

# 団粒土の誘電特性を表現するための水分特性を考慮した混成球モデルの拡張 Extended Dual Composite Spheres Model by Taking into Account the Soil Water Regime to Describe the Effective Dielectric Permittivity of Aggregate Soil

○宮本輝仁, 原口暢朗, 塩野隆弘

Teruhito Miyamoto, Noburo Haraguchi, and Takahiro Shiono

## 1. はじめに

不飽和土壌の巨視的誘電特性は、水分保持状態・形態に大きく依存するといわれている。特に、団粒土のような二重間隙構造を持つ場合、水分分布の偏りにより特徴的な誘電特性を示すことが報告されている(Miyamoto et al., 2003)。本研究の目的は、水分特性を考慮して団粒土の誘電特性を表現するモデルを構築することである。

## 2. 団粒構造のモデル化

混成球モデルは多層から成る球状の粒子により局所誘電特性を表わし、その集合体として混合体の巨視的誘電特性が求まるモデルである。混成球モデルは相の数に応じて層数を増やすことが可能である。Fig. 1に示すように団粒内間隙が飽和されるまでは土壌水分の大部分は団粒内で保持され、団粒内間隙が水で満たされた後、団粒間隙で水分保持がされると仮定し、4層の混成球モデルで団粒構造を表現した。4層の組み合わせは、液相と固相が接するように決定した。

団粒土の水分保持形態を考えると、水分が少ない場合、その多くが団粒内間隙で保持されるが、団粒表面や団粒間にリング水として保持されるものもある。そのため、Friedman (1998)に倣い団粒土の誘電特性を2種類(4層と3層)の混成球モデルを飽和度に応じた重み付けをして足し合わせるにより表現した。

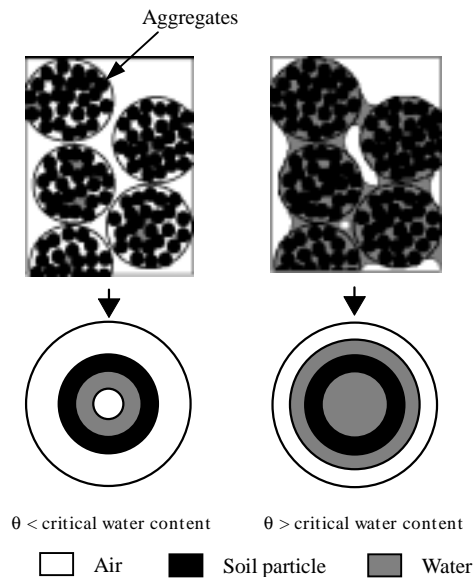


Fig. 1 Diagram of the modeling approach.

## 3. 水分特性をもとにした重み関数の決定法

2種類の混成球モデルで計算される誘電率の飽和度に応じた重み関数は、層数が異なることや団粒表面の吸着水や団粒間のリング水に比べて団粒内間隙で保持される量が多いことから、S字関数で表現した。

$$f_{4\text{phase}} = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(S - 1))}$$

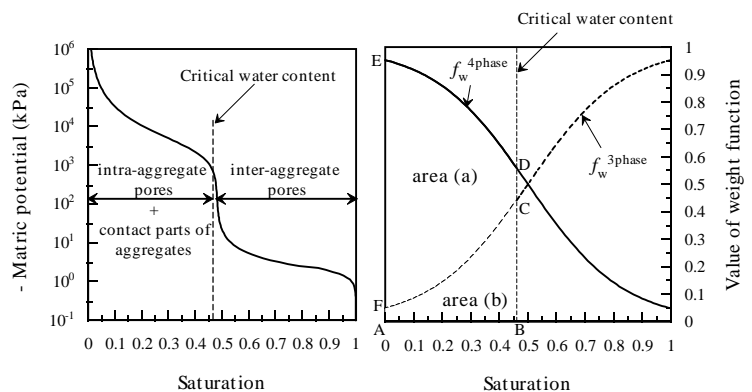


Fig. 2 Water characteristic curve and weight function

$$f_{3\text{phase}} = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(S - 1))} \quad (1)$$

