

## 電気伝導度・温度依存性評価のための砂層誘電率のモデル化

Modeling of dielectric constant of sand layer for evaluating its dependence on the electrical conductivity and temperature

○安中武幸\*・花山 奨\*

ANNAKA Takeyuki, HANAYAMA Susumu

### 1. はじめに

誘電率測定を原理とする土壤水分センサーが普及している。しかし、その含水率測定における電気伝導度および温度への依存性が問題となっており、「センサー自体の特性」と「土壌の誘電率」両面からの検討が必要とされている。前者については、誘電率既知の基準溶液を用いた検定によりセンサーごとに特性が報告されており、後者については、結合水の自由化や Maxwell-Wagner 効果（物質の不均質性に起因する誘電率上昇効果）の影響が指摘されている。特に、作動周波数が 100MHz より低いセンサーでは Maxwell-Wagner 効果の影響を受けるとされているが、その実態はよく分かっていない。

本研究では、砂層の誘電率をモデル化し、それによって土壤水（溶液）の電気伝導度と温度の誘電率への影響を評価することを目的とした。

### 2. 砂層の誘電率モデル

砂層の誘電率をモデル化するために、球状粒子の濃厚分散系の誘電率を表す花井の式<sup>1)</sup>を用いた。飽和から封入不飽和域は Fig.1(a)、乾燥から不飽和域は Fig.1(b)の様にモデル化した。 $\epsilon^*$ は砂層の複素誘電率を表しており、添字「A」は気泡混じり水、「s」は砂粒子

「a」は空気、「q」は水膜付き砂粒子を表している。(a), (b)に対して、花井の式は次式となる。

$$\frac{\epsilon^* - \epsilon_s^*}{\epsilon_A^* - \epsilon_s^*} \left( \frac{\epsilon_A^*}{\epsilon^*} \right)^{\frac{1}{3}} = 1 - \Phi \quad \frac{\epsilon^* - \epsilon_q^*}{\epsilon_a^* - \epsilon_q^*} \left( \frac{\epsilon_a^*}{\epsilon^*} \right)^{\frac{1}{3}} = 1 - \Phi \quad (1)$$

ここに、 $\Phi$ は砂粒子の体積割合である。なお、気泡混じり水の複素誘電率 $\epsilon_A^*$ および水膜付き砂粒子の複素誘電率 $\epsilon_q^*$ は、球状粒子の希薄分散系の誘電率を表す Wagner 式により、

$$\epsilon_A^* = \epsilon_w^* \frac{2(1-\nu)\epsilon_w^* + (1+2\nu)\epsilon_a^*}{(2+\nu)\epsilon_w^* + (1-\nu)\epsilon_a^*} \quad \epsilon_q^* = \epsilon_w^* \frac{2(1-\nu)\epsilon_w^* + (1+2\nu)\epsilon_s^*}{(2+\nu)\epsilon_w^* + (1-\nu)\epsilon_s^*} \quad (2)$$

と表せる<sup>1)</sup>。ここに、 $\epsilon_w^*$ は水の複素誘電率、 $\nu$ は気泡または固相の体積割合である。

$\epsilon_a^* = 1$ ,  $\epsilon_s^* = 5.5$ ,  $\epsilon_w^* = \{80.3 - 0.37(T - 20)\} - i[\kappa_{w,20}\{1 + 0.02(T - 20)\}]/(\omega\epsilon_v)$  (Tは温度、 $\kappa_{w,20}$ は20°Cにおける電気伝導度)を仮定し、周波数 $\omega$ は5TEセンサーを想定して70MHzとした。 $\epsilon_v$ は真空の誘電率である。砂層の固相率は0.55とし、不飽和域では固相率が0.55となる様に $\nu$

\* 山形大学農学部 Faculty of Agriculture, Yamagata Univ.

キーワード：土壌の物理化学的性質、水分移動、畑地灌漑

と  $\Phi$  を調整しながら、所定の含水率  $\theta$  に対応する砂層の複素誘電率を算出した。

### 3. 結果と考察

#### (1) Topp 式との比較

20°C で溶液電気伝導度が 0 の場合、砂層誘電率の実数部と含水率の関係は Fig.2 の様になった。図中には Topp 式も描いてあるが、モデルによる計算値は Topp 式と良い一致を示した。

