

## 軟 X 線画像法による高水分領域にあるベントナイトの水分測定 Measuring Water Content of Saturated Bentonite by Soft X-ray Digital Radiography

○廣住豊一\*, 岡島賢治\*, 伊藤良栄\*, 成岡 市\*

HIROZUMI Toyokazu\*, OKAJIMA Kenji\*, ITO Ryoei\* and NARIOKA Hajime\*

### I. はじめに

土壌の微小範囲における状態変化を捉えることは、土壌中に生起する諸現象の解明に極めて重要である。とくに土壌水分は、降雨や乾燥などによって変化し、そのわずかな変化が土壌中の物質移動や、土壌構造そのものにも大きな影響を与える。

筆者らの開発した「軟 X 線画像法」(以下、「本法」とする)は、微小範囲の土壌基質構造を定量できる<sup>1)</sup>。筆者らは、これまでに本法による粒径および面密度の測定手法を開発した<sup>2,3)</sup>。

本報では、微小範囲の土壌水分測定法の開発を目指し、とくに高水分領域のベントナイトの含水比および体積含水率の測定法について検討した。

### II. 測定原理

シルトや粘土などの細粒分は、水分量によって体積が変化する。このとき、水分量と体積に一価関係があれば、体積から水分量を推定することができる。そこで本報では、土壌面密度の測定値から水分量の推定を試みた。

試料が飽和水分状態にあるとき、含水比  $\omega$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ )および体積含水率  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )は、その定義から、水の密度  $\rho_w$  ( $\text{kg m}^{-3}$ )、土粒子の密度  $\rho_s$  ( $\text{kg m}^{-3}$ )および乾燥密度  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ )を用いて、それぞれ次式のように表すことができる。

$$\omega = \rho_w \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_s} \right) \quad (1)$$

$$\theta = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2)$$

さらに、 $\rho$  は、土壌面密度  $\rho_A$  ( $\text{kg m}^{-2}$ )および試料の厚さ  $t$  (m)を用いて、次式のように表すことができる<sup>3)</sup>。

$$\rho = \frac{\rho_A}{t} \quad (3)$$

筆者らは、前報で乾燥試料の  $\rho_A$  は本法によって測定することができ、軟 X 線画像の平均濃度階調

値  $\bar{g}l$  の一次関数で近似できることを示した。その考えを拡張すれば、一般的に  $\rho_A$  と  $\bar{g}l$  の関係は次式で表すことができる。

$$\rho_A = f(\bar{g}l) \quad (4)$$

(1)~(4) 式より、 $\omega$  および  $\theta$  は、次式で表すことができる。

$$\omega = \rho_w \left( \frac{t}{f(\bar{g}l)} - \frac{1}{\rho_s} \right) \quad (5)$$

$$\theta = 1 - \frac{f(\bar{g}l)}{\rho_s \cdot t} \quad (6)$$

以上から、 $\rho_A$  と  $\bar{g}l$  の関係および  $\rho_w$ ,  $\rho_s$ ,  $t$  が既知であれば、 $\bar{g}l$  から、 $\omega$  および  $\theta$  を推定できると考えた。

### III. 方法

試料には、ナカライテスク社製ベントナイト(以下、「ベントナイト」とする)を供した。ベントナイトの土粒子密度  $\rho_s$  は  $2.72 (\text{Mg m}^{-3})$ であった。試料は、蒸留水と混合し、よく練り混ぜ、水分量を  $\omega \geq 0.68 (\text{kg kg}^{-1})$ に調節した。水分量を調節した試料は、深さ  $t=8.0 (\text{mm})$  ポリスチレン製矩形容器に摺り切りまで充填した。

容器に充填した試料は、ソフテックス社製 DCTS-7003を用いて、軟 X 線撮影した。照射条件は、管電圧 40 kV、管電流 1.5 mA、照射時間 60 s、FFD 500 mmに設定した。撮影したフィルムは、ニックス社製 Hi-RHEIN RH-9001を用いて現像した。現像条件は、現像液温度  $28^\circ\text{C}$ 、現像時間 180 sに設定した。軟 X 線撮影した試料は、ただちに湿潤質量を測定し、炉乾燥後、土壌面密度  $\rho_A$ 、含水比  $\omega$  および体積含水率  $\theta$  を求めた。

フィルム上に現像された試料影像是、16ビットグレースケール、1200 dpi でスキャンし、デジタル画像化した。画素濃度は、黒を最小値の 0、白を最大値の 1 とし、その間を 65,535 段階に離散化した「濃度階調値」とした。軟 X 線画像は、Scilab-4.1.2 および

\*三重大学大学院生物資源学研究所, Graduate School of Bioresources, Mie University

キーワード：軟 X 線画像法, 土壌水分, 画像解析

SIP-0.4.0 を用いて画像解析し、平均濃度階調値  $\bar{gl}$  を求めた。そして、上記の(5), (6)式を用いて  $\bar{gl}$  から推定した含水比  $\omega$  および体積含水率  $\theta$  が、それぞれの実測値と一致するか検証した。

