

# 土壤構造評価のための軟 X 線画像法

## —微細粒試料の「土壤面密度」—

廣住豊一<sup>1</sup>・黒澤俊人<sup>2</sup>・成岡 市<sup>1</sup>

Soft X-ray digital radiography for soil structure:

“area density of soil” of fine sand, silt and clay

Toyokazu HIROZUMI<sup>1</sup>, Toshihito KUROSAWA<sup>2</sup> and Hajime NARIOKA<sup>1</sup>

**Abstract :** In this paper, authors proposed "Area Density of Soil" (ADoS) which was a new concept for soil structure. ADoS was defined as weight of the solid phase per unit area. In addition, authors investigated how to measure ADoS by using Soft X-ray Digital Radiography (SXDR). Increase of specimen thickness and dry bulk density increased gray level of pixels in soft X-ray digital image. Increase of ADoS also increased average of gray level of pixels in the image. The approximate expression to estimate ADoS from average of gray level of pixels in the image was a linear function. The values calculated by the function were fit in ones measured. This fact provided us a measuring technique of ADoS by using SXDR.

**Keywords :** Soft X-ray Digital Radiography (SXDR), Soil Structure, Area Density of Soil (ADoS), Specimen Thickness, Dry Bulk Density

### 1. はじめに

粘土など微細粒径の土粒子を含む土壤は乾燥収縮や湿潤膨張によってその形状や体積が変化する。また、この変化によって土粒子や団粒の配列様式など土壤内部の構造も変化する。そして、この土壤構造の変化は排水性・保水性・通気性・土壤硬度などに大きな影響を与える。

土壤構造の測定法は測定対象とする土壤構造や用いる手法に応じて様々な方法がある（たとえば、日本第四紀学会, 1993; Childs and Collis-George, 1950; ASTM International, 2004 など）。なかでも、1970年代に利用が始まった X 線を用いる方法は土壤の内部構造を非破壊で測定できるため有用性が高い (Rogaar and Thiadens, 1975; Anderson, 1979)。この X 線を用いた土壤構造測定法のひとつに X 線 CT によるものがある（たとえば、Petrovic et.al., 1981; Cassel et.al., 1990; Sander et.al., 2008 など）。近年では X 線 CT の持つ課題のひとつであった解像力にも大きな進歩がみられる（たとえば、Tip-

pköttera et.al., 2009 など）。しかし、X 線 CT は仕組みが複雑、装置が高価などの課題がある。

これに対して、波長の長い軟 X 線を用いる方法がある。この方法によって土壤構造に関する多くの知見が明らかにされた（たとえば、成岡ら, 1988; Mori et.al., 1999 など）。しかし、これらは土壤粗間隙構造が主対象であり、土壤基質構造に対する測定は土壤の堆積様式の観察（日本第四紀学会, 1993）にみられる程度であった。

土壤粗間隙構造はそのひとつひとつを幾何学的に認識できるため、数・大きさ・形状・方向・位置などを用いて定量的に表現することができる。一方、土壤基質構造は大きさや形状の異なる多数の一次粒子や団粒が幾重にも折り重なって形成されたものであるため、土壤粗間隙構造のように幾何学的な表現方法を用いることは難しい。

そこで筆者らは、土壤の軟 X 線影像には、土粒子および団粒の配列様式またはそれらの重畳様式、すなわち土壤基質構造が投影されていることに着目した。そして、軟 X 線影像をデジタル化し、画像解析することで土壤基質構造を定量化できる「軟 X 線画像法」を開発した（廣住ら, 2011a）。

前報（廣住ら, 2011b）では、ガラスビーズや砂のような粗大粒径試料に対して本法を適用し、土壤粒子の幾何学的性質である粒径を測定できることを示した。

これに加えて、土壤粒子の充填様式を評価できれば、本法は土壤基質構造測定法として利用価値がより高まる。

そこで本論では、土壤粒子の充填様式を表現する概念として、「土壤面密度」を新たに定義した。そして、微細粒土を対象とした軟 X 線画像法による土壤面密度の測定法について検討した。

## 2. 土壤面密度の定義と測定原理

### 2.1 土壤面密度の定義

本論では、土壤基質構造のうち、土粒子の重畳および充填様式を表現する新たな概念として、「土壤面密度 ( $\rho_A$ , Area Density of Soil)」を提案する。

土壤面密度  $\rho_A$  は「土壤の単位面積あたりの固相の質量」として次式のように定義する。

<sup>1</sup>Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan. Corresponding author: 廣住豊一, <sup>1</sup>三重大学大学院生物資源学研究所

<sup>2</sup>Life Science Research Center, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu-shi, Mie, 5148507 Japan

2011年12月8日受稿, 2012年7月3日受理  
土壤の物理性 122号, 3-14 (2012)

$$\rho_A = \frac{M_s}{A_t} \quad (1)$$

$\rho_A$ : 土壌面密度 ( $\text{kg m}^{-2}$ ),  $M_s$ : 固相の質量 ( $\text{kg}$ ),  
 $A_t$ : 面積 ( $\text{m}^2$ )

土壌面密度  $\rho_A$  はある平面範囲に含まれる固相すなわち土粒子の量を示す値である。したがって、土壌粒子の密度が既知であれば、 $\rho_A$  からこの範囲の固相体積を求めることができる。さらに、この範囲の体積が既知であれば、この範囲の間隙体積・固相率・間隙率・間隙比など土壌の充填状態に関する種々の情報を得ることができる。

また、土壌面密度  $\rho_A$  は土壌の厚さ  $t$  および乾燥密度  $\rho$  を用いて次式のように表すこともできる。

$$\rho_A = \rho \cdot t \quad (2)$$

$\rho_A$ : 土壌面密度 ( $\text{kg m}^{-2}$ ),  $\rho$ : 乾燥密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $t$ : 厚さ ( $\text{m}$ )

土壌の厚さ  $t$  は土壌の対向する両端面間の距離である。また、乾燥密度  $\rho$  は単位体積あたりの固相質量と定義される(土壌物理学会, 2002)。このことから、試料の厚さ方向のみに体積変化が生ずると仮定したとき、乾燥収縮などによって  $t$  が減少すると  $\rho$  が増加し、あわせて間隙率が減少する。したがって、 $\rho_A$  は単位面積あたりの土壌がもつ総間隙量の情報を含んでいると考えられる。

土壌面密度  $\rho_A$  はある平面範囲における固相量・間隙量・間隙比など土壌の充填状態を表す値であることから、土壌基質構造の平面的な分布様式や二次元方向の変化の表現に適している。このことから、 $\rho_A$  は土壌基質構造の平面的な不均一性の評価にも利用できる。

## 2.2 土壌面密度の測定原理

(2) 式で示したように土壌面密度  $\rho_A$  は土壌の厚さおよび乾燥密度によってその値が変化する。同様に、物体に照射した X 線の透過量は物体の厚さおよび密度などによって変化する。したがって、X 線は土壌面密度  $\rho_A$  の測定に適していると考えられる。

ある物体に対して単一エネルギーの X 線を照射したとき、その透過量は次式で表される(三枝ら, 2001)。

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (3)$$

$I$ : 物体を透過した X 線量,  $I_0$ : 物体に照射した X 線量,  
 $\mu$ : 線減弱係数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $t$ : 物体の厚さ ( $\text{m}$ )

また、線減弱係数  $\mu$  は次式で表される(日本アイソトープ協会, 1992)。

$$\mu = \sigma \rho \frac{N_A}{A} \quad (4)$$

$\sigma$ : 物体の断面積 ( $\text{m}^2$ ),  $\rho$ : 物体の密度 ( $\text{g m}^{-3}$ ),  
 $N_A$ : アボガドロ数 ( $\text{mol}^{-1}$ ),  $A$ : モル質量 ( $\text{g mol}^{-1}$ )

(2) ~ (4) 式より、土壌に照射した X 線の透過量は土壌面密度  $\rho_A$  と負の相関にあると考えられる。

以上を踏まえて、本論では微細粒土を対象として試料の厚さおよび乾燥密度と軟 X 線画像との関係を調べ、軟 X 線画像法による土壌面密度測定について検討する。

## 3. 材料と方法

試料には、篩い分けによって 0.074 mm 以上の粒子を除去したセメント用の川砂(以下「砂」とする)、三栄シリカ社製珪石粉末 SP-35(以下「シルト」とする)、ナカライテスク社製ベントナイト(Code 03923-85, Bentonite; 以下「ベントナイト」とする)、ナカライテスク社製カオリナイト(Code 19829-45, Kaolinite; 以下「カオリナイト」とする)の4種類を使用した。それぞれの試料の粒径・含水比・土粒子密度を Table 1 に示す。

試料容器には、矩形のポリスチレン製容器(縦横約 27.5 mm, 深さは適宜調節)を用いた。

試料は、均一になるように突き固めながら、試料容器の摺り切りまで充填し、表面をナイフで丁寧に整形した。また、試料は軟 X 線撮影ごとに充填しなおした。そのとき、突き固め回数を変えることで軟 X 線撮影ごとに試料の乾燥密度を変化させた。

試料の厚さおよび乾燥密度の算出に必要な試料容器の深さおよび容積は、あらかじめ試料容器の内寸法を測定することで求めた。

以上の操作で充填した試料は、ソフテックス社製 DCTS-7003 およびフジフィルム社製工業用 X 線フィルム IX FR(以下「フィルム」とする)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、撮影条件は X 線管電圧 40 kV, X 線管電流 1.5 mA, 照射時間 60 s, FFD 500 mm に設定した。

撮影したフィルムの現像には、ニックス社製自動現像

Table 1 試料一覧.  
Specimens.

