土壌の周波数依存導電率および比誘電率の二平板電極による測定

学生員 吉村 貴広* 正員 長岡 直人*

正員 馬場 吉弘* 正員 雨谷 昭弘*

Measurement of Frequency-Dependent Conductivity and Relative Permittivity of a Soil Using Two Parallel Electrodes

Takahiro Yoshimura*, Student Member, Naoto Nagaoka*, Member, Yoshihiro Baba*, Member, Akihiro Ametani*, Member

Impedance of cylindrical specimens of a soil having three different lengths is measured at frequencies ranging from 40 Hz to 40 MHz using two parallel electrodes in order to estimate and remove the effect of the contact impedance. Both conductivity and relative permittivity of the tested soil increase with increasing the moisture ratio. The conductivity of the soil having a moisture ratio of 5% is almost constant (about 3 mS/m) at frequencies lower than 10 MHz, and increases with increasing frequency beyond 10 MHz. The relative permittivity of the same soil decreases with increasing frequency up to 10 MHz, at which it is 7.

キーワード：導電率，周波数依存，接地，比誘電率，土壌

Keywords: conductivity, frequency dependence, grounding, relative permittivity, soil

1. 緒 言

土壌の電気的特性が明らかであれば、FDTD 法等を用いた電磁界解析により、設備設計時に接地インピーダンスについての定量的な検討が可能となる。文献(1)では、板状の岩盤サンプルを平行ストリップ線路に挿入し、線路方向の電磁波伝搬速度と減衰定数を測定することによって、13 MHz～550 MHz の周波数範囲における岩盤の導電率と比誘電率を求めている。13 MHz 以下の範囲においては、岩盤サンプルの抵抗と静電容量の測定結果からそれらを求めている。電極と岩盤サンプル間の接触インピーダンスについては、線路長および幅が、厚さに比べて充分大きいと、その影響は小さいものと仮定している。本稿では、二平行平板電極に土壌サンプルを挟み、電極間距離の異なる3ケースで電極間インピーダンスの周波数特性を測定し、得られた結果から接触インピーダンスを除去した土壌サンプルの導電率と比誘電率の周波数特性を算出したので報告する。

2. 測定法と導電率，比誘電率の算出法

図1に測定回路⁽²⁾を示す。半径50 mmの二平行平板アルミ電極間に土壌サンプルを挟み、40 Hz から40 MHz の範囲で電極間のインピーダンス(振幅と位相)をインピーダンスアナライザ(Agilent 4294 A)を用いて測定した。電極間距離は18, 38 および58 mm の3ケースとした。電極と土壌の接触インピーダンスを一定にするため、測定時には上

図1 測定回路図

Fig. 1. A measuring circuit.

部電極板の上に錘を置き、5.6 kPa で加圧した。土壌サンプルは同志社大学京田辺校地リザーブ用地から採取し、含水率 $\alpha (= W_w/W_a \times 100 : W_w$ は土壌に含まれる水分の質量, W_a は水分も含めた土壌の全質量) を調整した後測定を行った。電極間インピーダンス $\dot{Z}_i [\Omega]$ は(1)式によって表される。

$$\begin{aligned} \dot{Z}_i &= \dot{Z}_m l_i / S + 2\dot{Z}_c / S \\ &= \frac{\text{Re}(\dot{Z}_m) + j \text{Im}(\dot{Z}_m)}{S} l_i + 2 \frac{\text{Re}(\dot{Z}_c) + j \text{Im}(\dot{Z}_c)}{S} \quad [\Omega] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\dot{Z}_m$ は断面積 1 m^2 、長さ 1 m あたりの土壌のインピーダンス $[\Omega \text{m}]$ 、 $\dot{Z}_c$ は断面積 1 m^2 あたりの電極と土壌の間の接触インピーダンス $[\Omega \text{m}^2]$ 、 l_i は電極間距離 $[\text{m}]$ 、 S は電極面積 $[\text{m}^2]$ である。なお(1)式において、上下の電極における接触インピーダンスは等しいと仮定している。

(1)式で明らかのように $\dot{Z}_i$ の実部と虚部のそれぞれが電極間距離 l_i の一次関数で与えられる。 l_i の異なる3点 ($N=3$) の測定結果の実部と虚部のそれぞれに最小二乗法を適用することで、 $\dot{Z}_m [\Omega \text{m}]$ が以下のように求まる。

* 同志社大学工学部電気工学科
〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3
Department of Electrical Engineering, Doshisha University
1-3, Miyakodani, Tatara, Kyotanabe 610-0321

図2 規格化した土壌インピーダンス $\dot{Z}_m$ の周波数特性
Fig. 2. Frequency characteristics of $\dot{Z}_m$.

