

土壌基質構造の測定法の開発とその物理的性質の評価¹

廣 住 豊 一 *

三重大学大学院生物資源学研究科

Soft X-ray Digital Radiography — Methodology for Soil Structure and Physical Properties —

Toyokazu HIROZUMI

Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie 514-8507, Japan

Abstract

Soil macro pores are quantitated by number, size, shape, direction and so on. However, soil matrix structure which consists of a lot of soil particles, aggregates and their arrangements of varied size and shape is difficult to quantitate. Soft X-ray Digital Radiography (SXDR) was developed from a viewpoint that a soft X-ray image of soil has information of soil structure. On the SXDR, soil matrix structure was quantitated by the result of the image processing of soft X-ray digital images. In this paper, overview of SXDR, and measurement of soil structure by SXDR are indicated. The contents of this paper are as following.

- (1) Principle and procedure of SXDR were described
- (2) Particle size of glass beads and sand were measured by SXDR
- (3) Area Density of Soil (ADoS) was defined and it was measured by SXDR
- (4) Cracks on bentonite were observed by SXDR
- (5) Water content and suction were measured by SXDR

Key Words: Soft X-ray Digital Radiography (SXDR), Area Density of Soil (ADoS), soil structure, measuring method, image processing

第 1 章 はじめに

土壌は地球の表層わずか数 cm ～数 m の範囲に堆積したごく薄い層に過ぎない。しかし、この薄い土層の中で行われている複雑な物質資源の循環に支えられ、人類をふくめた生物が共生できる環境が形成され、そして生物圏の多様な生命が育まれている。この土壌の成り立ちや仕組みを探究することは、フィールドサイエンスの原点である。

土壌の性質のうち、もっとも基礎的で重要なもののひとつが「土壌構造」である。土壌構造は、植物生育に重要な保水性・排水性などの土壌の物理性や、保肥性などの土壌の化学性を左右する。そして、

2012 年 12 月 11 日受理

¹ 三重大学審査学位論文

〒 514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

* For correspondence (e-mail: zumi@bio.mie-u.ac.jp)

その結果、土壌の生物性にも大きな影響を与える。

土壌構造は、無機物あるいは有機物が幾重にも折り重なり、あるいは集合体となって形成された「土壌基質」と、それらの間や内部に形成された様々な形状や大きさの「土壌間隙」からなる。そのため、両者の組み合わせからなる土壌構造は複雑な様相を呈し、その全容を詳述することは難しい。

この問題に対して、さまざまな土壌の物理的指標を用いて、土壌構造の特徴を表現する方法がある。たとえば、乾燥密度、三相分布および土性など基礎的項目のほか、粒度分布、間隙径分布および比表面積などである。これらの測定法には、採土円筒による乾燥密度・間隙率測定⁶⁸⁾、比重計法やピペット法による粒度分布測定^{30,69)}、水分特性曲線による間隙径分布測定^{5,38)}、水銀圧入型ポロシメーターによる間隙径分布測定^{2,31,33,74)}、空気圧入法による間隙径分布測定^{27,29)}、BET法による比表面積測定⁵⁸⁻⁵⁹⁾、気体吸着法および空気透過法による比表面積・粒径・間隙径測定²⁸⁾などがある。しかし、これらの測定値は、土壌構造の実体を直接投影しておらず、土壌構造の特徴を部分的に切り出したもので、土壌構造の実像を表現する測定値とは言い難い。

一方、土壌構造の実体を直接観察する代表的な方法として、土壌を固化・研磨して作製した薄片を顕微鏡などで観察する微細形態分析法がある⁵⁴⁾。この分析法は、土壌の一次粒子や団粒等の形状、寸法あるいは配列様式などの土壌構造に関係する情報を得ることができる。しかし、得られる情報は二次元表面から得られた情報に限定されるといった制約がある。

これらの測定法に対して、X線が物体を透過する性質を利用し、土壌の内部構造を非破壊で透視する方法がある。X線を土壌構造の測定に活用する試みは、土壌間隙の分布割合の測定⁷⁾、透水係数や堆積様式の判別⁹⁾などに始まる。その後、土壌構造の透視には軟X線が最適であることが示され⁴⁰⁾、土壌粗間隙を鮮明にとらえることができる造影剤が発見され^{8,34-35,41,43)}、この造影剤を活用した間隙の立体構造の測定法^{25-26,40,42,51)}、画像解析による粗間隙構造の定量評価法⁷³⁾などが開発された（以下、これらの測定法を総称して「軟X線映像法」とする）。そして、この軟X線映像法を用いて、間隙の空間構造およびその物理的機能に関する新たな知見が数多く明らかにされた^{14-15,24,45-49,70-73)}。軟X線映像法のほか、X線を用いた土壌構造の測定法としてはX線CTによるものがあり、土壌の密度評価¹⁾などのほか、さまざまな研究が行われている^{4,6,12-13,16)}。近年では、マイクロフォーカスX線CTによって、X線CTの抱える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¹¹⁾。しかし、X線CTは、仕組みが複雑、高価で撮影時間が長いなど、一般に広く普及するには至っていない。

軟X線映像法は、これまでブラックボックスであった土壌の内部構造、特に土壌粗間隙に関する諸問題を解決する有効な手立てであった。しかし、形状や大きさなどで幾何学的に定量できる土壌粗間隙に対して、多数の土粒子や団粒が幾重にも折り重なって形成された土壌基質構造を幾何学的に定量することは難しい。そのため、軟X線映像法による土壌構造の研究は、土壌粗間隙の形状に関する幾何学的な観察・評価にとどまり、土壌基質構造に対する研究は土壌の堆積様式の観察⁵⁵⁾にみられる程度であった。しかし、近年では、軟X線映像をデジタル解析することによって、土壌基質構造を定量化する試みが行われている^{23,32,39,44,50,56-57,60-65,75-78)}。

これらを踏まえて開発された土壌基質構造の測定法が「軟X線画像法 (SXDR, Soft X-ray Digital Radiography; 以下、「本法」とする)」である^{61,63-64)}。本法は、土壌の軟X線影像が土壌の粒子および団粒の配列様式またはそれらの重畳様式を投影した構造情報であることに着目して開発されたものである。本法は、デジタル画像に変換した軟X線影像を画像解析によって数値化することで、これまで困難であった土壌基質構造の定量化を実現した。本法によって、土壌構造測定法の新展開が期待されている。

本論では、この軟X線画像法の原理および方法、ならびに、本法による土壌基質構造の測定方法について論ずる。

第2章 軟X線画像法の原理と方法

1. 軟X線の基礎知識

本法で用いる「軟X線」は、電磁波の一種であるX線のうち、波長が長くエネルギーが低いものをいう。一方、波長が短くエネルギーが高いものを「硬X線」と呼ぶ。ただし、軟X線および硬X線といった分類は、相対的・便宜的な区分であり、使用される分野によってその定義が異なる。本論では、土壌の撮影に最適とされる60keV以下のエネルギーのX線を軟X線と呼ぶ⁴³⁾。

X線は、直進性があり、物体を透過する能力を持つ。また、物体を透過する際には、その状態に応じて減弱する⁶⁶⁾。物体に照射されたX線は、その一部が物質内部で吸収または散乱され、残りが物質を透過する。このときのX線の透過量は、X線のエネルギー、物質を構成する元素の原子番号、密度および質量などによって変化する。そして、たとえばX線フィルム面上において、この透過量の差がX線の投影像となって可視化される。ある物質に対して単一エネルギーのX線 I_{in} を照射した際のX線の透過量 I_{out} は次式で表される⁶⁷⁾。

$$I_{out} = I_{in} e^{-\mu t} \quad (1)$$

I_{out} : 物質を透過したX線量 (光子数), I_{in} : 物質に照射したX線量 (光子数), μ : 線減弱係数 (m^{-1}), t : 物質の厚さ (m)

また、線減弱係数 μ は次式で表される⁵³⁾。

$$\mu = A\rho \frac{N_A}{M} \quad (2)$$

μ : 線減弱係数 (m^{-1}), A : 断面積 (m^2), ρ : 密度 (g m^{-3}), N_A : アボガドロ数 (mol^{-1}), M : モル質量 (g mol^{-1})

(1) および (2) 式より、物質に照射されたX線は、物体の厚さや密度、物体を構成する物質などによって、透過量が変化する。土壌の間隙部分と固相部分では、構成する物質も密度も異なる。したがって、土壌の間隙部分を透過したX線と、土壌の固相部分を透過したX線では、おのずとその透過量に差が現れる。本法は、土壌の内部構造の違いによって、透過するX線量に差が生じることに着目し、透過X線量の様態と土壌基質構造との関係を明らかにすることで、土壌基質構造を測定する手法である。

2. 軟X線画像法の手順と操作

本法の操作手順をFig. 1に示す。本法の主要な流れは、①試料の準備、②軟X線撮影、③軟X線影像のデジタル化、④画像解析の順である。

2.1. 試料の準備

本法に供する試料は、所定の処理を行った後、試料容器に充填し、これを軟X線撮影する。なお、本法は土壌基質構造の測定を目的とし、その測定対象は「土壌」であるが、本論では試験的材料を含めて「試料」とする。試料容器には、軟X線を透過し

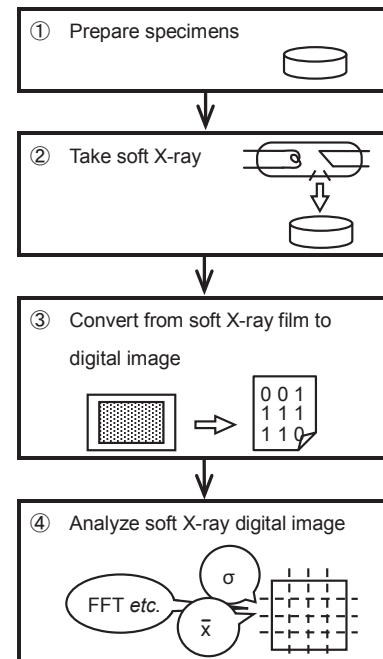


Fig. 1 Procedure of Soft X-ray Digital Radiography.

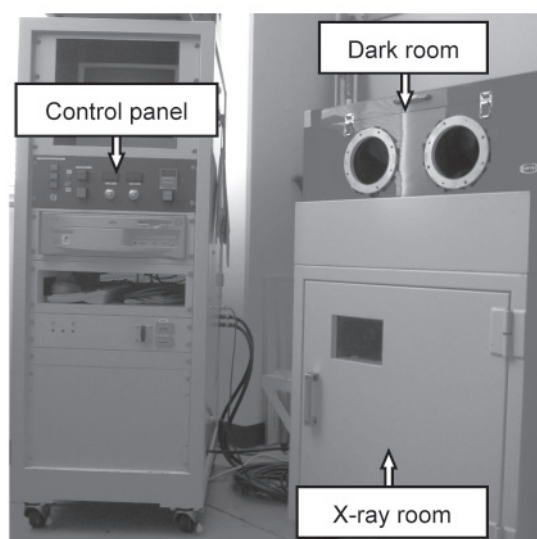


Photo. 1 Soft X-ray generator SOFTEX DCTS-7003.

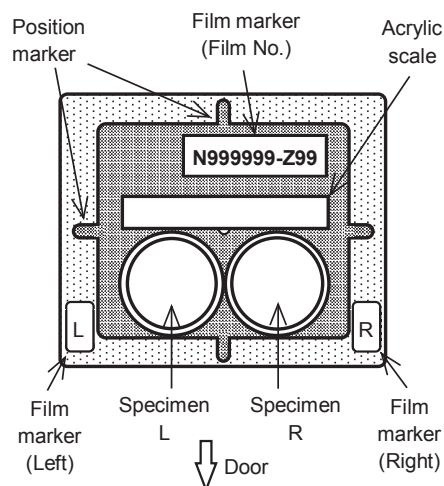


Fig. 2 Layout of specimen containers on specimen platform and camera for X-ray film⁴²⁾.

やすい材質のものを用いる。本法に適する材質としては、たとえばポリスチレンなどがある。塩素を含む塩化ビニル製、鉄やアルミニウムなどの金属製の材質のものは、軟X線を吸収しやすいため、本法には適さない。ただし、X線束に平行となる側面のみに金属を使用し、容器底面に軟X線を透過しやすい材質を用いるなど、軟X線の透過を妨げなければこの限りではない。

2.2. 軟X線撮影

軟X線撮影には、軟X線照射装置と透過影像の検出器を用いる。本論では、軟X線照射装置にソフテックス社製 DCTS-7003 を使用した。DCTS-7003 は、インバータ制御方式による直流型のX線照射装置である。DCTS-7003 の外観を **Photo. 1** に示す。また、透過影像の検出器には、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）を使用した。

試料を充填した試料容器は、軟X線照射装置の試料室に適切に配置し、軟X線撮影を行う。本論では、フィルムを装填した揺動型撮影台⁴²⁾を撮影台中央と照射されるX線束の中心が合致するように DCTS-7003 の試料室内に設置し、軟X線撮影を行った。この試作揺動型撮影台の外観を **Photo. 2** に、軟X線撮影時の試料の位置関係を **Fig. 2** にそれぞれ示す。

本法の軟X線撮影では、撮影回数を減らし作業を効率化するため、同時に2つの試料を撮影する。しかし、X線強度は線源からの距離の2乗に反比例して弱くなるため（距離の逆2乗則）、撮影台上に到達したX線は、X線束の中心に対して同心円状の強度分布を持つ¹⁹⁾。また、ターゲットで発生するヒール効果によって、X線束の中心から陽極側に照射されるX線の強度変化は、X線束の中心から陰極側に照射されるX線の強度変化に比べて大きくなる²⁰⁾。さらに、X線束の中心からの距離に応じて試料に対するX線の入射角が大きくなるため、X線束の中心から離れるほどX線が透過する試料厚が増加する。

これらのことから、軟X線撮影によって得られる試料影像は、照射されるX線束の中心を軸として左右対称の濃度分布の偏りを持つ。したがって、1つの試料を撮影台中央で撮影した場合、すべての試料影像が同一の濃度分布の偏りを持つのに対し、2つの試料を同時に撮影した場合、試料の配置によって試料影像の濃度分布の偏りが異なることを考慮する必要がある。そこで、本法では、左右それぞれの

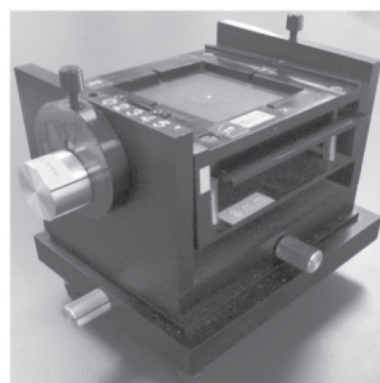


Photo. 2 Specimen platform and camera for X-ray film⁴²⁾

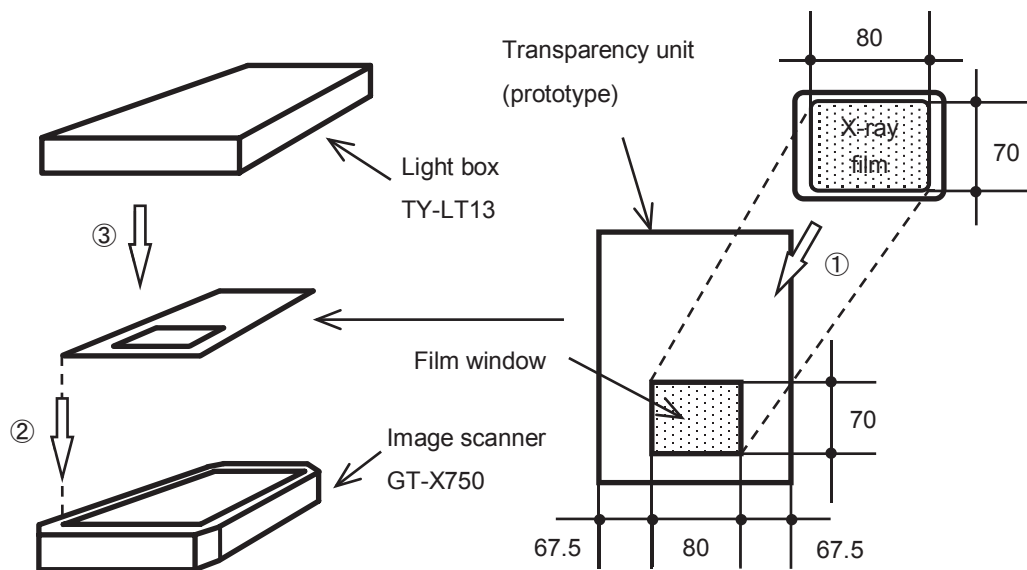


Fig. 3 Layout of X-ray film on digital image scanner (mm).