Specimen	Particle Size(mm)	Particle Density ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	Water Content ( $\text{kg kg}^{-1}$ )
Sand	< 0.074	2.68	0.004
Silica Powder	0.019 (median)	2.67	< 0.001
Bentonite	0.010 (median)	2.72	0.080
Kaolinite	0.005 (median)	2.74	0.003

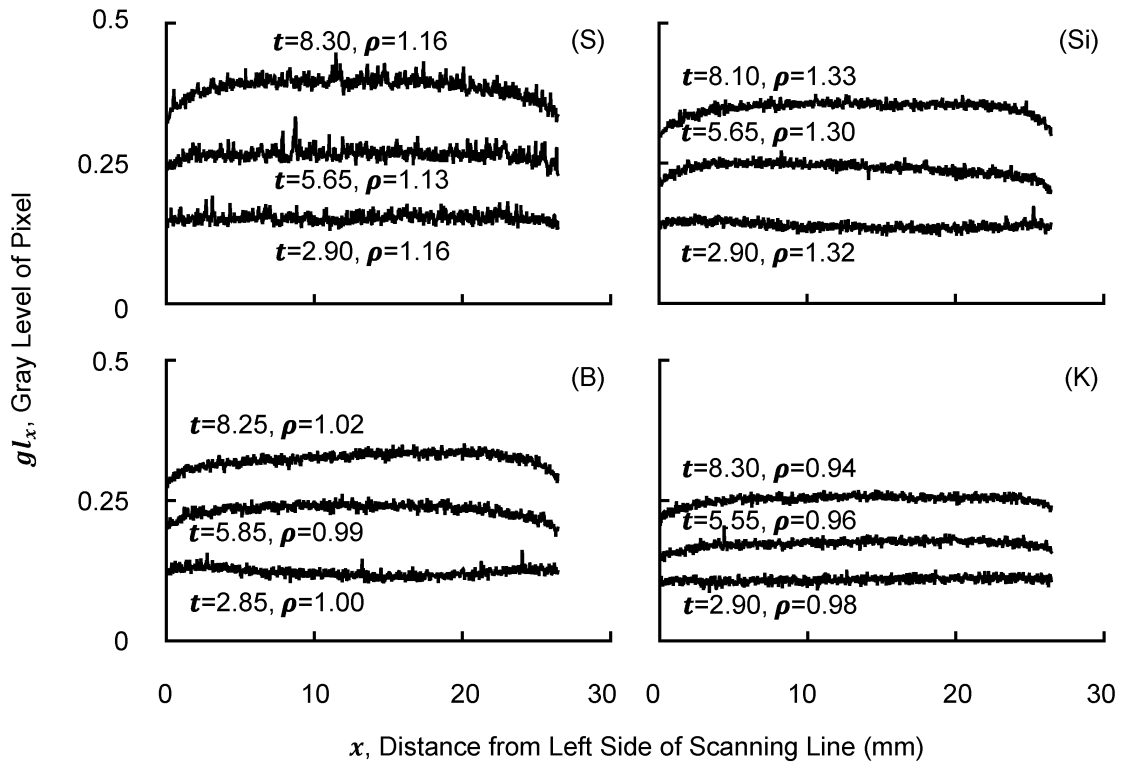


Fig. 1 試料の厚さの違いによる走査線上の画素濃度階調値変化. 図中の  $t$  は試料の厚さ (mm),  $\rho$  は乾燥密度 ( $\text{Mg m}^{-3}$ ). (S) 砂, (Si) シルト, (B) ベントナイト, (K) カオリナイト.

Effect of specimen thickness on gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image.  $t$  is specimen thickness (mm),  $\rho$  is dry bulk density ( $\text{Mg m}^{-3}$ ). (S) sand, (Si) silica powder, (B) bentonite, (K) kaolinite.

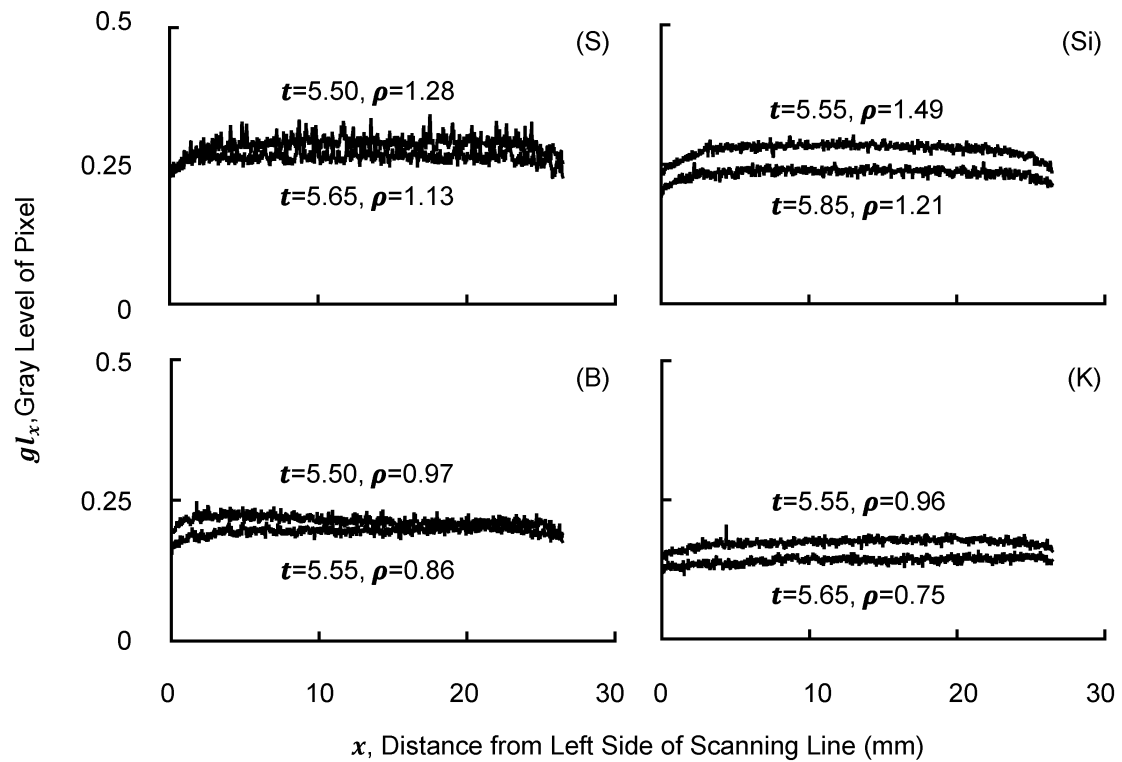


Fig. 2 試料の乾燥密度の違いによる走査線上の画素濃度階調値変化. 図中の  $t$  は試料の厚さ (mm),  $\rho$  は乾燥密度 ( $\text{Mg m}^{-3}$ ). (S) 砂, (Si) シルト, (B) ベントナイト, (K) カオリナイト.

Effect of dry bulk density on gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image.  $t$  is specimen thickness (mm),  $\rho$  is dry bulk density ( $\text{Mg m}^{-3}$ ). (S) sand, (Si) silica powder, (B) bentonite, (K) kaolinite.

