J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 127, p.3 ～ 9 (2014)

論　文
Original Paper

軟 X 線画像法による飽和粘土の水分量推定

廣住豊一[1]・岡島賢治[1]・伊藤良栄[1]・成岡　市[1]

Estimating water content of saturated clay by soft X-ray digital radiography

Toyokazu HIROZUMI[1], Kenji OKAJIMA[1], Ryoei ITO[1] and Hajime NARIOKA[1]

Abstract: This study estimated water content of saturated clay using soft X-ray digital radiography (SXDR). The study focused on the relationship between water content and clay density. The water content of saturated clay can be calculated from its wet bulk density. The dry bulk density of dried clay can be calculated by examining the average gray levels of pixels in its soft X-ray image. The water content of saturated clay can also be estimated from its soft X-ray image if the wet bulk density of saturated clay can be estimated using the same technique. Experiments were conducted with the soft X-ray images of saturated kaolin and bentonite samples. The gravimetric and volumetric water contents estimated from these images were compared with observed values. The estimated values were in agreement with the observed values. This fact proved that the water content of saturated clay can be estimated by SXDR.

Key Words : soft X-ray digital radiography (SXDR), wet bulk density, gravimetric water content, volumetric water content, clay

1. はじめに

土壌は，直径数 mm の砂から，直径数 μm 以下の粘土まで，微小な粒子が無数に集まり，相互に影響しあい形成されている．したがって，微小寸法における土壌の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，大きく変化する．そして，この土壌水分の変化は，土壌中の物質移動や，土壌構造そのものに大きな影響を与える．

土壌のなかでも粘質土は，土壌水分の変化によって，土粒子の配列様式が大きく変化する．このとき生じた土粒子の移動は，たとえば乾燥亀裂となって現れる．とくに水分飽和状態にある粘質土は，流動や変形を生じやすく，より顕著な変化を示す．粘質土における水分の空間的・時間的変動を捉えることができれば，土壌水分と土壌構造の関係について，より深い知見を得ることができる．

土壌水分の測定には，乾熱法のほか，テンシオメータ法，TDR 法，FDR 法などが一般に用いられる（ファイトテクノロジー研究会, 2002）．テンシオメータ法，TDR 法，FDR 法などの測定法は，非破壊で連続測定ができ，土壌水分の野外観測には欠かせない．しかし，これらの測定法は，ある程度の大きさをもった土壌を測定対象とし，土壌水分の微小な空間分布（たとえば，数 mm^3 以下）を捉えることは難しい．

これらの測定法に対して，放射線で物体を透写し，内部の微小構造を測定する方法がある．その代表的なものに，「CT」がある（土壌物理学会, 2002）．CT は，断層イメージをもとに，物体内部の三次元情報を得る手法である．CT で土壌水分の三次元分布を測定した例には，X 線 CT による例（Nakashima et al., 2011），中性子線 CT による例（中西ら, 1999）などがある．しかし，CT は，原理が複雑，装置が高価，撮影時間が長いなどの難点がある．また，中性子線を用いる場合は，大規模な実験施設を必要とする．

放射線による土壌の測定法には，CT のほか，「軟 X 線映像法」がある（土壌物理学会, 2002）．軟 X 線映像法は，CT に比べて，高い空間分解能とコントラスト分解能を持つ．また，造影剤を用いることで，土壌粗間隙を鮮明に捉えることができる（徳永ら, 1984）．軟 X 線映像法によって，土壌粗間隙を測定した例には，立体構造の測定（成岡, 1987），画像解析による定量評価（森ら, 1997）などがある．このように軟 X 線映像法は，土壌粗間隙の存在形態を捉えることができる有用な手法である．土壌粗間隙は，数量や寸法を用いて，その特徴を表現できる．しかし，大きさや形状の異なる多数の土粒子からなる土壌基質の特徴を，幾何学的に表現することは難しい．このことから，土壌基質の評価に，軟 X 線映像法を用いた例は少なかった．

これに対して，軟 X 線画像を用いて，土壌基質を評価できる「軟 X 線画像法」が開発された（廣住ら, 2011a）．軟 X 線画像法は，土粒子の分布や重畳の様式が，軟 X 線画像に「質感」として投影されることに着目し，この

[1]Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya, Tsu, Mie, 514-8507, Japan. Corresponding author：廣住豊一, 三重大学大学院生物資源学研究科
2013 年 6 月 16 日受稿　2014 年 4 月 9 日受理

軟 X 線画像の質感を，画像解析によって数値化することで，土壌基質の特徴を定量的に表現する．軟 X 線画像法を用いた土壌基質に対する評価の例には，粗粒土の粒径測定（廣住ら, 2011b），細粒土の土壌面密度測定（廣住ら, 2012）などがある．軟 X 線画像法は，土壌の平面的な密度変化を 1 mm^2 以下の分解能で捉えることができる，非破壊で連続測定ができる，などの特長がある．この特長を活用し，乾燥亀裂の発生および成長によって，ベントナイトの基質部分に生じる，平面的な密度分布の変化を，経時的に観察した例がある（廣住, 2013）．軟 X 線画像法によって土壌水分を推定できれば，微小寸法における土壌水分の空間的 · 時間的変動を追跡できる．

