J. Jpn. Soc. Soil Phys., December 2011, Vol. **119**, 17−28

論文
Original Paper

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―

廣住豊一[1]・黒澤俊人[2]・成岡　市[1]

Soft X-ray Digital Radiography for Soil Structure: Measuring of Particle Size of Glass Beads and Sand

Toyokazu HIROZUMI[1], Toshihito KUROSAWA[2] and Hajime NARIOKA[1]

Abstract : Particle size is one of the most important factors to determine soil structure. In this paper, measuring of particle size of soil by using Soft X-ray Digital Radiography (SXDR) was examined. Soft X-ray image of glass beads and sand of some kinds of particle size were taken, and analyzed by statistical methods. Arithmetic mean, median,standard deviation and coefficient of variation of gray levels of pixels in the imagewere calculated. As a result, it was observed that d, particle size of samples, affected σ_{gl}, standard deviation of gray levels of pixels in the image. The σ_{gl} increased with increasing the d. In addition, correlation between the d and the σ_{gl} was affected by the number of pixels which was used to calculate σ_{gl}. This fact provides us measuring of particle size of soil by using SXDR. To measure of particle size by using the method, sufficient size of image was demanded.

Key Words : Soft X-ray Digital Radiography (SXDR), soil structure, primary structure, glass beads, sand

1. はじめに

土壌構造は，保水性・通気性・地耐力など土壌の物理的な諸特性に大きな影響を与える．したがって，その適切な評価法の確立は，土壌における諸現象を理解するうえで極めて重要である．

筆者らは，従来の軟X線による土壌構造の測定法を改良し，デジタル化した軟X線画像を解析することで土壌構造を定量的に評価できる「軟X線画像法」を開発した（廣住ら，2011）．本法は，土壌の軟X線画像が土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，土壌の骨格構造である固相部分の評価を行うもので，これまで土壌の粗間隙に対する定性的な観察・評価が中心であった軟X線による土壌構造測定法に新たな可能性を与えた．

土壌構造は，土粒子の一次粒子およびそれらが集合した二次粒子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，この両者の割合や分布によって特徴づけられる．すなわち，土壌構造は土粒子の形状や大きさと，それらの配列様式によって決定されるといえる．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り，土壌を構成する土粒子の大きさの分布，すなわち粒度分布は土壌構造を表すひとつの指標に用いられる．

土壌の粒度分布測定には，日本工業規格による比重計法（JIS A1201）およびピペット法（JIS Z8820-2）などが用いられる（木庭・青山，2005；宮崎・西村，2011）．土壌以外の粉体に対する粒度分布測定では，レーザ回折・散乱法，遠心沈降法，電気的検知帯法，FFF法および動的光散乱法などが実用化されている（羽多野ら，2003）．レーザ回折・散乱法は，取り扱いが簡便で，測定に要する時間が短く，10^{-5} ～ 10^{2}mmの広範囲の粒径を測定できるため，粉体の粒度分布測定の主流となっている．また，レーザ回折・散乱法を土壌の粒度分布測定への応用することも検討されている（栗原ら，1999）．しかし，これらの測定法は，試料を液中に分散させるなど破壊的な方法を用いるため，土壌構造を維持したまま測定することが難しい．

一方，筆者らが開発した軟X線画像法は，試料を非破壊で測定できるため，土粒子の重畳や配列様式などを維持し，土壌の内部構造をありのままの姿で映し出せる．たとえば，軟X線画像法による土壌の粒度分布測定ができれば，土壌構造の測定に新たな可能性を見出すことができる．

そこで本論では，軟X線画像法による土壌の粒度分布測定の足掛かりとするため，粒径が比較的大きく均一なガラスビーズおよび砂を対象とし，本法による解析結果と試料粒径との関係について考察し，これらの結果から，軟X線画像法による粒径測定が可能であることを示す．

2. 軟X線画像法による粒径測定の理論

X線は直進性および透過性があり，物体を透過する際に物体の状態に応じて減弱する性質を持つ（御園生ら，1982）．物体に対して照射されたX線は，物体による吸収または散乱によって減弱し，その残りが物体を透過す