機 Hi-RHEIN RH-9001 を使用し、現像液温度 28℃、現像時間 180 s に設定した。

フィルム上に投影された軟 X 線影像是、既報 (廣住ら, 2011a) の方法でデジタル化した。スキャン条件は、16 ビットグレースケール、解像度 1200 dpi (画素の一辺長 0.0212 mm) に設定した。スキャナのアスペクト比は 1:1 であった。

デジタル化した試料画像は一辺 1248 pix (26.4 mm) の正方形の「軟 X 線画像」として画像解析に供した。軟 X 線画像作成時には、試料の軟 X 線画像の陰影の中心が軟 X 線画像の中央に位置するようにした。

軟 X 線画像の画素濃度は、黒を最小値 0、白を最大値の 1 とし、その間を 65536 段階に離散化した「濃度階調値」とした。フィルムは X 線によって黒く感光するため、濃度階調値が低いほど X 線透過量が多いことを示す。

画像解析では、INRIA 製数値計算システム Scilab-4.1.2 および Scilab 用画像処理ツールボックス SIP-0.4.0 を援用し、以下の処理を行った。

(1) 走査線上の画素濃度抽出

軟 X 線画像に走査線を設定し、中心画素を含む左右方向一直線の画素列を抽出した。

(2) 高速フーリエ変換

高速フーリエ変換により走査線上の画素濃度変化の

周期性を解析した。上記 (1) で抽出した画素列の濃度階調値の増減を信号波形とみなし、これを入力信号として処理した。

(3) セミバリオグラム解析

セミバリオグラム解析により走査線上の画素濃度の空間的相関性を解析した。上記 (2) の高速フーリエ変換と同様に、上記 (1) で抽出した画素列の濃度階調値を入力信号として処理した。

(4) 濃度階調値の三次元表示

格子分割法 (廣住ら, 2011a) により濃度階調値の空間分布を可視化した。格子寸法は上記 (3) で求めた画素濃度の空間的相関性をもとに決定した。

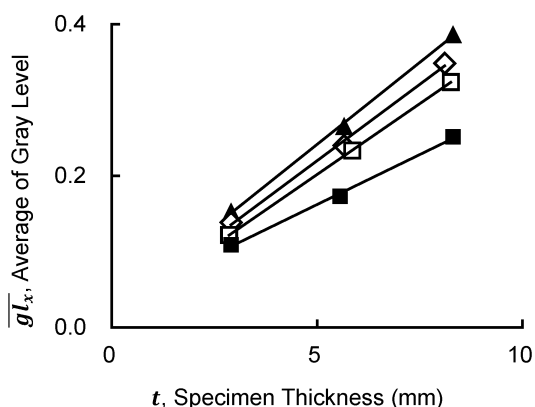
(5) 濃度階調値の統計処理

軟 X 線画像上に正方形の解析対象範囲 (以下「解析枠」とする) を設定し、解析枠内の平均濃度階調値を求めた。そして、解析枠の大きさを増減させ、解析枠内の平均濃度階調値の変化を調べた。解析枠の中心は軟 X 線画像の中心に合わせた。

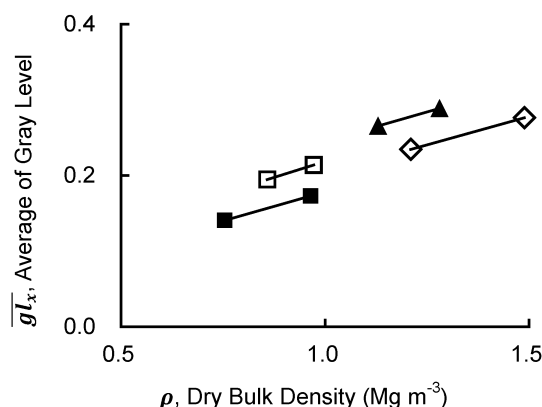
## 4. 結果と考察

### 4.1 試料の厚さおよび乾燥密度と画素濃度

走査線上の濃度階調値に対する解析によって、試料の厚さおよび乾燥密度が軟 X 線画像の画素濃度に与える



**Fig. 3** 試料の厚さ  $t$  と走査線上の平均画素濃度階調値  $\overline{g}_x$ . ▲砂, ◇シルト, □ベントナイト, ■カオリナイト.  $t$ , specimen thickness and  $\overline{g}_x$ , average of gray levels on scanning line. ▲ sand, ◇ silica powder, □ bentonite, ■ kaolinite.



**Fig. 4** 試料の乾燥密度  $\rho$  と走査線上の平均画素濃度階調値  $\overline{g}_x$ . ▲砂, ◇シルト, □ベントナイト, ■カオリナイト.  $\rho$ , dry bulk density and  $\overline{g}_x$ , average of gray levels on scanning line. ▲ sand, ◇ silica powder, □ bentonite, ■ kaolinite.

**Table 2** 試料厚  $t$  と走査線上の平均画素濃度階調値  $\overline{g}_x$  の関係式 (Fig. 3).  $r^2$  は決定係数.

Approximation between  $t$ , specimen thickness and  $\overline{g}_x$ , average of gray levels on scanning line (Fig. 3).  $r^2$ , coefficient of determination.

Specimen	Approximation	$r^2$
Sand	$\overline{g}_x = 0.0433 t + 0.0250$	0.999
Silica Powder	$\overline{g}_x = 0.0403 t + 0.0182$	0.997
Bentonite	$\overline{g}_x = 0.0374 t + 0.0150$	1.000
Kaolinite	$\overline{g}_x = 0.0264 t + 0.0299$	0.998

**Table 3** 乾燥密度  $\rho$  と走査線上の平均画素濃度階調値  $\overline{g}_x$  の関係式 (Fig. 4).  $r^2$  は決定係数.

Approximation between  $\rho$ , dry bulk density and  $\overline{g}_x$ , average of gray levels on scanning line (Fig. 4).  $r^2$ , coefficient of determination.

Specimen	Approximation	$r^2$
Sand	$\overline{g}_x = 0.1539 \rho + 0.0917$	—
Silica Powder	$\overline{g}_x = 0.1501 \rho + 0.0527$	—
Bentonite	$\overline{g}_x = 0.1685 \rho + 0.0498$	—
Kaolinite	$\overline{g}_x = 0.1528 \rho + 0.0254$	—

影響を調べた。

各試料の走査線上の画素濃度変化を Figs. 1, 2 に示す。横軸は走査線左端からの距離  $x$  mm, 縦軸は走査線左端から  $x$  mm 離れた位置の濃度階調値  $gl_x$  である。また、同図は試料の種類ごとに整理してまとめた。

Fig. 1 では、試料の厚さが画素濃度に与える影響をみた。同図では、 $\rho$  の差が  $0.05 \text{ Mg m}^{-3}$  以下かつ  $t$  の差が 2 mm 以上の走査線の組み合わせを試料の種類ごとに選択した。

Fig. 2 では、試料の乾燥密度が画素濃度に与える影響をみた。同図では、 $t$  の差が 0.3 mm 以下かつ  $\rho$  の差が  $0.1 \text{ Mg m}^{-3}$  以上の走査線の組み合わせを試料の種類ごとに選択した。

Figs. 1, 2 によると、 $gl_x$  は、 $\rho$  が同等の条件では  $t$  が大きいほど、また  $t$  が同等の条件では  $\rho$  が大きいほど、高い値を示した。

Fig. 1 を用いて求めた  $t$  と  $gl_x$  の平均値  $\overline{gl_x}$  との関係を図 3 に示す。いずれの試料の種類でも  $\overline{gl_x}$  は  $t$  と正の相関があり、この関係は Table 2 に示した一次関数で近似できた。この近似式は試料の種類ごとに異なった。これらの一次関数の傾きは砂 > シルト > ベントナイト > カオリナイトの順に大きかった。これは試料粒径の序列と合致した。

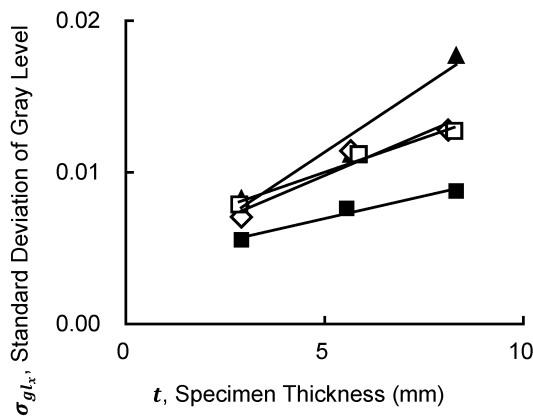


Fig. 5 試料厚  $t$  と走査線上の画素濃度階調値の標準偏差  $\sigma_{glx}$ . ▲砂, ◇シルト, □ベントナイト, ■カオリナイト.  $t$ , specimen thickness and  $\sigma_{glx}$ , standard deviation of gray levels on scanning line. ▲ sand, ◇ silica powder, □ bentonite, ■ kaolinite.

Table 4 試料厚  $t$  と走査線上の画素濃度階調値の標準偏差  $\sigma_{glx}$  の関係式 (Fig. 5).  $r^2$  は決定係数.

Approximation between  $t$ , specimen thickness and  $\sigma_{glx}$ , standard deviation of gray levels on scanning line (Fig. 5).  $r^2$ , coefficient of determination.

