m(f, \epsilon_r, Z_2, C_0, l_2) - Z_1}{Z_m(f, \epsilon_r, Z_2, C_0, l_2) + Z_1}$$

$$Z_m(f, \epsilon_r, Z_2, C_0, l_2) = Z_2(f, \epsilon_r) \frac{1 + \Gamma_n(f, \epsilon_r, Z_2, C_0) e^{-j2\beta_2(f, \epsilon_r) l_2}}{1 - \Gamma_n(f, \epsilon_r, Z_2, C_0) e^{-j2\beta_2(f, \epsilon_r) l_2}}$$

$$\beta_2(f, \epsilon_r) = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r(f)}}{c}$$

$$\Gamma_n(f, \epsilon_r, Z_2, C_0) = \frac{1 - j2\pi f \epsilon_r(f) C_0 Z_2(f, \epsilon_r)}{1 + j2\pi f \epsilon_r(f) C_0 Z_2(f, \epsilon_r)}$$

$$Z_2(f, \epsilon_r) = \frac{Z_{20}}{\sqrt{\epsilon_r(f)}}$$

$$Z_{20} = 60 \ln \frac{b}{a}$$

ここで、 β_1 はプローブ内ケーブルの伝搬定数、 Z_2 と β_2 を媒質を充填した場合のプローブ内伝送線路の特性インピーダンスと伝搬定数、 a と b はそれぞれ内導体と外導体内側の半径である。

(2-b) 測定手順

上式の関係において、計測量は反射係数 Γ 、既知あるいは別途計測可能なパラメータは Z_0 、 Z_1 、 Z_{20} 、 l_2 、 β_1 である。 l_1 と C_0 は最初未知パラメータであるが、空気($\epsilon_r = 1 + j0$)を充填したときの測定値 Γ を用いてこれらの値を決定する。続いて、測定媒質を充填して反射係数 Γ を計測し、上式の関係を用いて媒質の複素比誘電率 ϵ_r を算出する。

(2-c) 測定結果

試料の土の体積水分量を、①0%、②5%、③10%と変化させた場合の複素比誘電率の測定結果を表1に示す。使用したプローブは改良形(図1(b))で、その形状パラメータは、全て $a=0.81$ [mm]、 $b=12$ [mm]、 $l_2=28$ [mm]である。理科年表によれば乾燥土の比誘電率は実部3、虚部0(20℃, 1MHz)であり、表1の結果はそれと一致する。土の誘電率は、厳密には成分比によって変わる。体積水分量10%の1.4GHzにおける参考値(実部0.5~0.6, 虚部-0.4~-0.9, F. Ulaby, et al, Microwave Remote Sensing, vol II, Artech House, 1982)ともの良好な一致を確認できる。

図3は、5%水分量の試験土について測定

反射係数と算出した複素比誘電率(表1)に基づく反射係数理論値を振幅(上図)と位相(下図)のそれぞれで比較したものである。複素比誘電率の実部は反射係数位相を、虚部は振幅を支配するが、算出した両成分が振幅と位相の両測定結果を正しく説明できていることが分かる。

表1 土の複素比誘電率測定結果

周波数 [GHz]	体積水分量		
	0%	5%	10%
0.002	3.1-j0.1	4.2-j0.2	5.7-j0.3
1.0	3.1-j0.1	4.2-j0.3	5.7-j0.4
2.0	3.1-j0.1	4.2-j0.3	5.7-j0.5
3.0	3.1-j0.1	4.2-j0.3	5.7-j0.6
4.0	3.1-j0.1	-	-

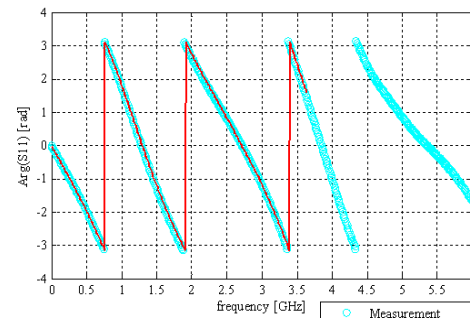
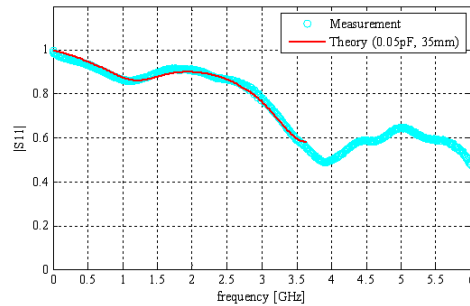


図3 5%水分量の土の測定結果

本プローブはTEMモードで動作するため、測定限界周波数は次式となる。

$$f_c = \frac{c}{\pi \sqrt{\epsilon_r} (a+b)}$$

本プローブは液体媒質の測定も可能であるが、固い土壌の測定にはまだ不適であることが今後の課題となる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕（計 1 件）

- (1) H. Kimura, “Open-ended coaxial probe for in-situ measuring the dielectric constant of soft earth media,” 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011 年 7 月, バンクーバー (カナダ).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 宏 (KIMURA HIROSHI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40262753