[1]Graduate 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科
[2]Life Science Research Center, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 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，17−28（2011）

る．この減弱の程度は，X線のエネルギーと，物体を構成する物質およびその構成比率などで変化する．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（成岡・本間，1991）．すなわち，土壌試料に対して軟X線を照射したとき，試料各部において，軟X線の透過方向に間隙部分が多い場所は，固相部分が多い場所よりも，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，試料を透過するX線量は次式で表すことができる（三枝ら，2001）．

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

I：試料を透過するX線量，I_0：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：試料厚（m），D：厚みに換算した間隙量（m）

ここで，土粒子を均一な球形の粒子と仮定し，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，すなわち試料粒径の異なる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. 1に示す．試料粒径の大きい土壌構造モデルは，試料粒径の小さい土壌構造モデルに比べて，充填した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したとき，試料粒径の大きい土壌構造モデルの方がその差は大きい．(1) 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より大きく変動すると考えられる．ただし，この理論は，粒子が不規則に充填されることで生ずる間隙分布の不均一性を利用している．試料が厚くなると，そこに含まれる粒子数も増えるため，この間隙分布の不均一性が平均化され，試料粒径の大きさによる違いが出にくくなると考えられる．

以上を踏まえ，本論では，軟X線画像法を用いて，軟X線画像に含まれる画素の濃度階調値の変化量，変化の周期性および分布状態などを解析し，これらの解析結果と試料粒径との関係を調べ，本法を用いた試料粒径の測定の際に必要となる測定項目および測定条件などについて検討した．

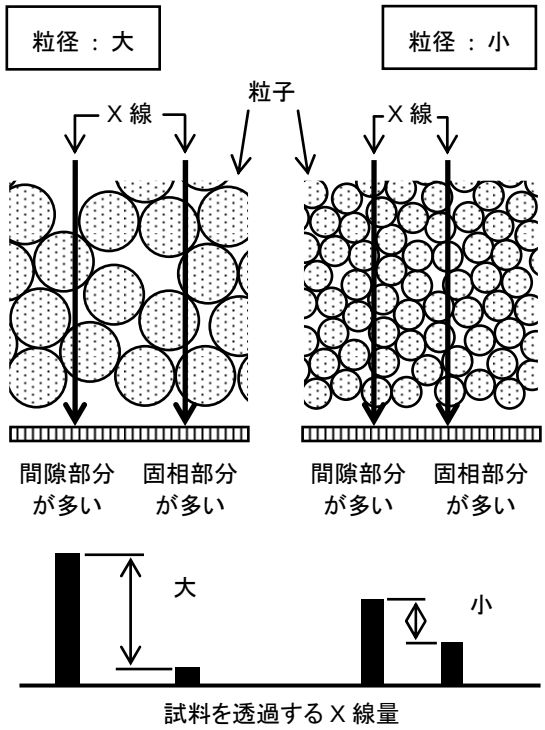


Fig. 1 試料の粒径とX線の透過様式．
Model of X-ray transmission of different particle size specimens.

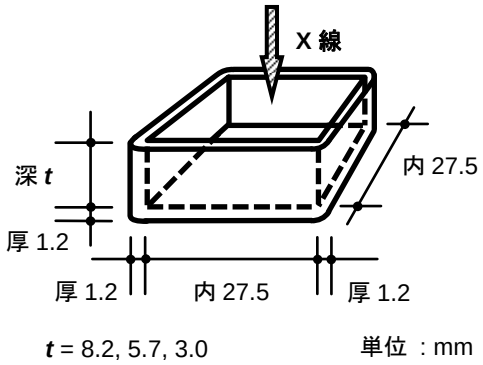


Fig. 2 試料容器の形状および寸法．
Figure and dimension of specimen container.

Table 1 試料の一覧．
Specimens.

