

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—

廣住豊一¹・黒澤俊人²・成岡 市¹

Soft X-ray Digital Radiography for Soil Structure: Development and Trial

Toyokazu HIROZUMI¹, Toshihito KUROSAWA² and Hajime NARIOKA¹

Abstract : Soil structure consists of a lot of soil particles, aggregates and their arrangements. Soft X-ray Digital Radiography (SXDR) was developed. SXDR is a methodology for evaluation of soil structure from a view point that a soft X-ray image of soil has information of soil structure. In this paper, overview of new methodology SXDR, and some examples of information of soil structure by using this methodology were indicated. In the SXDR, an analog image taken by using soft X-ray radiography was converted to a digital one, and the digital image was analyzed with image processing such as statistical analysis, Semivariogram and Fourier Transform. Some results by using the SXDR were examined on information of soil structure. Some results appeared to be related to soil structure. The SXDR provided to evolution of the studies on soil structure by using soft X-ray.

Key Words : Soft X-ray Digital Radiography (SXDR), soil structure, primary structure, image processing, statistical analysis

1. はじめに

土壌内部の団粒構造や間隙など土壌構造単位の形状・大きさは、排水・保水のような土壌水の移動、およびそれらにともなう溶質の移動などに大きな影響を与える。このことから、土壌中の物質移動現象の理解には、適切な土壌構造評価法の確立が求められる。

土壌構造は、無機物あるいは有機物の粒子が幾重にも折り重なり、集合体となって形成された固相部分と、それらの隙間に形成された様々な形状や大きさの間隙部分からなる。そのため、土壌構造は極めて複雑な様相を呈し、その全容を詳述することが難しい。

これに対して、多くの研究者は、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しようとしてきた。たとえば、乾燥密度・三相分布・土性などの基礎的な項目のほか、粒度分布・間隙径分布・比表面積など

があげられる。これらの測定法には、水分特性曲線による間隙径分布測定（土壌物理研究会，1979；Childs and Collis-George, 1950）、水銀圧入型ポロシメーターによる間隙径分布測定（佐藤ら，1992；山口・池永，1993）、空気圧入法による間隙径分布測定（神谷ら，1996；宇野ら，1998）、BET法による比表面積測定（馬場，1994a；馬場，1994b）、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（宇野ら，1993）などがあげられる。しかし、これらの測定値は、土壌構造を直接投影したものではなく、土壌構造の特徴をある側面から切り出したものであるため、土壌構造の実体として得られた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（日本第四紀学会，1993）。この分析法は、土壌の一次粒子や団粒等の形状・寸法・配列様式など土壌構造に関する数多くの情報を得ることができる。しかし、土壌薄片の作製には、専門的な技能を要し、相応の時間と手間がかかる。

これに対して、X線を用いた土壌内部構造の非破壊観察・測定法がある。たとえば、土壌用造影剤を見出した粗間隙構造の観察法（徳永ら，1984；徳永ら，1985）、間隙の立体構造の測定法（成岡，1987；成岡・本間，1991；岩間ら，1994；岩間ら，1996）などがある。また、画像解析による粗間隙構造の定量評価も試みられた（森ら，1997）。これらの方法によって、間隙構造が排水性に与える影響（Mori et. al., 1999）、粗孔隙の構造と雨水の透過性（成岡ら，1988）、粗孔隙の透水・通気・排水機能（成岡ら，2000）、乾燥密度と団粒間隙、細・粗間隙の分化程度（成岡・駒村，2000a）、管状孔隙群の深さ方向の分布と状態（成岡・駒村，2000b）、土壌動物の活動による管状孔隙および団粒の形成過程（成岡・川田，2001）、火山灰土における排水性粗孔隙の存在と大径粗孔隙およびこれに連結した小径粗孔隙の機能（岩田・成岡，2002）などが明らかにされた。しかし、これらの軟 X 線による土壌構造の観察・測定法は、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、現状では土壌構造の構成単位として重要な要素である固相部分に対しての研究はまだまだ途上にあるといえる。

そこで筆者らは、土壌に軟 X 線を透過して得られた

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

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

2011年6月6日受稿, 2011年10月24日受理
土壌の物理性 119号, 3-15 (2011)

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、軟 X 線影像をデジタル画像に変換し、それを解析することで土壌の固相部分を評価する「軟 X 線画像法」を新たに開発した。本法の確立によって、土壌構造の分析とその中で生起する諸現象の解明に関して、さらに多くの可能性を期待できる。

本論では、筆者らが新たに開発した軟 X 線画像法の理論と方法を論ずるとともに、本法の開発にあたって得られた知見を整理し、また本法をいくつかの試料に適用して得られた実例を示す。

2. 軟 X 線の基礎知識

2.1 軟 X 線の定義

X 線は光と同じ電磁波の一種である。X 線は物体を透過する能力を持ち、その波長によってエネルギーおよび透過能力が異なる。X 線の中でも波長の長いものを軟 X 線と呼び、波長の短い硬 X 線に比べてエネルギーおよび透過能力が低いという特徴がある。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は異なる。たとえば、材料工学の分野では、軟 X 線の波長は 0.5 ~ 10nm の範囲で、そのエネルギー領域は 0.1 ~ 2keV としている (桜井, 2009)。また、医療放射線の分野では、およそ 30keV 以下のエネルギー領域の X 線を軟 X 線としている (医療放射線辞典編集委員会, 2000)。

2.2 軟 X 線の吸収原理

X 線は、可視光線と同様に直進性があり、物体を透過する際にその状態に応じて減弱する性質を持つ (御園生ら, 1982)。物体に照射された X 線は、その一部が物体内部で吸収または散乱され、残りが物体を透過する。このときの X 線の透過量は、X 線のエネルギーと、物体を構成する物質の原子番号・密度・質量割合などによって変化し、この透過量の差が X 線の投影像となって可視化される。ここで、ある物体に対して単一エネルギーの X 線を照射した際の X 線の透過量は次式で表される (三枝ら, 2001)。

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

I : 物体を透過した X 線量 (光子数), I_0 : 物体に照射した X 線量 (光子数), μ : 線減弱係数 (m^{-1}), d : 物体の厚さ (m)

物体に照射された X 線の減弱は、おもに光電効果、コンプトン散乱、電子対生成による相互作用によって発生するもので、線減弱係数 μ は次式で表される (飯田, 2006)。

$$\mu = N(\tau + \sigma + \kappa) \quad (2)$$

τ : 光電効果の原子断面積 (m^2), σ : コンプトン散乱の原子断面積 (m^2), κ : 電子対生成の原子断面積 (m^2), N : 単位体積あたりの原子数 (m^{-3})

軟 X 線を含む 0.1 ~ 0.5MeV 以下のエネルギー領域では光電効果による減弱がおもな作用で、その他の作用については無視できる。光電効果の原子断面積 τ は、次式で近似できる (日本アイソトープ協会, 1992)。

$$\tau \approx \frac{Z^4}{E^3} \quad (3)$$

Z : 原子番号, E : 光子のエネルギー (eV)

物体が化合物または混合物の場合は、原子番号 Z に実効原子番号 Z_{eff} を用いる。実効原子番号 Z_{eff} は、次式により近似的に求めることができる (三枝ら, 2001)。