試料容器がX線束の中心で接するように配置する。このように、X線束を中心軸として左右対称に試料を配置し、撮影した軟X線影像を反転することで、試料影像の濃度分布の偏りを一定に調整することができる。本論では、試料容器が撮影台の手前側（試料室の扉側）に接するように、また左右それぞれの試料容器が撮影台中央で接するように配置した。

軟X線撮影の照射条件は、FFD（Focus-Film Distance; X線管焦点とフィルム間の距離）を500 mmに固定し、管電圧・管電流・照射時間を適宜調節する。本論では、撮影したフィルムの現像にニックス社製自動現像機 Hi-RHEIN RH-9001 を使用した。また、現像条件は、現像液温度を28 °Cに、現像時間を180 sに固定することで、現像ムラを減らした。

2.3. 軟X線影像のデジタル化

一般に、X線フィルムは透過光による読影に対して最適化されているため、反射光による読み取りでは十分なコントラストを得ることができない。そこで、本論では、フィルム上に投影された軟X線影像のデジタル化において、厚紙を加工して試作した簡易透過フィルムユニット（以下、「透過フィルムユニット」とする）、コクヨ社製ライトボックス TY-LT13（以下、「ライトボックス TY-LT13」とする）、エプソン社製のフラットベッドスキャナ GT-X750（以下、「スキャナ GT-X750」とする）および同社製のスキャナドライバ EPSON Scan ver.3.24J（以下、「EPSON Scan」とする）を使用し、画像解析に十分なコントラストを持つ画像を得る方法を考案した。

スキャン時のフィルムなどの配置方法を Fig. 3 に示す。その配置方法は、以下のとおりである。

- ① 透過フィルムユニットに設けたフィルム窓にあわせてフィルムを貼り付ける（Fig. 3-①）。
- ② フィルムFRがスキャナ GT-X750 の透明ガラス面に密着するように透過フィルムユニットを配置する（Fig. 3-②）。このとき、フィルムの表面およびスキャナ GT-X750 の透明ガラス面に付着した埃や油脂などの汚れを除去することによって画像解析時の誤差を低減できる。また、透過フィルムユニットとスキャナ GT-X750 の位置を合わせることで正確な画像位置を得ることができる。
- ③ 光源となるライトボックス TY-LT13 を最大光量にして透過フィルムユニット全体を覆うように載せ、その透過光から画像を読み取るようにスキャンする（Fig. 3-③）。

スキャン時の画像解像度の選定について、X線フィルムは、一般に20 LP mm⁻¹以上の解像力があるとされている。LP mm⁻¹は写真フィルムの解像力（空間分解能）の単位で、その写真フィルムに記録で

きる識別可能な線の対 (LP; Line Pair) の数を示す。この解像力は次式で表される²¹⁾。

$$r = \frac{1}{2l} \quad (3)$$

r : 解像力 (LP mm⁻¹), l : 線幅および線間の寸法 (mm)

すなわち、解像力が 20 LP mm⁻¹ の X 線フィルムは、1 mm に 20 対の線を記録することができる。このときの線幅は 0.025 mm である。画像解像度の単位である dpi は、1 inch (25.4mm) あたりの画素数 (pix) を示す。したがって、20 LP mm⁻¹ を画像解像度に換算するとおよそ 1000 dpi となる。そこで、スキャン時の画像解像度としては、X 線フィルムの解像力相当以上となる 1200 dpi を選定した。カラーモードは、軟 X 線画像が濃度階調のみで表現され色情報を必要としないこと、また、画像解析に必要なコントラスト分解能を確保することから、65,536 段階で画素濃度を表現できる 16 ビットグレースケールに設定した。

軟 X 線撮影したフィルム影像をスキャナ GT-X750 でデジタル化した画像例を **Photo. 3** に示す。デジタル化した軟 X 線画像は、所定の寸法になるように切り取り処理を行い、これを画像解析に供する。

2.4. 画像解析

本法では、デジタル化した試料の軟 X 線画像に含まれる画素濃度 (白黒の濃淡) に対して、統計処理などを行うことによって、軟 X 線画像を定量的な数値として表現する。画素濃度は、黒を最小値の 0、白を最大値の 1 とし、その間の濃度変化を 65,536 段階 (16bit) に離散化した「濃度階調値 (gray level)」として処理する。

本論では、いくつかの画像解析プログラムを試作し、軟 X 線画像の解析を行った。画像解析プログラムの試作には、Scilab-4.1.2³⁾ (以下、「Scilab」とする)、および SIP-0.4.0¹⁰⁾ (以下、「SIP」とする) を援用した。本論で試作した画像解析プログラムの処理内容を以下に示す。

2.4.1. 濃度階調値表示 (画像全体)

供試画像の濃度階調値をその座標情報とともに抽出する。平面座標に画素の位置を、縦軸にその濃度階調値をとり、三次元座標上に表示し、供試画像の全体的な濃度階調値の変化を可視化する。

2.4.2. 濃度階調値表示 (走査線上)

供試画像に走査線を設定し、その走査線上の濃度階調値を抽出し、グラフ上に表示する。この走査線は、供試画像の左端から右端に向かって、軟 X 線画像の中央部を横断するように引く。走査線の設定方法を **Fig. 4** に示す。

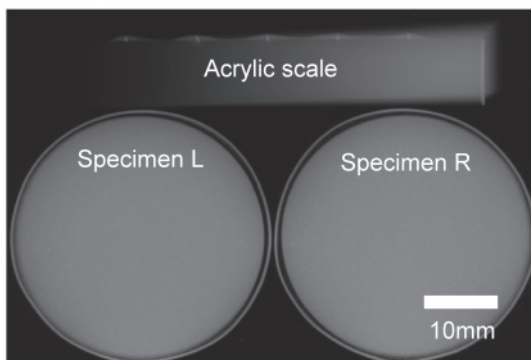


Photo. 3 A soft x-ray digital image of specimens

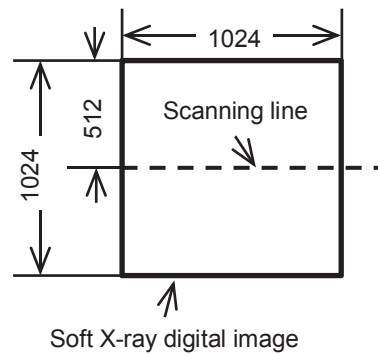


Fig. 4 A scanning line on soft X-ray digital image (pix).

2.4.3. 統計解析（全画素）

供試画像の濃度階調値に対して統計解析を行い、平均値 \bar{gl} 、中央値 \tilde{gl} 、標準偏差 σ_{gl} および変動係数 CV_{gl} を求める。画素数を n 、濃度階調値を gl_k ($k = 1, 2, 3, \dots, n$) とすると、これらは以下の式で定義される。

平均値 \bar{gl}

$$\bar{gl} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n gl_k \quad (4)$$

中央値 \tilde{gl}

$$\tilde{gl} = \begin{cases} gl_m & n \text{ が奇数のとき, } m = \frac{n+1}{2} \\ \frac{gl_m + gl_{m+1}}{2} & n \text{ が偶数のとき, } m = \frac{n}{2} \end{cases} \quad (5)$$

標準偏差 σ_{gl}

$$\sigma_{gl} = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (gl_k - \bar{gl})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

変動係数 CV_{gl}

$$CV_{gl} = \frac{\sigma_{gl}}{\bar{gl}} \quad (7)$$

2.4.4. 統計解析（範囲指定）

供試画像に正方形の解析対象範囲を設定する。その解範囲内の濃度階調値に対して、前出の「統計解析（全画素）」と同様の統計解析を行う。さらに、解析対象範囲の大きさを変化させ、解析結果の変化を調べる。解析対象範囲の中心は供試画像の中心に合致させる。この「統計解析（範囲指定）」のアルゴリズムを Fig. 5 に示す。

2.4.5. 格子分割法

供試画像を所定寸法の正方格子に分割する。各格子の濃度階調値に対して、前出の「統計解析（全画素）」と同様の統計解析を行う。さらに、格子の大きさを変化させ、解析結果の変化を調べる。この「格子分割法」のアルゴリズムを Fig. 6 に示す。

2.4.6. セミバリオグラム解析

供試画像に設定した走査線上の濃度階調値に対してセミバリオグラムによる解析を行う。走査線の設定は、前出の「濃度階調値表示（走査線上）」と同様とする。なお、セミバリオグラムは、データの空間的な相関を表現しており、次式で表される³⁶⁾。

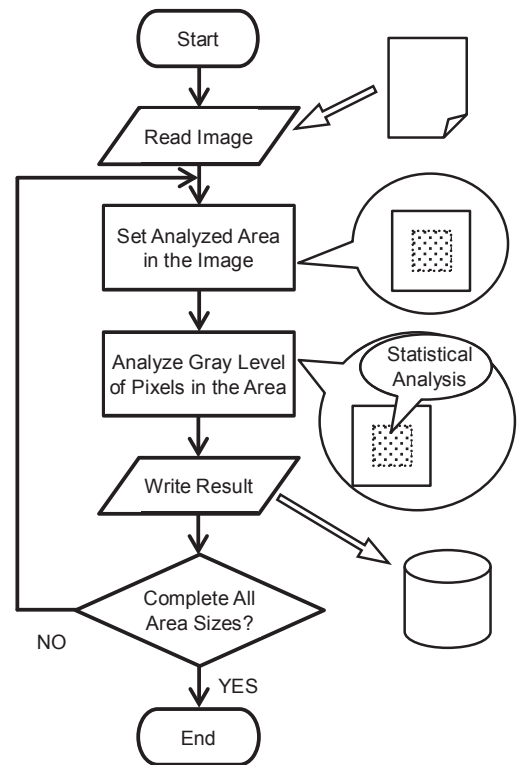


Fig. 5 Algorithm of statistical analysis (in multiple analyzed area sizes).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{k=1}^{N_h} (gl_x - gl_{x+h})^2 \quad (8)$$

$\gamma(h)$: セミバリオグラム, gl_x : 走査線上の位置 x にある画素の濃度階調値, gl_{x+h} : 位置 x から距離 h 離れた位置にある画素の濃度階調値, N_h : gl_x と gl_{x+h} の組み合わせの総数

2.4.7. 高速フーリエ変換

供試画像に設定した走査線上の濃度階調値に対して高速フーリエ変換による解析を行う。走査線の設定は、前出の「濃度階調値表示（走査線上）」と同様とする。本法では、走査線上の濃度階調値の増減を入力信号とみなして、高速フーリエ変換を行い、濃度階調値の増減周期を調べる。

濃度階調値を、走査線上の位置の関数と考えると、次式で表すことができる。

$$gl_x = f(x) \quad (9)$$

x : 走査線上の位置, gl_x : 走査線上の位置 x の濃度階調値

前式に対するフーリエ変換は、次式で表される。

$$F(T) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-\frac{i2\pi x}{T}} dx \quad (10)$$

x : 走査線上の位置, T : 濃度階調値の増減周期, i : 虚数, π : 円周率

3. 軟 X 線画像法の適用例

本節では、物性が既知または大きさや形状が事前に明らかである試料に対して本法を適用し、本法による土壌構造測定の妥当性を実験的に確認する。

3.1. 試料

試料には、蒸留水（以下、「水」とする）、呼び粒径が 0.2mm および 0.6mm のソーダ石灰ガラス製ガラスビーズ（以下、「ガラスビーズ A」および「ガラスビーズ B」とする）、セメント用川砂（以下、「砂」とする）、ならびに三栄シリカ社製珪石粉末 SP-35（以下、「シルト」とする）を供した。試料の一覧を **Table 1** に示す。これらの試料を充填する試料容器には、ポリスチレン製シャーレ（以下、「シャーレ」とする）を用いた。このシャーレを **Fig. 7** に示す。試料は、試料厚・充填密度・体積含水率を変えてシャーレに充填し、これを軟 X 線撮影した。充填条件および軟 X 線撮影条件とあわせて、ガラスビーズ A および B, 砂, シルトの軟 X 線画像を **Photo. 4** にそれぞれ示す。

3.2. 統計解析の適用例

3.2.1. 試料厚と平均濃度階調値

水およびガラスビーズ A の試料厚 t (mm) と平均濃度

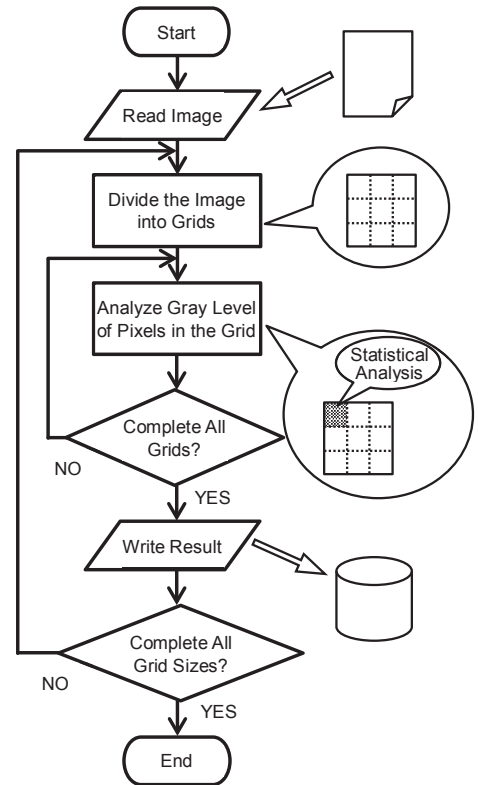


Fig. 6 Procedure of “grid partitioning analysis”

Table 1 Specimens

Specimens	Specification	Particle Size
Water	Pure Water	—
Glass Beads A	Soda-Lime Glass	nominal size 0.2 mm
Glass Beads B	Soda-Lime Glass	nominal size 0.6 mm
Sand	River Sand, Cement Use	0.074 ~ 0.250 mm
Silica Powder (silt)	SP-35, Silica Powder, SAN-EI Silica Co., Ltd.	nominal size 0.023 mm

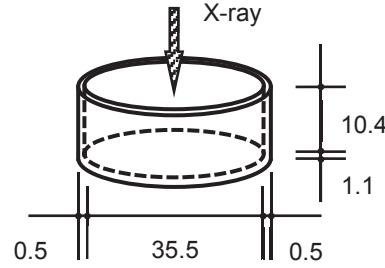
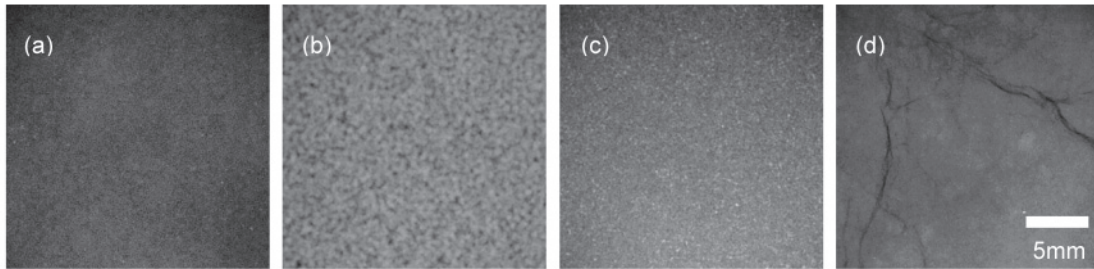
**Fig. 7** Figure and dimension of specimen container (mm).

Photo. 4 Soft X-ray digital images. (a) Glass beads A (dry bulk density 1.59 Mg m^{-3} , volumetric water content $0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). (b) Glass beads B (dry bulk density 1.59 Mg m^{-3} , volumetric water content $0.34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). (c) Sand (dry bulk density 1.51 Mg m^{-3} , volumetric water content $0.22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). (d) Silica powder (dry bulk density 1.36 Mg m^{-3} , volumetric water content $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Specimen thickness 10.4 mm, X-ray tube voltage 40 kV, X-ray tube current 1.5 mA, irradiation time 60 s. Note: These images were not raw images. Contrast and brightness of these images were optimized for print papers.

階調値 \bar{gl} の関係を **Fig. 8** に示す。**Fig. 8** によると、水およびガラスビーズ A のいずれも、管電流が低い方が、平均濃度階調値が高かった。また、いずれの試料および管電流でも、 t の増加とともに \bar{gl} が増加した。水では、とくに管電流 0.5 mA においてその傾向が顕著であった。ガラスビーズ A では、管電流 1.5 mA において、試料厚の増加量と平均濃度階調値の増加量との関係はほぼ直線的であった。しかし、管電流 0.5 mA においては、試料厚の増加にともなって平均濃度階調値の増加量が漸減した。照射される X 線量と管電流との間には直線的な比例関係があるため¹⁷⁻¹⁸⁾、管電流 0.5 mA でみられた濃度階調値の増加量の減少は、フィルムの黒化特性によると考えられる。

3.2.2. 体積含水率と平均濃度階調値

ガラスビーズ A を試料としたときの体積含水率 θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) と平均濃度階調値 \bar{gl} の関係を **Fig. 9** に示す。**Fig. 9** によると、 θ の増加とともに \bar{gl} が増加する傾向がみられ、その関係は次式で近似できた。

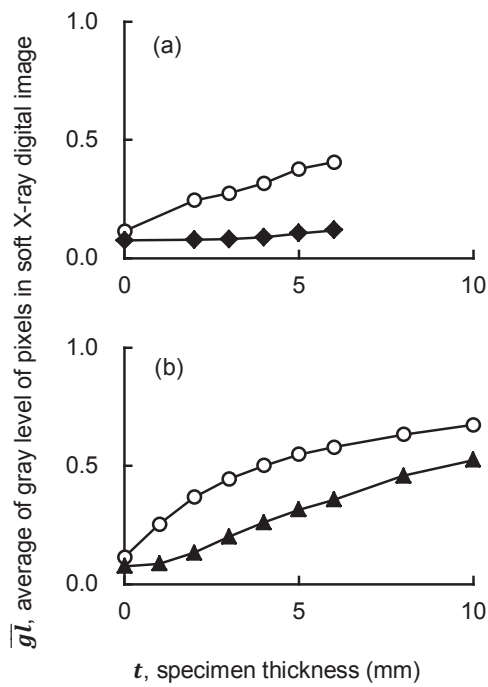


Fig. 8 t , specimen thickness and \overline{gl} , average of gray level of pixels in soft X-ray digital image. (a) water, X-ray tube voltage 30kV, irradiation time 60s, (b) glass beads, X-ray tube voltage 40kV, irradiation time 60s. X-ray tube current: \circ 0.5mA, \blacktriangle 1.5mA, \blacklozenge 2.0mA.