名称	仕様	粒径 (mm)
ガラスビーズ	ソーダ石灰ガラス製ガラスビーズ	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0
川砂	セメント用川砂	0.074~0.106, 0.106~0.250, 0.250~0.425, 0.425~0.850, 0.850~2.000

3. 材料と方法

3. 1 試料

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の川砂（以下,「川砂」とする）を供した．試料の一覧を Table 1 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）に均一充填し，これを軟 X 線撮影した．試料容器の形状および寸法を Fig. 2 に示す．

3. 2 実験方法

軟 X 線撮影には，照射装置にソフテックス社製の直流型 X 線照射装置 DCTS-7003 を，影像の検出器にフジフイルム社製の工業用 X 線フィルム IX FR（以下,「フィルム FR」とする）を使用した．撮影方法は，造影剤を使用しない単純撮影とした. 撮影条件は, 管電圧 40kV（X 線の最短波長 3.105×10^{-11}m），管電流 1.5mA，照射時間 60s，FFD500mm に設定した．フィルム FR の現像には，ニックス社製の自動現像機 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℃，現像時間 180s に設定した．

フィルム FR に投影された試料の軟 X 線影像は，エプソン社製のフラットベッドスキャナ GT-X750 および同社製のスキャナドライバ EPSON Scan ver.3.24J を使用して，デジタル画像化した．スキャナ GT-X750 によるスキャンの際には，コクヨ社製のライトボックス TY-LT13，および試作した透過フィルムユニットを使用し，画像解析に十分なコントラストを確保した（廣住ら，2011）. スキャン条件は, カラーモードを 16 ビットグレースケールに，解像度を 1200dpi（1 画素の一辺の長さ約 0.0212mm）に設定した．デジタル化した試料の軟 X 線画像は，その中心が試料の中心と合致するように縦 1024pix（21.7mm）×横 1024pix（21.7mm）の正方形に切り抜き，これを画像解析に供した．

画像解析については, 供試画像に含まれる画素濃度（画素の白黒濃淡）に対して数値計算を行う解析プログラムを試作した．これらの解析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 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 を援用した．試作した解析プログラムでは，画素の濃度について, 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 65,536 段階（16bit）に分割して表現する濃度階調値として処理した．画像解析の解析内容は以下のとおりとした．

(1) 供試画像の濃度変化の観察

供試画像の画素の濃度階調値の変化を面的および線的に観察した．

面的な観察では，平面座標上に画素の位置を，縦軸に画素濃度をそれぞれとり，3 次元座標として表示し，その増減の特徴を調べた．

線的な観察では，供試画像に走査線を設定し，この走査線上にある画素の濃度階調値を表示し，その増減の特徴を調べた．走査線は，供試画像の左端から右端に向かって，供試画像の中央部を横断するように引いた．走査線の設定方法を Fig. 3 に示す．

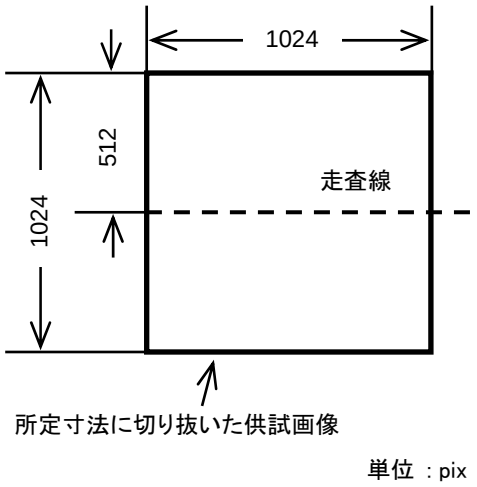


Fig. 3　走査線の設定方法．
A scanning line on soft X-ray digital image.

(2) 高速フーリエ変換による濃度変化の周期性評価

前述の走査線上にある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の適用を行い，濃度階調値の変化の周期性を調べた．

(3) セミバリオグラム解析による画素間の距離と濃度階調値の関連性の評価

前述の走査線上にある画素の濃度階調値の増減に対してセミバリオグラム解析を行い，画素間の距離と濃度階調値の関係を調べた．

(4) 供試画像の濃度階調値の統計解析

供試画像内に正方形の解析対象範囲を設定し，その解範囲内に含まれる画素に対して統計解析を行い，平均値・中央値・標準偏差・変動係数などを求めた．また，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た．このとき解析対象範囲の中心は供試画像の中心に合致させた．この解析プログラムのアルゴリズムを Fig. 4 に示す．