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3.45]{a_1 Z_1^{3.45} + a_2 Z_2^{3.45} + a_3 Z_3^{3.45} + \dots + a_n Z_n^{3.45}} \quad (4)$$

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$: 物体の全電子数に対する各元素の電子数の割合, $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$: 物体を構成する各元素の原子番号

これらより、ある物体に対して X 線を照射した際の透過量は、物体の厚み、物体を構成する元素とその構成割合、照射する X 線のエネルギーなどに影響を受けることがわかる。

2.3 軟 X 線の発生原理

X 線は、X 線管内の陰極側で発生させた電子を、高電圧で加速させ、陽極側のターゲットに衝突させることによって発生させる。

このとき発生する X 線の最大エネルギーは X 線管電圧に等しく、最短波長 λ_{min} は次式のデュエヌ・フント (Duane-Hunt) の法則から換算できる (飯田, 2006)。

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{1.24}{v} \quad (5)$$

λ_{min} : X 線の最短波長 (nm), v : X 線管電圧 (kV)

また、発生する X 線強度は一般に次式で表される (青柳ら, 1998)。

$$X = Kv^2iT \quad (6)$$

X : 発生する X 線強度, v : X 線管電圧 (kV), i : X 線管電流 (mA), T : X 線管のターゲット金属の原子番号, K : 定数

3. 軟 X 線画像法の開発

3.1 軟 X 線画像法の手順

軟 X 線画像法の手順を Fig. 1 に示す. 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.

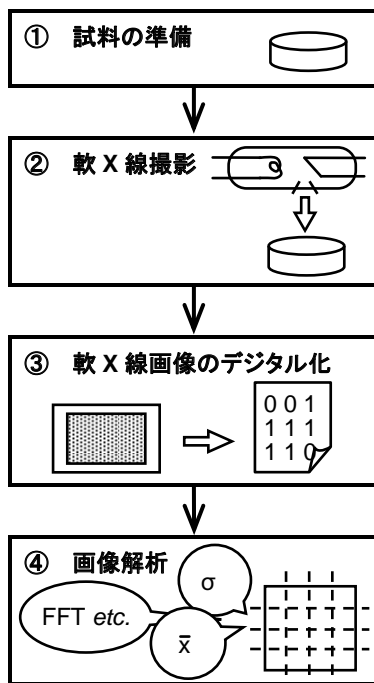


Fig. 1 軟 X 線画像法の手順.
Procedure of Soft X-ray Digital Radiography.

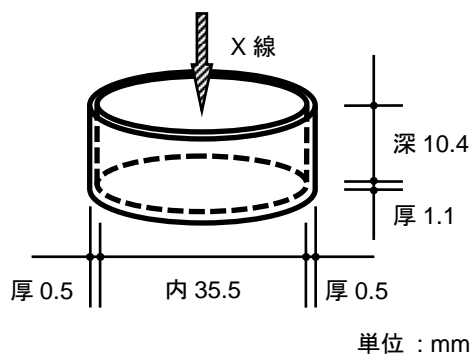


Fig. 2 試料容器の形状および寸法.
Figure and dimension of specimen container.

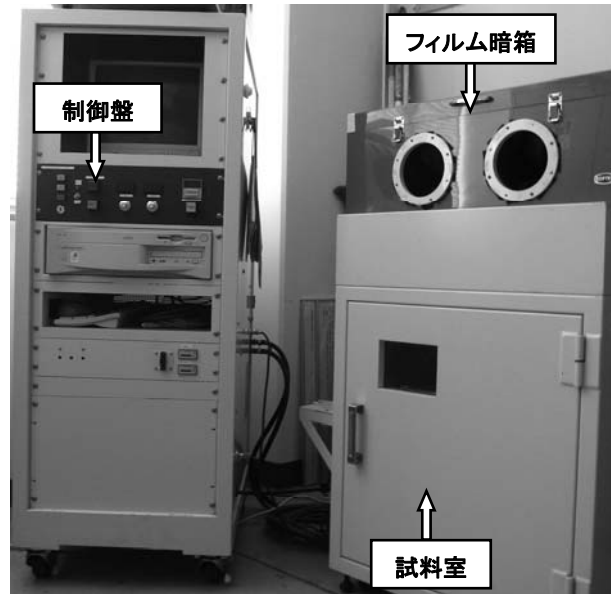


Photo 1. 軟 X 線照射装置 DCTS-7003.
Soft X-ray generation apparatus SOFTEX DCTS-7003.

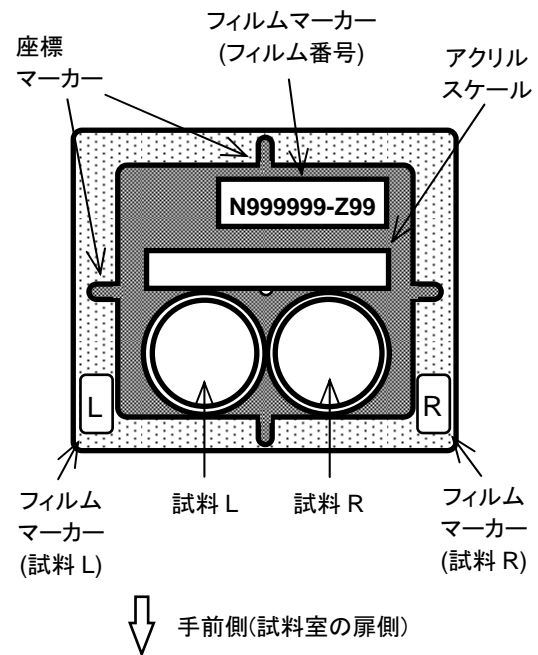


Fig. 3 撮影時の試料容器などの配置.
Layout of specimen containers on film platform.

3.2 試料の準備

試料を充填する容器には, 軟 X 線を透過しやすいポリスチレン製のシャーレを使用した. このシャーレの形状および寸法を Fig. 2 に示す.

試料は, 試料厚・充填密度・体積含水率を変えて試料容器に充填し, これを軟 X 線撮影した.

3.3 軟 X 線撮影

軟 X 線撮影では, 軟 X 線照射装置にソフテックス社製 DCTS-7003 を, 透過影像の検出器にフジフィルム社

製工業用 X 線フィルム IX FR (以下, 「フィルム FR」とする) をそれぞれ使用した. 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. X 線管のターゲットはタングステン, X 線照射窓はベリリウムである. DCTS-7003 の外観を Photo. 1 に示す.

透過影像の検出器には, X 線フィルム, イメージングプレート, デジタル X 線センサなどいくつかの種類があり, 特徴が異なる. X 線フィルムは, 安価で解像力 (空間分解能) が高い. イメージングプレートは, 放射線強度分解能および検出感度が高い (飯田, 2006). デジタル X 線センサは, 大量・連続撮影に適する. 本論では, 解像力および費用を考慮して, X 線フィルムを用いた.