そこで筆者らは，水分飽和状態にある粘土の水分量は，湿潤密度の関数であることに着目し，軟 X 線画像法を用いて，粘土の水分量を推定する方法を考案した．本論では，筆者らが考案した，水分飽和状態にある粘土に対する水分量推定法の原理を示す．そして，膨潤性の異なる 2 種類の粘土を用いて，この推定原理の妥当性を確認し，軟 X 線画像法によって，水分飽和状態にある粘土の水分量を推定できることを示す．

2. 推定原理

水分飽和状態にある粘土の含水比 ω（kg kg^{-1}）および体積含水率 θ（m^3 m^{-3}）は，湿潤密度 ρ_t（Mg m^{-3}），土粒子の密度 ρ_s（Mg m^{-3}），水の密度 ρ_w（Mg m^{-3}）を用いて，それぞれ次式で表すことができる．

$$\omega = \frac{\rho_w}{\rho_s}\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_t - \rho_w} - 1\right) \tag{1}$$

$$\theta = \frac{\rho_s - \rho_t}{\rho_s - \rho_w} \tag{2}$$

(1)，(2) 式において，ρ_s および ρ_w は，水分量によって変化しない．したがって，水分飽和試料では，ρ_t から，ω および θ を求めることができる．

乾燥試料の ρ_t, すなわち，乾燥密度 ρ_d（Mg m^{-3}）は，軟 X 線画像法を用いて，「土壌面密度」を測定することで，求めることができる（廣住ら, 2012）．

土壌面密度 ρ_{Ad}（Mg m^{-2}）は，「土壌の単位面積あたりの固相の質量」として定義される（廣住ら, 2012）．ρ_{Ad} は，試料の乾燥密度 ρ_d（Mg m^{-3}）および厚み t（m）を用いて，次式で表すことができる．

$$\rho_{Ad} = \rho_d t \tag{3}$$

乾燥試料の ρ_{Ad} は，軟 X 線画像の平均濃度階調値 $\overline{gl}$ の一次関数として求めることができる（廣住ら, 2012）．したがって，t が既知であれば，ρ_d, すなわち，乾燥試料の ρ_t は，$\overline{gl}$ から測定できる．

そこで本論では，土壌面密度を拡張し，水分を含んだ試料に適用できる「湿潤土壌面密度」を考える．湿潤土壌面密度 ρ_{At}（Mg m^{-2}）は，「土壌の単位面積あたりの液相と固相の質量」として定義する．ρ_{At} は，試料の湿潤密度 ρ_t（Mg m^{-3}）および厚み t（m）を用いて，次式で表すことができる．

$$\rho_{At} = \rho_t t \tag{4}$$

乾燥試料の ρ_{Ad} と同様に，水分飽和試料の ρ_{At} を，$\overline{gl}$ から測定できれば，(4) 式から ρ_t を求めることができる．

ここで，試料の水分量と軟 X 線の透過量の関係を考える．試料に軟 X 線を照射すると，照射された軟 X 線の一部は試料中で減弱され，その残りが試料を透過する．そして，この軟 X 線の透過量に応じて，軟 X 線画像の画素濃度が変化する．軟 X 線の照射量 I_{in} と透過量 I_{out} には，次式の関係がある（日本アイソトープ協会, 1992）．

$$I_{out} = I_{in} e^{-\mu_m \rho_t t} \tag{5}$$

ここで，e は自然対数の底，μ_m は質量減弱係数（m^2 Mg^{-1}），ρ_t は湿潤密度（Mg m^{-3}），t は厚さ（m）である．

(4)，(5) 式より，湿潤土壌面密度 ρ_{At} が等しい試料に対して，同じ量の軟 X 線 I_{in} を照射すると，試料の質量減弱係数 μ_m が大きいほど，軟 X 線の透過量 I_{out} は小さくなる．一般に，軟 X 線の波長領域では，試料の原子番号が大きいほど，μ_m は大きい（MacGillavry and Rieck, 1968）．したがって，試料を構成する元素の組成割合によって，I_{out} は変化し，軟 X 線画像の画素濃度も変化する．

試料の間隙は，乾燥状態では空気で，水分飽和状態では水で，それぞれ満たされている．密度の小さい空気を無視すると，乾燥試料は，土粒子のみで構成された物質であると考えることができる．これに対して，水分飽和試料は，土粒子と水の混合物である．水素と酸素からなる水は，ケイ素やアルミニウムなどからなる土粒子に比べて，構成元素の原子番号は小さい．よって，水分飽和試料は，乾燥試料に比べて，μ_m は小さくなる．したがって，ρ_{At} が等しいとき，水分飽和試料は，乾燥試料に比べて，I_{out} は大きくなる．

前述のように，乾燥試料を土粒子のみで構成された物質であると考えると，その構成元素の組成割合は変化せず，μ_m は一定である．これに対して，水分飽和試料では，土粒子に対する水の存在割合，すなわち，ω の増減によって，μ_m は変化する．(1) 式より，ω と ρ_t には一価関係がある．よって，μ_m は ρ_t の関数である．したがって，(4)，(5) 式より，水分飽和試料では，I_{out} は ρ_{At} の関数であると考えることができる．