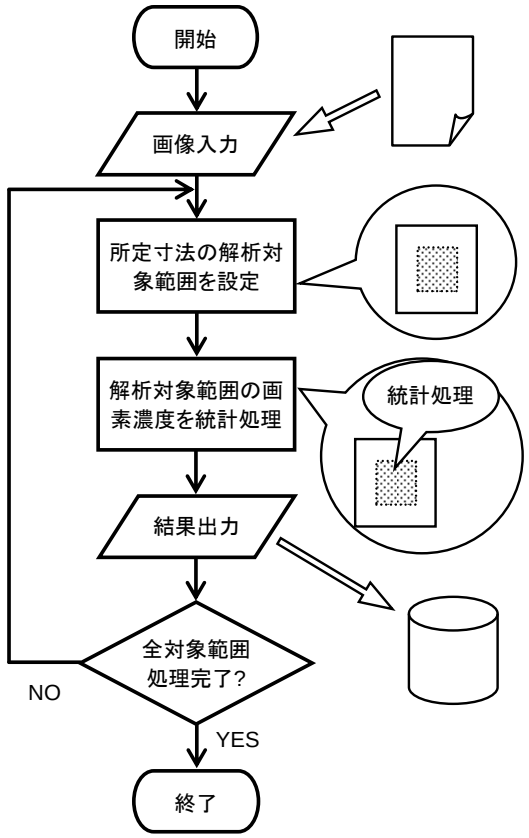


Fig. 4　画像解析プログラムのアルゴリズム .
Algorithm of soft X-ray digital image analysis program.

4. 結果と考察

4. 1 試料粒径と画素濃度の変動範囲

深さ 8.2mm の試料容器に充填した各試料の軟 X 線画像の一部を Photo. 1 に，その供試画像の画素濃度階調値の変化を面的に観察したグラフを Fig. 5 に，線的に観察したグラフを Fig. 6 にそれぞれ示す．Fig. 5－(a)～(h) のすべてのグラフにおいて，平面座標上に画素の位置を，縦軸にその画素の濃度階調値を示す．平面座標の 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それぞれ示す．また，Fig. 6－(a) ～ (h) のすべてのグラフにおいて，横軸に走査線上の画素の位置 x を，縦軸にその画素の濃度階調値 gl_x を示す．x は，走査線の左端を始点とし，走査線の左端からの距離として示す．

Fig. 5－(a)～(h) および Fig. 6－(a)～(h) のいずれのグラフにおいても，gl_x は 0.4 ～ 0.5 付近を中心に増減を繰り返す傾向があった．濃度階調値の増減の大きさについては，試料粒径が大きいほど，その範囲が大きくなった．たとえば，粒径 0.1mm のガラスビーズ (Fig. 6－(a)) では，gl_x は 0.45 ～ 0.50 の範囲であったが，粒径 3.0mm のガラスビーズ (Fig. 6－(e)) では，gl_x は 0.35 ～ 0.55 の範囲であった．同様に，粒径 0.074 ～ 0.106mm の川砂 (図 6－(f)) では，gl_x は 0.40 ～ 0.50 の範囲であったが，粒径 0.850 ～ 2.000mm の川砂 (Fig. 6－(h)) では，gl_x は 0.35 ～ 0.55 の範囲であった．

以上のことから，試料の軟 X 線画像の濃度階調値は 0.4 ～ 0.5 付近を中心に増減を繰り返す傾向があり，試料粒径が大きいほど，この増減の変動範囲が大きいことがわかった．