軟 X 線撮影時の試料の位置関係を Fig. 3 に示す. フィルム FR を装填した試作揺動型撮影台 (成岡, 1987) 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. 試作揺動型撮影台の外観を Photo. 2 に示す. 軟 X 線撮影では, 同時に 2 つの試料を撮影することで, 撮影回数を減らし作業を効率化できた. しかし, 距離の逆 2 乗則によって, 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, 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 (荒川ら, 2000). また, ヒール効果によって, X 線束の中心から陰極側での強度変化に比べて陽極側での強度変化が大きくなる (荒川ら, 2000). 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. その結果, 軟 X 線撮影によって得られる試料影像是照射される X 線束の中心, すなわち撮影台中央を中心として左右対称の濃度分布の偏りを持つ. 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. そこで, 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. このように, 撮影台中央を中心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すべて同一に調整できた. 試料は, 撮影者から見て右側の試料を「試料 R」, 左側の試料を「試料 L」とし, 試料近傍にフィルムマーカーを設置することによって, 撮影台の左右どちら側で撮影されたものであるかを識別できた. 撮影台中央には, 濃度階調の指標とするために試作したアクリル製スケールを配置した.

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 500mm に固定し, 管電圧・管電流・照射時間を適宜調節した. 撮影したフィルム FR の現像には, ニックス社製自動現像機 Hi-RHEIN RH-9001 を使用した. この現像条件は, 同装置指定現像液の温度を 28°C, 現像時間を 180s に固定し, 可能な限り現像ムラを減らした.

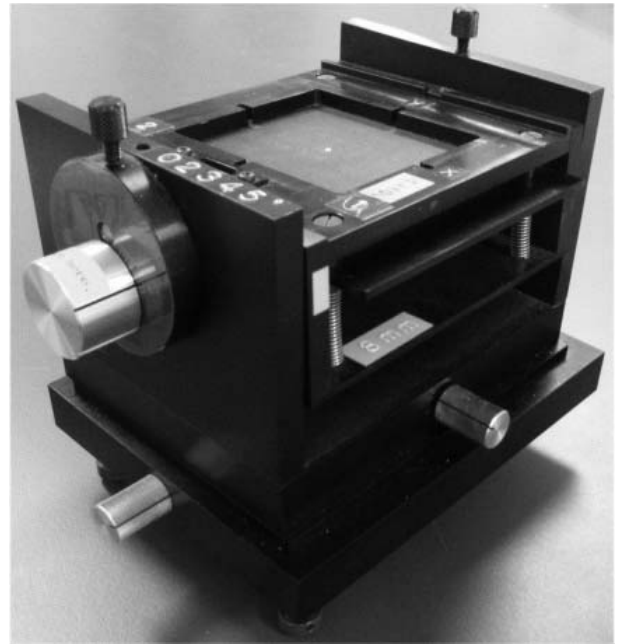


Photo. 2 試作揺動型撮影台.
Film platform (prototype).

3. 4 軟 X 線画像のデジタル化

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 FR 上に投影された軟 X 線影像のデジタル化に, 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 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 FR などの配置方法を Fig. 4 に示す. まず, 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 FR を貼り付けた (Fig. 4-①). 次に, 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した (Fig. 4-②). このとき, フィルム FR 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た. 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た. そして, 光源となるライトボックス TY-LT13 を, 光量を最大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した (Fig. 4-③).

軟 X 線影像をデジタル画像化する際のスキャン条件は, 画像解像度を 1200dpi に, カラーモードを 16 ビットグレースケールに, 画像の保存ファイル形式を TIFF 形式に設定した.

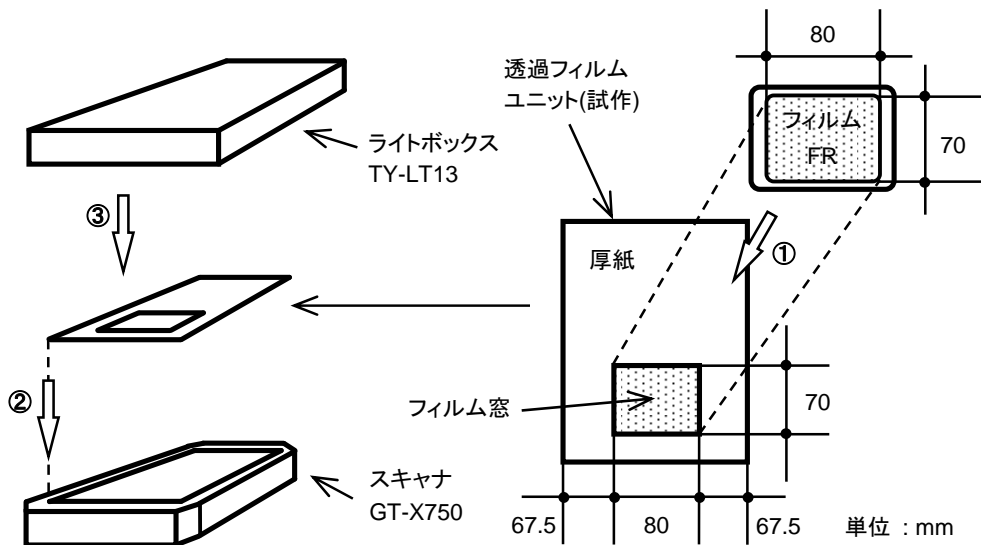


Fig. 4 フィルム FR スキャン時の配置.
Layout of X-ray film FR on digital image scanner.

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（荒川ら、2000）。

$$u = \frac{1}{2d} \quad (7)$$

u : 解像力 (LP mm^{-1}), d : 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、1mm 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、これを画像解像度に換算するとおおよそ 1000dpi である。そこで本論では、X 線フィルムの解像力相当以上となる 1200dpi で処理した。カラーモードについては、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必要があることから、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。画像の保存ファイル形式には、16 ビットグレースケール画像の保存ができる TIFF 形式を選定した。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、試料の中心を画像の中心と合致させ、一辺の長さが 1024pix（約 21.7mm）の正方形になるように切り取り処理を行い、これを画像解析に供した。軟 X 線画像の処理には、16 ビットグレースケール画像の編集および保存ができる Corel Paint-Shop Photo Pro X3 を使用した。

アクリルスケールの軟 X 線画像

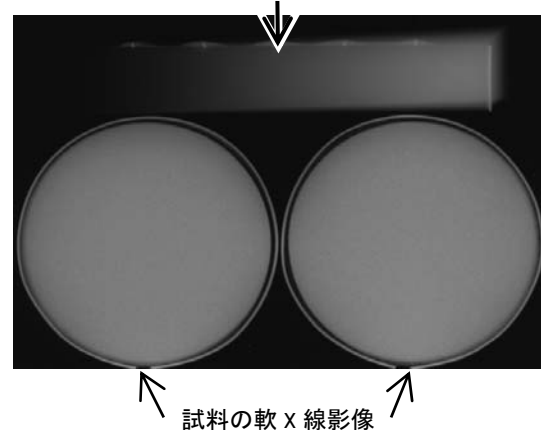


Photo. 3 デジタル化した軟 X 線画像の例。
A sample of soft X-ray digital image.