Specimen	Approximation	$r^2$
Sand	$\sigma_{glx} = 0.0017 t + 0.0026$	0.949
Silica Powder	$\sigma_{glx} = 0.0011 t + 0.0042$	0.935
Bentonite	$\sigma_{glx} = 0.0009 t + 0.0055$	0.980
Kaolinite	$\sigma_{glx} = 0.0006 t + 0.0040$	0.970

Fig. 2 を用いて求めた  $\rho$  と  $gl_x$  の平均値  $\overline{gl_x}$  との関係を図 4 に、 $\rho$  と  $\overline{gl_x}$  との関係を表す一次関数を Table 3 にそれぞれ示す。 $\rho$  と  $\overline{gl_x}$  の一次関数は、いずれの試料の種類でも正の傾きを持ち、傾きの大きさは試料の種類ごとに異なった。

以上のことから、(3), (4) 式のとおり、試料を透過する X 線量は試料の厚さおよび乾燥密度と負の相関があることが確認できた。

#### 4.2 画素濃度の増減

Figs. 1, 2 の  $gl_x$  はいずれの試料の種類・厚さ・乾燥密度においても、 $x$  の変化とともに増減を繰り返す傾向があった。Figs. 1, 2 の (Si), (B), (K) の各グラフによると、シルト・ベントナイト・カオリナイトではその増減の変動幅はほぼ同じであった。これらに対して、Figs. 1, 2 の (S) のグラフによると、砂の変動幅はやや大きかった。

Fig. 1 を用いて求めた  $t$  と  $gl_x$  の標準偏差  $\sigma_{glx}$  の関係を Fig. 5 に示す。いずれの試料でも  $\sigma_{glx}$  は  $t$  と正の相関があり、この関係は Table 4 に示した一次関数で近似できた。

Fig. 2 を用いて求めた  $\rho$  と  $gl_x$  の標準偏差  $\sigma_{glx}$  との関係を Fig. 6 に、 $\rho$  と  $\sigma_{glx}$  との関係を表す一次関数を Table 5 にそれぞれ示す。 $\rho$  と  $\sigma_{glx}$  の一次関数はいずれの試料の種類でも正の傾きを持っていた。

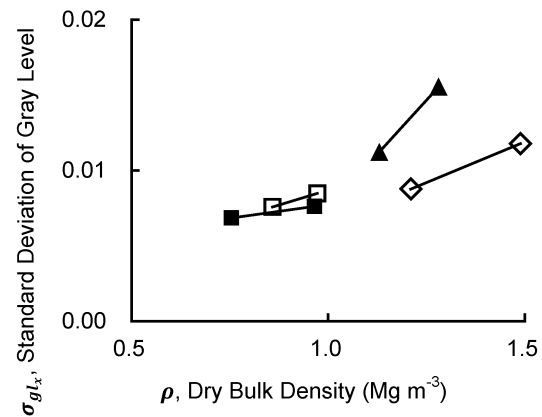


Fig. 6 乾燥密度  $\rho$  と走査線上の画素濃度階調値の標準偏差  $\sigma_{glx}$ . ▲砂, ◇シルト, □ベントナイト, ■カオリナイト.  $\rho$ , dry bulk density and  $\sigma_{glx}$ , standard deviation of gray levels on scanning line. ▲ sand, ◇ silica powder, □ bentonite, ■ kaolinite.

Table 5 乾燥密度  $\rho$  と走査線上の画素濃度階調値の標準偏差  $\sigma_{glx}$  の関係式 (Fig. 6).  $r^2$  は決定係数.

Approximation between  $\rho$ , dry bulk density and  $\sigma_{glx}$ , standard deviation of gray levels on scanning line (Fig. 6).  $r^2$ , coefficient of determination.

Specimen	Approximation	$r^2$
Sand	$\sigma_{glx} = 0.0288 \rho - 0.0213$	—
Silica Powder	$\sigma_{glx} = 0.0108 \rho - 0.0043$	—
Bentonite	$\sigma_{glx} = 0.0079 \rho + 0.0008$	—
Kaolinite	$\sigma_{glx} = 0.0036 \rho + 0.0041$	—

これらのことから、試料の厚さおよび乾燥密度に連動して  $g_x$  の増減の変動幅が大きくなることが確認できた。また、近似式に用いた一次関数の傾きは砂>シルト>ベントナイト>カオリナイトの順に大きかった。これは試料粒径の序列と合致した。

次に、Fig. 1 の  $g_x$  に対して高速フーリエ変換を適用し、画素濃度変化の周期性を調べた。

その結果を試料の種類・厚さごと整理して Fig. 7 に示す。横軸は周期  $T$  mm, 縦軸はその周期におけるフーリエ振幅スペクトル  $F(T)$  である。ここでは  $g_x$  の細かな増減をみるため  $T$  の範囲は  $T < 2$  とした。

砂では  $F(T)$  は  $T$  と正の相関があった ( $S_H, S_M, S_L$ )。しかし、シルト・ベントナイトでは砂に比べてその傾向は弱かった ( $Si_H, Si_M, B_H, B_M$ )。また、 $t$  が小さいものやカオリナイトではこの傾向はみられなかった ( $Si_L, B_L, K_H, K_M, K_L$ )。

$K_H, K_M, K_L$ ).

$T$ - $F(T)$  の近似式とその決定係数,  $F(T)$  の標準偏差を Table 6 に示す。

$T$ - $F(T)$  の近似式  $F(T) = a \cdot \log T + \beta$  はいずれも  $a > 0$  であった。このことから、 $T$  が大きいほど  $F(T)$  も大きくなる傾向が確認できた。また、砂では  $a > 0.3$  であったが、シルト・ベントナイト・カオリナイトでは  $a < 0.2$  であった。このことから、 $T$  が大きいほど  $F(T)$  も大きくなる傾向は、砂において顕著であるが、シルト・ベントナイト・カオリナイトでは弱いことがわかった。

$F(T)$  の標準偏差  $\sigma_{F(T)}$  は、砂では  $\sigma_{F(T)} > 0.15$  であったが、シルト・ベントナイト・カオリナイトでは  $\sigma_{F(T)} \cong 0.1$  であった。このことから、砂はシルト・ベントナイト・カオリナイトより  $F(T)$  の変動が大きいことがわかった。

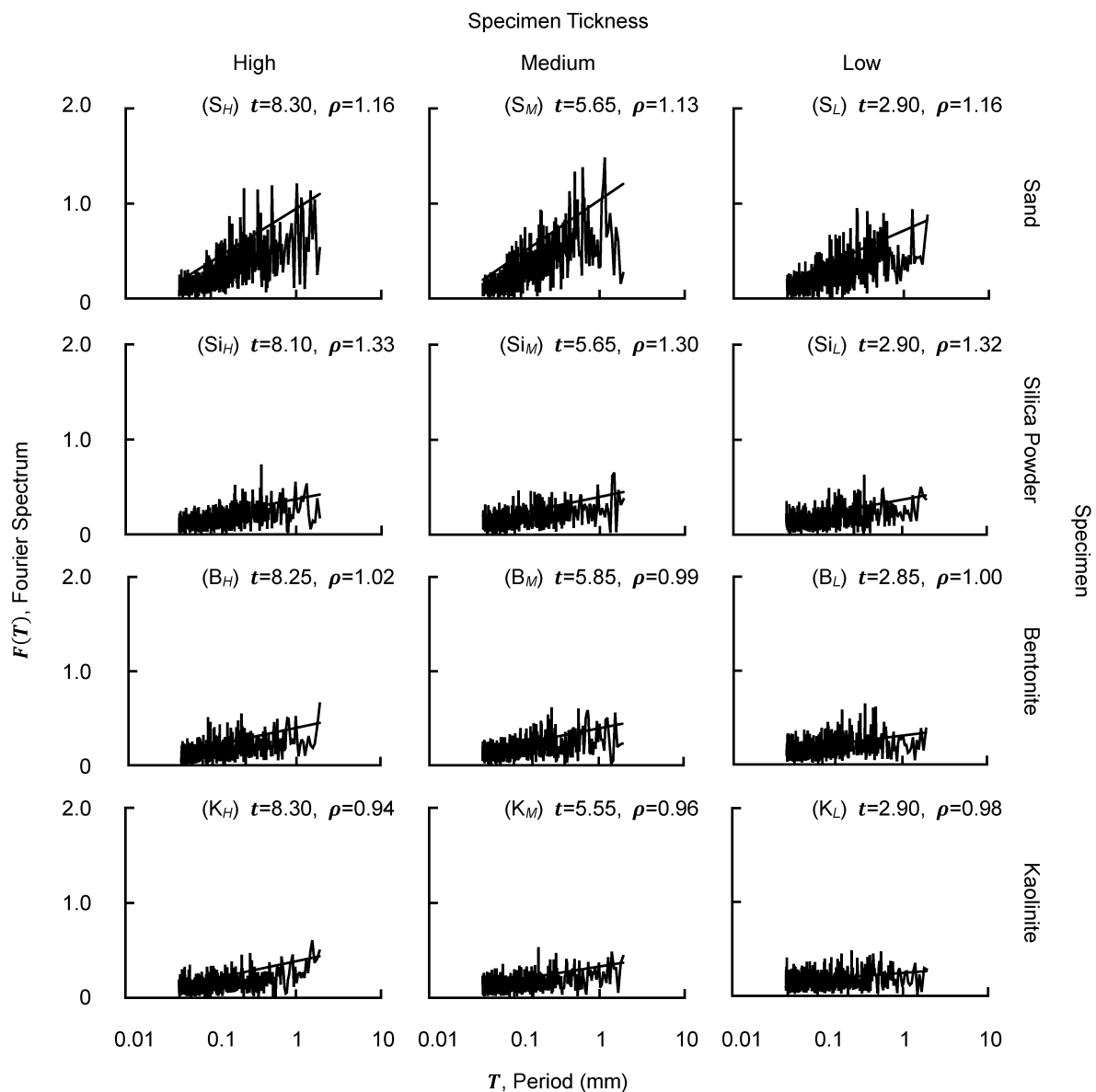


Fig. 7 高速フーリエ変換の適用結果。図中の  $t$  は試料の厚さ (mm),  $\rho$  は乾燥密度 ( $\text{Mg m}^{-3}$ )。図中の直線は直線近似したもの。

Result of FFT analysis for gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image.  $t$  is specimen thickness (mm),  $\rho$  is dry bulk density ( $\text{Mg m}^{-3}$ ). Straight lines are collinear approximations.