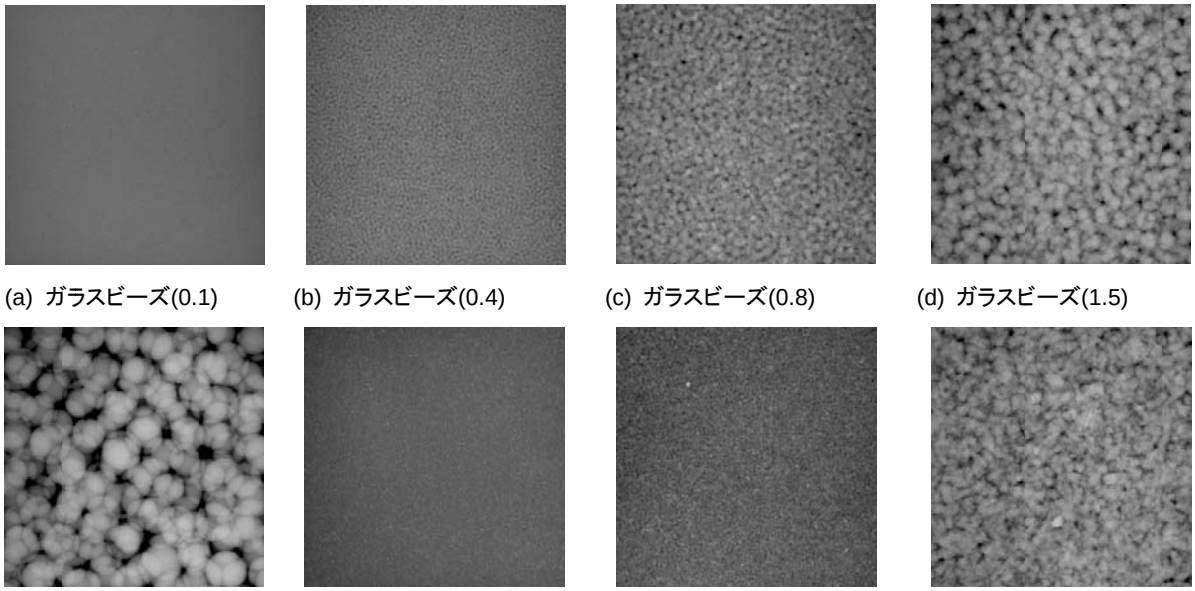
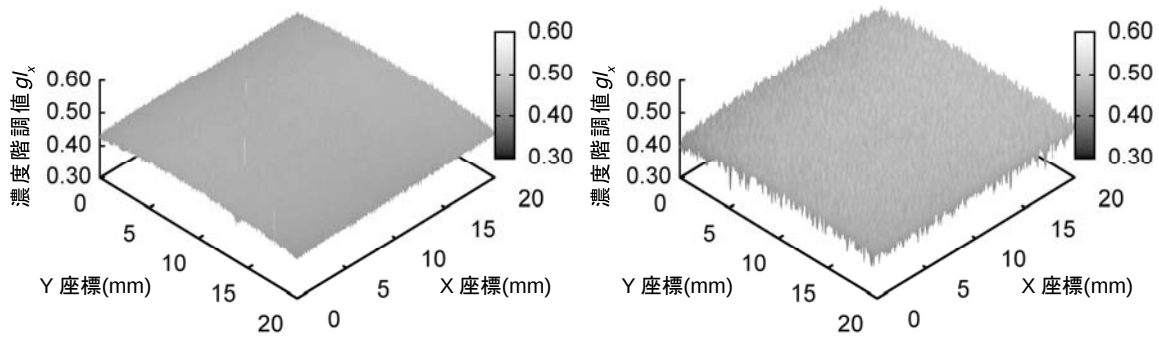
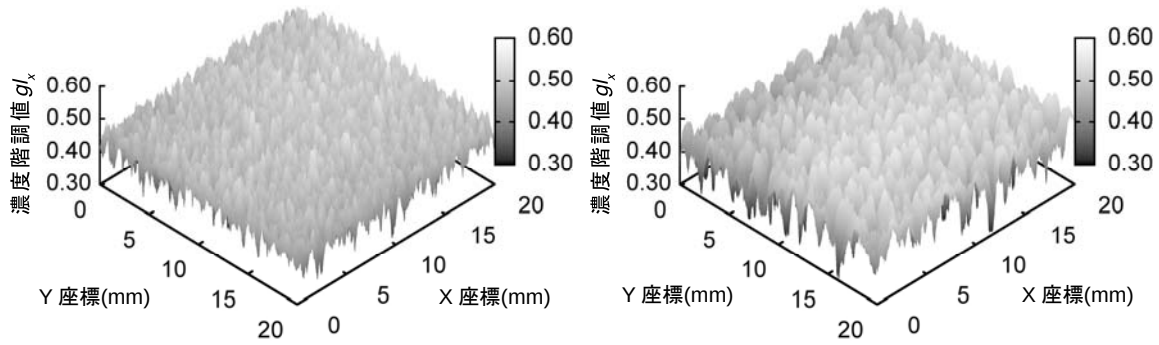