3.5 画像解析

画像解析では、供試画像の画素濃度（画素の白黒濃淡）に対して解析を行ういくつかのプログラムを試作した。このプログラムの試作には、INRIA（Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, フランス国立情報学自動制御研究所）の数値計算システム Scilab-4.1.2（以下、「Scilab」とする）、および、Ricardo Fabbri 氏が開発した Scilab 用画像処理ツールボックス SIP-0.4.0（以下、「SIP」とする）を援用した。画素濃度は、黒を最小値の 0、白を最大値の 1 とし、その間の濃度の変化を 16bit すなわち 65,536 段階に分割して処理した。Scilab には、統計処理および高速フーリエ変換を行う関数が内蔵されており、SIP の追加によって 16 ビットグレースケールの TIFF 画像の処理が可能となるため、解析プログラムの試作にかかる時間を短縮できた。

試作した画像解析プログラムの処理内容を以下に示す。

(1) 全画素濃度に対する統計処理

供試画像に含まれるすべての画素の濃度階調値に対して統計処理を行い、平均値・中央値・標準偏差・変動係数を求めた。

(2) 格子分割法

供試画像を所定の寸法の正方形の格子に分割し、その格子内に含まれる画素の濃度階調値に対して統計処理を行い、それぞれの格子における画素濃度の平均値・中央値・標準偏差・変動係数を求めた。さらに、この格子の寸法を増減させ、それぞれの格子の画素濃度に対して行った統計処理の結果を観察した。この格子分割法の処理手順を Fig. 5 に示す。

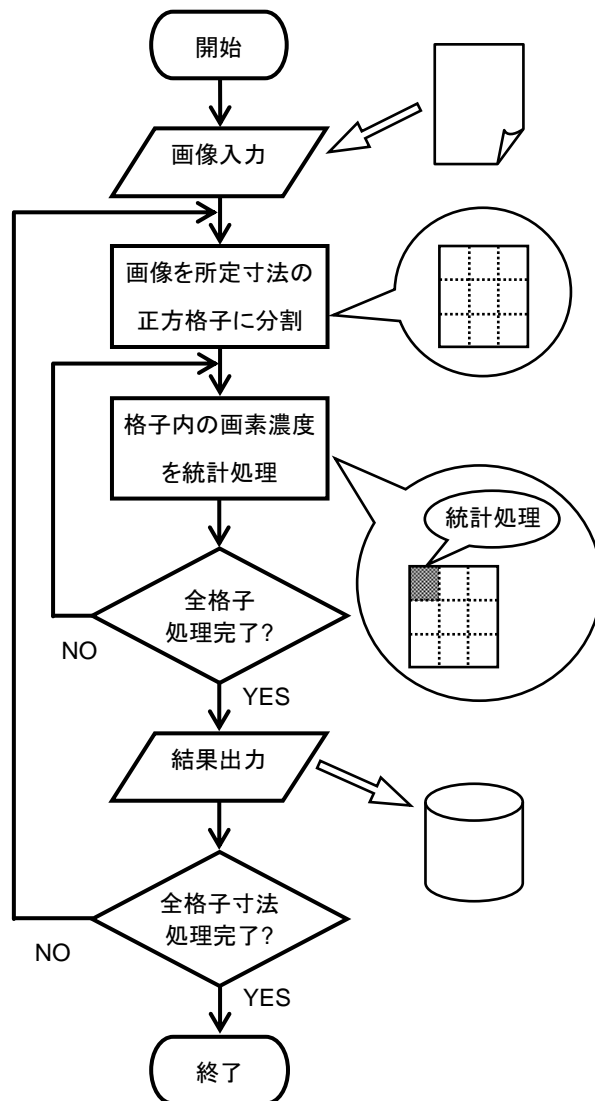


Fig. 5 「格子分割法」の処理手順。
Procedure of Grid Partitioning Analysis.

(3) 高速フーリエ変換・セミバリオグラム解析

供試画像に走査線を設定し、その走査線上にある画素

の濃度階調値に対して高速フーリエ変換およびセミバリオグラム解析を行った。高速フーリエ変換には Scilab に内蔵された関数を、セミバリオグラム解析には自作の関数を用いた。走査線は、供試画像の中心を横断するように、供試画像の左端から右端に向かって引いた。

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、次式で表される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} \{Z(x_i) - Z(x_{i+h})\}^2 \quad (8)$$

$\gamma(h)$: セミバリオグラム, $Z(x_i)$: ある点 x_i におけるデータ, $Z(x_{i+h})$: x_i から距離 h 離れた点 x_{i+h} におけるデータ, N_h : $Z(x_i)$ と $Z(x_{i+h})$ の組み合わせの総数

なお、フーリエ変換は、時間の関数を周波数の関数に変換し、次式で表される。

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (9)$$

t : 時間, f : 周波数

このフーリエ変換によって、ある信号波形に含まれる周波数成分を抽出することができる。本論では、走査線上の各画素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高速フーリエ変換を行うことによって、濃度階調値の変化に含まれる周期性を評価した。

4. 軟 X 線画像法の適用例

4.1 試料

試料に、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のガラスビーズ (以下、「ガラスビーズ A」および「ガラスビーズ B」とする)、セメント用の川砂 (以下、「砂」とする)、ならびに三栄シリカ社製の珪石粉末 SP-35 (以下、「シルト」とする) を供した軟 X 線画像法の適用例を示す。

本論の目的は軟 X 線画像法の確立であるため、試料にはできるだけ材質・形状などが均質なものを使用した。これらの試料の一覧を Table 1 に示す。

軟 X 線画像法に供した試料画像のうち、ガラスビーズ A および B, 砂, シルトについて、その充填条件および軟 X 線撮影条件とあわせて、Photo. 4 にそれぞれ 1 例ずつ示す。

Table 1 試料一覧.
Specimens.

試料	仕様	粒径
水	蒸留水	—
ガラスビーズ A	ソーダ石灰ガラス製ガラスビーズ	呼び径 0.2mm
ガラスビーズ B	ソーダ石灰ガラス製ガラスビーズ	呼び径 0.6mm
砂	セメント用川砂	0.074 ~ 0.250mm
シルト	三栄シリカ製珪石粉末 SP-35	呼び径 0.023mm

4.2 試料厚および体積含水率と平均濃度階調値

水を試験材料とした場合の試料厚（水深）と平均濃度階調値の関係を Fig. 6 に示す。軟 X 線の照射条件は、管電圧 30kV、管電流 0.5、2.0mA の 2 段階、照射時間 60s に設定した。

いずれの管電流においても、試料厚の増加とともに平均濃度階調値の増加がみられた。とくに管電流 0.5mA において、その傾向が特に顕著であった。

ガラスビーズ A を試験材料とした場合の試料厚と平均濃度階調値の関係を Fig. 7 に示す。軟 X 線の照射条件は、管電圧 40kV、管電流 0.5、1.5mA の 2 段階、照射時間 60s に設定した。

いずれの管電流においても、試料厚の増加とともに平均濃度階調値が増加した。ただし、管電流 0.5mA では試料厚の増加とともに平均濃度階調値の増加率が減少したが、1.5mA ではほぼ直線的に増加した。(6) 式で示したように、管電流と照射される X 線量との間には直線的な比例関係があるため、この 0.5mA においてみられた濃度階調値の増加率の減少は検出器であるフィルム FR の黒化特性によると考えた。