以上のことから，水分飽和試料では，湿潤土壌面密度 ρ_{At} は，軟 X 線画像の平均濃度階調値 $\overline{gl}$ の関数であると考えることができる．そこで，ρ_{At} と $\overline{gl}$ の関係を，次式で一般的に表す．

$$\rho_{Ad} = f\left(\overline{gl}\right) \tag{6}$$

(1)，(2)，(4)，(6) 式より，水分飽和試料の ω および θ は，それぞれ次式で表すことができる．

$$\omega = \frac{\rho_w}{\rho_s}\left(\frac{t(\rho_s-\rho_w)}{f(\overline{gl})-\rho_w t}-1\right) \tag{7}$$

$$\theta = \frac{-f(\overline{gl})+\rho_s t}{t(\rho_s-\rho_w)} \tag{8}$$

(7)，(8) 式より，ρ_{At} と $\overline{gl}$ の関係および ρ_w, ρ_s, t が既知であれば，水分飽和試料の ω および θ は，$\overline{gl}$ から推定できる．

3. 材料と方法

3.1 試料の作成

試料の材料には，膨潤性の異なる 2 種類の粘土を供した．非膨潤性粘土にはナカライテスク社製カオリン（以下，「カオリン」とする）を，膨潤性粘土には同社製ベントナイト（以下，「ベントナイト」とする）を，それぞれ用いた．土粒子の密度 ρ_s（Mg m^{-3}）は，カオリンでは $\rho_s = 2.74$，ベントナイトでは $\rho_s = 2.72$ であった．

各材料は，蒸留水と混合し，水分量を調節した．まず，風乾した材料を 50 g 程度石膏用ラバーボウルにとり，質量を測定した．そして，この石膏用ラバーボウルに所定質量の蒸留水を加え，水分状態が均一になるように材料をよく練り混ぜた．このとき加える蒸留水の質量は，各含水比が所定間隔以下になるように設定した．この間隔は，カオリンでは 0.05 kg kg^{-1} 以下，ベントナイトでは 0.1 kg kg^{-1} 以下を目安とした．また，調整する水分量は，各材料につき 40 点以上とした．

含水比を調整し練り混ぜた材料は，ポリスチレン製の矩形容器（縦 27.5 mm, 横 27.5 mm, 深さ 8.2 mm）に，摺り切りまで充填した．充填の際には，気泡や材料の充填むらが生じないように注意し，できる限り均一に充填した．容器に充填した材料は，表面をナイフで丁寧に成形し，これを試料とした．試料は，各水分量につき，1 個作成した．

試料の湿潤密度，湿潤土壌面密度，含水比，体積含水率，水分飽和度は，試料容器の内寸法，軟 X 線撮影直後および炉乾燥後の試料の全質量から，試料全体の値として求めた．

3.2 軟 X 線画像法による解析

作成した試料は，ソフテックス社製軟 X 線照射装置 DCTS-7003 およびフジフイルム社製工業用 X 線フィルム IX FR を用いて軟 X 線撮影した．撮影方法は，造影剤を使用しない単純撮影とした．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 の一定値に設定した．撮影したフィルムは，ニックス社製自動現像機 Hi-RHEIN RH-9001 を用いて現像した．現像条件は，現像液温度 28 °C，現像時間 180 s に設定した．

フィルム上に現像された試料影像は，エプソン社製フラットベッドスキャナ GT-X750 および同社製スキャナドライバ EPSON Scan ver.3.24J を用いてデジタル画像化した．デジタル化の手順は，既報（廣住ら, 2011a）に準じた．スキャン条件は，16 ビットグレースケール，1200 dpi（画素寸法 0.0212 mm × 0.0212 mm），アスペクト比 1 : 1 とした．また，スキャナが持つ，ダイナミックレンジやガンマ値などに対する自動補正機能はすべて停止した．

デジタル化した試料影像は，試料中央を中心とする一辺 1248 pix（26.4 mm）の正方形に切り抜き，これを「軟 X 線画像」とした．軟 X 線画像に含まれる画素濃度は，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」として扱った．この濃度階調値は，0 に近いほど軟 X 線の透過量が多いことを示す．

軟 X 線画像は，Scilab-4.1.2（Digiteo, 2013）および SIP-0.4.0（Fabbri, 2012）を用いて解析した．画像解析では，軟 X 線画像に含まれる全画素の濃度階調値に対する平均値（以下，「平均階調値」とする）および標準偏差（以下，「階調標準偏差」とする）を求めた．

画像解析によって得られた平均階調値は，(7)，(8) 式に代入し，含水比および体積含水率の推定値を求めた．そして，推定値と実測値を比較した．このときの計算では，$\rho_w = 1$（Mg m^{-3}），$t = 0.0082$（m）とした．ρ_s は，各材料の値を用いた．

推定値の適合度の判断には，*RMSE*（Root Mean Square Error）を測定範囲に応じて補正した *NRMSE*（Normalized RMSE）を用いた．*RMSE* および *NRMSE* は次式で定義される．*RMSE* および *NRMSE* は，その値が小さいほど，実測値に対する，推定値の適合度が高いことを示す．