これらの結果をまとめると、以下のとおりであった。

- (1) 砂では、画素濃度変化はある程度の周期性を持っている。
- (2) シルト・ベントナイト・カオリナイトでは、画素濃度変化は周期性に乏しい。

ガラスビーズや砂のような粗大粒径の試料では、粒径と画素濃度の変動幅に密接な関係があった（廣住ら、2011b）。しかし、本論で用いた砂以外の微細粒試料では、画素濃度の増減幅に顕著な違いはなく、画素濃度変化も周期性に乏しかった。

均一粒径に近い試料では、粒径が画素濃度階調値の変化に周期性を与える大きな要因であると考えられる。しかし、本論で用いた試料のうち、シルト・ベントナイト・カオリナイトの中央粒径はいずれも解像度の下限値となる画素寸法 0.0212 mm より小さかった。したがって、軟 X 線画像では、これらの試料の粒子の幾何学的変化を捉えられず、画素濃度変化に周期性が現れなかったと考えられる。

#### 4.3 画素濃度の不均一分布

Figs. 1, 2 の  $gl_x$  の変化にはいくつかの傾向があった。たとえば、試料中央部の  $gl_x$  が試料両端部の  $gl_x$  より高いもの、逆に試料中央部の  $gl_x$  が試料両端部の  $gl_x$  より低いもの、試料左端または右端の  $gl_x$  が反対側の  $gl_x$  より高いものなどである。これは試料の充填時に生じた試料厚や乾燥密度の不均一性によると考えられる（廣住ら、2011a）。

そこで、格子分割法を用いて画素濃度変化を三次元座標上に表示し、軟 X 線画像全面における画素濃度分布

の不均一性を可視化した。格子分割法では軟 X 線画像を分割する格子の寸法によって特徴を抽出できる土壌構造単位が変化するため、セミバリオグラム解析によって適切な格子寸法を求めた。

その結果を試料の種類・厚さごと整理して Fig. 8 に示す。横軸は画素間の距離  $h$  mm, 縦軸はセミバリオグラム  $\gamma(h)$  である。

セミバリオグラム解析で得られたレンジは、砂では  $h < 0.25$ , シルト・ベントナイト・カオリナイトでは  $h < 0.1$  であった。

軟 X 線画像の画素濃度の不均一性をより精緻に可視化するには格子寸法はできる限り小さくすることが好ましい。しかし、格子寸法が小さくなると、個々の粒子形状や粒子同士の干渉、軟 X 線画像に含まれる雑音などが無視できなくなる。セミバリオグラム解析ではデータ間の相関が失われる距離をレンジとしている。すなわち、画素間の距離がセミバリオグラム解析で求めたレンジ以上であれば、それらの画素間の濃度階調値には相関性がなく、それぞれ独立したデータとして扱うことができる。したがって、格子寸法はレンジ以上のできるだけ小さい値が最適と判断した。

この結果を踏まえ、格子寸法を 12 pix (0.25 mm) に設定した格子分割法を用いて各格子の平均濃度階調値を求め、三次元座標上に表示した。その一例を Fig. 9 に示す。xy 平面座標は軟 X 線画像上の位置  $(x, y)$ , 縦軸はその位置  $(x, y)$  にある格子の平均濃度階調値  $\overline{gl_{x,y}}$  である。x 座標は軟 X 線画像左端から距離  $x$  mm, y 座標は軟 X 線画像上端から距離  $y$  mm である。また、Fig. 9 のグラ

**Table 6**  $T$ - $F(T)$  の近似式と  $F(T)$  の標準偏差 (Fig. 7).  
Approximation of  $T$ - $F(T)$  and standard deviation of  $F(T)$  (Fig. 7) .

Specimen	$t$ , Specimen Thickness (mm)	$\rho$ , Dry Bulk Density (Mg m <sup>-3</sup> )	$F(T) = \alpha \cdot \log T + \beta$ , Approximation of $T$ - $F(T)$	$r^2$ , Coefficient of Determination	$\sigma_{F(T)}$ , Standard Deviation of $F(T)$	Source Figs.
Sand	8.30	1.16	$F(T) = 0.4978 \cdot \log T + 0.1585$	0.336	0.202	Fig.7-(S <sub>H</sub> )
	5.65	1.13	$F(T) = 0.5478 \cdot \log T + 0.1692$	0.330	0.225	Fig.7-(S <sub>M</sub> )
	2.90	1.16	$F(T) = 0.3497 \cdot \log T + 0.1626$	0.258	0.162	Fig.7-(S <sub>L</sub> )
Silica Powder	8.10	1.33	$F(T) = 0.1556 \cdot \log T + 0.1263$	0.147	0.096	Fig.7-(Si <sub>H</sub> )
	5.65	1.30	$F(T) = 0.1642 \cdot \log T + 0.1368$	0.167	0.095	Fig.7-(Si <sub>M</sub> )
	2.90	1.32	$F(T) = 0.1449 \cdot \log T + 0.1384$	0.128	0.095	Fig.7-(Si <sub>L</sub> )
Bentonite	8.25	1.02	$F(T) = 0.1680 \cdot \log T + 0.1324$	0.155	0.101	Fig.7-(B <sub>H</sub> )
	5.85	0.99	$F(T) = 0.1583 \cdot \log T + 0.1417$	0.129	0.104	Fig.7-(B <sub>M</sub> )
	2.85	1.00	$F(T) = 0.0986 \cdot \log T + 0.1516$	0.056	0.099	Fig.7-(B <sub>L</sub> )
Kaolinite	8.30	0.94	$F(T) = 0.1686 \cdot \log T + 0.1175$	0.204	0.088	Fig.7-(K <sub>H</sub> )
	5.55	0.96	$F(T) = 0.1282 \cdot \log T + 0.1265$	0.135	0.082	Fig.7-(K <sub>M</sub> )
	2.90	0.98	$F(T) = 0.0603 \cdot \log T + 0.1464$	0.027	0.085	Fig.7-(K <sub>L</sub> )

フ番号  $S_H$ ,  $Si_L$ ,  $B_M$ ,  $K_H$  は, Fig. 1 の走査線番号  $S_H$ ,  $Si_L$ ,  $B_M$ ,  $K_H$  にそれぞれ対応する。

その結果,  $\overline{gl_{x,y}}$  は, 試料中央部では高く試料辺縁部に向かって低くなるもの ( $S_H$ ,  $B_M$ ), 試料中央部では低く試料辺縁部に向かって高くなるもの ( $Si_L$ ,  $K_H$ ) などがあり, 軟 X 線画像全面において画素濃度分布が不均一であることやその分布状態が試料ごとに異なることを確認できた。これは, 試料充填時の突き固めによって生じた試料の厚さまたは乾燥密度の不均一性が画素濃度の不均一性として現れたと考えられる。また, いずれの試料でも軟 X 線画像の最辺縁部の  $\overline{gl_{x,y}}$  が低かった。これは, 試料充填時に試料容器の辺縁部に対して十分に突き固め操作を行うことができず, 乾燥密度が低くなったためであると考えられる。

Fig. 9 の  $S_H$ ,  $B_M$  でみられた試料中央部の方が試料辺縁部よりも  $\overline{gl_{x,y}}$  が高い傾向は Fig. 1 の  $S_H$ ,  $B_M$  において

も確認できた。しかし, Fig. 9 の  $Si_L$ ,  $K_H$  でみられた試料辺縁部の方が試料中央部よりも  $\overline{gl_{x,y}}$  が高い傾向は Fig. 1 の  $Si_L$  では確認できたが, Fig. 1 の  $K_H$  では確認できなかった。これは, 走査線上の画素濃度変化が試料のその他の場所の画素濃度の変化に比べて小さかったためであると考えられる。

#### 4.4 解析枠寸法と平均濃度階調値

これまでの論議から, 軟 X 線画像の画素濃度は数画素のスケールおよび軟 X 線画像全面のスケールのいずれでも不均一に分布していることがわかった。そこで, この画素濃度分布の不均一性が軟 X 線画像法の解析結果に与える影響について検討した。

各試料の軟 X 線画像における解析枠の寸法とその解析枠内の平均濃度階調値との関係を Fig. 10 に示す。横軸は解析枠の一辺の長さ  $a$  mm, 縦軸はその解析枠内の平均濃度階調値  $\overline{gl_a}$  である。