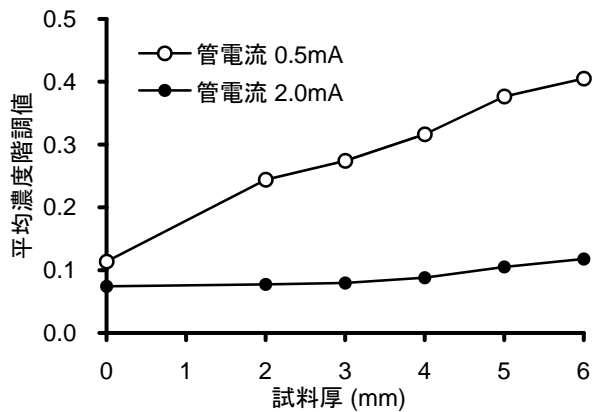


Fig. 6 蒸留水における試料厚と平均濃度階調値。管電圧 30kV、照射時間 60s。
Thickness and average of gray level of pixels in soft X-ray digital image (water). X-ray tube voltage 30kV, irradiation time 60s.

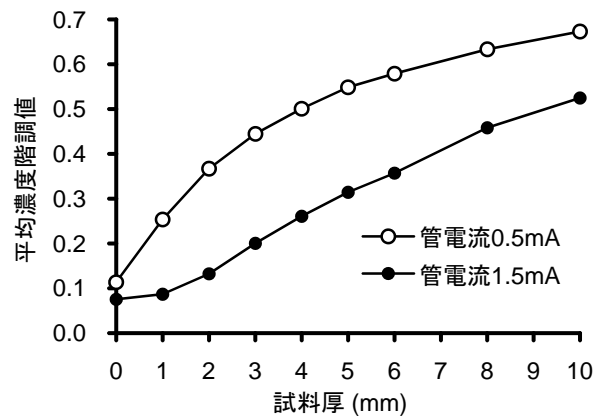


Fig. 7 ガラスビーズにおける試料厚と平均濃度階調値。管電圧 40kV、照射時間 60s。
Thickness and average of gray level of pixels in soft X-ray digital image (glass beads). X-ray tube voltage 40kV, irradiation time 60s.

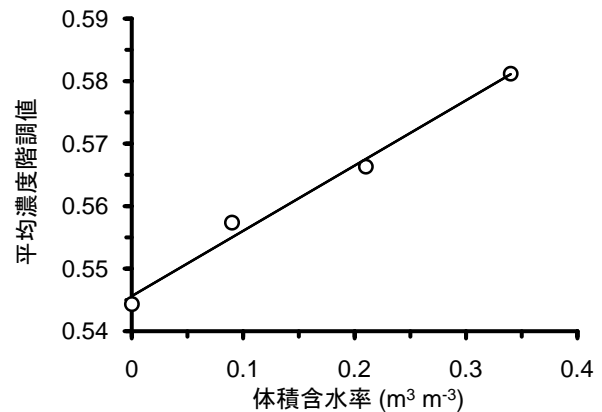


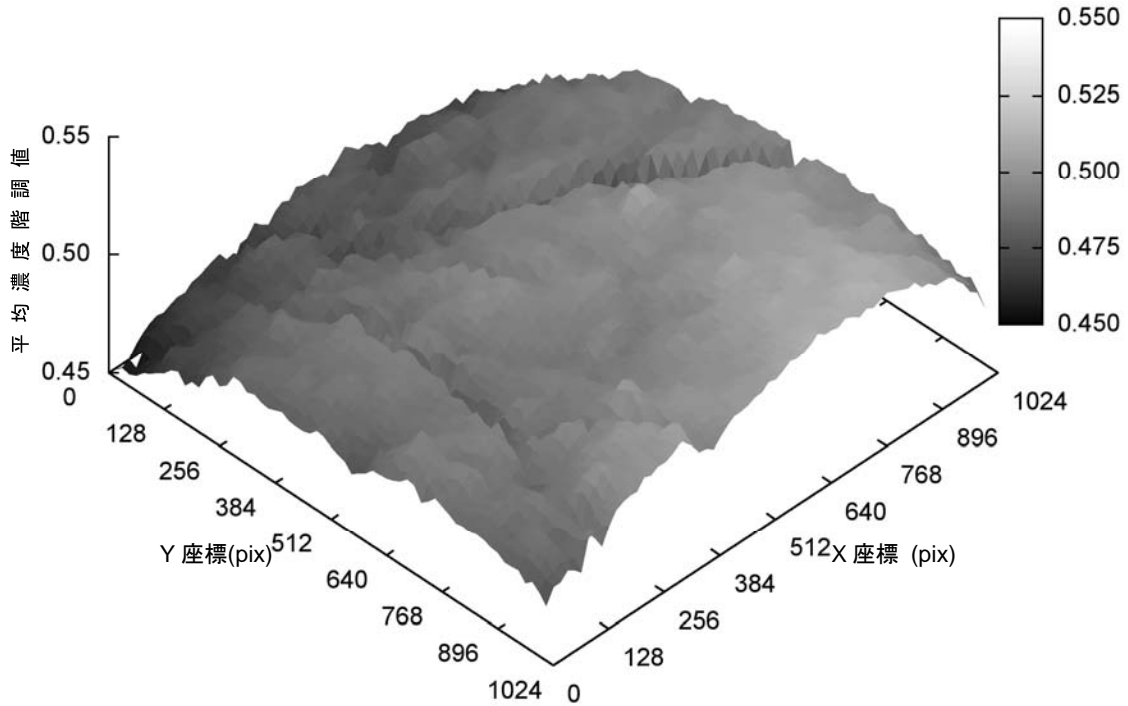
Fig. 8 ガラスビーズにおける体積含水率と平均濃度階調値。管電圧 40kV、管電流 1.5mA、照射時間 60s、試料厚 10.4mm。
Volumetric water content and average of gray level of pixels in soft X-ray digital image (glass beads, thickness 10.4mm). X-ray tube voltage 40kV, X-ray tube current 1.5mA, irradiation time 60s.

ガラスビーズ A を試験材料とした場合の体積含水率と平均濃度階調値の関係を Fig. 8 に示す. 軟 X 線の照射条件は, 管電圧 40kV, 管電流 1.5mA, 照射時間 60s に設定した. 試料厚は 10.4mm に固定した.