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{x}_i - x_i)^2} \tag{9}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{x_{max} - x_{min}} \tag{10}$$

ここで，n は測定数，$\hat{x}_i$ は推定値，x_i は実測値，x_{max} は実測値の最大値，x_{min} は実測値の最小値である．

4. 結果と考察

4.1 水分飽和試料の選定

本論の方法で作成した試料のうち，水分飽和状態にあるものを選定するため，含水比 ω（kg kg^{-1}）と水分飽和度 S（m^3 m^{-3}）の関係を調べた（Fig. 1）．

カオリンおよびベントナイトのいずれの材料でも，ω の増加とともに，S は増加した．水分飽和状態に達する含水比 ω_{sat}（kg kg^{-1}）は，カオリンでは $\omega_{sat} = 0.35$，ベントナイトでは $\omega_{sat} = 1.12$ であった．$\omega \geq \omega_{sat}$ でみられた S のばらつきは，試料の厚さや封入空気のばらつきなどによると考えた．

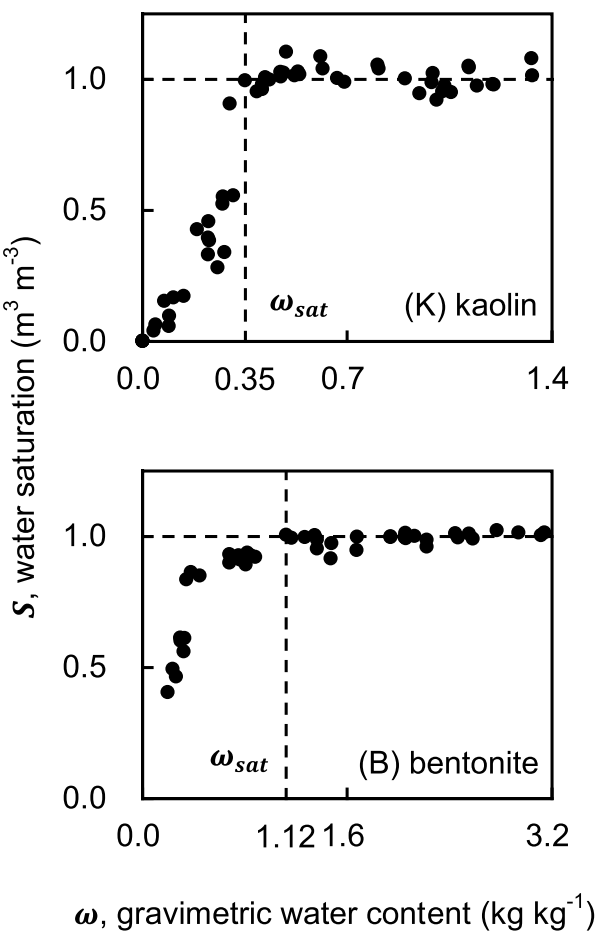


Fig. 1 カオリン（K）およびベントナイト（B）の含水比（ω; kg kg^{-1}）と水分飽和度（S; m^3 m^{-3}）.
Gravimetric water content（ω; kg kg^{-1}）and water saturation（S; m^3 m^{-3}）of kaolin（K）and bentonite（B）.

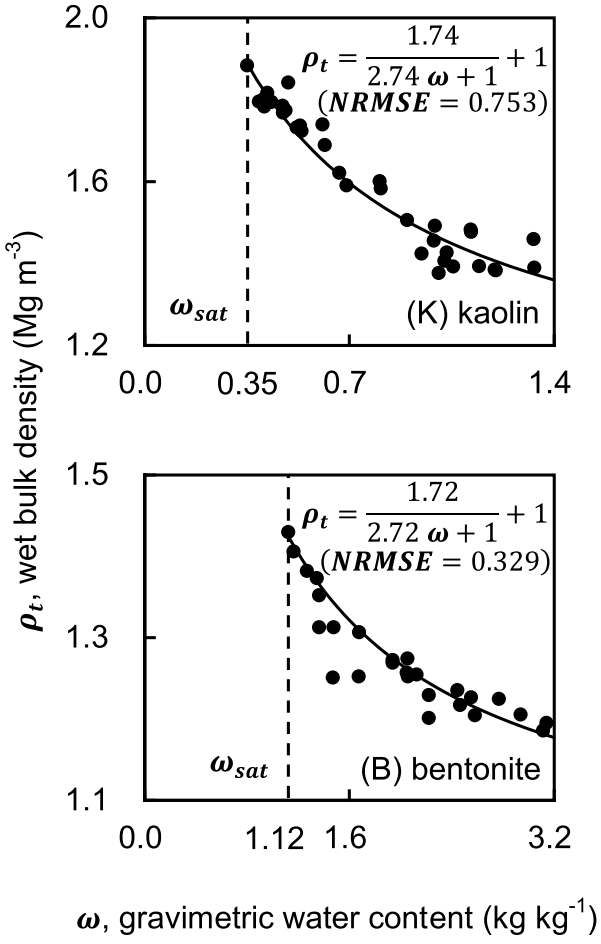


Fig. 2 $\omega \geq \omega_{sat}$ における，カオリン（K）およびベントナイト（B）の含水比（ω; kg kg^{-1}）と湿潤密度（ρ_t; Mg m^{-3}）．— は（11）式による理論値.
Gravimetric water content（ω; kg kg^{-1}）and wet bulk density（ρ_t; Mg m^{-3}）for $\omega \geq \omega_{sat}$ of kaolin（K）and bentonite（B）. —: theoretical value by Eq.（11）.