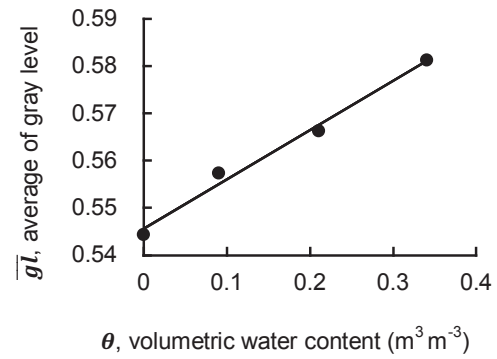


Fig. 9 θ , volumetric water content and \overline{gl} , average of gray level of pixels in soft X-ray digital image. Glass beads A (specimen thickness 10.4 mm), X-ray tube voltage 40 kV, X-ray tube current 1.5 mA, irradiation time 60 s.

$$\overline{gl} = 0.1044\theta + 0.5456 \quad (r^2 = 0.988) \quad (11)$$

\overline{gl} : 平均濃度階調値, θ : 体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

風乾時では $\overline{gl} = 0.54$, $\theta = 0.34$ では $\overline{gl} = 0.58$ であった。この結果は、ガラスビーズの試料厚の変化による平均濃度階調値の変化に比べて、過少であった。ガラスビーズは水に比べて比重が大きく、またガラスビーズを構成するケイ素などの元素は、水を構成する水素や酸素に比べて、より大きい原子番号を持つ。したがって、ガラスビーズは水に比べて、試料厚の増減が濃度階調値に与える影響も大きくなったと考えられる。

3.3. 格子分割法の適用例

格子分割法の適用例を **Fig. 10** に示す。供試画像には、シルトを試料とした **Photo. 4-(d)** を用いた。格子寸法を変更することで強調される画像の特徴が変化した。格子寸法 2 pix では、画像に雑音が多く含まれていたが、格子寸法を大きくすることで、この雑音は低減された。格子寸法 32 pix では、亀裂が明瞭にみられた。格子寸法 64 pix では、粒子の重畳や亀裂のいずれもよくとらえた。しかし、格子寸法 128 pix では、粒子の重畳や亀裂は不明瞭になり、試料の全体的な濃度階調の変化をよく表現していた。また、いずれの格子寸法でも、全体的な濃度階調の変化は上に凸の湾曲形状を示した。これは、試料充填が不均一で、試料厚および乾燥密度の一方または両方が、試料側縁部に比べて、試料中央部で大きかったためであると考えられる。

3.4. セミバリオグラム解析の適用例

ガラスビーズ A および B, ならびに砂に対してセミバリオグラムを適用した結果を **Fig. 11** に示す。

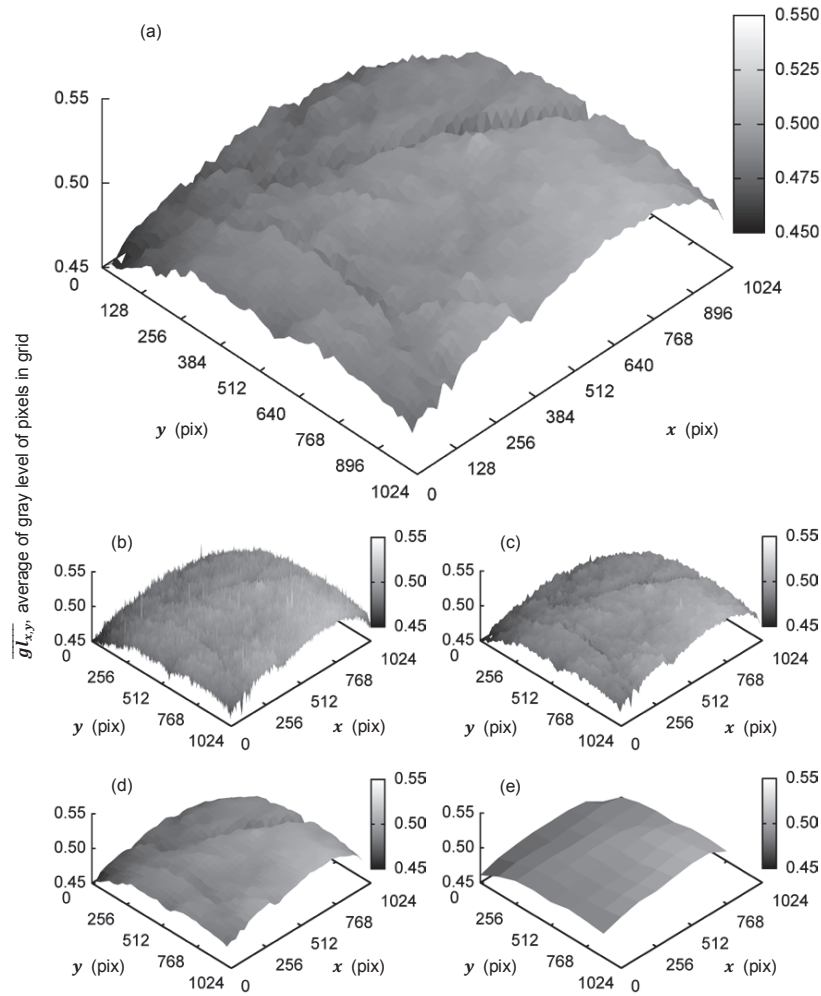


Fig. 10 Result of grid partitioning analysis. Specimen: silica powder (photo.4-(d)). Grid size: (a) 64pix \times 64pix, (b) 2pix \times 2pix, (c) 8pix \times 8pix, (d) 32pix \times 32pix, (e) 128pix \times 128pix.

Fig. 11 によると、ガラスビーズ A および B、ならびに砂のいずれにおいても、 $0.1 < h < 0.2$ (mm) までは $\gamma(h)$ が増加し、その後 $\gamma(h)$ はほぼ一定になる傾向があった。セミバリオグラムでは、このときの h をレンジ (range)、 $\gamma(h)$ をシル (sill) と呼ぶ。レンジはデータの相関性がなくなる距離を示している。いずれの試料でも、シルが大きいほどレンジが大きくなる傾向があった。また、シルおよびレンジは、「ガラスビーズ A < ガラスビーズ B < 砂」の順に大きくなった。

3.5. 高速フーリエ変換の適用例

ガラスビーズ A および B、砂、ならびにシルトに対して高速フーリエ変換を適用した結果を **Fig. 12** に示す。全体的な傾向として、短い周期 T において小さいフーリエ振幅スペクトル $F(T)$ が、長い T において大きい $F(T)$ がみられた。また、試料によって、大きい $F(T)$ が集中する周期が異なった。砂に対して、ガラスビーズ A および B は、大きい $F(T)$ を持つ T が顕著にあらわれた。これは、粒径が均一なガラスビーズに比べて、粒径がより広い範囲に分布する砂の方がより複雑な周期性成分を持っているためと考えられる。シルトでは、より長い T において大きい $F(T)$ がみられた。これは、亀裂のような大きな間隙構造によると考えられる。

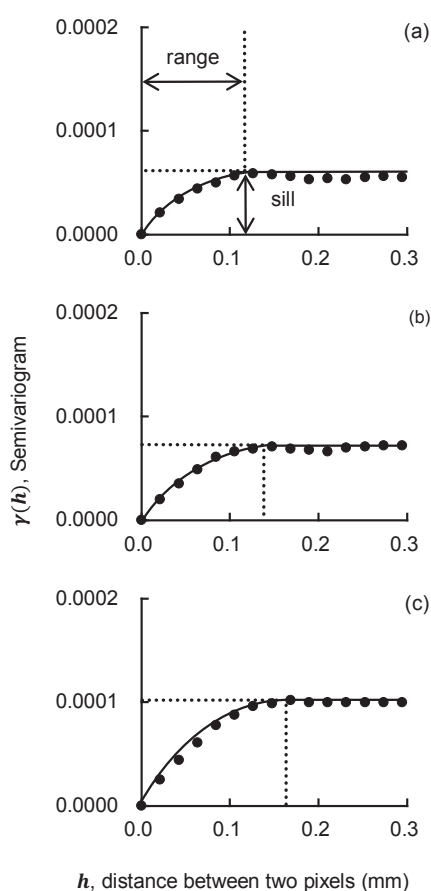


Fig. 11 Result of semivariogram analysis. (a) glass beads A (photo.4-(a)), (b) glass beads B (photo.4-(b)), (c) sand (photo.4-(c)).

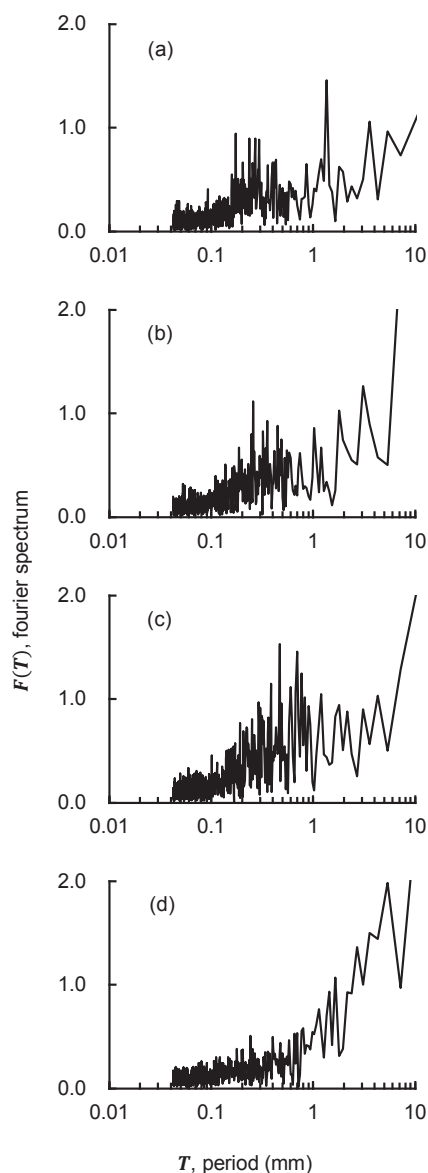


Fig. 12 Result of FFT analysis. (a) glass beads A (photo.4-(a)), (b) glass beads B (photo.4-(b)), (c) sand (photo.4-(c)), (d) silica powder (photo.4-(d)).

第3章 粗粒試料の粒径測定

土壌構造は、一次粒子および二次粒子などから形成された固相部分と、その隙間に形成された間隙部分からなり、固相と間隙の割合や分布によって特徴づけることができる。とくに、土粒子の大きさは土壌構造を決定する重要な要素である。本章では、ガラスビーズおよび砂を対象として、本法を用いた粒径測定について論ずる。

1. 軟 X 線画像法による粒径測定の原理

軟 X 線のような低エネルギー領域の X 線では、土壌基質を構成する主要な物質であるケイ素やアルミニウムによって減弱される X 線量の方が、土壌間隙を構成する土壌水や土壌空気によって減弱される X 線量に比べてより大きい⁵¹⁾。したがって、土壌に対して軟 X 線を照射したとき、間隙部分が多い場所は、固相部分が多い場所に比べてより多くの軟 X 線が透過する。このとき、間隙部分による X 線

の減弱量が、固相部分による X 線の減弱量に比べて、無視できるほど小さいとすると、既出の (1) 式から、試料を透過する X 線量 I_{out} は次式で表すことができる。

$$I_{out} = I_{in} e^{-\mu(t_{specimen} - t_{pore})} \quad (12)$$

I_{out} : 試料を透過する X 線量, I_{in} : 試料に照射された X 線量, μ : 固相部分の線吸減弱数 (m^{-1}), $t_{specimen}$: 試料厚 (m), t_{pore} : 厚みに換算した間隙量 (m)

ここで、土粒子を均一な球と仮定し、これを不規則に充填した土壌構造モデルを考える。このとき、粒子の大きさの異なる 2 つの土壌構造モデルに対して X 線を照射したときの模式図を Fig. 13 に示す。

大きい粒子を充填した土壌構造モデルは、小さい粒子を充填した土壌構造モデルに比べて、粒子間に形成される間隙が大きい。それぞれの土壌構造モデルから、固相部分が多い場所と間隙部分が多い場所を取り出し、X 線透過方向の固相と間隙の割合を比較すると、大きい粒子を充填した土壌構造モデルの方がその差は大きい。(12) 式で示したように、X 線の透過量は、その透過方向における固相と間隙の割合によって異なる。この X 線の透過量は軟 X 線画像の濃度階調値として得られる。すなわち、試料粒径が大きいほど、軟 X 線画像の濃度階調値が大きく変動すると考えられる。

本章では、以上の原理に基づき、試料粒径と軟 X 線画像の濃度階調値の変動との関係を解明し、本法による試料粒径の測定法を明らかにする。

2. 材料と方法

試料には、9 種類の粒径のソーダ石灰ガラス製のガラスビーズ（以下、「ガラスビーズ」とする）および 5 段階の粒径範囲に篩い分けたセメント用川砂（以下、「砂」とする）を供した。試料の一覧を Table 2 に示す。各試料は、よく風乾させたのち、深さの異なる 3 種類のポリスチレン製の矩形容器（以下、「試料容器」とする）に充填し、これを軟 X 線撮影した。試料容器を Fig. 14 に示す。軟 X 線の撮影条件は、管電圧 40kV、管電流 1.5mA、照射時間 60s、FFD 500mm に設定した。画像解析では、既出の濃度階調値表示（画像全体）、濃度階調値表示（走査線上）、高速フーリエ変換、セミバリオグラム解析、統計解析（全画素）、統計解析（範囲指定）を行った。

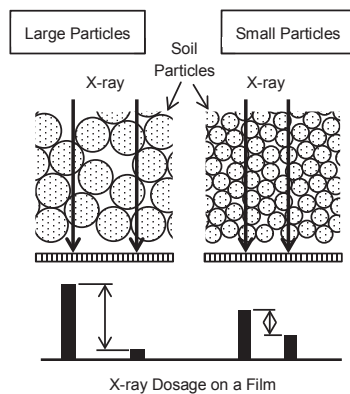


Fig. 13 A model of X-ray transmission of different particle size specimens.

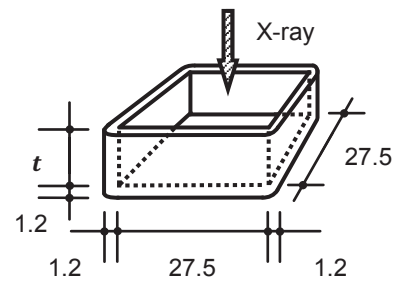


Fig. 14 Figure and dimension of specimen container (mm). $t = 8.2, 5.7, 3.0$ (mm).

Table 2 Specimens

Specimens	Specification	Particle Size (mm)
Glass Beads	Soda-Lime Glass	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0
Sand	River Sand, Cement Use	0.074 ~ 0.106, 0.106 ~ 0.250, 0.250 ~ 0.425, 0.425 ~ 0.850, 0.850 ~ 2.000

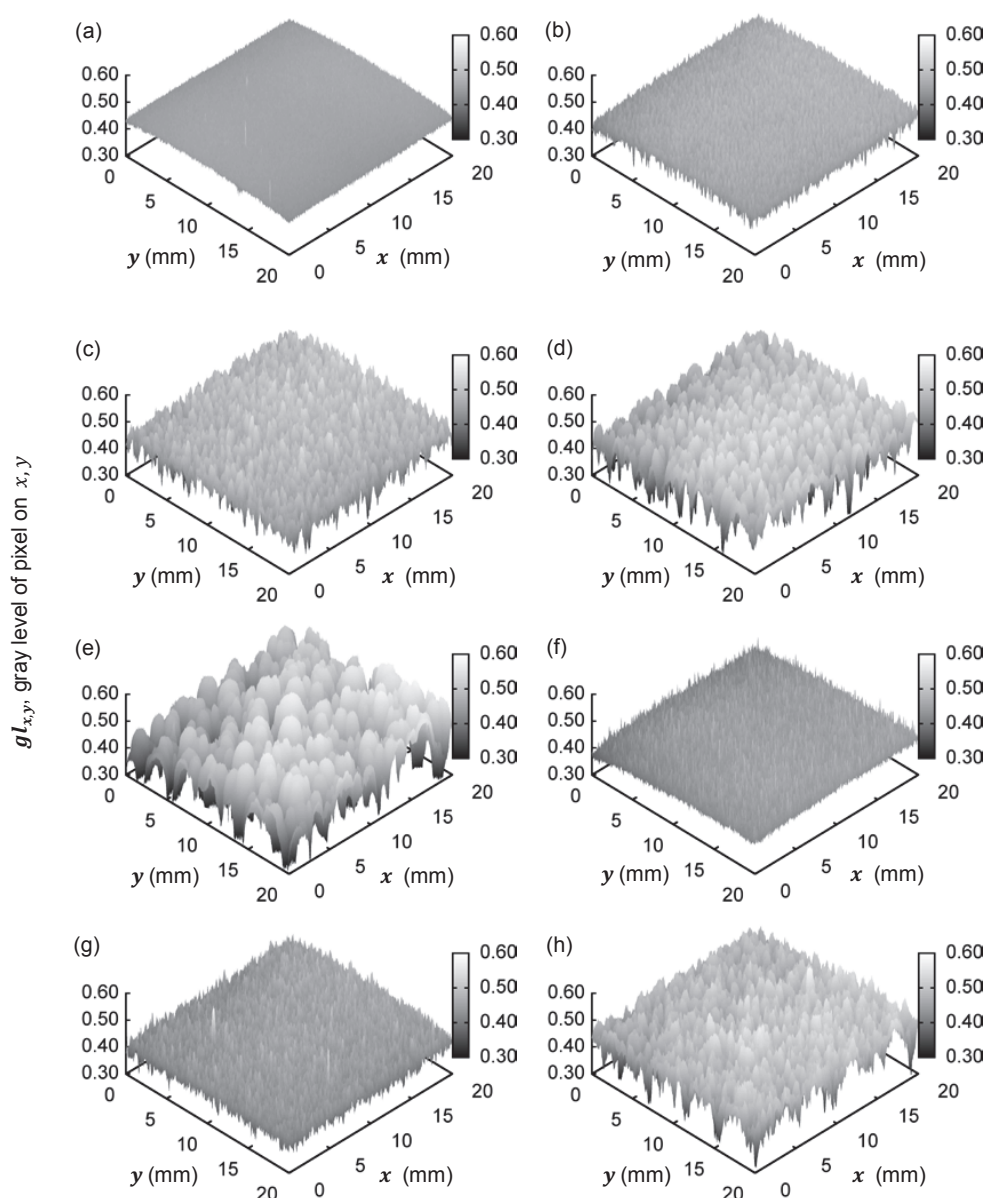


Fig. 15 Gray level of pixels in soft X-ray digital image (thickness of specimens $t = 8.2\text{mm}$). (a) glass beads ($d = 0.1\text{mm}$), (b) glass beads ($d = 0.4\text{mm}$), (c) glass beads ($d = 0.8\text{mm}$), (d) glass beads ($d = 1.5\text{mm}$), (e) glass beads ($d = 3.0\text{mm}$), (f) sand ($d = 0.074 \sim 0.106\text{mm}$), (g) sand ($d = 0.250 \sim 0.425\text{mm}$), (h) sand ($d = 0.850 \sim 2.000\text{mm}$).