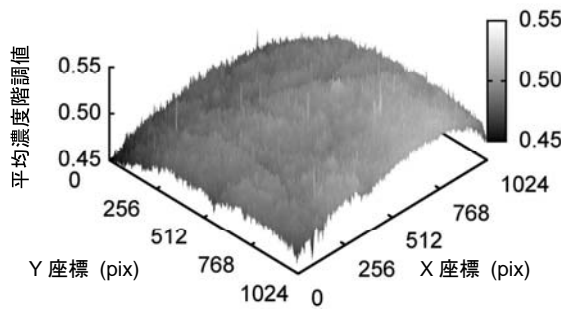
体積含水率の増加とともに平均濃度階調値が増加する傾向がみられ, その関係は次式で近似できた.

$$\bar{gl} = 0.1044\theta + 0.5456 \quad (R^2 = 0.988) \quad (10)$$

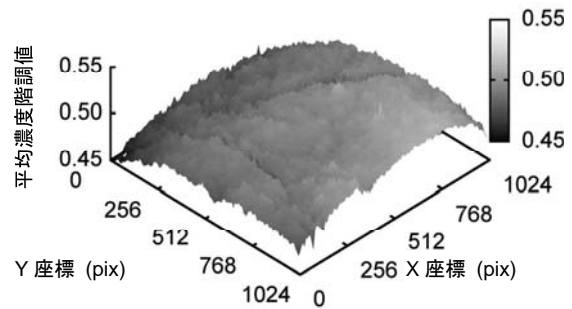
\bar{gl} : 平均濃度階調値, θ : 体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)



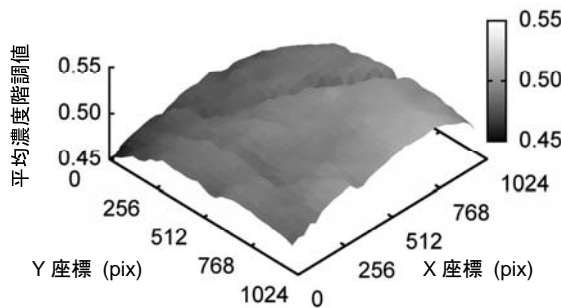
(a) 格子寸法(64pix × 64pix)



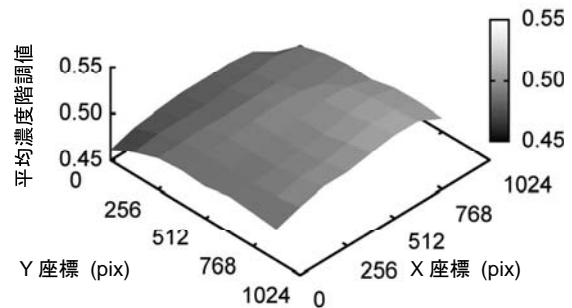
(b) 格子寸法(2pix × 2pix)



(c) 格子寸法(8pix × 8pix)

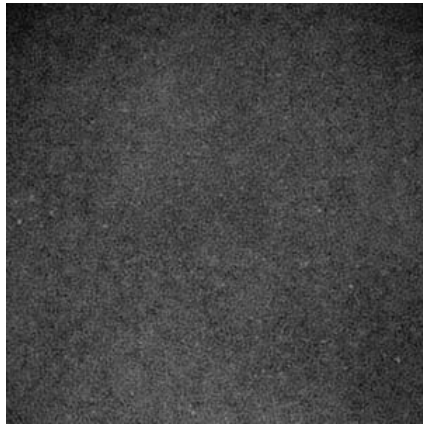


(d) 格子寸法(32pix × 32pix)



(e) 格子寸法(128pix × 128pix)

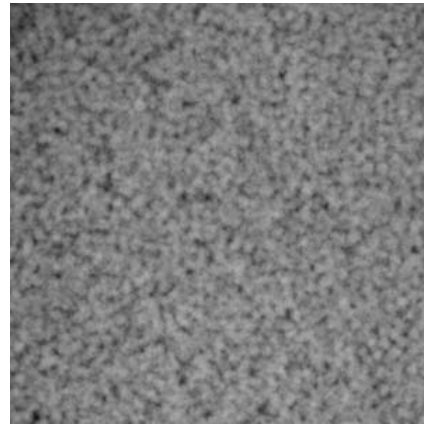
Fig. 9 格子分割法による解析結果. 試料はシルト (写真4-(d)).
Result of Grid Partitioning Analysis. specimen: silica powder (photo.4-(d)).



5mm

試料厚 10.4 mm, 乾燥密度 1.59 Mg m^{-3} , 体積含水率 $0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; 撮影条件 : 40 kV, 1.5 mA, 60 s

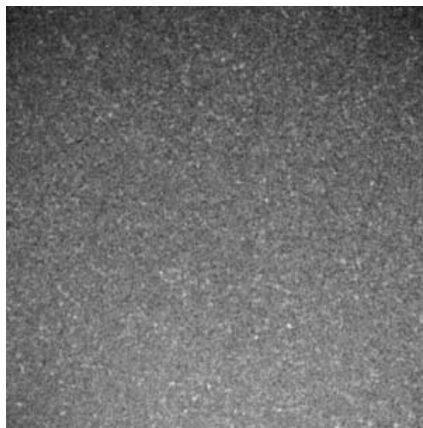
(a) ガラスビーズ A



5mm

試料厚 10.4 mm, 乾燥密度 1.59 Mg m^{-3} , 体積含水率 $0.34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; 撮影条件 : 40 kV, 1.5 mA, 60 s

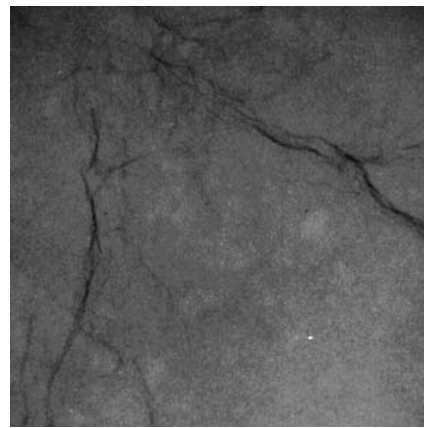
(b) ガラスビーズ B



5mm

試料厚 10.4 mm, 乾燥密度 1.51 Mg m^{-3} , 体積含水率 $0.22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; 撮影条件 : 40 kV, 1.5 mA, 60 s

(c) 砂



5mm

試料厚 10.4 mm, 乾燥密度 1.36 Mg m^{-3} , 体積含水率 $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; 撮影条件 : 40 kV, 1.5 mA, 60 s

(d) シルト

※これらの画像は印刷時の視認性を高めるためコントラストを強めに調整した。

Photo. 4 供試画像の例.
Soft X-ray digital images of specimens.

風乾時の平均濃度階調値は 0.54, 体積含水率 $0.34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 時の平均濃度階調値は 0.58 であった. 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は 0.1 から 0.6 までであったのに対し, 体積含水率の変化による平均濃度階調値の変化は極めて小さかった.

ガラスビーズを構成するケイ素やカルシウムなどの元素は, 水を構成する水素や酸素に比べて, より高い原子番号を持つ. (3) 式より, 線減弱係数 μ は, 原子番号が大きいほど大きくなる. また, (1) 式より, 線減弱係数 μ が大きいほど, X 線の透過量は減少する. すなわち,

水に比べてより高い原子番号の元素で構成されたガラスビーズは, その存在量の変化が X 線の透過量に与える影響が大きく, これが平均濃度階調値の変化範囲の差としてあらわれたと考えた.