以上のことから，本論では，$\omega \geq \omega_{sat}$ の試料を水分飽和試料として選定し，これ以降，この試料を用いて検討を行った.

4.2 選定した水分飽和試料における水分量と湿潤密度の関係の確認

選定した水分飽和試料で，本論の推定原理で示した水分量と湿潤密度の関係が成り立つことを確認するため，含水比 ω（kg kg^{-1}）と湿潤密度 ρ_t（Mg m^{-3}）の関係を調べ，推定原理で示した両者の関係式から求めた理論値と比較した（Fig. 2）.

まず，ω に対する ρ_t の理論曲線を求めるため，(1) 式を ω の関数として整理し ρ_t を次式で表した.

$$\rho_t = \rho_w \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s \omega + \rho_w} + 1 \right) \qquad (11)$$

そして，(11) 式に，$\rho_w = 1$（Mg m^{-3}），各材料の ρ_s（Mg m^{-3}）を代入し，ω に対する ρ_t の理論曲線を求めた.

ω および ρ_t の関係を調べると，カオリンおよびベントナイトのいずれの材料でも，ω の増加とともに，ρ_t は減少した．ω および ρ_t の実測値を（11）式から求めた理論曲線と比較すると，いずれの材料でも，実測値にばらつきはみられるものの，理論曲線は実測値の傾向をよく捉えた.

以上のことから，選定した水分飽和試料における水分量と湿潤密度の関係は，本論の推定原理で示した両者の関係と概ね一致することを確認できた.

4.3 試料内部の充填密度のばらつき

試料内部の充填密度のばらつきを確認するため，含水比 ω（kg kg^{-1}）と階調標準偏差 σ_{gl} の関係を調べた（Fig. 3）.

カオリンでは，ω の増加とともに，σ_{gl} は減少した．そして，$\omega \approx 0.7$ で，$\sigma_{gl} \approx 0.01$ 付近に収束した．一方，ベントナイトでは，σ_{gl} は，ω によって大きく変化せず，$\sigma_{gl} \approx 0.01$ であった.

以上のことから，試料が水分飽和状態にあるとき，試料内部の充填密度のばらつきは，カオリンでは水分量の増加とともに大きくなること，ベントナイトでは水分量と明瞭な関係はみられないことがわかった.

4.4 水分飽和試料における湿潤土壌面密度の測定

水分飽和試料において，平均階調値から湿潤土壌面密度を測定できることを確認するため，試料の水分状態と

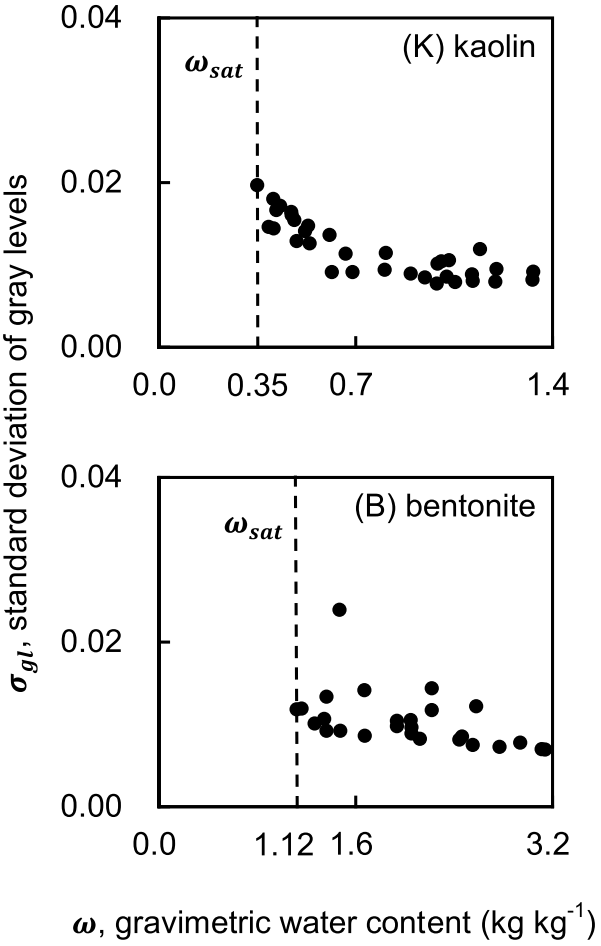


Fig. 3 $\omega \geq \omega_{sat}$ における，カオリン（K）およびベントナイト（B）の含水比（ω; kg kg^{-1}）と階調標準偏差（σ_{gl}）．
Gravimetric water content（ω; kg kg^{-1}）and standard deviation of gray levels（σ_{gl}）for $\omega \geq \omega_{sat}$ of kaolin（K）and bentonite（B）.