ここで、 $f_{4\text{phase}}$ 、 $f_{3\text{phase}}$  はそれぞれ 4 層、3 層の混成球モデルの重み、 $S$  は飽和度、 $\alpha$  はフィッティングパラメータである。これにより、低水分領域では団粒構造の影響がより顕著に現れる様子が再現できる。

重み関数を水分特性と結び付けるために、臨界水分量と重み関数の臨界水分より左側の部分に対応させた。つまり、臨界水分の時に団粒内間隙に保持される水分量とリング水として保持される水分量の割合を、4 層と 3 層それぞれの重み関数の 0 から臨界水分に相当する飽和度までの積分値の割合に相当すると仮定した。このように仮定することにより、臨界水分量(ここでは pF4.2 水分量とした)と団粒内間隙量を実験から求めることにより、重み関数を決定することができる。

#### 4. モデルの検証

団粒径が 1.0~2.0mm の耐水性団粒土を用いてモデルの検証を行なった。重み関数を決定するために臨界水分量、団粒内間隙量を実験から求め、パラメータ  $\alpha$  を最小二乗法により求めた。臨界水分量は  $0.31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、団粒内間隙量は  $0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、パラメータ  $\alpha$  は 6.6 となった。

液相の誘電率は固相表面からの距離により近似する次式を用いた。

$$\epsilon_{\text{water}} = d_w \epsilon_{\text{max}} \left/ d_w + \frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{\epsilon_{\text{max}} - (\epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}}) e^{\lambda d_w}}{\epsilon_{\text{min}}} \right] \right. \quad (2)$$

ここで、 $\epsilon_{\text{min}} = 5.5$ 、 $\epsilon_{\text{max}} = 80.4$ 、 $\lambda = 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$ 、 $d_w$  は液相が固相表面に均一にフィルム状に分布したと仮定した場合の厚さである。また、気相と固相の誘電率をそれぞれ 1 と 5 として計算した。

体積含水率( $\theta$ ) - 誘電率( $\epsilon$ )の関係を Fig. 3 に、 $\theta - d\epsilon/d\theta$ 関係を Fig. 4 に示した。 $\theta - \epsilon$ 関係は 3 相と 4 相とも低水分領域で測定値によく合っている。4 相にすることにより、臨界水分付近の測定値をより良く再現できることも分かる。 $\theta - d\epsilon/d\theta$ 関係では団粒構造を考慮する意義がより明確に現われている。3 相モデルでは $\theta - d\epsilon/d\theta$ 関係が単調増加を示すのに対して、4 相モデルで線形の重み関数を用いた場合、低水分領域での変化を再現できるようになる。更に、S 字関数を主に関数として用いることにより、臨界水分付近で  $d\epsilon/d\theta$ の値が急激に増加する様子を再現できることが分かる。

今後、試料の種類を増やしてモデルの検証を行なう予定である。

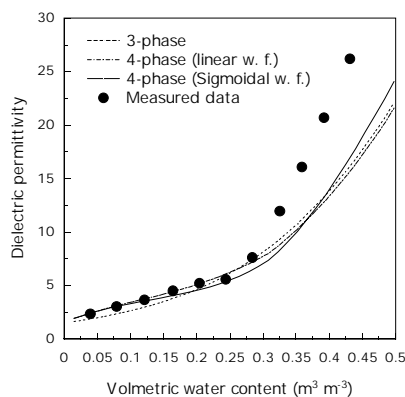


Fig. 3 Calculated and measured  $\theta - \epsilon$  relationship for 1.0-2.0 aggregate soil.

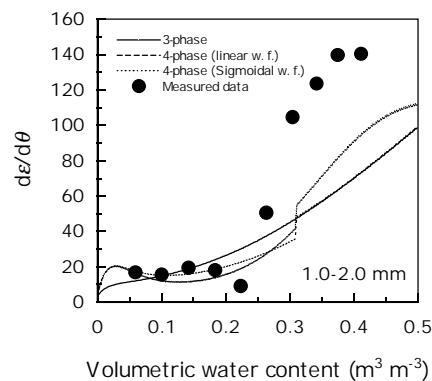


Fig. 4 Calculated and measured  $\theta - d\epsilon/d\theta$  relationship for 1.0-2.0 aggregate soil.