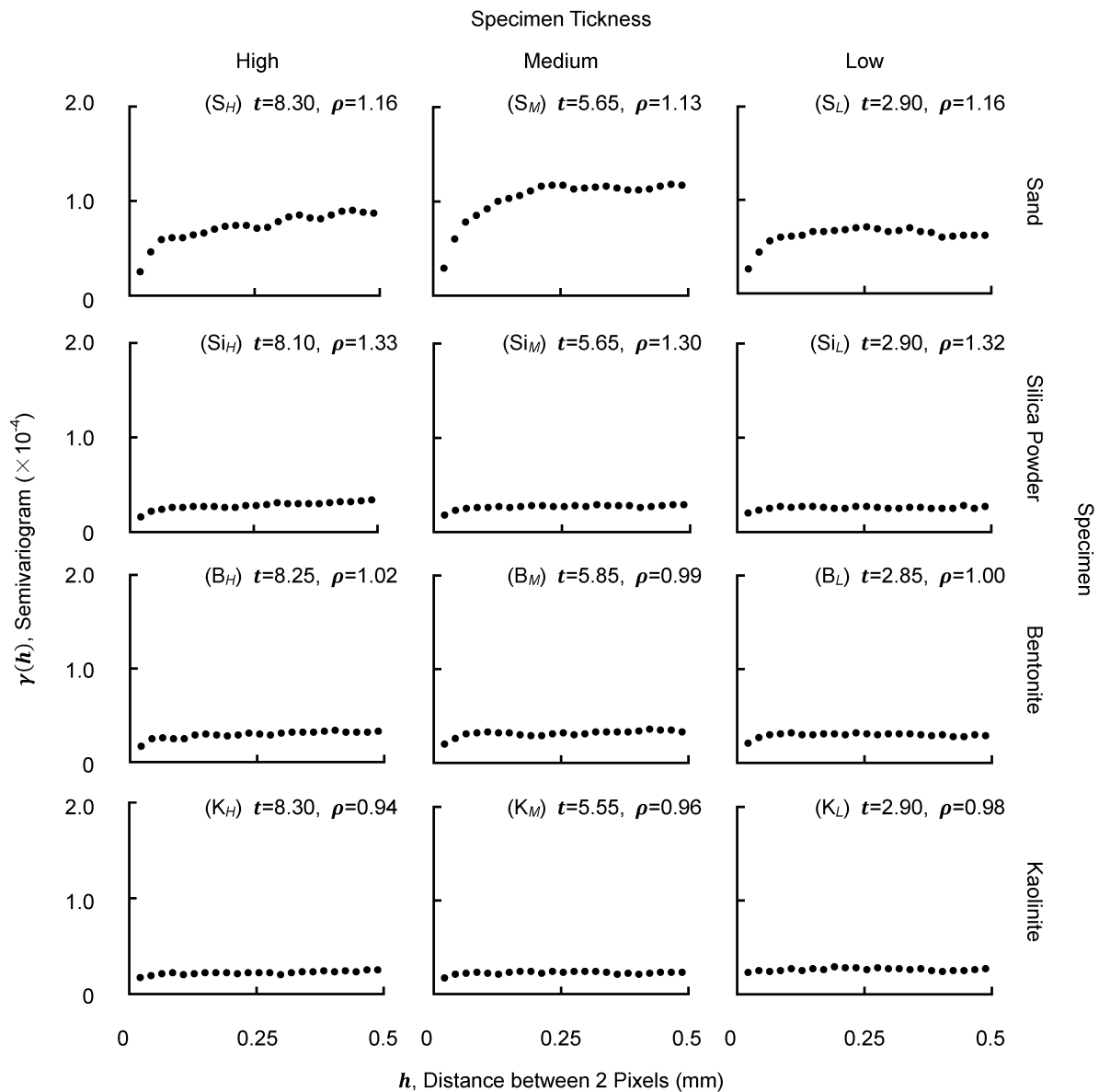


Fig. 8 セミバリオグラム解析の適用結果. 図中の  $t$  は試料の厚さ (mm),  $\rho$  は乾燥密度 (Mg m<sup>-3</sup>).

Result of semivariogram analysis for gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image.  $t$  is specimen thickness (mm),  $\rho$  is dry bulk density (Mg m<sup>-3</sup>).



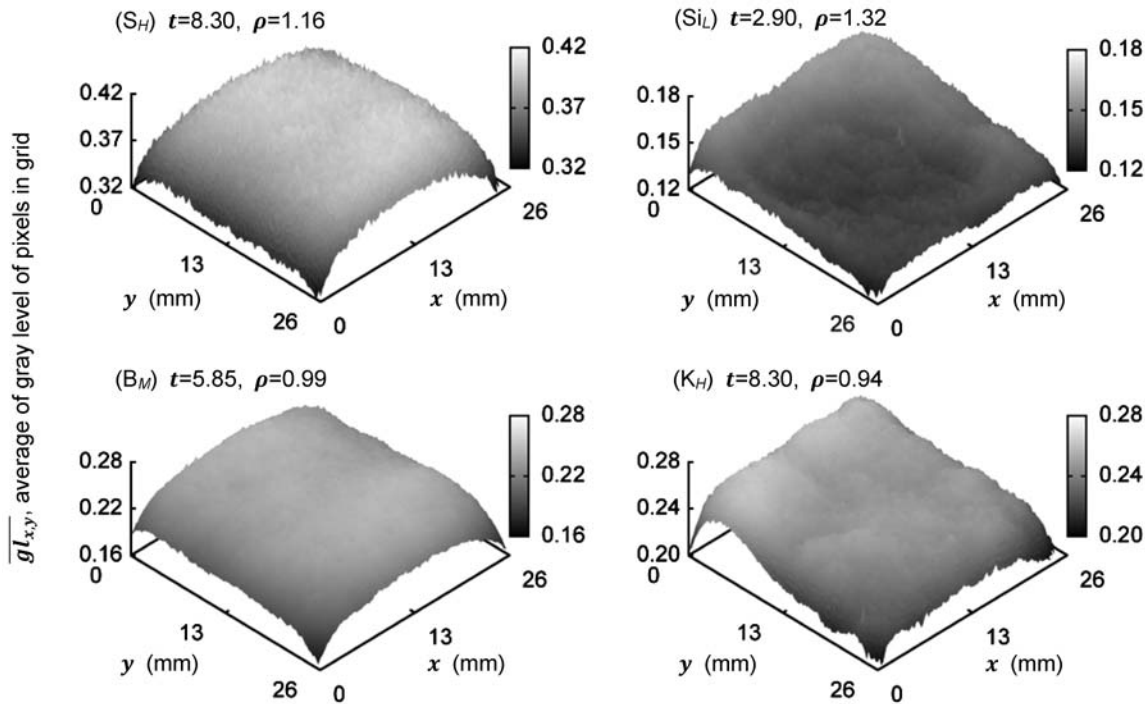


Fig. 9 軟 X 線画像全面における濃度階調値の分布状況. 図中の  $t$  は試料の厚さ (mm),  $\rho$  は乾燥密度 ( $\text{Mg m}^{-3}$ ). ( $S_H$ ) 砂, ( $Si_L$ ) シルト, ( $B_M$ ) ベントナイト, ( $K_H$ ) カオリナイト.

Spatial distribution of gray level of pixels in soft X-ray digital image.  $t$  is specimen thickness (mm),  $\rho$  is dry bulk density ( $\text{Mg m}^{-3}$ ). ( $S_H$ ) sand, ( $Si_L$ ) silica powder, ( $B_M$ ) bentonite, ( $K_H$ ) kaolinite.

Fig. 10 のいずれも,  $a$  が小さいほど  $\overline{gl}_a$  の急激な増減や小刻みな増減がみられ  $\overline{gl}_a$  の変動幅が大きかった. しかし,  $a$  の増加とともに  $\overline{gl}_a$  の変化はゆるやかに推移した. また,  $\overline{gl}_a$  と  $a$  に正の相関があるもの ( $Si_L$ ,  $B_L$ ),  $\overline{gl}_a$  と  $a$  に負の相関があるもの ( $S_H$ ,  $S_M$ ,  $Si_H$ ,  $Si_M$ ,  $B_H$ ,  $B_M$ ,  $K_M$ ) などの傾向があった. この傾向は, Figs. 1, 2 において, 試料中央部の  $\overline{gl}_x$  が試料両端部の  $\overline{gl}_x$  より高いもの, 試料中央部の  $\overline{gl}_x$  が試料両端部の  $\overline{gl}_x$  より低いものに対応していた.

これらの結果から,  $a$  が小さいときにみられた  $\overline{gl}_a$  の細かな増減は粒子の形状や粒子同士の干渉などによる狭い範囲での試料の不均一性をとらえており,  $\overline{gl}_a$  の変化がゆるやかに推移しはじめてからの変化は試料全体の充填の不均一性をとらえたものと考えられる.

#### 4.5 土壌面密度と平均濃度階調値

以上の論議から, 軟 X 線画像の画素濃度は試料の厚さおよび乾燥密度と密接な関係があり, これらには正の相関があることがわかった. また, 試料充填時に生じた不均一性は軟 X 線画像に反映し, 解析枠の寸法によって得られる平均濃度階調値に影響することがわかった.