3. 結果と考察

3.1. 試料粒径と画素濃度階調値の増減範囲

深さ 8.2mm の試料容器に充填した各試料の軟 X 線画像を **Photo. 5** に、軟 X 線画像の画素濃度階調値を三次元座標上に表示したものを **Fig. 15** に、走査線上の画素濃度階調値の変化を **Fig. 16** にそれぞれ示す。**Fig. 15**, **16** のいずれのグラフでも、 $0.35 < gl_x < 0.55$ の範囲内で増減を繰り返す傾向がみられた。また、試料粒径が大きいほど gl_x の増減範囲が広がった。

3.2. 試料粒径と画素濃度階調値の周期性

Fig. 16 に示した濃度階調値の増減には周期性がみられた。この周期性は、**Fig. 16-(a)**, **(f)** などの粒

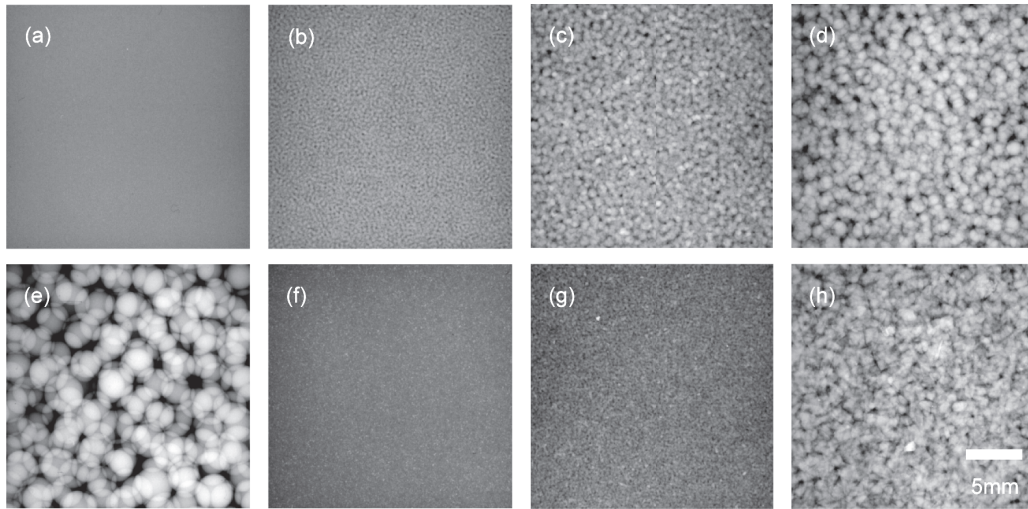


Photo. 5 Soft X-ray digital images of specimens (specimens thickness $t = 8.2\text{mm}$). (a) glass beads ($d = 0.1\text{mm}$), (b) glass beads ($d = 0.4\text{mm}$), (c) glass beads ($d = 0.8\text{mm}$), (d) glass beads ($d = 1.5\text{mm}$), (e) glass beads ($d = 3.0\text{mm}$), (f) sand ($d = 0.074 \sim 0.106\text{mm}$), (g) sand ($d = 0.250 \sim 0.425\text{mm}$), (h) sand ($d = 0.850 \sim 2.000\text{mm}$). Note: These images were not raw images. Contrast and brightness of these images were optimized for print papers.

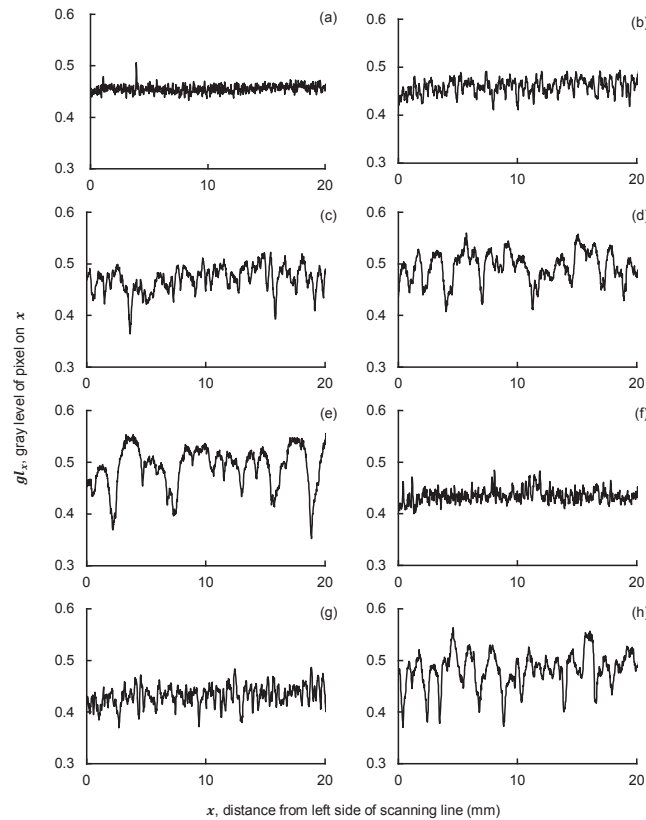


Fig. 16 Gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image (specimen thickness $t = 8.2\text{mm}$). (a) glass beads ($d = 0.1\text{mm}$), (b) glass beads ($d = 0.4\text{mm}$), (c) glass beads ($d = 0.8\text{mm}$), (d) glass beads ($d = 1.5\text{mm}$), (e) glass beads ($d = 3.0\text{mm}$), (f) sand ($d = 0.074 \sim 0.106\text{mm}$), (g) sand ($d = 0.250 \sim 0.425\text{mm}$), (h) sand ($d = 0.850 \sim 2.000\text{mm}$).

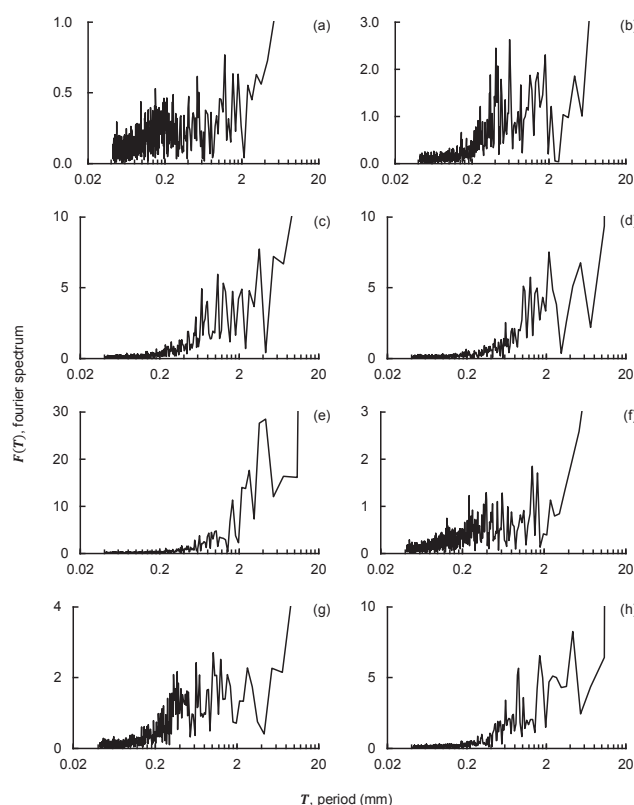


Fig. 17 Result of FFT analysis of gray level of pixels on scanning line (specimen thickness $t=8.2\text{mm}$). (a) glass beads ($d=0.1\text{mm}$), (b) glass beads ($d=0.4\text{mm}$), (c) glass beads ($d=0.8\text{mm}$), (d) glass beads ($d=1.5\text{mm}$), (e) glass beads ($d=3.0\text{mm}$), (f) sand ($d=0.074 \sim 0.106\text{mm}$), (g) sand ($d=0.250 \sim 0.425\text{mm}$), (h) sand ($d=0.850 \sim 2.000\text{mm}$).

径が小さい試料では不明瞭で、**Fig. 16-(e)**、**(h)**などの粒径が大きい試料では明瞭であった。

そこで、この増減の周期性を調べるため、高速フーリエ変換による解析を行った。その結果を**Fig. 17**に示す。**Fig. 17**によると、ガラスビーズでは、試料粒径付近の T に高い $F(T)$ が集中する傾向があった。たとえば、**Fig. 17-(b)**によると、粒径 0.4mm では $T=0.4$ 付近に $F(T)$ のピークがみられた。しかし、**Fig. 17-(a)**によると、粒径 0.1mm では $T=0.1$ (mm) 付近における $F(T)$ は、それ以外の T における $F(T)$ と大きな差はみられなかった。また、砂では、ガラスビーズと同様に試料粒径付近の T において高い $F(T)$ が多くみられる傾向があった。しかし、ガラスビーズに比べてより広い範囲の T に高い $F(T)$ が分布していた。たとえば、**Fig. 17-(g)**によると、粒径 $0.250 \sim 0.425\text{mm}$ では $T=0.2 \sim 3.0$ (mm) に高い $F(T)$ が多くみられた。

以上のことから、①供試画像の濃度階調値の増減には周期性があること、②試料粒径が大きいほどその周期が大きいこと、③その周期の大きさは試料粒径に近いことがわかった。また、砂は、ガラスビーズと比較して、濃度階調値の増減により多くの周期成分を含んでいた。これは、ガラスビーズがほぼ均一な粒径の粒子からなるのに対し、砂はある範囲に分布した粒径の粒子からなるためであると考えられる。

3.3. 試料粒径と画素濃度階調値の空間的従属性

セミバリオグラムによる解析結果を**Fig. 18**に示す。**Fig. 18**によると、粒径が大きくなるほどシルおよびレンジが大きくなった。レンジについて、ガラスビーズでは粒径の $1/3 \sim 2/3$ の値をとった。また、

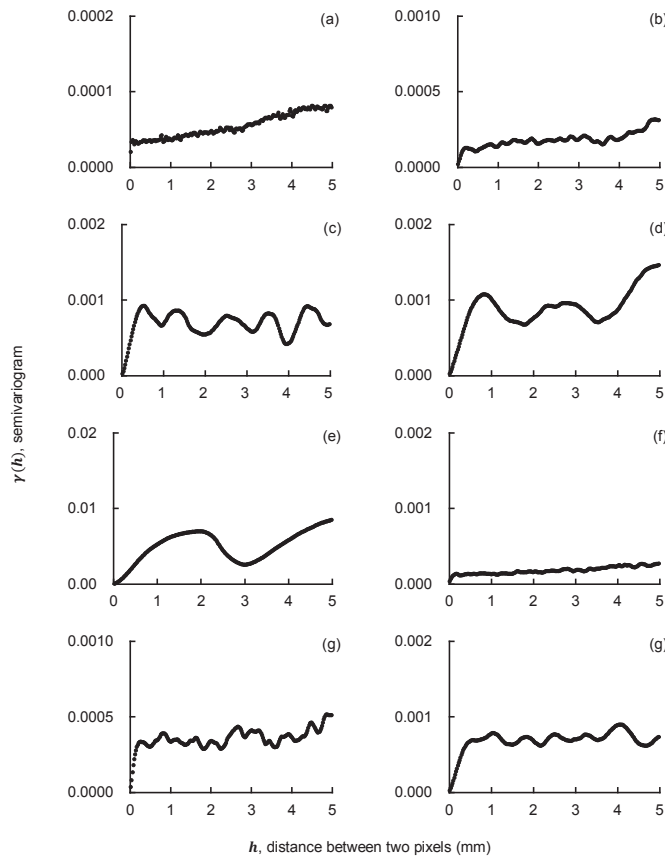


Fig. 18 Result of semivariogram analysis of gray level of pixels on scanning line (thickness of specimen $t=8.2\text{mm}$). (a) glass beads ($d=0.1\text{mm}$), (b) glass beads ($d=0.4\text{mm}$), (c) glass beads ($d=0.8\text{mm}$), (d) glass beads ($d=1.5\text{mm}$), (e) glass beads ($d=3.0\text{mm}$), (f) sand ($d=0.074 \sim 0.106\text{mm}$), (g) sand ($d=0.250 \sim 0.425\text{mm}$), (h) sand ($d=0.850 \sim 2.000\text{mm}$).

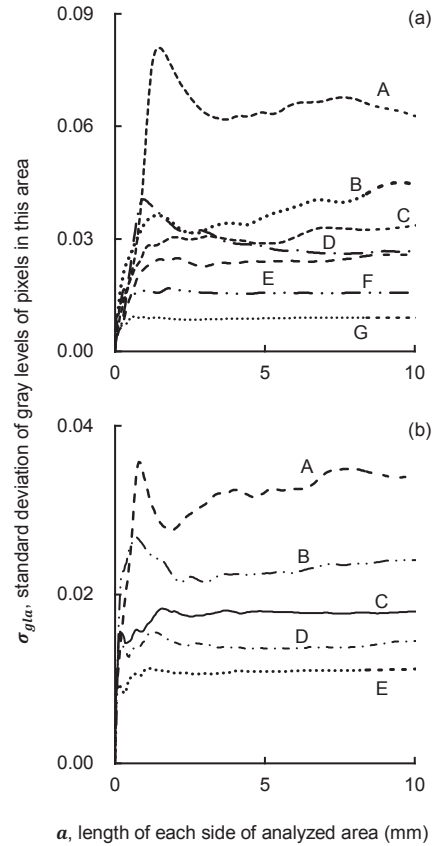


Fig. 19 a , length of each side of analyzed area and σ_{gla} , standard deviation of gray levels of pixels in this area. (a) glass beads, A: $d=3.0\text{mm}$, B: $d=2.0\text{mm}$, C: $d=1.5\text{mm}$, D: $d=1.0\text{mm}$, E: $d=0.8\text{mm}$, F: $d=0.4\text{mm}$, G: $d=0.2\text{mm}$, (b) sand A: $d=0.850 \sim 2.000\text{mm}$, B: $d=0.425 \sim 0.850\text{mm}$, C: $d=0.250 \sim 0.425\text{mm}$, D: $d=0.106 \sim 0.250\text{mm}$, E: $d=0.074 \sim 0.106\text{mm}$.