#### (2) 溶液電気伝導度の影響

Fig.3 に、溶液電気伝導度 ( $\kappa_w, 20$ ) を 0 から 7 dS/m まで変えて得た砂層の誘電率実数部と含水率の関係を示した。電気伝導度が高くなるにつれて誘電率が大きくなるが、3 dS/m 位まではさほど大きな影響は認められない。しかし、5 dS/m では影響が大きくなり、無視できなくなる。

#### (3) $\kappa_w$ が高い時の誘電率の温度依存性

Fig.4 に溶液電気伝導率が 7 dS/m の時の誘電率実数部の温度依存性を示した。飽和に近い水分領域と不飽和で含水率が高い領域の接続性に問題がある。気泡混じりの水が連続相となっている飽和に近い領域の結果が妥当とすれば、含水率が高い不飽和領域の結果に不自然さがあると考えられる。そこで、含水率が低い領域のみを見ると、温度上昇に伴い誘電率も高くなる傾向が認められる。一方、飽和に近い領域では逆の傾向が認められ、水の誘電率が温度上昇に伴い低下することを反映している。

#### (4) $\Delta\epsilon/\Delta T$ の溶液電気伝導度依存性

Fig.5 に、誘電率の温度に対する変化率 ( $\Delta\epsilon/\Delta T$ ) が溶液電気伝導度によって変化する様子を示した。溶液電気伝導度が 0 の場合には負の変化率を示し、水の誘電率の性質を反映したものになっている。溶液電気伝導度が 2~3 dS/m では、この変化率がほぼ 0 となっており、それより高くなると大きな値を示している。また、含水率が高い程、溶液電気伝導度に対する  $\Delta\epsilon/\Delta T$  の増加率が大きくなっている。

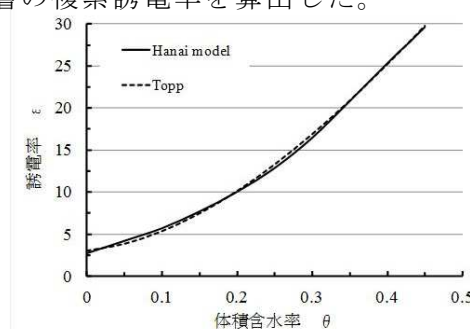


Fig.2 Calculated  $\epsilon\sim\theta$  relation (20°C,  $\kappa_w=0$ )

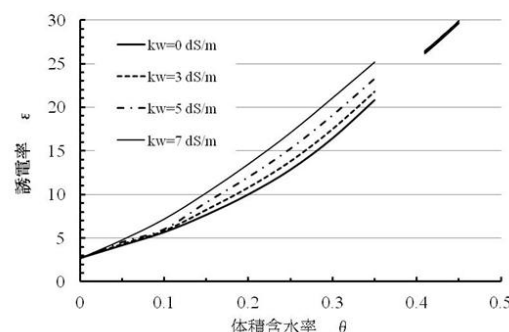


Fig.3 Calculated  $\epsilon\sim\theta$  relations for various  $\kappa_w$  values (20°C)

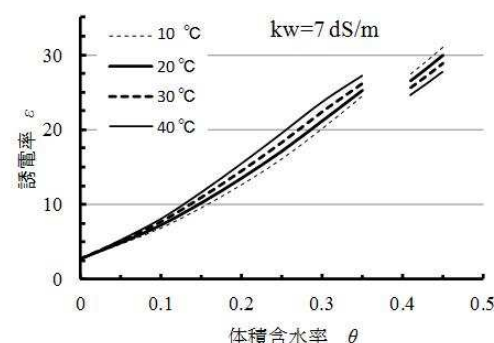


Fig.4 Temperature dependence of  $\epsilon\sim\theta$  relations ( $\kappa_w=7$  dS/m)

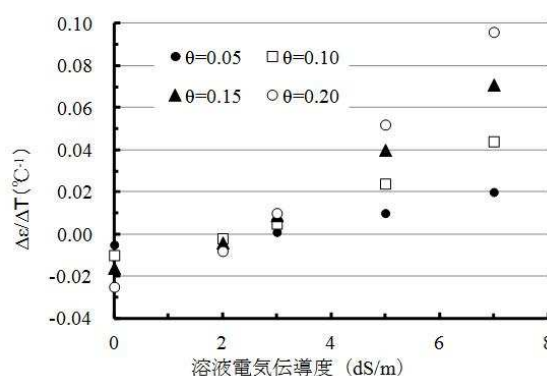


Fig.5 Relationship between  $\kappa_w$  and  $\Delta\epsilon/\Delta T$

1) 花井哲也 (2000) : 不均質構造と誘電率、吉岡書店