土壌面密度は, (2) 式のように試料の厚さに乾燥密度を乗じた値に等しい. したがって, 軟 X 線画像の濃度階調値から土壌面密度が推定できる. しかし, 軟 X 線画像の画素濃度は画像全面に不均一に分布している.

そこで, 本論では土壌面密度の推定に平均濃度階調値を用いた. 本論では, 試料の厚さおよび乾燥密度を試料全体の値として測定したため, これらの値と軟 X 線画像法による解析結果を対応させるには, 軟 X 線画像全体に含まれるすべての画素に対する解析結果を用いる必

要がある.

土壌面密度と軟 X 線画像全体の平均濃度階調値の関係を Fig. 11 に示す. 横軸は軟 X 線画像全体の平均濃度階調値  $\overline{gl}$ , 縦軸は土壌面密度  $\rho_A$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ) である.

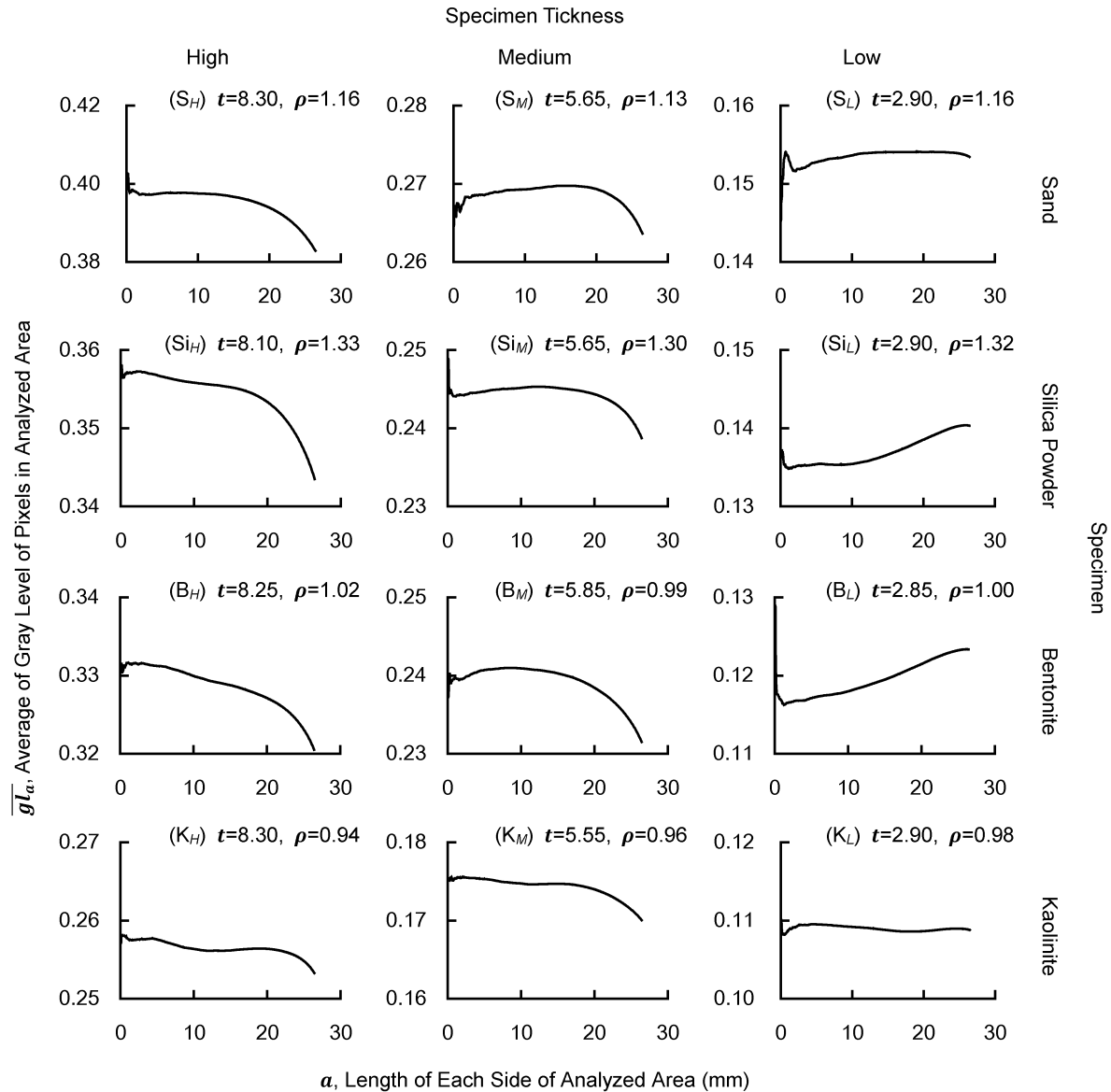
いずれの試料でも  $\rho_A$  は  $\overline{gl}$  と正の相関があり, この関係は Table 7 のように近似できた.

(3), (4) 式から,  $\rho_A$  の増加は X 線透過量に指数関数的な影響を与える. しかし,  $\rho_A$  と  $\overline{gl}$  の関係は一次関数で近似できた. このことは X 線フィルムの写真特性によると考えられる. すなわち, X 線フィルムの黒化度は X 線照射量に対数比例する (荒川ら, 2000). したがって,  $\rho_A$  の増減にともなう X 線透過量の指数関数的な増減はこの X 線フィルムの特性によって相殺されたと考えられる. また, 近似式の傾きは試料ごとに異なったが, これは試料を構成する土壌基質の化学組成などによると考えられる.

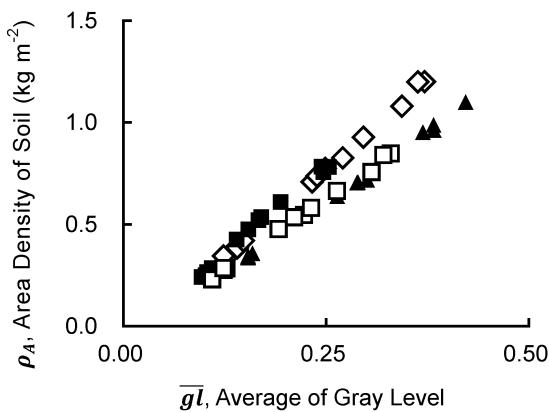
以上のことから, 軟 X 線画像全面の平均濃度階調値  $\overline{gl}$  を測定することによって, 土壌面密度  $\rho_A$  が推定できることが明らかになった. また, このとき得られる  $\rho_A$  は試料全体の充填状態をすべて包含したものであった.

#### 4.6 軟 X 線画像法による土壌面密度の測定例

軟 X 線画像法によって土壌面密度の分布がどのように可視化されるかを示すため, 格子寸法を 12 pix (0.25 mm) に設定した格子分割法で得られた平均濃度階調値から, 前節の Fig. 11 および Table 7 で求めた近似式を用いて各格子の土壌面密度  $\rho_A$  を求め, 三次元座標上に表示した. その一例を Fig. 12 に示す.  $xy$  平面座標は軟 X 線画像上の位置 ( $x, y$ ), 縦軸はその位置の土壌面密度  $\rho_A$  である. また, Fig. 9 のグラフ番号  $S_M$ ,  $Si_M$ ,  $B_M$ ,  $K_M$  は,



**Fig. 10** 解析対象範囲の一辺の長さ  $a$  と平均濃度階調値  $\bar{g}l_a$ . 図中の  $t$  は試料の厚さ (mm),  $\rho$  は乾燥密度 ( $Mg\ m^{-3}$ ).  
 $a$ , length of each side of analyzed area, and  $\bar{g}l_a$ , average of gray levels of pixels in this area.  $t$  is specimen thickness (mm),  
 $\rho$  is dry bulk density ( $Mg\ m^{-3}$ )



**Fig. 11** 土壌面密度  $\rho_A$  と軟 X 線画像全体の平均濃度階調値  $\bar{g}l$ . ▲砂, ◇シルト, □ベントナイト, ■カオリナイト.  
 $\rho_A$ , area density of soil, and  $\bar{g}l$ , average of gray levels in soft X-ray digital image. ▲ sand, ◇ silica powder, □ bentonite, ■ kaolinite.

**Table 7** 土壌面密度  $\rho_A$  と軟 X 線画像の平均濃度階調値  $gl$  の関係式 (Fig. 11).  $r^2$  は決定係数.  
 Approximation between  $\rho_A$ , area density of soil, and  $gl$ , average of gray levels of pixels in soft X-ray digital image (Fig. 11).  $r^2$ , coefficient of determination.