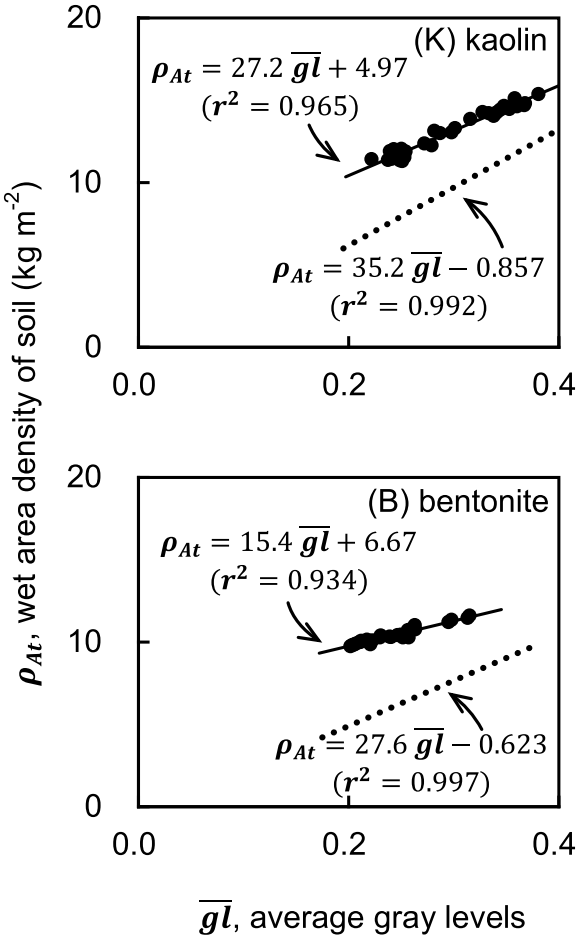


Fig. 4 $\omega \geq \omega_{sat}$ における，カオリン（K）およびベントナイト（B）の平均階調値（$\overline{gl}$）と湿潤土壌面密度（ρ_{At}; kg m^{-2}）．— は，$\omega \geq \omega_{sat}$ のときの近似値．⋯ は，$\omega \approx 0$ のときの近似値．
Average gray levels（$\overline{gl}$）and wet area density of soil（ρ_{At}; kg m^{-2}）for $\omega \geq \omega_{sat}$ of kaolin（K）and bentonite（B）. —: approximate value for $\omega \geq \omega_{sat}$. ⋯: approximate value for $\omega \approx 0$.

軟 X 線の透過量の関係が，推定原理で示した内容と一致することを確認した．そこで，$\omega \geq \omega_{sat}$ の試料における，平均階調値 $\overline{gl}$ と湿潤土壌面密度 ρ_{At}（kg m^{-2}）の関係を調べ，$\omega \approx 0$ の試料と比較した（Fig. 4）．$\omega \approx 0$ における $\overline{gl}$ と ρ_{At} の関係は，既報（廣住ら, 2012）の平均階調値と土壌面密度の近似式において，土壌面密度を ρ_{At} とみなすことで求めた．

$\omega \geq \omega_{sat}$ の試料における，$\overline{gl}$ と ρ_{At} の関係を調べると，カオリンおよびベントナイトのいずれの材料でも，ρ_{At} の増加とともに，$\overline{gl}$ は増加した．そして，$\omega \geq \omega_{sat}$ の試料でも，$\omega \approx 0$ の試料と同様に，ρ_{At} は $\overline{gl}$ の一次関数として近似できた．この近似式の決定係数 r^2 は，いずれの材料でも，$r^2 > 0.9$ であった．したがって，水分飽和試料でも，乾燥状態にある試料と同様に，平均階調値と湿潤土壌面密度に一価関係があること，両者の関係は一次関数でよく近似できることを確認できた．

$\omega \geq \omega_{sat}$ と $\omega \approx 0$ での軟 X 線の透過量の違いを調べると，いずれの材料でも，ρ_{At} が等しいとき，$\omega \geq \omega_{sat}$ における $\overline{gl}$ は，$\omega \approx 0$ における $\overline{gl}$ に対して，小さかった．すなわち，湿潤土壌面密度が等しいとき，水分飽和試料は，乾燥状態にある試料に比べて，軟 X 線の透過量は大きいことを確認できた．これは，推定原理で示した内容と一致した．

以上のことから，水分飽和試料の軟 X 線の透過に関する性質は，推定原理で示した内容と一致することを確認できた．そして，水分飽和試料の湿潤土壌面密度を，平均階調値から測定できることを確認できた．

4.5 軟 X 線画像法による含水比および体積含水率の推定

水分飽和試料において，本論で示した推定式を用いて，平均階調値から水分量を推定できることを確認するため，平均階調値 $\overline{gl}$ と，含水比 ω（kg kg^{-1}）および体積含水率 θ（m^3 m^{-3}）の関係を調べ，(7)，(8) 式を用いて $\overline{gl}$ から求めた推定値と比較した（Fig. 5，Fig. 6）．