Photo. 1　画像解析に供した試料の軟 X 線画像 . 試料厚 t=8.2mm.
Soft X-ray digital images of specimens. tickness t=8.2mm.



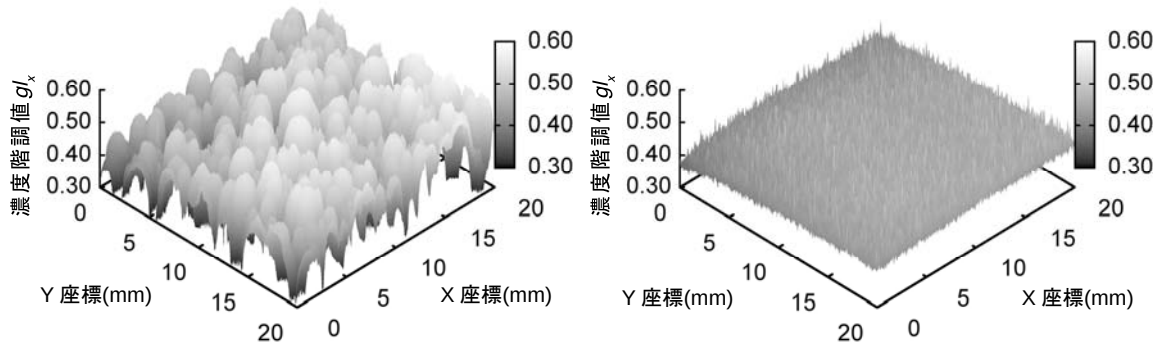
(a) ガラスビーズ(粒径 0.1mm)

(b) ガラスビーズ(粒径 0.4mm)



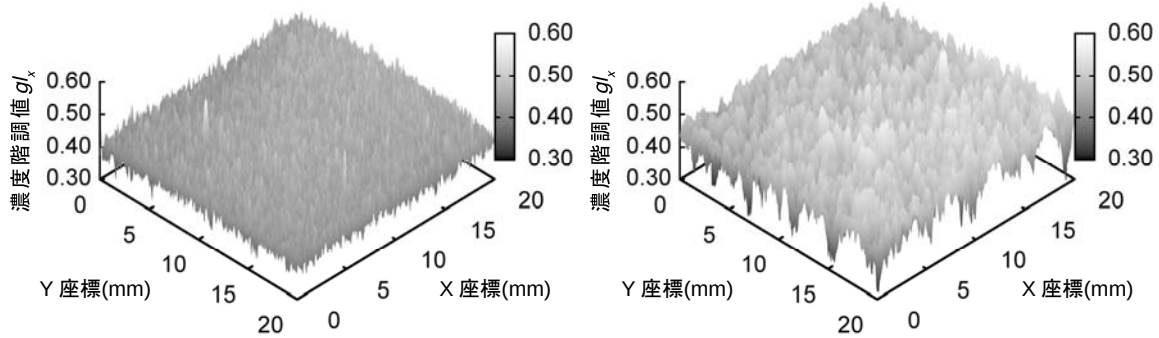
(c) ガラスビーズ(粒径 0.8mm)

(d) ガラスビーズ(粒径 1.5mm)



(e) ガラスビーズ(粒径 3.0mm)

(f) 川砂(粒径 0.074～0.106mm)



(g) 川砂(粒径 0.250～0.425mm)

(h) 川砂(粒径 0.850～2.000mm)

Fig. 5 供試画像全体の画素の濃度階調値の変化 . 試料厚 t=8.2mm.
Gray level of pixels in soft X-ray digital image. tickness t=8.2mm.