砂では粒径の増加にともなうレンジの増加割合がガラスビーズに比べて小さかった。セミバリオグラム解析によって得られるレンジは、画素間の濃度階調値に類似性なくなる画素間距離を表している。ガラスビーズおよび砂のいずれにおいても、試料粒径が大きいほどレンジが大きくなることから、試料粒径が大きいほど濃度階調値が近い値を持つ画素間の距離が長いことが明らかになった。

3.4. 解析対象範囲と画素濃度階調値の標準偏差

解析対象範囲の一辺長 a とその解析対象範囲内の濃度階調値の標準偏差 σ_{gla} との関係を **Fig. 19** に示す。**Fig. 19** によると、ガラスビーズおよび砂のいずれの粒径でも、 a の増加とともに σ_{gla} が急激に増加し、その後 σ_{gla} の値はゆるやかに増減を繰り返しながら収束した。この σ_{gla} の急激な増加は、 $a < 2\text{mm}$ の範囲でみられ、試料粒径が大きいほど σ_{gla} の急激な増加が継続する a の値も大きくなった。さらに、ガラスビーズでは $a > 5\text{mm}$ で、砂では $a > 2\text{mm}$ で、 σ_{gla} の変動幅が小さくなり、試料粒径の大きさと σ_{gla} の大きさの順序が一致した。

以上のことから、ガラスビーズでは $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 以上、砂では $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 以上の供試画像に対し

て、濃度階調値の標準偏差を求めることで、試料粒径を推定できると考えられる。

3.5. 画素濃度階調値の標準偏差による試料粒径推定

試料粒径 d (mm) と供試画像の濃度階調値の標準偏差 σ_{gl} との関係を試料厚 t ごとに Fig. 20 に示す。なお、砂については粒径範囲の中央値を d とした。また、 σ_{gl} の算出では、ガラスビーズおよび砂のいずれの試料粒径の推定に十分な画像寸法を確保するため、試料画像全面を解析対象範囲とした。Fig. 20 によると、ガラスビーズおよび砂のいずれの試料でも、 d の増大とともに σ_{gl} が増加した。ただし、 d の増大にともなう σ_{gl} の増加量は、試料の種類および試料厚 t に応じて異なった。たとえば、ガラスビーズでは、 $t = 8.2\text{mm}$ において d の増大にともなう σ_{gl} の増加量はほぼ一定であったが (Fig. 20-(c))、 $t = 3.0\text{mm}$ においては d の増大とともに、 d の増大に対する σ_{gl} の増加率が減少する傾向があった (Fig. 20-(a))。一方、砂では、 $t = 3.0\text{mm}$ において d の増大にともなう σ_{gl} の増加量はほぼ一定であったが (Fig. 20-(a))、 $t = 8.2\text{mm}$ においては d の増大とともに、 d の増大に対する σ_{gl} の増加率が減少する傾向があった (Fig. 20-(c))。 d と σ_{gl} の関係は、Table 3 に示す式でそれぞれ近似でき、いずれもよく適合した。

以上のことから、濃度階調値の標準偏差 σ_{gl} から試料粒径 d を測定できることが明らかになった。

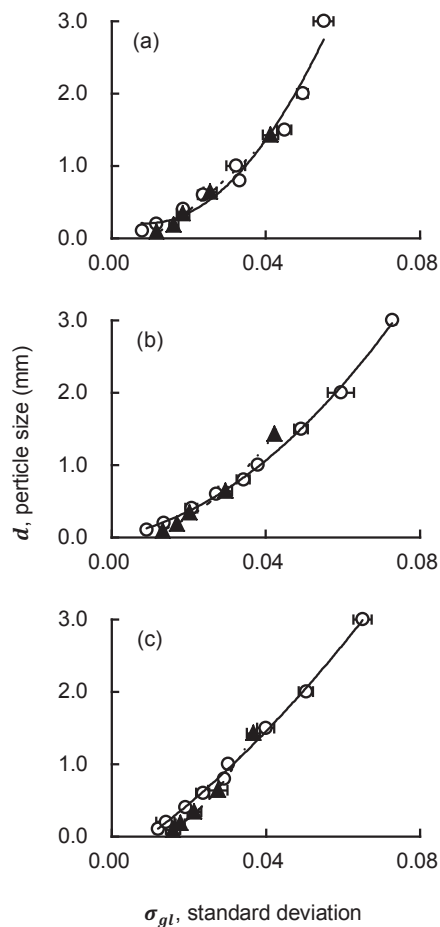


Fig. 20 d , particle size of specimens and σ_{gl} , standard deviation of gray levels of pixels in soft X-ray digital image. t , specimen thickness: (a) 3.0 mm, (b) 5.7 mm, (c) 8.2 mm. \circ : glass beads, \blacktriangle : sand. image size: 21.7mm \times 21.7mm.

第4章 微細粒試料の土壌面密度測定

土壌基質構造は、土粒子の形状や大きさなど粒子そのものの性質に加えて、それらの粒子の充填様式によって決定される。本章では、土壌の充填様式を示すひとつの尺度として、乾燥密度と試料厚から得られる「土壌面密度」の概念

Table 3 Approximations between d , particle size of specimens and σ_{gl} , standard deviation of gray levels of pixels in soft X-ray digital image

Specimens	t (mm)	Approximations	r^2
Glass Beads	3.0	$d = 1206.8\sigma_{gl}^2 - 21.853\sigma_{gl} + 0.3032$	0.9689
	5.7	$d = 431.57\sigma_{gl}^2 + 9.2048\sigma_{gl} + 0.0059$	0.9985
	8.2	$d = 251.36\sigma_{gl}^2 + 34.976\sigma_{gl} - 0.3500$	0.9977
Sand	3.0	$d = 372.97\sigma_{gl}^2 + 26.278\sigma_{gl} - 0.2896$	0.9968
	5.7	$d = 835.44\sigma_{gl}^2 - 0.8111\sigma_{gl} - 0.0352$	0.9971
	8.2	$d = 1679.2\sigma_{gl}^2 - 25.560\sigma_{gl} + 0.0909$	0.9985

を新たに定義する。そして、微細粒土を対象として、本法を用いた土壌面密度測定について論ずる。

1. 「土壌面密度」の定義と測定原理

1.1 土壌面密度の定義

土壌基質構造のうち、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、「土壌面密度 (ρ_A , Area Density of Soil)」を提案する。 ρ_A は「土壌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。

$$\rho_A = \frac{M_s}{A_t} \quad (13)$$

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

ρ_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、土粒子の密度が既知であれば、 ρ_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情報を得ることができる。また、 ρ_A は土壌の厚さ t および乾燥密度 ρ を用いて次式のように表すこともできる。

$$\rho_A = \rho \cdot t \quad (14)$$

ρ_A : 土壌面密度 (kg m^{-2}), ρ : 乾燥密度 (kg m^{-3}), t : 厚さ (m)

t は土壌の対向する両端面間の距離である。また、 ρ は単位体積あたりの固相質量と定義される³⁷⁾。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 ρ が増加し、あわせて間隙率が減少する。したがって、 ρ_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。 ρ_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、 ρ_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。また、(14) 式より、 ρ_A は ρ に t を乗じた値と等しいことから、いずれか一方を測定できれば、もう一方を一価関係で求めることができる。たとえば、レーザ共焦点顕微鏡などを用いることによって t の正確な測定ができれば、 ρ_A から ρ を推定でき、粘質土の収縮および膨張にともなう、 ρ の経時変化を追跡することもできる。

1.2 土壌面密度の測定原理

既出の (1) および (2) 式より、 t および ρ が大きくなるほど、透過する X 線量は小さくなる。また、(14) 式より、 ρ_A は ρ に t を乗じた値に等しい。すなわち、 ρ_A が大きいほど、軟 X 線の透過量が小さくなり、濃度階調値が高くなる。本章では、以上の原理に基づき、土壌面密度と軟 X 線画像の濃度階調値との関係を解明し、本法による土壌面密度の測定法を明らかにする。

2. 材料と方法

試料には、0.074mm 以下の粒径に篩い分けたセメント用川砂（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）およびナカライテスク社製カオリン（Code 19829-45, Kaolin; 以下、「カオリン」とする）を使用した。実験方法は前章に準じた。

3. 結果と考察

3.1 試料・試料厚・乾燥密度と軟 X 線画像の濃度階調値

走査線上の濃度階調値の変化を Fig. 21, Fig. 22 に示す。Fig. 21 は、試料厚と画素濃度の関係を示すため、乾燥密度が近く、試料厚が異なる試料の軟 X 線画像を並べて示した。Fig. 22 は、乾燥密度と画

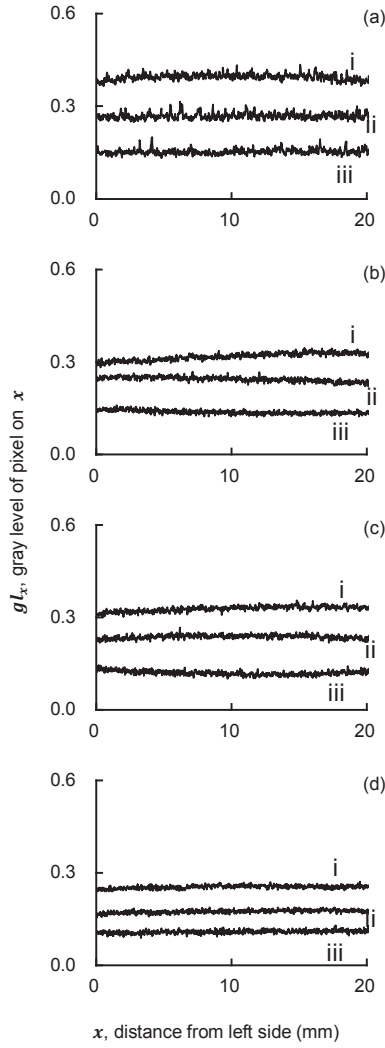


Fig. 21 Effect of specimen thickness on gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image. (a) sand, (b) silica powder, (c) bentonite, (d) kaolinite.

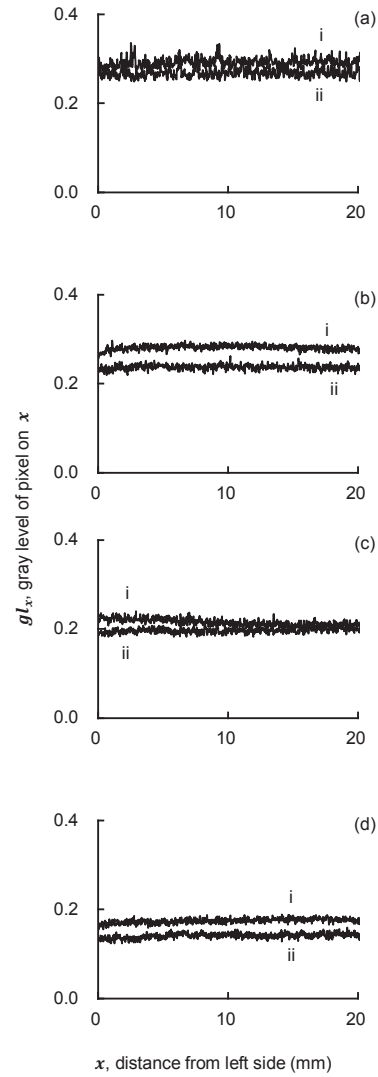


Fig. 22 Effect of dry bulk density on gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image. (a) sand, (b) silica powder, (c) bentonite, (d) kaolinite.

素濃度の関係を示すため、試料厚が近く、乾燥密度が異なる試料の軟 X 線画像を並べて示した。**Fig. 21**によると、試料厚 t が大きいほど、走査線上の画素濃度階調値 gl_x は大きくなった。また、**Fig. 22**によると、乾燥密度 ρ が大きいほど、 gl_x は大きくなった。これらの結果は、既出の (1) および (2) 式で示したとおり、試料厚および乾燥密度が大きいほど、試料を透過する X 線量が小さいことを裏付けた。

3.2 画素濃度階調値の増減周期

Fig. 21, 22によると、いずれの試料種類、試料厚および乾燥密度であっても、 gl_x が増減する傾向があった。その増減範囲は、シルト (**Fig. 21-(b), 22-(b)**)、ベントナイト (**Fig. 21-(c), 22-(c)**) およびカオリナイト (**Fig. 21-(d), 22-(d)**) については、ほぼ同じであった。しかし、砂 (**Fig. 21-(a), 22-(a)**) の gl_x の増減範囲は、シルト、ベントナイトおよびカオリナイトの gl_x の増減範囲に比べてやや大きかった。

そこで、高速フーリエ変換による解析を行い、 gl_x の増減の周期性を調べた。高速フーリエ変換の適用結果を **Fig. 23** に示す。砂 (**Fig. 23-(a)-i ~ iii**) では、周期 T が大きいほど、フーリエ振幅スペクト

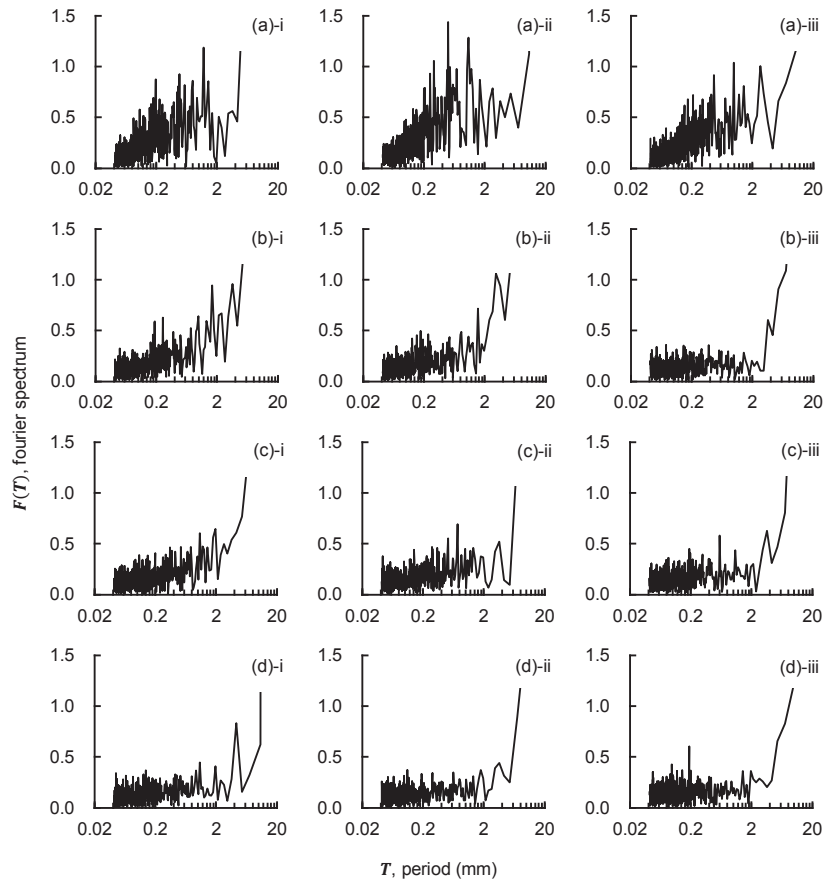


Fig. 23 Result of FFT analysis for gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image. (a)-i ~ iii sand (fig.21-(a)-i ~ iii), (b)-i ~ iii silica powder (fig.21-(b)-i ~ iii), (c)-i ~ iii bentonite (fig.21-(c)-i ~ iii), (d)-i ~ iii kaolinite (fig.21-(d)-i ~ iii).

ル $F(T)$ も大きくなる傾向があった。しかし、シルト (**Fig. 23-(b)-i ~ ii**) およびベントナイト (**Fig. 23-(c)-i ~ ii**) では、砂に比べてその傾向は弱かった。また、試料厚 t が薄い場合 (**Fig. 23-(b)-iii, (c)-iii**) やカオリナイト (**Fig. 23-(d)-i ~ iii**) では、この傾向はみられなかった。

前章では、ガラスビーズや砂のような粗大粒径の試料において、濃度階調値の増減範囲とその粒径とは密接な関係があることを示した。しかし、本章では、砂以外の試料において、濃度階調値の増減幅には大きな違いはみられず、濃度階調値の変化にも周期性はみられなかった。

3.3 濃度階調値の空間的不均一性

次に、格子分割法によって、軟X線画像上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、格子寸法を小さくすることで、軟X線画像の画素濃度の不均一性をより精緻に可視化できる。しかし、格子寸法を小さくすると、個々の粒子や軟X線画像に含まれる雑音の影響が大きくなる。そこで、まずセミバリオグラム解析の結果から、適切な格子寸法を求めた。試料、試料厚および乾燥密度ごとのセミバリオグラム解析の結果を **Fig. 24** に示す。セミバリオグラム解析で得られたレンジは、砂 (**Fig. 24-(a)-i ~ iii**) で $h < 0.25$ (mm)、シルト (**Fig. 24-(b)-i ~ iii**)、ベントナイト (**Fig. 24-(c)-i ~ iii**) およびカオリナイト (**Fig. 24-(d)-i ~ iii**) で $h < 0.1$ (mm) であった。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。そこで、格子分割法における格子寸法は 12pix (0.25mm) に設定した。

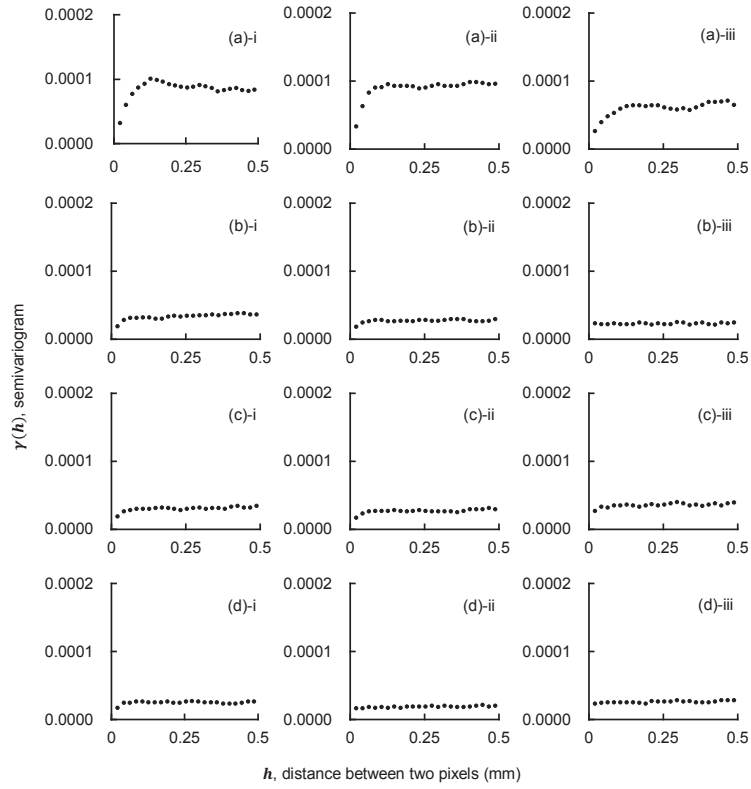


Fig. 24 Result of semivariogram analysis for gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image. (a)-i ~ iii sand (fig.21-(a)-i ~ iii), (b)-i ~ iii silica powder (fig.21-(b)-i ~ iii), (c)-i ~ iii bentonite (fig.21-(c)-i ~ iii), (d)-i ~ iii kaolinite (fig.21-(d)-i ~ iii).