Specimen	Approximation	$r^2$
Sand	$\rho_A = 27.93 \bar{g}l - 0.9324$	0.9979
Silica Powder	$\rho_A = 34.94 \bar{g}l - 0.9989$	0.9981
Bentonite	$\rho_A = 27.62 \bar{g}l - 0.6225$	0.9971
Kaolinite	$\rho_A = 35.17 \bar{g}l - 0.8572$	0.9915

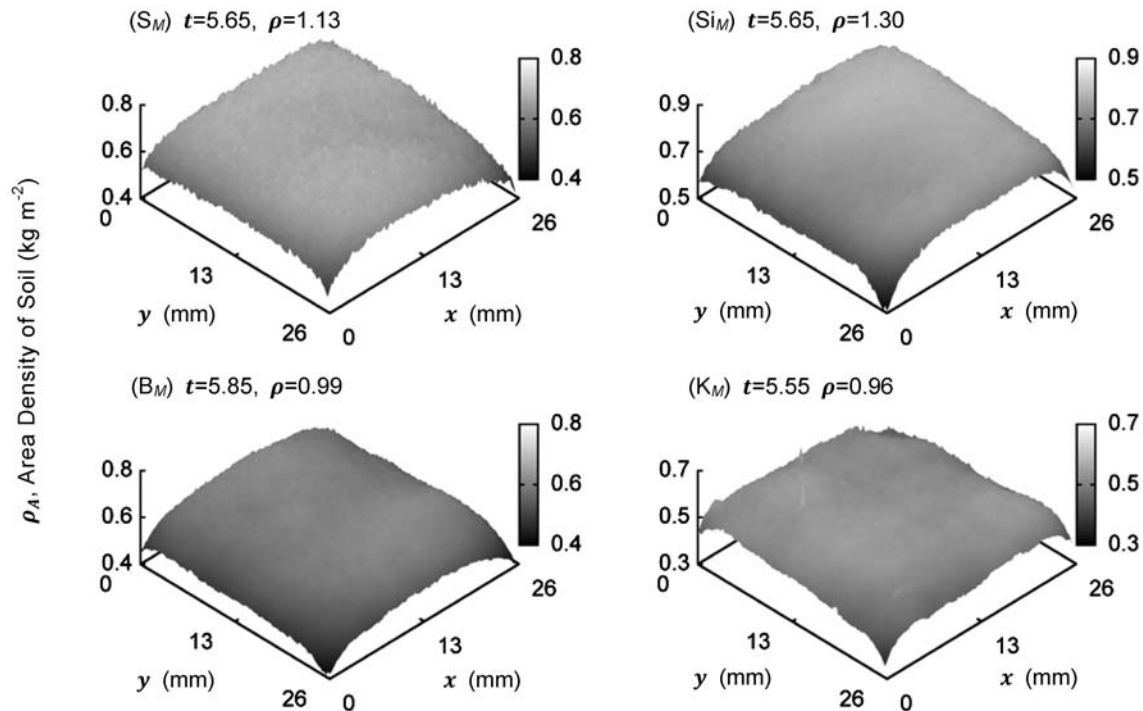


Fig. 12 軟 X 線画像法による土壤面密度  $\rho_A$  の測定例。図中の  $t$  は試料の厚さ(mm),  $\rho$  は乾燥密度( $\text{Mg m}^{-3}$ )。( $S_M$ )砂, ( $Si_M$ )シルト, ( $B_M$ ) ベントナイト, ( $K_M$ ) カオリナイト。  
Measurement of  $\rho_A$ , area density of soil by using Soft X-ray Digital Radiography.  $t$  is specimen thickness (mm),  $\rho$  is dry bulk density ( $\text{Mg m}^{-3}$ ). ( $S_M$ ) sand, ( $Si_M$ ) silica powder, ( $B_M$ ) bentonite, ( $K_M$ ) kaolinite.

Fig. 1 の走査線番号  $S_M, Si_M, B_M, K_M$  にそれぞれ対応する。Fig. 12 から、いずれの試料の種類でも、 $\rho_A$  は試料内で不均一に分布しており、試料中央部に比べて試料辺縁部で低く、全体的に湾曲形状を示すことが確認できた。従来の円筒管による乾燥密度測定法では、試料全体の値としての乾燥密度は得られるが、その分布状態は得られない。しかし、軟 X 線画像法による土壤面密度測定では、試料内の土壤面密度の分布状態を可視化し、試料充填の不均一性を読み取ることができた。

## 5. おわりに

本論は、土壤構造の把握には粒子の大きさや形状など粒子の幾何学的情報とその粒子の充填情報を正確に把握することが重要であると考え、土壤粒子の充填様式を示す新しい概念として「土壤面密度」を新たに定義した。

また、試料に微細粒土を用いて試料の充填状態と軟 X 線画像との関係を調べ、本法による土壤面密度測定について検証した。

その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 軟 X 線画像の画素濃度は試料の厚さおよび乾燥密度と正の相関があり、この関係は一次関数で近似できた。
- (2) シルト・ベントナイト・カオリナイトでは、その粒径が軟 X 線画像の解像度以下であったため、画素濃度の増減に周期性がみられなかった。
- (3) 軟 X 線画像の画素濃度は試料充填時に生じた試料の厚さおよび乾燥密度の不均一性を表していた。
- (4) 解析対象範囲の大きさによって平均濃度階調値が変

化した。解析対象範囲が数画素のときは個々の粒子形状や粒子同士の干渉などの影響を受け、解析対象範囲が大きくなると試料全体の充填の不均一性に影響を受けた。

- (5) 土壤面密度は平均濃度階調値の一次関数を用いて近似できた。
- (6) この近似式を用いて微細粒試料の土壤面密度を測定し、土壤面密度が試料上で不均一に分布している様子を可視化できた。

以上のことから、軟 X 線画像法によって土壤面密度を測定できることを明らかにした。

本論では風乾試料を用いたが、現位置土壤では間隙内の土壤水分の存在を無視できない。特に粘質土の収縮・膨脹には水の移動が重要な役割を果たしていることは明らかである。今後は土壤水分が含まれた土壤面密度をどのように評価するかが重要な課題となる。

## 謝辞

実験の実施にあたっては、三重大学流域保全学教育研究分野専攻生諸氏のご助力を賜った。ここに記して謝意を表する。

## 引用文献

- Anderson, M. G. (1979) : On the potential of radiography to aid studies of hillslope hydrology. *Earth Surface Processes*, 4 (1) :77-83.
- 荒川哲, 伊藤忠, 九島博, 志村一男, 山口晃, 山田稔, 坂上恵, 須長祥浩, 高尾慶人, 坂田義明 (2000) : 新しい放射線写真学・改訂 2 版. pp.176-196, 富士フィルムメディカル,

- 東京.
- ASTM International (2004) : Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry. pp.1-6, West Conshohocken, DOI:10.1520/D4404-84R04, www.astm.org.
- Cassel, D. K., Brown, J. M. and Johnson, G. A. (1990) : Computed tomographic analyses of water distribution in three porous foam media. *Theoretical and Applied Climatology*, 42 (4) :223-228.
- Childs, E. C. and Collis-George, N. (1950) : The permeability of porous materials. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 201 (1066) :392-405.
- 土壌物理学会編 (2002) : 新編土壌物理用語事典. p.36, 養賢堂. 東京.
- 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.
- 三枝健二, 入船寅二, 福土政広, 齋藤秀敏, 中谷儀一郎 (2001) : 放射線基礎計測学. 医療科学社, p.22.
- Mori, Y., Iwama, K., Maruyama, T. and Mitsuno, T. (1999) : Discriminating the influence of soil texture and management-induced changes in macropore flow using soft X-rays. *Soil Science*, 164 (7) :467-482.
- 成岡市, 駒村正治, 高須俊行 (1988) : 立川ロームにおける管状孔隙が地下水涵養に果たす役割. *土壌の物理性*, 56:2-14.
- 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. p.34, 丸善, 東京.
- 日本第四紀学会編 (1993) : 第四紀試料分析法 2 研究対象別分析法. pp.98-108, 東京大学出版会, 東京.
- Petrovic, A. M., Siebert, J. E. and Rieke, P. E. (1981) : Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal*, 46 (3) :445-450.
- Rogaar, H. and Thiadens, R. A. H. (1975) : X-ray applied to the study of the pore structure in soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 23:321-333.
- Sander, T., Gerke, H. H. and Rogasik, H. (2008) : Assessment of Chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography. *Geoderma*, 145: 303-314.
- Tippkötter, R., Eickhorsta, T., Taubnera, H., Grednera, B. and Rademakerb, G. (2009) : Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography ( $\mu$  CT) . *Soil and Tillage Research*, 105:12-20.

## 要 旨

本論では、土壌の単位面積あたりの質量を「土壌面密度」と定義し、土壌構造を表現する新たな概念として提案した。また、軟 X 線画像法を用いた土壌面密度の測定法について検討した。その結果、土壌の厚さおよび乾燥密度の増加に連動して軟 X 線画像の画素濃度が増加することから、土壌面密度は軟 X 線画像の平均濃度階調値と密接な関係があることを示した。この関係は一次関数で近似できることを示し、軟 X 線画像法による土壌面密度測定が可能であることを示した。

キーワード：軟 X 線画像法, 土壌構造, 土壌面密度, 試料厚, 乾燥密度