4.3 格子寸法の影響

格子分割法によって各格子の画素濃度の平均値を求め, 3次元座標上に表示したものを Fig. 9 に格子寸法ごとを示す. 供試画像には, シルトを試料とした Photo. 4 - (d) を用いた. X 座標は供試画像左端からの距離を, Y 座標は供試画像上端からの距離を各々画素数 (pix) で

示す。縦軸は各格子の画素濃度の平均値を示す。

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、各々以下の傾向がみられた。

- (1) 2 pix × 2pix の格子寸法では、撮影・現像などで生じた雑音とみられる細かな濃度階調の変化が現れた (Fig. 9-(b)).
- (2) 8 pix × 8pix の格子寸法では、2pix × 2pix の格子寸法にくらべて雑音が軽減され、粒子の重畳によるものとみられる濃度階調の変化が強調された (Fig. 9-(c)).
- (3) 32pix × 32pix の格子寸法では、亀裂による濃度階調の変化が明瞭にみられた (Fig. 9-(d)).
- (4) 64pix × 64pix の格子寸法では、粒子の重畳や亀裂による濃度階調の変化のいずれについてもよくとらえていた (Fig. 9-(a)).
- (5) 128pix × 128pix の格子寸法では、粒子の重畳や亀裂による濃度階調の変化が不明瞭になり、試料の全体的な濃度階調の変化の傾向を示した (Fig. 9-(e)).

また、いずれの格子寸法においても、全体的な濃度階調の変化は湾曲形状を示した。これは、試料の充填が不均一で、試料厚および乾燥密度の一方または両方が、試料中央部の方が試料側縁部に比べて大きくなったためであると考えた。

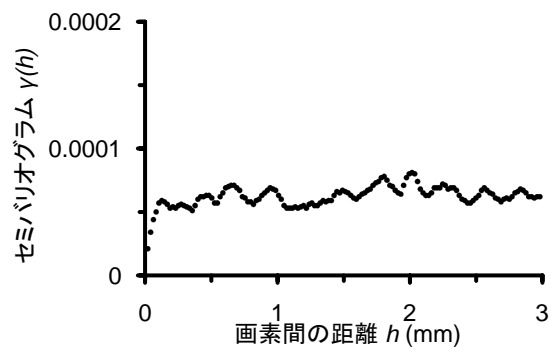
4.4 セミバリオグラム

ガラスビーズA(Photo. 4-(a))およびB(Photo.4-(b))ならびに砂 (Photo. 4-(c)) に対してセミバリオグラムを適用した結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 において、横軸は画素間の距離 h を、縦軸はその距離 h における画素の濃度階調値に対するセミバリオグラム $\gamma(h)$ を示す。ガラスビーズ A (Fig. 10-(a)) および B (Fig. 10-(b)) ならびに砂 (Fig. 10-(c)) のいずれにおいても、ある h まで $\gamma(h)$ が急激に増加し、その後 $\gamma(h)$ が緩やかに増減を繰り返す類似の傾向があった。セミバリオグラムでは、この $\gamma(h)$ の急激な増加が終息する h をレンジ、そのときの $\gamma(h)$ をシルと呼ぶ。レンジはデータの相関性がなくなる距離を示している。いずれの試料においても、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。

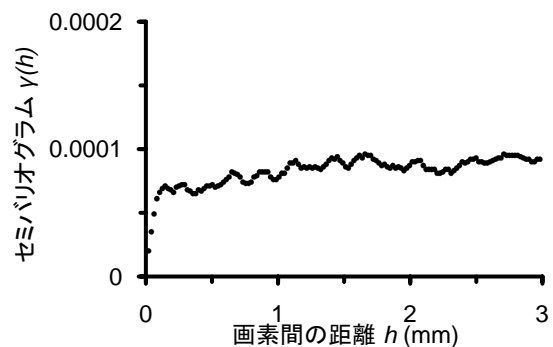
4.5 高速フーリエ変換

ガラスビーズA (Photo. 4-(a)) および B (Photo. 4-(b)), 砂 (Photo. 4-(c)) ならびにシルト (Photo. 4-(d)) に対して高速フーリエ変換を適用した結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 において、横軸は濃度階調値の増減が繰り返される周期を、縦軸はその周期のフーリエ振幅スペクトルを示す。フーリエ振幅スペクトルは、その周期が濃度階調値の増減の周期性に与える影響の大きさを示す。ガラスビーズ A (Fig. 11-(a)) および B (Fig. 11-(b)), 砂 (Fig. 11-(c)) ならびにシルト (Fig. 11-(d)) のいずれにおいても、周期の変化に応じてフーリエ振幅スペクトルが増減を繰り返す傾向があった。全体的な傾向として、短い周期に小さいフーリエ振幅スペクトルが、

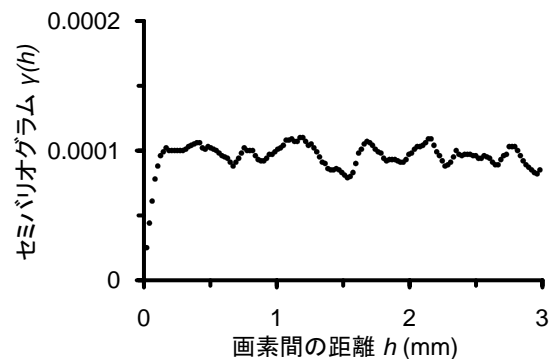
長い周期に大きいフーリエ振幅スペクトルが多くみられた。また、試料によって、大きいフーリエ振幅スペクトルが集中する周期が異なった。ガラスビーズ A および B は、砂に対して、大きいフーリエ振幅スペクトルを持つ周期がより顕著にあらわれた。これは、粒径が均一なガラスビーズに比べて、粒径がより広い範囲に分布する砂の方が、より複雑な周期性成分を持つためであると考えた。シルトでは、より長い周期に高いフーリエ振幅スペクトルが多くみられた。これは、亀裂のような大きな構造が影響しているものと考えた。



(a) ガラスビーズA (写真4-(a))



(b) ガラスビーズB (写真4-(b))



(c) 砂 (写真4-(c))

Fig. 10 セミバリオグラムによる解析結果.
Result of Semivariogram analysis.