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}(\dot{Z}_m) &= \frac{N \sum_{i=1}^N l_i \cdot \text{Re}(\dot{Z}_i) - \sum_{i=1}^N l_i \cdot \sum_{i=1}^N \text{Re}(\dot{Z}_i)}{N \sum_{i=1}^N l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N l_i \right)^2} \times S \quad [\Omega m] \\ \text{Im}(\dot{Z}_m) &= \frac{N \sum_{i=1}^N l_i \cdot \text{Im}(\dot{Z}_i) - \sum_{i=1}^N l_i \cdot \sum_{i=1}^N \text{Im}(\dot{Z}_i)}{N \sum_{i=1}^N l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N l_i \right)^2} \times S \quad [\Omega m] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式より, $\dot{Z}_m$ は次式のようにも表される。

$$\left. \begin{aligned} |\dot{Z}_m| &= \sqrt{\text{Re}(\dot{Z}_m)^2 + \text{Im}(\dot{Z}_m)^2} \quad [\Omega m] \\ \theta_m &= \frac{180}{\pi} \arctan \frac{\text{Im}(\dot{Z}_m)}{\text{Re}(\dot{Z}_m)} \quad [\text{deg.}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式より, $\dot{Z}_m$ [Ωm] の逆数として, 断面積 1 m², 長さ 1 m あたりの土壌のアドミタンス $\dot{Y}_m$ [S/m] は次式のように与えられる。

$$\dot{Y}_m = 1/\dot{Z}_m = \text{Re}(\dot{Y}_m) + j \text{Im}(\dot{Y}_m) \quad [\text{S/m}] \quad \dots\dots\dots (4)$$

一方, 導電率 $\sigma(\omega)$, 比誘電率 $\epsilon_r(\omega)$, 断面積 S [m²], 長さ l [m] の均質土壌のアドミタンスは次式で与えられる。

$$\dot{Y}_m S/l = [\sigma(\omega) + j\omega\epsilon_0\epsilon_r(\omega)]S/l \quad [\text{S}] \quad \dots\dots\dots (5)$$

(4), (5) 式より, $\sigma(\omega)$ および $\epsilon_r(\omega)$ は次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma(\omega) &= \text{Re}[Y_m(\omega)] \quad [\text{S/m}], \quad \epsilon_r(\omega) = \text{Im}[Y_m(\omega)]/\epsilon_0\omega \\ &\dots\dots\dots (6) \end{aligned} \right\}$$

(6) 式の計算を各周波数で行うことにより, σ と ϵ_r の周波数特性が得られる。

3. 導電率と比誘電率の周波数特性

電極間インピーダンス $\dot{Z}_i$ の測定結果から求めた断面積

図3 土壌の導電率 σ および比誘電率 ϵ_r の周波数特性
Fig. 3. Frequency characteristics of σ and ϵ_r of the tested soil.

1 m², 長さ 1 m あたりの土壌インピーダンス $\dot{Z}_m$ の周波数特性を図2に示す。 $\dot{Z}_m$ は, いずれの含水率 α でも容量性を示し, 低周波領域で一定, 高周波領域で約 20 dB/dec の傾きで周波数の増加に伴い減少している。また, 低周波領域では α の増加に対してインピーダンスが著しく減少している。

算出した導電率 σ および比誘電率 ϵ_r の周波数特性を図3に示す。 σ は低周波領域で一定で, 含水率 $\alpha = 1$ および 3%では高周波領域で周波数の増加に伴い上昇している。低周波領域では α の増加によって σ は著しく上昇している。周波数 100 kHz 以下の領域では, θ_m が 0~4 度 [図2(b)参照] となり, $\dot{Z}_m$ に与える ϵ_r の寄与分が極めて小さくなり, 精度良く ϵ_r を算出することが困難であった。このため, 100 kHz 以上のみを表示した。 ϵ_r は周波数の増加に伴い減少している。

4. 結 言

二平行平板電極に土壌サンプルを挟み, 電極間距離の異なる3ケースで電極間インピーダンスの周波数特性の測定を行った。得られた結果から, 土壌サンプルの長さに依存しないと考えられる接触インピーダンス分を除去し, 土壌サンプルの導電率と比誘電率の周波数特性を算出した。

(平成18年3月28日受付)

文 献

- (1) Y. Amano and K. Tanabe: "Study on propagation characteristics of electromagnetic wave in underground (I)", *CRIEPI Report*, No.T89065 (1990) (in Japanese)
天野雄二・田辺一夫:「地盤の電磁波伝搬特性に関する検討 (I)」, 電力中央研究所報告, No.T89065 (1990)
- (2) T. Yoshimura, N. Nagaoka, Y. Baba, and A. Ametani: "Evaluation of parameters of lossy medium for surge analysis of grounding electrodes", *IEEE Trans. PE*, Vol.125, No.6, pp.626-627 (2005-6) (in Japanese)
吉村貴広・長岡直人・馬場吉弘・雨谷昭弘:「接地サージ解析のための損失媒質パラメータ推定」, 電学論 B, **125**, 6, pp.625-626 (2005-6)