カオリンおよびベントナイトのいずれの材料でも，ω および θ の増加とともに，$\overline{gl}$ は減少した．この傾向は，(7)，(8) 式と一致した．実測値に対する推定値の適合度を調べると，いずれの材料でも，含水比では

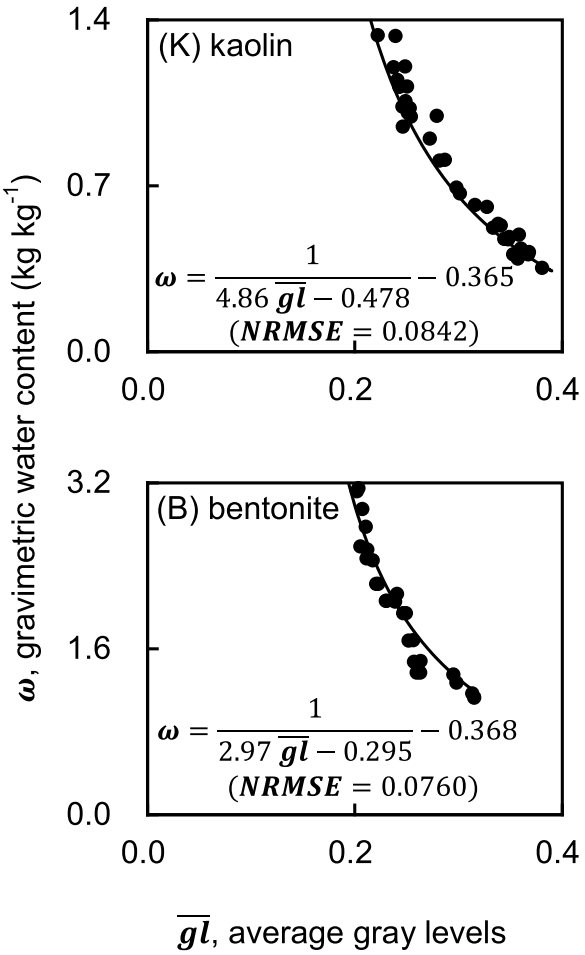


Fig. 5 $\omega \geq \omega_{sat}$ における，カオリン（K）およびベントナイト（B）の平均階調値（$\overline{gl}$）と含水比（ω; kg kg^{-1}）．—は，(7) 式による計算値．
Average gray levels ($\overline{gl}$) and gravimetric water content (ω; kg kg^{-1}) for $\omega \geq \omega_{sat}$ of kaolin (K) and bentonite (B). —: estimated value by Eq. (7).

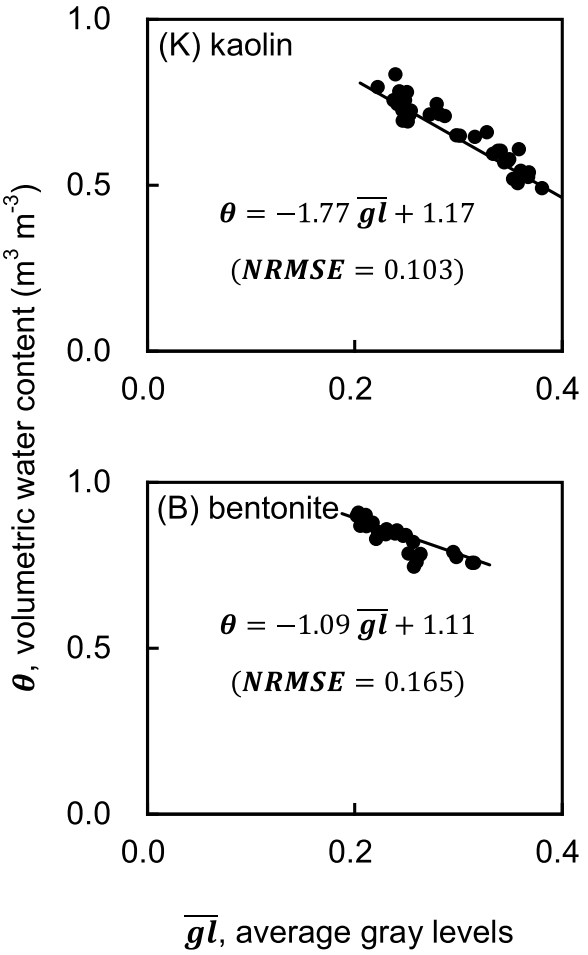


Fig. 6 $\omega \geq \omega_{sat}$ における，カオリン（K）およびベントナイト（B）の平均階調値（$\overline{gl}$）と体積含水率（θ; m^3 m^{-3}）．—は（8）式による計算値．
Average gray levels ($\overline{gl}$) and volumetric water content (θ; m^3 m^{-3}) for $\omega \geq \omega_{sat}$ of kaolin (K) and bentonite (B). —: estimated value by Eq. (8).