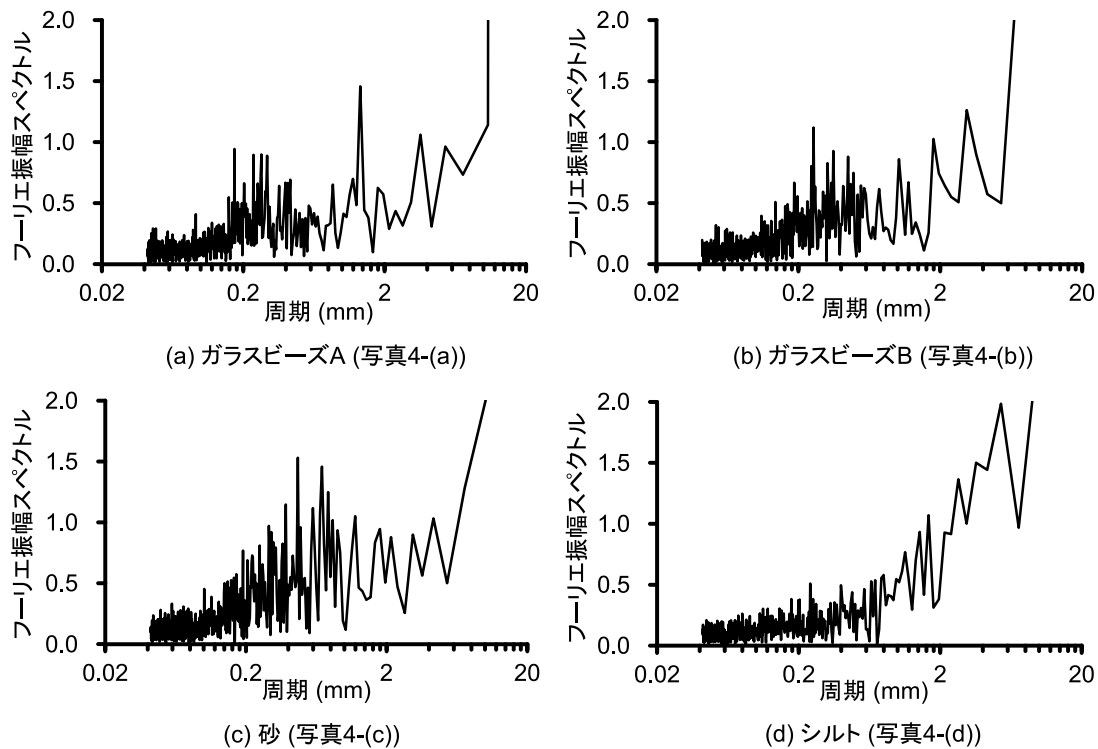


Fig. 11 高速フーリエ変換による解析結果.
Result of FFT analysis.

5. おわりに

本論では、筆者らが新たに開発した土壌構造評価のための軟 X 線画像法について、その理論と方法を明らかにした。また、本法の開発にあたって得られた知見を操作段階ごとに示した。さらに、ガラスビーズ、セメント用の川砂およびシルト質の珪石粉末を試料とした本法の適用事例を示した。

軟 X 線画像法は、軟 X 線撮影によって得られた試料の軟 X 線画像をスキャナでデジタル画像化し、その軟 X 線画像に含まれる各画素の濃度階調値に対して、統計処理・セミバリオグラム・フーリエ変換などの画像解析を行うことで、土壌構造を定量的に評価する方法である。本法の開発にあたって得られた知見は以下のように整理できた。

- (1) 軟 X 線撮影では、撮影台の中央を中心として試料を左右対称に配置することで、作業効率の向上と誤差の低減を両立できた。また、軟 X 線フィルムの現像条件を一定に保つことで、現像ムラを低減できた。
- (2) 軟 X 線画像のデジタル化では、試作した透過フィルムユニットとライトボックスを活用することで、十分なコントラストを持つ画像を得ることができた。また、フィルムおよびスキャナの透明ガラス面に付着した油脂や埃などを丁寧に除去することで、スキャン時に混入する誤差を低減できた。
- (3) 軟 X 線画像の解像度は、1200dpi に設定することで、フィルムの解像力相当以上を確保できた。また、カラーモードは、16 ビットグレースケールに設定することで、画像解析に必要なコントラスト分解能を確

保できた。

- (4) 画像解析プログラムの試作には、各種統計処理が組み込み関数として用意されている数値計算システム Scilab を援用することで、開発効率を向上できた。また、Scilab 用画像処理ツールボックス SIP を援用することで、16 ビットグレースケール TIFF ファイル形式の画像を扱うことができた。

軟 X 線画像法では、各操作段階で誤差の要因となる雑音が入ることがあるため、これらの雑音をできるだけ取り除くことによって、より良い精度の評価を行うことができる。

また、ガラスビーズ、セメント用の川砂およびシルト質の珪石粉末に対して軟 X 線画像法を適用し、本法によって得られる土壌構造の情報を以下のように整理できた。

- (1) 軟 X 線画像に含まれる画素の平均濃度階調値が試料厚および体積含水率の変化をとらえることがわかった。
- (2) 軟 X 線画像を格子状に分割し、この格子寸法を変化させることで、特徴を抽出できる土壌構造単位の大きさが変化することがわかった。
- (3) 軟 X 線画像に対してセミバリオグラムおよび高速フーリエ変換による解析を行うことで、試料ごとに異なる結果が得られることがわかった。この解析結果には、試料の構造情報が含まれることが考えられた。

本論では、土壌の軟 X 線画像が固相部分における粒子の配列および重畳様式を投影した構造情報であるということを示し、新たに軟 X 線画像法を開発することによって、これまで粗間隙構造が主な測定対象であった軟 X 線による土壌構造測定法に対して、新たな展開の可能性を示した。

今後は、軟 X 線画像法で評価できる土壌構造情報の探索を進めるとともに、その解析結果が土壌構造のいかなる情報を反映したものであるかという理論面の整理をあわせて行っていく必要がある。

謝辞

軟 X 線照射装置の開発・試作に関して、ソフテック株式会社のご協力を賜った。ここに謝意を表する。

引用文献

- 青柳泰司, 安部真治, 小倉泉, 清水悦雄 (1998): 放射線機器工学. p.25, コロナ社, 東京.
- 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, p.75, p.208, 富士フィルムメディカル, 東京.
- 馬場秀和 (1994a): 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.
- 馬場秀和 (1994b): 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.
- 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.
- 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, p.108, pp.354-355, 通商産業研究社, 東京.
- 医療放射線辞典編集委員会 (2000): 医療放射線辞典第3版. p.359, 共立出版, 東京.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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, p.138, 医療科学社, 東京.
- 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孔隙の構造解析. 農業土木学会論文集, 187 (65-1): 49-57.
- Mori, Y., Maruyama, T., and Mitsuno, T. (1999): Soft X-ray Radiography of Drainage Patterns of Structured Soils. Soil Science Society of America Journal, 63 (4): 733-740.
- 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.
- 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): 1-6.
- 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.
- 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.
- 成岡市, 駒村正治 (2000a): 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.
- 成岡市, 駒村正治 (2000b): 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.
- 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.
- 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.
- 日本第四紀学会 (1993): 第四紀試料分析法. pp.98-103, 東京大学出版会, 東京.
- 桜井健次 (2009): X 線反射率法入門. p.1, 講談社, 東京.
- 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.
- 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孔隙の軟 X 線透写像についての考察—X 線透写像による土壌と孔隙に関する研究 (I)—. 農業土木学会論文集, 114: 61-68.
- 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孔隙に関する研究 (II)—. 土壌の物理性, 51: 49-62.
- 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.
- 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.
- 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.

要 旨

本論では、筆者らが新たに開発した軟 X 線画像法の理論および方法について明らかにした。本法は、土壌に軟 X 線を照射して得られた軟 X 線画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ということに着目して開発したもので、軟 X 線影像をデジタル画像に変換し、それを解析することによって、土壌構造の評価を行う手法である。本論は、本法の手順を示し、その各段階において得られた知見や留意点について整理した。また、いくつかの試料に対して軟 X 線画像法の試行実験を行い、軟 X 線画像法によって得られる情報について考察し、これまでの粗空隙構造に対する観察・測定が研究対象であった軟 X 線による土壌構造測定法について、軟 X 線画像法による新たな展開の可能性を示した。

キーワード：軟 X 線画像法, 土壌構造, 一次構造, 画像処理, 統計解析