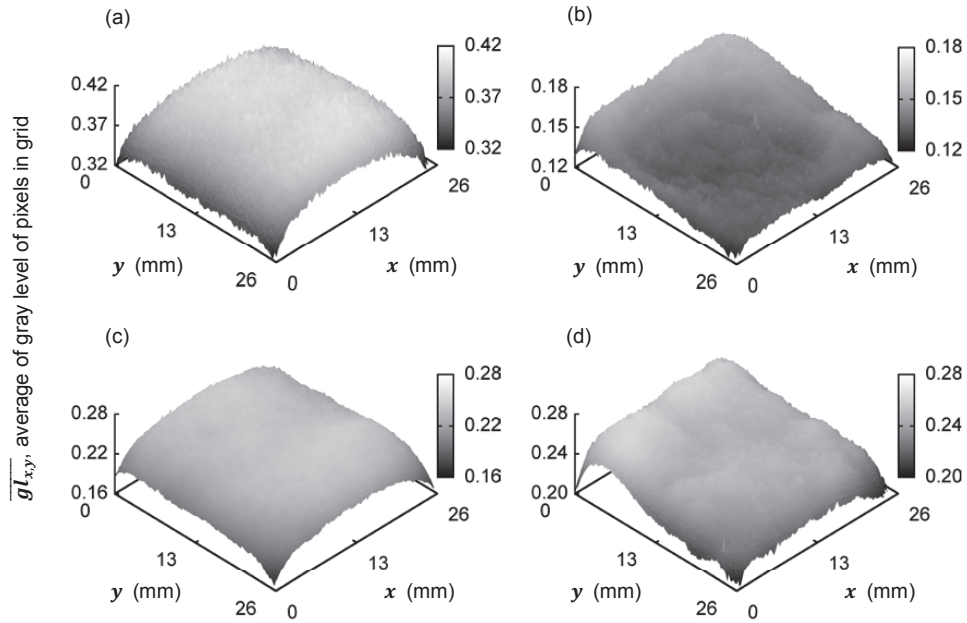


Fig. 25 Spatial distribution of gray level of pixels in soft X-ray digital image. (a) sand (fig.21-(a)-i), (b) silica powder (fig.21-(b)-iii), (c) bentonite (fig.21-(c)-ii), (d) kaolinite (fig.21-(d)-i).

格子分割法の結果を **Fig. 25** に例示する。**Fig. 25** によると、各格子の平均画素濃度階調値 $\overline{gl_{x,y}}$ は、試料中央部の方が試料辺縁部よりも高いもの (**Fig. 25-(a), (c)**)、試料辺縁部の方が試料中央部よりも高いもの (**Fig. 25-(b), (d)**) などがあり、軟 X 線画像上において画素濃度が不均一に分布していることが確認できた。また、その分布状態は試料ごとに異なっていた。

3.4 解析対象範囲の大きさと平均濃度階調値

以上より、軟 X 線画像の画素濃度は、局所的小および全体的なスケールのいずれにおいても、不均一に分布していることがわかった。そこで、「統計解析 (範囲指定)」の結果を用いて、この画素濃度の不均一分布が本法の解析結果に与える影響について検討した。

各試料の解析対象範囲として設定した正方形の辺長 a (mm) と、その解析対象範囲内に含まれるすべての画素の平均濃度階調値 $\overline{gl_a}$ との関係を **Fig. 26** に示す。**Fig. 26** のいずれのグラフでも、ある a の大きさまで $\overline{gl_a}$ が急激に増加し、しばらく細かな増減を繰り返したのち、 a の増加とともに $\overline{gl_a}$ の変化がゆるやかに推移した。また、 a の増加にともなう $\overline{gl_a}$ の変化は、 a の増加にともない $\overline{gl_a}$ が増加する傾向を示すもの (**Fig. 26-(b)-iii, (c)-iii**)、 a の増加にともない $\overline{gl_a}$ が減少する傾向を示すもの (**Fig. 26-(a)-i, ii, (b)-i, ii, (c)-i, ii, (d)-ii**) などいくつかの傾向があった。これらの傾向は、**Fig. 21, 22** において、試料中央部の gl_x が試料両端部の gl_x より高いもの、試料中央部の gl_x が試料両端部の gl_x より低いものにそれぞれ対応していた。

これらの結果について、 a が小さいときの $\overline{gl_a}$ の細かな増減は、狭い範囲での試料の不均一性をとらえ、また、 $\overline{gl_a}$ の変化がゆるやかに推移しはじめてからの $\overline{gl_a}$ 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。

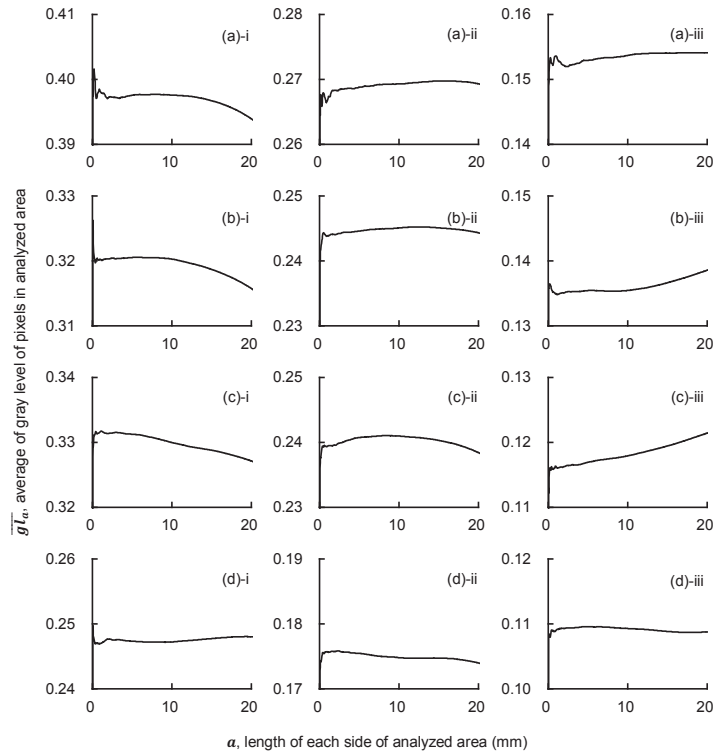


Fig. 26 a , length of each side of analyzed area and $\overline{gl_a}$, average of gray levels of pixels in the area. (a)-i ~ iii sand (fig.21-(a)-i ~ iii), (b)-i ~ iii silica powder (fig.21-(b)-i ~ iii), (c)-i ~ iii bentonite (fig.21-(c)-i ~ iii), (d)-i ~ iii kaolinite (fig.21-(d)-i ~ iii).

3.5 平均濃度階調値による土壌面密度推定

以上の論議から、軟 X 線画像の濃度階調値は、乾燥密度および試料厚との間に密接な関係があり、乾燥密度および試料厚が増加すると軟 X 線画像の画素濃度が増加することがわかった。また、試料充填において生じた不均一性が軟 X 線画像に反映され、その結果、解析対象範囲の寸法によって得られる平均濃度階調値が変化することがわかった。

土壌面密度 ρ_A は、(14) 式で示したように、乾燥密度 ρ に試料厚 t 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、土壌面密度を推定できると考えられる。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、土壌面密度 ρ_A の推定には、平均濃度階調値 \bar{gl} を用いた。 ρ_A と \bar{gl} の関係を Fig. 27 に示す。いずれの試料でも、 ρ_A の増加にともない \bar{gl} が増加した。 ρ_A と \bar{gl} の関係は、Table 4 に示す式でそれぞれ近似できた。いずれの近似式も決定係数 $r^2 \geq 0.99$ となり、よく適合した。

以上のことから、平均濃度階調値 \bar{gl} から土壌面密度 ρ_A を測定できることが明らかになった。

第 5 章 粘土における亀裂形成過程の分析

粘土を多く含む土壌に生ずる乾燥亀裂は、土粒子配列の変化や土壌水分の移動に起因した土壌基質構造の変形である。本章では、本法を用いて、亀裂の発生および発達にともなう土壌基質構造の変形を観察する。そして、土壌基質構造変形の面から、乾燥亀裂の形成機構について考察する。

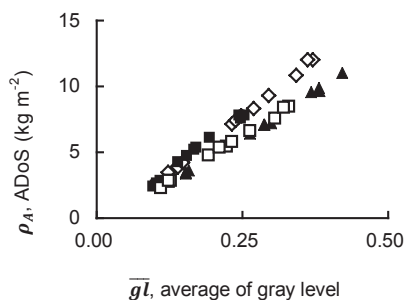


Fig. 27 ρ_A , Area Density of Soil (ADoS) and \bar{gl} , average of gray levels in soft X-ray digital image. ▲ sand, ◇ silica powder, ■ bentonite, □ kaolinite.

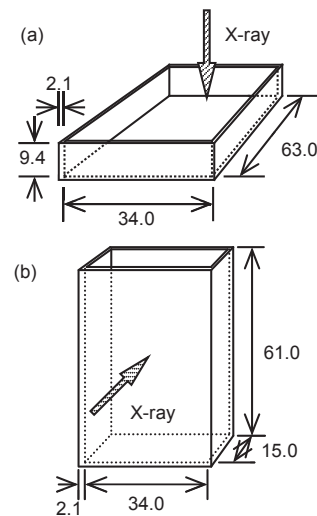


Fig. 28 Figure and dimension of specimen containers (mm). (a) specimen container A, (b) specimen container B.

Table 4 Approximations between ρ_A , Area Density of Soil and \bar{gl} , average of gray levels of pixels in soft X-ray digital image

Specimens	Approximation	r^2 , Coefficient of Determination
Sand	$\rho_A = 27.93 \bar{gl} - 0.9324$	0.9979
Silica Powder	$\rho_A = 34.94 \bar{gl} - 0.9989$	0.9981
Bentonite	$\rho_A = 27.62 \bar{gl} - 0.6225$	0.9971
Kaolinite	$\rho_A = 35.17 \bar{gl} - 0.8572$	0.9915

1. 材料と方法

試料には、ナカライテスク社製ベントナイト (Code 03923-85, Bentonite; 本章では以下, 「ベントナイト」とする) を用いた。ベントナイトの基本的物理性は, 土粒子密度 ρ_s 2.72 (Mg m⁻³), 塑性限界 (PL, Plastic Limit) W_p 0.44 (kg kg⁻¹), 液性限界 (LL, Liquid Limit) W_L 2.43 (kg kg⁻¹), 塑性指数 (PI, Plasticity Index) I_p 1.99 であった。ベントナイトは, 液性限界以上になるように蒸留水と混合し, 十分に練り混ぜてペースト状にした。ベントナイトペーストは, 形状の異なる 2 種類のポリスチレン製矩形容器 (本章では以下, 「試料容器 A」および「試料容器 B」とする) に真空脱気などは行わず充填した。試料容器 A および B の形状および寸法を **Fig. 28-(a), (b)** にそれぞれ示す。また, ベントナイトペーストを充填する直前に, 練り混ぜたベントナイトペーストの含水比を測定し, これを初期含水比 ω_0 (kg kg⁻¹) とした。

試料を充填した試料容器 A および B は, その上面を大気開放し, 試料表面から水分を蒸発させた。そして, 任意の経過時間 u (s) ごとに, 軟 X 線撮影を行い, 得られた軟 X 線画像を本法によって解析した。軟 X 線撮影のときの軟 X 線照射方向は, それぞれ水平方向および鉛直方向に発達する亀裂が観察できるように, 試料容器 A では試料容器上面から (**Fig. 28-(a)**), 試料容器 B では試料容器側面から (**Fig. 28-(b)**) 照射した。また, 撮影時に, そのときの含水比 ω_u (kg kg⁻¹) を測定した。

軟 X 線撮影, デジタル化および画像解析の各段階の操作方法是前章までに準じた。軟 X 線撮影の条件は, 試料容器 A では, 管電圧 40 kV, 管電流 1.5 mA, 照射時間 45 s とした。試料容器 B では, 管電圧 50 kV, 管電流 1.5 mA, 照射時間 60 s に設定した。画像解析に供する軟 X 線画像は, 縦 2880pix (61.1mm) × 横 1600pix (33.9mm) とした。画像解析では, 格子分割法による解析を行った。このときの格子寸法は, 縦 32pix × 横 32pix とした。

2. 結果と考察

2.1 水平方向への亀裂発達

試料容器 A に充填したベントナイトペーストの含水比の経時変化を **Fig. 29** に示す。**Fig. 29** によると, $u < 150000$ で u の増加とともに ω_u もほぼ直線的に減少し, $u > 150000$ で u の増加にともなう ω_u の減少はゆるやかになり, $u > 200000$ で ω_u はほぼ一定になった。

経過時間 u におけるベントナイトペーストの軟 X 線画像と, そのときの含水比 ω_u を **Photo. 6** に示す。初期に発生した亀裂は, $u = 56880$ で, 軟 X 線画像に向かって左上および右下に確認できた (**Photo. 6-(vii)-a, b**)。この左上に発生した亀裂 (以下, 「亀裂 A」とする) は, その幅が増加しながら, 試料中央部に向かって発達した (**Photo. 6-(vii) ~ (x)**)。また, 右下に発生した亀裂 (以下, 「亀裂 B」とする) も, 左上に発生した亀裂と同様にその幅を増加しながら, 試料を横断するように左側に向かって発達した (**Photo. 6-(vii) ~ (x)**)。 $u = 101220$ で, 左上隅および右上隅に新しい亀裂が発生した (**Photo. 6-(x)-c, d**; 以下, 左上隅に発生した亀裂を「亀裂 C」, 右上隅に発生した亀裂を「亀裂 D」とする)。亀裂 C および D は, $u = 128040$ で, 亀裂 A に接続した (**Photo. 6-(xi)**)。 $101220 < u < 144840$ の範囲では, 新しい亀裂が多数発生した (**Photo. 6-(x) ~ (xi)**)。しかし, $u \geq 144840$ では, ベントナイトペーストに新しく発生する亀裂が少なくなり, $128040 < u < 144840$ において, その形状や配置の変化は概ね平衡状態となった (**Photo. 6-(xi) ~ (xii)**)。それ以降, それぞれの亀裂は, その形状を維持しながら, 幅を増加させる傾向にあった (**Photo. 6-(xi) ~ (xiv)**)。

乾燥初期に発生した亀裂 A ~ D は, いずれも試料

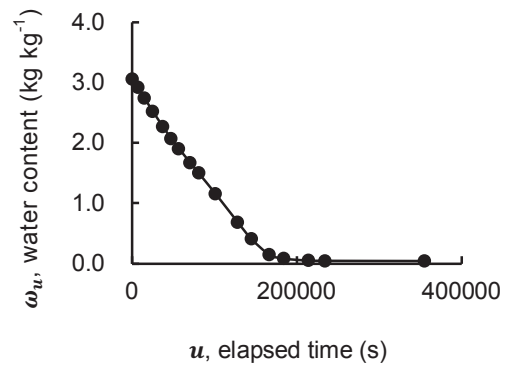


Fig. 29 u , elapsed time and ω_u , water content of specimens (horizontal).

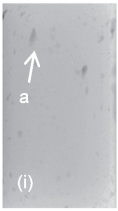



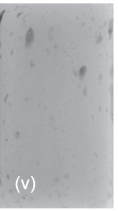
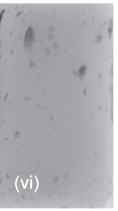
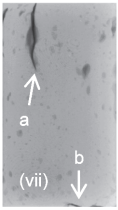
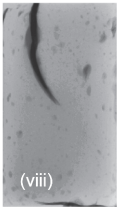
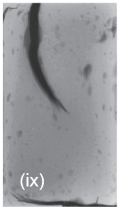
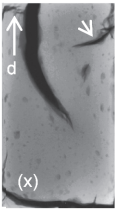
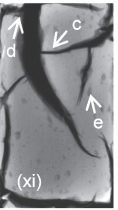
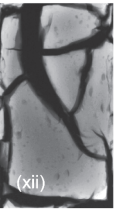
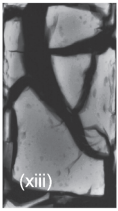
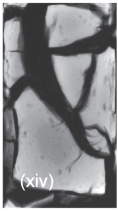
						
u	0	6900	14700	25200	37560	47520
ω_u	3.06	2.92	2.75	2.52	2.27	2.07
						
u	56880	70560	80760	101220	128040	144840
ω_u	1.91	1.67	1.50	1.16	0.69	0.41
						
u	166740	354900				
ω_u	0.15	0.04				

Photo. 6 Elapsed time and soft X-ray digital image of specimens (horizontal). u : elapsed time (s), ω_u : water content (kg kg^{-1})

辺縁部または試料辺縁部付近に発生した。このことから、試料充填直後の含水比はほぼ均一であるとする、試料中央部に比べて、試料辺縁部では乾燥が早く進行していたと考えられる。また、亀裂 A の発生場所は、 $u = 0$ において、濃度階調値が他の場所に比べて低かった (**Photo. 6-(i)-a**)。そして、時間経過とともに、この場所の濃度階調値がさらに低下し、その面積も少しずつ大きくなった (**Photo. 6-(i)-a ~ (vii)-a**)。亀裂 C および D の発生場所も、同様に、 $u = 0$ において、他の場所に比べて濃度階調値が低かった。そして、時間経過とともに、この場所の濃度階調値が低下し、そして亀裂 C および D がそれぞれ発生した。

軟 X 線画像の濃度階調値には土壌面密度と含水比の情報が含まれている。濃度階調値の低い場所は、土壌面密度および含水比の一方または両方が低い場所であると考えられる。 ω_0 はほぼ均一であるとする、 $u = 0$ に濃度階調値が低い場所は、土壌面密度が低い部分であると考えられる。このことから、ベントナイトの亀裂は、初期土壌面密度が低い場所に発生することがわかった。

亀裂 C (**Photo. 6-(x)-c**) および D (**Photo. 6-(x)-d**) の発達状況については、いずれも $u = 128040$ において、亀裂 A に対してほぼ直角に連結していた (**Photo. 6-(xi)-c, d**)。また、 $u = 128040$ で発生した亀裂 (**Photo. 6-(xi)-e**；以下、「亀裂 E」とする) についても同様に、亀裂 C に対してほぼ直角に連結していた。

以上のことから、ベントナイトに発生する水平方向の亀裂は、試料辺縁部付近の土壌面密度が低い点に発生し、その後、すでに発生していた最近傍の亀裂に向かって直角に連結するように発達することがわかった。

2.2 鉛直方向への亀裂発達

試料容器 B に充填したベントナイトの含水比の経時変化を **Fig. 30** に示す。**Fig. 30** によると、 ω_u の減少速度は、前節で行った試料容器 A を用いた実験に比べて遅かった。このことは、試料容器 B は試料容器 A に比べて、大気開放した容器上面の面積が小さいため蒸発量が少なく、また試料容器が深いいため試料深部からの水分の移動に時間がかかったためであると考えられる。

経過時間 u (s) における軟 X 線画像と、そのときの含水比 ω_u (kg kg^{-1}) を **Photo. 7** に示す。**Photo. 7** によると、実験開始直後から時間経過とともに試料表面の沈下がみられた (**Photo. 7-(i) ~ (xxiv)**)。また、この試料表面の沈下にと

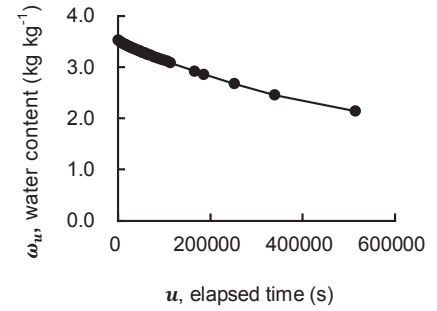


Fig. 30 u , elapsed time and ω_u , water content of specimens (vertical).