NRMSE < 0.1，体積含水率では *NRMSE* < 0.2 であった．以上のことから，本論で示した推定式を用いることで，平均階調値から含水比および体積含水率を精度よく推定できることを確認できた．

カオリンおよびベントナイトにおいて，土壌面密度の平面分布を測定するとき，粒子同士の干渉や雑音の混入などを考慮すると，その測定寸法は一辺 0.1 mm の正方形が最適である（廣住ら, 2012）．湿潤土壌面密度の測定においても同様であるとすると，本論で示した水分量の推定法でも同等の空間分解能をもつと考えられる．

本論では，材料として，膨潤性の異なるカオリンおよびベントナイトを供した．その結果，材料によって推定精度は異なるものの，いずれの材料に対しても，本論で示した水分量の推定法を適用できた．このことから，本論で示した推定原理は，さまざまな土壌に適用可能であることが期待できる．

5. おわりに

本論では，軟 X 線画像法を用いて，水分飽和状態にある粘土の水分量を推定する方法について検討した．そこで，粘土の水分量と湿潤密度との関係に着目した推定原理に基づき，試料の軟 X 線画像の平均階調値から含水比および体積含水率を推定する計算式を導いた．そして，カオリンおよびベントナイトを用いた実験を行い，推定式の妥当性を検証した．その結果，この推定式を用いて求めた含水比および体積含水率は，実測値とよく一致することが確認できた．以上のことから，軟 X 線画像法を用いて，水分飽和状態にある粘土の水分量を精度よく推定できることが確認できた．今後は，粘土以外の土壌や，水分不飽和状態にある土壌に対して，軟 X 線画像法を適用する方法について検討する．

謝辞

本論で実施した実験では，三重大学大学院生物資源学研究科および同学部流域保全学教育研究分野の古谷啓氏，原田寛氏および杉浦麻菜美氏に，ご協力いただいた．また，本論の執筆にあたって，平成 25 年度三重大学若手研究プロジェクトの支援を受けた．ここに謝意を表する．

引用文献

Digiteo (2013): Home-Scilab. Available at http://www.scilab.org/products/scilab/. (December 20th, 2013)

土壌物理学会編 (2002): 新編土壌物理用語事典. pp. 44–45, 養賢堂, 東京.

Fabbri, R. (2012): SIP — Scilab Image Processing Homepage. Available at http://siptoolbox.sourceforge.net/. (December 20th, 2013)

ファイトテクノロジー研究会 (2002): ファイテク How to みる・きく・はかる — 植物環境計測 —. pp. 94–99, 171–175, 養賢堂, 東京.

廣住豊一 (2013): 土壌基質構造の測定法の開発とその物理的性質の評価. 三重大学大学院生物資源学研究科紀要, 39: 1–35.

廣住豊一, 黒澤俊人, 成岡　市 (2011a): 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: 3–15.

廣住豊一, 黒澤俊人, 成岡　市 (2011b): 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: 17–28.

廣住豊一, 黒澤俊人, 成岡　市 (2012): 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: 3–14.

MacGillavry, C.H. and Rieck, G.D. (ed.) (1968): International tables for X-Ray crystallography vol. III —Physical and chemical tables, pp. 157–200, International Union of Crystallography, The Kynoch Press, Birmingham.

森也寸志, 渡辺紹裕, 丸山利輔 (1997): フーリエ変換を用いた土壌粗間隙の構造解析. 農業土木学会論文集, 187 (65-1): 49–57.

中西友子, 古川　純, 松林政仁 (1999): 中性子線による根–土壌系の水の CT イメージング. 土壌の物理性, 82: 29–33.

Nakashima, Y., Mitsuhata, Y., Nishiwaki, J., Kawabe, Y., Utsuzawa, S. and Jinguuji, M. (2011): Non-destructive analysis of oil-contaminated soil core samples by X-ray computed tomography and low-field nuclear magnetic resonance relaxometry: a case study. Water, Air, & Soil Pollution, 214: 681–698.

成岡　市 (1987): 軟 X 線映像による土壌孔隙の立体計測法. 農業土木学会誌, 55(9): 29–35.

日本アイソトープ協会編 (1992): 放射線・アイソトープ 講義と実習, pp.18–37, 丸善, 東京.

徳永光一, 成岡　市, 深谷高俊 (1984): 重液浸入法の開発とそれによる土壌間隙の軟 X 線透写像についての考察 — X 線透写像による土壌と間隙に関する研究（I）—. 農業土木学会論文集, 114: 61–68.

要　　旨

本論では，軟 X 線画像法を用いて，水分飽和状態にある粘土の水分量の推定を行った．本論では，水分飽和状態にある粘土の水分量と密度の関係に着目した．粘土が水分飽和状態にあるとき，水分量は，湿潤密度から算出できる．粘土が乾燥状態あるとき，乾燥密度は，軟 X 線画像の平均濃度階調値から測定できる．湿潤密度も同様に平均濃度階調値から測定できるとすると，水分飽和状態にある粘土の水分量も同様の方法で推定できる．実験には，水分飽和状態にあるカオリンとベントナイトの軟 X 線画像を用いた．そして，軟 X 線画像から推定した含水比および体積含水率を，実測値と比較した．その結果，推定値は，実測値とよく一致した．以上のことから，軟 X 線画像法を用いて，水分飽和状態にある粘土の水分量を推定できることが明らかになった．

キーワード：軟 X 線画像法，湿潤密度，含水比，体積含水率，粘土