#### IV. 結果

##### (1) 土壌面密度

平均濃度階調値  $\bar{gl}$  と土壌面密度  $\rho_A$  の関係を Fig.1 に示す。 $\rho_A$  は、 $\bar{gl}$  の一次関数でよく近似できた。このことから、高水分量のベントナイトであっても、乾燥試料と同様に、平均濃度階調値  $\bar{gl}$  から土壌面密度  $\rho_A$  を測定できることがわかった。

##### (2) 含水比

平均濃度階調値  $\bar{gl}$  と含水比  $\omega$  の関係を Fig.2 に示す。(5) 式を用いて  $\bar{gl}$  から推定した  $\omega$  を実測値と比較したところ、両者はよく一致した。このことから、高水分領域のベントナイトでは、軟 X 線画像の平均濃度階調値  $\bar{gl}$  から、含水比  $\omega$  を精度よく推定できることがわかった。

##### (3) 体積含水率

平均濃度階調値  $\bar{gl}$  と体積含水率  $\theta$  の関係を Fig.3 に示す。(6) 式を用いて  $\bar{gl}$  から推定した  $\theta$  を実測値と比較したところ、両者は高い密度領域で一致しなかった。このことから、(6) 式を用いることにより、軟 X 線画像の平均濃度階調値  $\bar{gl}$  から、体積含水率  $\theta$  を精度よく推定することは難しいことがわかった。

#### V. おわりに

ベントナイトの水分量の変化にともなう体積変化に着目し、本法による高水分領域のベントナイトにおける含水比および体積含水率の測定法について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 高水分領域のベントナイトであっても、乾燥試料と同様に、軟 X 線画像から土壌面密度を測定することができた。
- (2) 高水分領域のベントナイトでは、軟 X 線画像から含水比を精度よく推定することができた。
- (3) 高密度領域のベントナイトの体積含水率を軟 X 線画像から精度よく推定することは難しかった。

#### 引用文献

- 1) 廣住豊一, 黒澤俊人, 成岡市: 土壌構造評価のための軟 X 線画像法 —軟 X 線画像法の開発とその適用例—, 土壌の物理性 119, pp.3~15 (2011)
- 2) 廣住豊一, 黒澤俊人, 成岡市: 土壌構造評価のための軟

X 線画像法 —ガラスビーズおよび砂の粒径測定—, 土壌の物理性 119, pp.17~28 (2011)

- 3) 廣住豊一, 黒澤俊人, 成岡市: 土壌構造評価のための軟 X 線画像法 —微細粒試料の「土壌面密度」—, 土壌の物理性 122, pp.3~14 (2012)

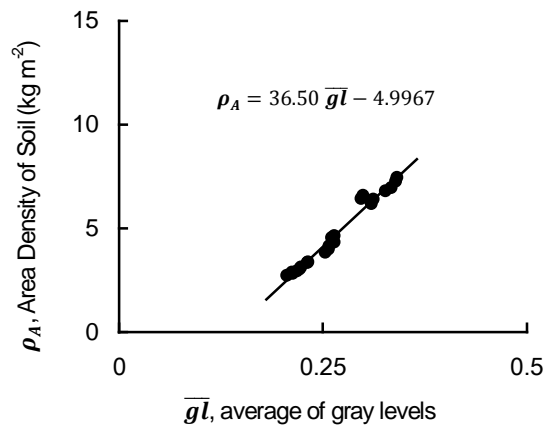


Fig.1  $\rho_A$ , Area Density of Soil and  $\bar{gl}$ , average of gray levels

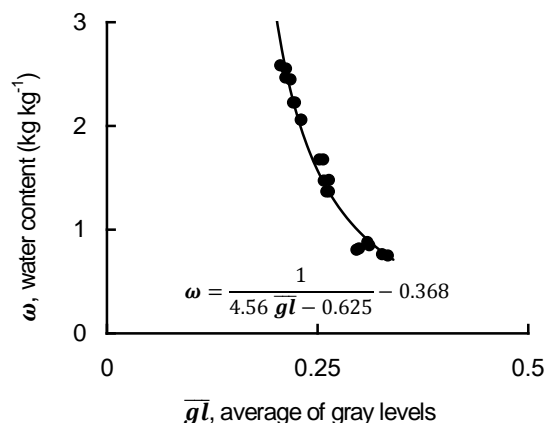


Fig.2  $\omega$ , water content and  $\bar{gl}$ , average of gray levels

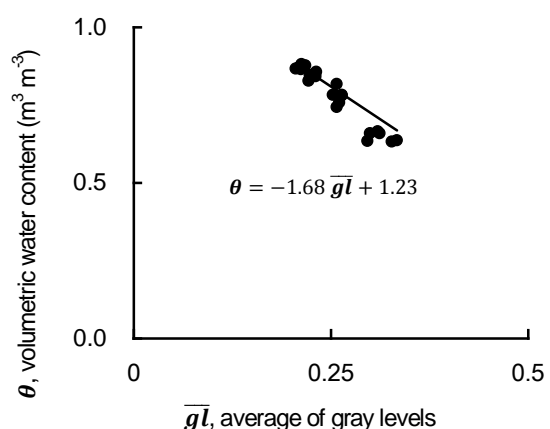


Fig.3  $\theta$ , volumetric water content and  $\bar{gl}$ , average of gray levels