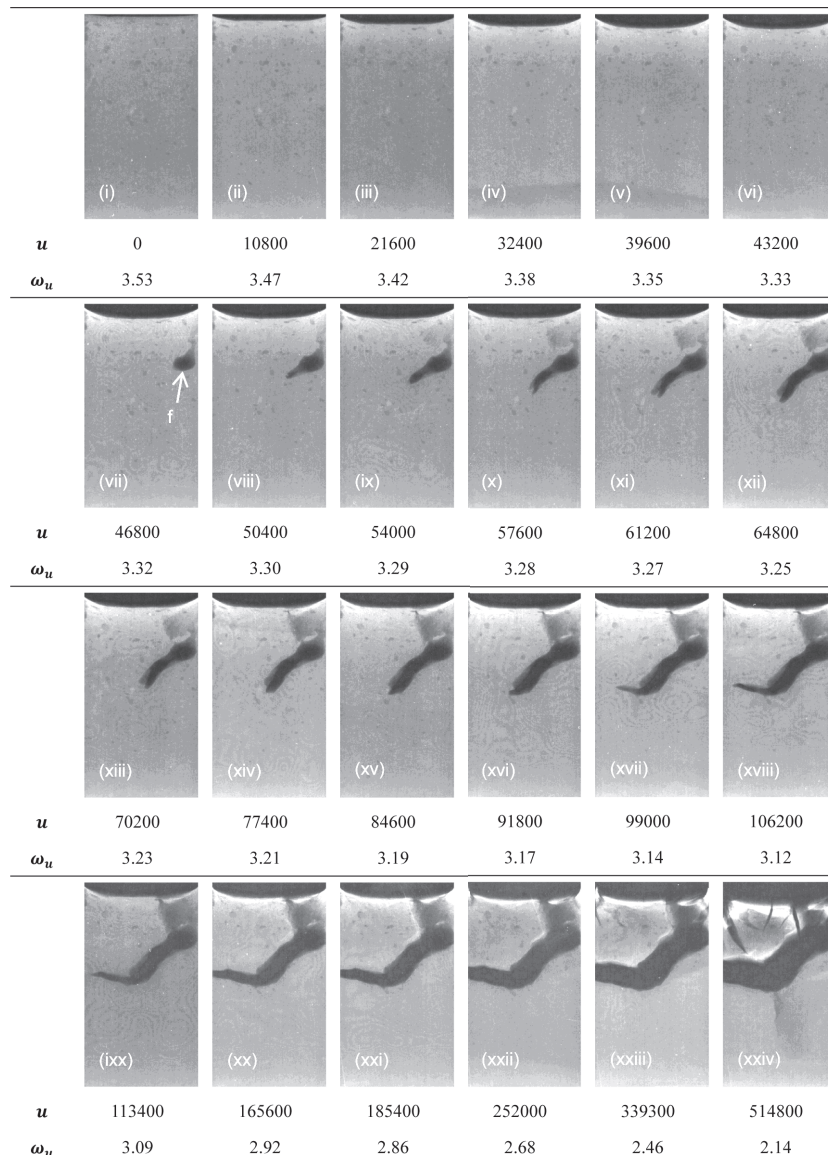


Photo. 7 Elapsed time and soft X-ray digital image of specimens (vertical). u : elapsed time (s), ω_u water content (kg kg^{-1}).

なって、試料表面の濃度階調値が高くなる傾向があった。この濃度階調値の増加は、試料表面に近いほど、また試料側面に近いほど、より顕著であった。そして、この濃度階調値の高い範囲は、時間経過とともに試料下部に向かって少しずつ広がった。これは、蒸発による上向きの水分移動によって試料表面近傍の水分量が増加したこと、試料表面の沈下とともにベントナイトの粒子が試料容器下方に移動したことなどによるものと考えられる。

$u = 46800$ に、軟 X 線画像の右上部に亀裂が確認できた (Photo. 7-(vii)-f; 以下、「亀裂 F」とする)。亀裂 F は、時間経過とともに、その幅を少しずつ増加しながら左下方向および上方向に向かって発達した。そして、 $u = 77400$ に試料表面に到達した (Photo. 7-(xiv))。また、 $u = 77400$ に左下から左上へ発達方向が変化した (Photo. 7-(xvii))。亀裂 F はその後も左上方向への発達を続け、 $u = 165600$ に試料左側面に到達した (Photo. 7-(xx))。

試料容器 A を用いて観察した水平方向の亀裂は、複数の箇所と同時に発生した。しかし、試料容器 B を用いて観察した鉛直方向の亀裂は、初期に発生した亀裂 F のみが発達を続け、 $u > 252000$ になって、次の亀裂が発生した (Photo. 7-(xxii))。そしてその後、試料表面に多数の亀裂が発生した (Photo. 7-(xxiv))。試料容器 B は、試料容器 A に比べて大気開放した容器上面の面積が小さい。そのため、1 つ目の亀裂が発生すると、発生した亀裂表面からの蒸発がより活発になり、亀裂付近がほかの場所よりもより早く乾燥する。それにともなって乾燥収縮がより一層盛んになる。その結果として、初期に発生した亀裂の発達がより進行するためであると考えられる。

2.3 亀裂の発達方向とその特徴

初期の亀裂の発生位置は、水平方向および鉛直方向のいずれの亀裂でも、試料辺縁部で発生した。また、水平方向の亀裂は複数の箇所に同時に亀裂が発生した。一方、鉛直方向の亀裂では初期に 1 つの亀裂のみが発生し、この亀裂のみが発達を続けた。この違いは、試料の蒸発表面積の違いによるものであると考えられる。

亀裂の発達については、水平方向の亀裂はすでに発生していた最近傍の亀裂に向かって発達した。また、水平方向へ発達する亀裂および鉛直方向に発達する亀裂のいずれも、それぞれの亀裂は直線状で、その幅を増加させながら、分岐することなく、前後に向かって発達した。したがって、ほかの場所で発生した亀裂同士がそれぞれの発達し、連結した結果、複数に分岐したような亀裂形状が形成されたと考えられる。

第 6 章 粘土における水分変化の測定

土壌構造は、固相のみからなるものではなく、土粒子内部、土粒子間および団粒間に形成された間隙や、その間隙内の空気・水分・溶質などの存在が極めて重要である。なかでも土壌水分は、降雨や乾燥などの周囲の環境変化によって、土壌中の分布や量が絶えず変化しており、また、その動態によって、土粒子配列が変化するなど、極めて重要な役割を果たす。本章では、本法による土壌水分測定の可能性について検討する。

1. 材料と方法

試料には、前章のベントナイトを用いた。ベントナイトの土壌水分特性曲線を Fig. 31 に示す。実験方法は、前章の試料容器 A を用いる実験に準じた。画像解析では、「統計解析 (全画素)」を行った。そして、その結果と、試料の含水比 ω_u および Fig. 31 から求

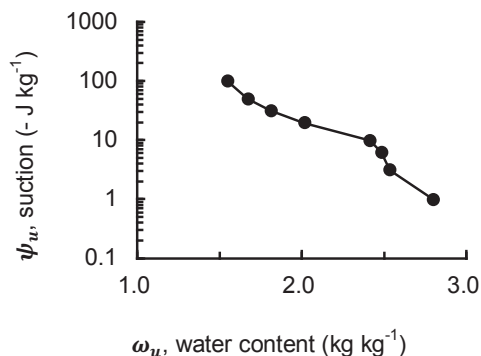


Fig. 31 Water retention curve of bentonite.

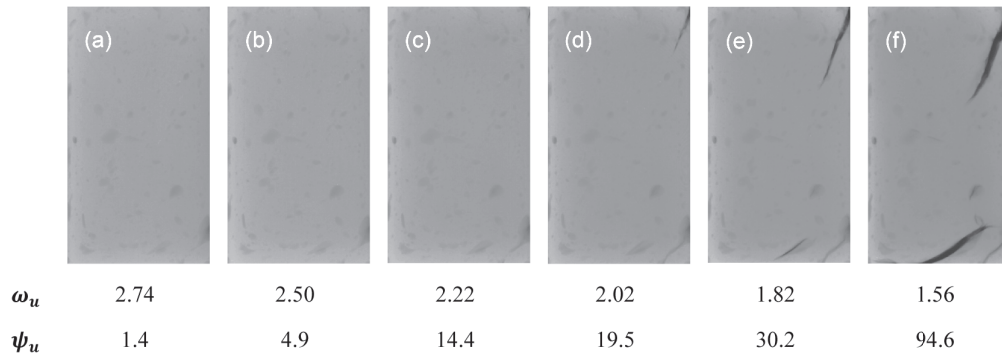


Photo. 8 Soil moisture and soft X-ray digital image of specimens. ω_u : water content (kg kg^{-1}), ψ_u : suction ($-\text{J kg}^{-1}$).

Note: These images were not raw images. Contrast and brightness of these images were optimized for print papers.

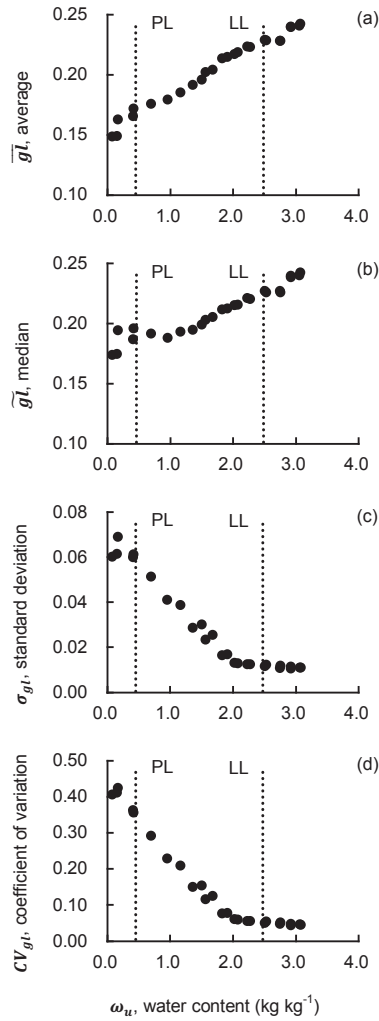


Fig. 32 ω_u , water content and result of statistical analysis of gray levels of pixels in soft X-ray digital image.

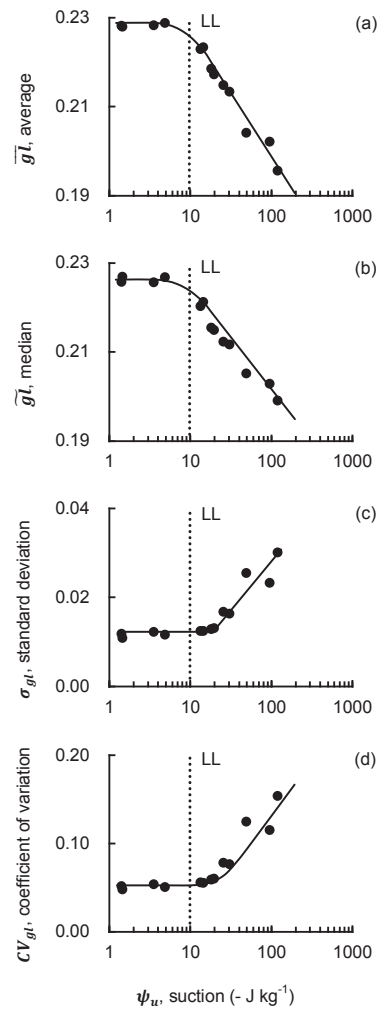


Fig. 33 ψ_u , suction and result of statistical analysis of gray levels of pixels in soft X-ray digital image.

めた土壌水分ポテンシャル ψ_u を比較した。

2. 結果と考察

2.1 土壌水分と軟 X 線画像

試料の各乾燥段階における軟 X 線画像を **Photo. 8** に示す。**Photo. 8** によると, $\omega_u = 2.02$, $\psi_u = -19.5$ で, 亀裂が発生した。また, ω_u および ψ_u が低いほど, 濃度階調値は低かった。また, いずれの画像も辺縁部に比べて中央部の画素濃度階調値が低い傾向があった。 ω_u および ψ_u が低いほど, この傾向は顕著であり, 軟 X 線画像のコントラストも強くなった。

2.2 含水比と軟 X 線画像

試料の含水比と, そのときの軟 X 線画像に対する統計解析の結果を **Fig. 32** に示す。**Fig. 32-(a), (b)**

によると, ω_u の増加とともに \bar{gl} および \tilde{gl} も増加した。しかし, $\omega_u < 1.0$ では, \tilde{gl} にばらつきがみられた。また, **Fig. 32-(c), (d)** によると, $\omega_u < 2.0$ では, ω_u の増加とともに, σ_{gl} および CV_{gl} が減少した。しかし, $\omega_u > 2.0$ では, σ_{gl} および CV_{gl} は, ω_u の値によらず, ほぼ一定であった。これは, $\omega_u < 2.0$ で, 乾燥とともにベントナイトペーストの土壌面密度のばらつきがより大きくなったことを示している。このことから, $\omega_u < 2.0$ を境界に, 乾燥収縮によるベントナイトペーストの基質構造変化が始まったと考えられる。

2.3 土壌水分ポテンシャルと軟 X 線画像

試料の土壌水分ポテンシャルと, そのときの軟 X 線画像に対する統計解析の結果を **Fig. 33** に示す。**Fig. 33-(a), (b)** によると, $\psi_u > -5$ では, \bar{gl} および \tilde{gl} は, ψ_u の値によらず, ほぼ一定であった。しかし, $\psi_u < -5$ では, \bar{gl} および \tilde{gl} は, ψ_u の増加とともに減少した。ベントナイトの液性限界は, 土壌水分ポテンシャルに換算して, およそ $\psi_u = -8.8$ であった。以上のことから, \bar{gl} および \tilde{gl} の値が, ψ_u の値による影響を受け始める変曲点は, 塑性限界の水分状態, すなわち土が液体から塑性体に変化する境界の水分状態に相当すると考えられる。

Fig. 33-(c), (d) によると, $\psi_u > -20$ では, σ_{gl} および CV_{gl} は, ψ_u の値によらず, ほぼ一定であった。しかし, $\psi_u < -20$ では, σ_{gl} および CV_{gl} は, ψ_u の増加とともに増加した。このことは, $\psi_u = -19.5$, すなわち $\omega_u = 2.02$ で亀裂の発生が認められたことと同様の理由であると考えられる。

2.4 軟 X 線画像からの土壌水分ポテンシャルの推定

次に, 軟 X 線画像からの土壌水分ポテンシャルの推定について検討した。

各水分状態のベントナイトペーストの軟 X 線画像の濃度階調値の変動係数 CV_{gl} と, そのときのベントナイトペーストの土壌水分ポテンシャル ψ_u との関係を **Fig. 34** に示す。その結果, $-100 < \psi_u < -1$ の範囲において, ψ_u は CV_{gl} の一次関数として, 以下の式で近似できた。

$$\psi_u = 1016.8 CV_{gl} - 46.406 \quad (r^2 = 0.8883) \quad (15)$$

ここで, ψ_u : 土壌水分ポテンシャル (kPa) (ただし, $-100 < \psi_u < -1$), CV_{gl} : 濃度階調値の変動係数である。

以上のことから, ベントナイトペーストの軟 X 線画像から土壌水分ポテンシャルが推定できる可能性が示された。

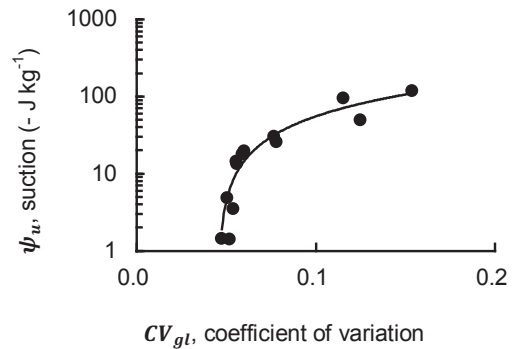


Fig. 34 CV_{gl} , coefficient of variation of gray levels of pixels in soft X-ray digital image and ψ_u , suction.

第7章 おわりに

本論では、軟 X 線画像法の原理と方法および本法を用いた土壌基質構造測定について論じた。その内容は以下のとおりである。

- (1) 土壌構造測定法を整理した。また、本法は、これまで困難であった土壌基質構造の定量化を実現できる測定法であることを示した。
- (2) 軟 X 線の基礎知識を整理し、本法の原理と方法を示した。また、ガラスビーズや砂など均質系試料を対象として、本法の適用例を示した。
- (3) 本法による粒径測定の原理を示した。そして、ガラスビーズおよび砂の粗粒試料を用いて、本法による粒径測定が可能であることを示した。
- (4) 土壌基質構造を表現する新しい概念である「土壌面密度」を定義した。そして、細砂、シルト質の珪石粉末、ベントナイトおよびカオリナイトを用いて、本法による土壌面密度測定が可能であることを示した。
- (5) ベントナイトにおける乾燥亀裂の形成過程を本法によって観察し、土壌基質構造変化の観察に本法が適していることを示した。
- (6) 本法によって、液性限界の識別および土壌水分ポテンシャルの推定ができる可能性があることを示した。

また、本法の課題としては、以下のものが挙げられる。

- (1) 本論では、物性が既知である均質系の試料を中心に、本法による測定例を示した。今後は、本法を実際土壌に適用するための方法を検討する必要がある。また、これにあわせて本法の適用例を蓄積し、体系的に整理していく必要がある。
- (2) 本論では、本法による粒径および土壌面密度の測定例を示し、また、液性限界識別および土壌水分ポテンシャル測定の可能性を示した。今後は、これらのほかに本法で測定できる土壌の物理的性質を探索する必要がある。

本論では、新たな視点から開発された土壌構造測定法である軟 X 線画像法について論じた。本法によって、これまで困難であった土壌基質構造の定量ができるようになり、土壌内部で生起する諸現象の解明にさらなる展開を期待できる。

本論で対象とした土壌構造は、土壌の特徴や性質を決定する最も基本的な要素である。この土壌構造によって、物理性・力学性・化学性・生物性など、土壌の特徴や性質が大きな影響を受ける。なかでも、土壌中の水分動態を左右する保水性や透水性などの決定因子とその決定機構を探索は、ほ場の水分の精確な把握と適切な制御が重要な農業生産分野において、とくに大きな意義を持つ。土壌構造と土壌水分との関係を明らかにすることで、農業生産分野にも大きく貢献できる。

軟 X 線画像法は、従来の土壌構造測定法に対して、新たな視点を与えるものである。本法が土壌構造の概念に新たな解釈を与えることを期待したい。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々からのご指導とご支援を頂戴した。主査および博士後期課程における主指導教員をお引き受けくださった本研究科教授成岡市博士には、終始に渡り懇切なるご指導、ご助言およびご校閲を賜った。副査をお引き受けくださった東京農業大学名誉教授駒村正治博士（当時東京農業大学教授）、本研究科教授加治佐隆光博士、同教授酒井俊典博士および筑波大学大学院生命環境科学研究科教授石井敦博士（当時本研究科准教授）には、有益なご助言と丁寧なご校閲を頂戴した。本学生命科学研究支援センター技術専門員黒澤俊人氏には、放射線に関して、数々の有益なご助言とご示唆を戴いた。独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構近畿中国四国農業研究センター井上

久義博士および高知大学農学部教授佐藤泰一郎博士をはじめ瀬戸内ゼミ参加者の皆様には、当該ゼミにおける活発な議論のなかから、研究を進めるための数多くのご助言を頂戴した。本学名誉教授天野秀臣博士には、終始暖かな励ましとご助言を、東京大学大学院農学生命科学研究科教授溝口勝博士、同技術専門員井本博美氏および本研究科助教伊藤良栄博士には、有益なご示唆を賜った。本研究科古谷啓氏、川瀬陽介氏および柴田花菜氏をはじめ、流域保全学教育研究分野専攻生および同窓生諸氏には、本研究における実験を行うにあたって、多大なご助力を戴いた。ソフテックス株式会社には、軟X線発生装置の開発および試作にあたって、多くのご支援を賜った。ミサワホーム東海株式会社濱本貴章博士、三重県保健環境研究所森康則博士および辻製油株式会社荒木裕子博士には、本論をまとめるにあたって、貴重なご助言と激励を頂戴した。本研究科研究科長吉岡基博士をはじめ本研究科教職員の皆様、とくに本学定型業務等運営・支援センター長前田政彦氏（当時本研究科事務長）をはじめ事務部門の皆様には多くのご配慮と暖かな励ましを戴いた。本論は、以上の皆様をはじめ数多くの方々からの温かいご指導、ご助力、ご支援、そして時に厳しいご叱責を頂戴した賜物である。ここに記し、心より感謝申し上げる。最後に、本論をまとめる幸運は、我が母校三重大大学、ならびに本学にかかわりのある数多くの人々から与えられたものである。貴重な機会を与えてくださった母校と関係者の皆様に深く感謝する。

附 記

本論に記載した会社名および製品名などは、一般にそれぞれの会社または個人の登録商標または商標である。なお、本論は、筆者の三重大大学審査学位論文を、その後頂戴したご意見などを踏まえて、再整理したものであることを附記する。

引用文献

- 1) A. M. Petrovic, J. E. Siebert and P. E. Rieke (1981): Soil Bulk Density Analysis in Three Dimensions by Computed Tomographic Scanning. *Soil Science Society of America Journal*, 46(3):445-450.
- 2) 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.
- 3) Digiteo (2011): Scilab / products / Home - Scilab WebSite. <<http://www.scilab.org/products/scilab/>>, (accessed 2012-01-15).
- 4) D. K. Cassel, J. M. Brown, and G. A. Johnson (1990): Computed Tomographic Analyses of Water Distribution in Three Porous Foam Media. *Theoretical and Applied Climatology*, 42(4):223-228.
- 5) E. C. Childs, and N. Collis-George (1950): The Permeability of Porous Materials. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 201(1066):392-405.
- 6) G. S. Warner, J. L. Nieber, I. D. Moore and R. A. Geise (1988): Characterizing Macropores in Soil by Computed Tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 53(3):653-660.
- 7) H. Rogaar and R. A. H. Thiadens (1975): X-ray applied to the study of the pore structure in soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 23:321-333.
- 8) K. Tokunaga (1988): X-ray Stereoradiographs Using New Contrast Media on Soil Macropores. *Soil Science*, 146(3):199-207.
- 9) M. G. Anderson (1979): On the Potential of Radiography to Aid Studies of Hillslope Hydrology. *Earth Surface Processes*, 4(1):77-83.
- 10) R. Fabbri (2011): SIP - Scilab Image Processing Homepage. <<http://siptoolbox.sourceforge.net/>>, (accessed 2012-01-15).
- 11) R. Tippköttera, T. Eickhorsta, H. Taubnera, B. Grednera and G. Rademakerb (2009): Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography (μ CT). *Soil and*

- Tillage Research, 105:12-20.
- 12) S. D. Gryzea, L. Jassogne, J. Sixc, H. Bossuyta, M. Weversd and R. Merckxa (2006): Pore Structure Changes During Decomposition of Fresh Residue: X-ray Tomography Analyses. *Geoderma*, 134:82-96.
 - 13) T. Sander, H. H. Gerke and H. Rogasik (2008): Assessment of Chinese Paddy-Soil Structure using X-ray Computed Tomography. *Geoderma*, 145: 303-314.
 - 14) Y. Mori, K. Iwama, T. Maruyama and T. Mitsuno (1999): Discriminating the Influence of Soil Texture and Management-Induced Changes in Macropore Flow Using Soft X-Rays. *Soil Science*, 164(7):467-482.
 - 15) Y. Mori, T. Maruyama, and T. Mitsuno (1999): Soft X-ray Radiography of Drainage Patterns of Structured Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4):733-740.
 - 16) Y. Nakashima and S. Kamiya (2007): Mathematica Programs for the Analysis of Three-Dimensional Pore Connectivity and Anisotropic Tortuosity of Porous Rocks using X-ray Computed Tomography Image Data. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 44(9):1233-1247.
 - 17) 青柳泰司・安部真治・小倉泉・清水悦雄 (1998): 放射線機器工学 (I) X 線診断機器. p.25, コロナ社, 東京.
 - 18) 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. p.63, 富士フイルムメディカル, 東京.
 - 19) 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. p.66, 富士フイルムメディカル, 東京.
 - 20) 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. p.75, 富士フイルムメディカル, 東京.
 - 21) 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. p.208, 富士フイルムメディカル, 東京.
 - 22) 飯田博美編 (2006): 放射線概論—第 1 種放射線試験受検用テキスト—. p.31, 通商産業研究社, 東京.
 - 23) 伊藤篤優 (2007): ガラス粒子群の軟 X 線画像特性と数値解析. 平成 18 年度三重大学生物資源学部卒業論文, pp.1-92.
 - 24) 岩田幸良・成岡市 (2002): 畑利用淡色黒ボク土と沖積水田土における排水性粗孔隙の異方性について. 土壌の物理性, 89:15-24.
 - 25) 岩間憲治・堀野治彦・丸山利輔・渡辺紹裕 (1996): 土壌孔隙構造の 3 次元分布解析と孔隙特性の定量化. 農業土木学会論文集, 182(64-2):103-108.
 - 26) 岩間憲治・丸山利輔・渡辺紹裕 (1994): 軟 X 線ステレオ画像を用いた疑似孔隙の画像処理による立体表示. 農業土木学会論文集, 171:99-105.
 - 27) 宇野尚雄・神谷浩二・田中宏路 (1998): 「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布. 土木学会論文集 III, 603(44):35-44.
 - 28) 宇野尚雄・杉井俊夫・神谷浩二 (1993): 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察. 土木学会論文集, 469(III-23):25-34.
 - 29) 神谷浩二・宇野尚雄・松島健之 (1996): 「空気圧入法」による砂質土の間隙径分布の計測. 土木学会論文集, III, 541(35):189-198.
 - 30) 木庭元晴・青山千彰 (2005): ピベット法による粒度分析再考. 関西大学博物館紀要, 11:A1-A19.
 - 31) 佐藤健・曾場昭之・桑山忠・宇野尚雄 (1992): 水銀圧入式ポロシメーターによる粒状材料の間隙径分布の測定. 土木学会論文集, III, 445(18):139-142.
 - 32) 柴田花奈・廣住豊一・成岡市 (2011): 軟 X 線画像法による粘土ペーストの鉛直方向への乾燥亀裂発生過程の評価. 農業農村工学会全国大会講演要旨集, 356-357.
 - 33) 高橋学・林為人 (2004): 水銀圧入式ポロシメータで得られる情報と測定の問題点. 資源と素材, 120: 455-460.
 - 34) 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.
 - 35) 徳永光一・佐藤照男・菊地宏・今和則 (1985): 粘質水田土の粗孔隙の実態と透水性について—X 線透写像による土壌と間隙に関する研究 (II) —. 土壌の物理性, 51:49-62.
 - 36) 土壌物理学学会編 (2002): 新編土壌物理用語事典. p.7, 養賢堂. 東京.
 - 37) 土壌物理学学会編 (2002): 新編土壌物理用語事典. p.36, 養賢堂. 東京.

- 38) 土壌物理研究会 (1979): 土の物理学—土質工学の基礎—. pp.231-233, 森北出版, 東京.
- 39) 中村雄一 (2005): 軟 X 線撮影によるガラスビーズ間隙水の凍結現象の観察とその解析. 平成 16 年度三重大学生物資源学部卒業論文, pp.1-91.
- 40) 成岡市 (1986): 軟 X 線映像による土壌孔隙の立体解析法の開発, 軟 X 線の科学, 2(2):19-28.
- 41) 成岡市 (1987): 軟 X 線による土の孔隙の撮り方, 軟 X 線の科学, 2(3, 4):15-24.
- 42) 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.
- 43) 成岡市 (1989): 土壌の粗孔隙の計測法とその物理的機能に関する研究. 東京農業大学総合研究所紀要, 1:1-58.
- 44) 成岡市 (2002): 軟 X 線デジタル画像による土壌の固相構造の測定に関する基礎的検討. 農業土木学会大会講演要旨集, 296-297.
- 45) 成岡市・岩田幸良・駒村正治 (2000): 関東ローム下層土における粗孔隙の透水, 通気および排水機能. 農業土木学会論文集, 208:63-71.
- 46) 成岡市・川田日出夫 (2001): 関東ローム表土においてミミズが形成した粗孔隙および団粒について. 農業土木学会論文集, 213:129-136.
- 47) 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.
- 48) 成岡市・駒村正治 (2000): 固相配列と排水特性からみた関東ローム表層黒ボク土の粗孔隙の特徴. 農業土木学会論文集, 210:19-27.
- 49) 成岡市・駒村正治 (2000): 武蔵野台地関東ローム層の深さ方向に発達している管状孔隙群について. 農業土木学会論文集, 208:99-105.
- 50) 成岡市・橋本雄介・山崎龍太郎 (2005): ベントナイトペースト薄層における乾燥亀裂の軟 X 線画像観察. 農業土木学会大会講演要旨集, 840-841.
- 51) 成岡市・本間秀明 (1991): 土壌構造と軟 X 線. 農業土木学会誌, 59(2):131-136.
- 52) 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.25-27, 丸善, 東京.
- 53) 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.
- 54) 日本第四紀学会 (1993): 第四紀試料分析法 2 研究対象別分析法. pp.98-103, 東京大学出版会, 東京.
- 55) 日本第四紀学会 (1993): 第四紀試料分析法 2 研究対象別分析法. pp.103-108, 東京大学出版会, 東京.
- 56) 橋本雄介・山崎龍太郎・土田ひとみ・成岡市 (2004): 軟 X 線画像による粘土の乾燥過程における収縮と亀裂形成の関係. 第 46 回土壌物理学会シンポジウム講演要旨集, 42-43.
- 57) 橋本雄介・山崎龍太郎・土田ひとみ・西本恵子・成岡市 (2003): ガラスビーズの軟 X 線画像とそのテクスチャ解析. 第 45 回土壌物理学会シンポジウム講演要旨集, 48-49.
- 58) 馬場秀和 (1994): H_2O ガスならびに N_2 ガスを用いた各種土の比表面積測定結果とその発現機構について—細粒土の比表面積, 細孔容積と物理性に関する研究 (I)—. 農業土木学会論文集, 171:1-6.
- 59) 馬場秀和 (1994): N_2 ガスを用いた比表面積の測定誤差ならびに各種土の比表面積の比較—細粒土の比表面積, 細孔容積と物理性に関する研究 (II)—. 農業土木学会論文集, 171:7-12.
- 60) 廣住豊一・川瀬陽介・成岡市 (2010): 軟 X 線画像法による粘質土における乾燥亀裂の発達過程の観察. 農業農村工学会全国大会講演要旨集, 140-141.
- 61) 廣住豊一・黒澤俊人・古谷啓・成岡市 (2011): 新しい土壌構造測定法「軟 X 線画像法」. 土壌物理学会, 116-117.
- 62) 廣住豊一・黒澤俊人・成岡市 (2011): 軟 X 線画像法によるガラスビーズおよび砂の粒径・充填密度・試料厚の評価. 農業農村工学会全国大会講演要旨集, 354-355.
- 63) 廣住豊一・黒澤俊人・成岡市 (2011): 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.
- 64) 廣住豊一・黒澤俊人・成岡市 (2011): 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.
- 65) 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.
- 66) 御園生圭輔・宮川正・田坂皓・坂井悠二・秋貞雅祥・平松慶博・鈴木宗治・蜂屋順一・斎藤達雄・野辺地篤郎・土井修・西岡清春・三田迪哉 (1982): X 線診断学. p.1, 文光堂, 東京.

-
- 67) 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. p.22, 医療科学社, 東京.
- 68) 宮崎毅・西村拓 (2011): 土壌物理実験法. pp.20-25, 東京大学出版会, 東京.
- 69) 宮崎毅・西村拓 (2011): 土壌物理実験法. pp.39-54, 東京大学出版会, 東京.
- 70) 森也寸志 (2000): 軟 X 線による非破壊土壌中の排水機構の解明. 土壌の物理性, 83:59-65.
- 71) 森也寸志・志賀摂子・岩間憲治・渡辺紹裕・丸山利輔 (1992): 土地利用による土壌間隙構造の差異—軟 X 線による観察を中心にして—. 土壌の物理性, 66:19-27.
- 72) 森也寸志・渡辺紹裕・丸山利輔 (1994): 水田土壌における根成孔隙の形成と形態に関する研究. 農業土木学会論文集, 171:13-20.
- 73) 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.
- 74) 山口晴幸・池永均 (1993): 土構造評価への水銀圧入型ポロシメーター装置の利用. 土と基礎, 41(4):15-20.
- 75) 山崎龍太郎・橋本雄介・西本恵子・土田ひとみ・成岡市 (2003): 粘土団粒の軟 X 線画像とそのテクスチャ解析. 第 45 回土壌物理学会シンポジウム講演要旨集, 50-51.
- 76) 山崎龍太郎・橋本雄介・土田ひとみ・成岡市 (2004): 乾燥過程における粘土の軟 X 線画像テクスチャ解析法の検討. 農業土木学会大会講演要旨集, 186-187.
- 77) 山崎龍太郎・橋本雄介・土田ひとみ・成岡市 (2004): 乾燥過程における粘土の軟 X 線画像とテクスチャ解析法の研究. 第 46 回土壌物理学会シンポジウム講演要旨集, 40-41.
- 78) 米原尚希 (2009): 軟 X 線映像法によるベントナイト及びカオリナイトペーストの乾燥亀裂の経時的発達について. 平成 20 年度三重大学生物資源学部卒業論文, pp.1-79.