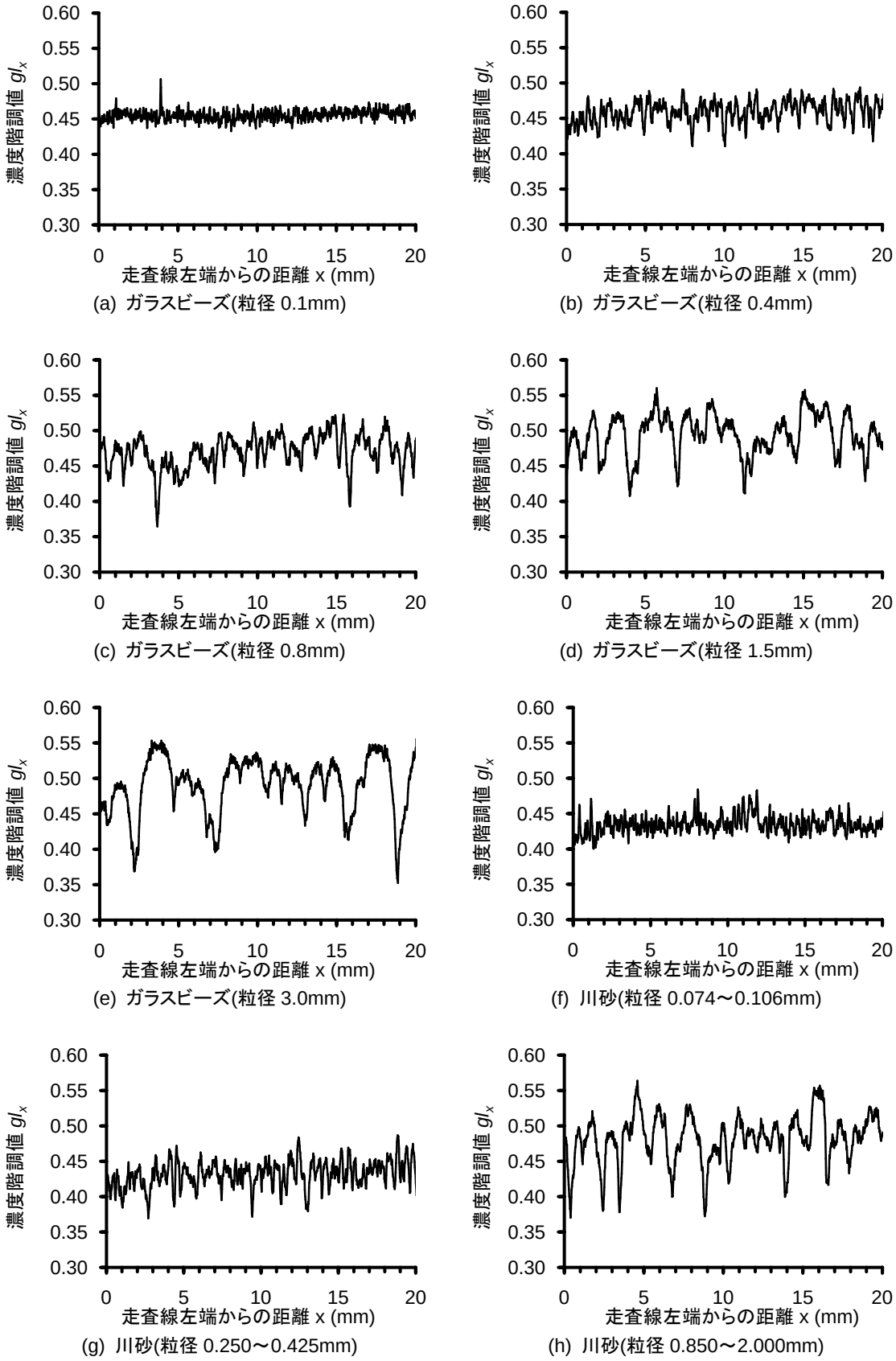


Fig. 6 走査線上の画素の濃度階調値の変化 . 試料厚 t=8.2mm.
Gray level of pixels on scanning line on soft X-ray digital image. tickness t=8.2mm.

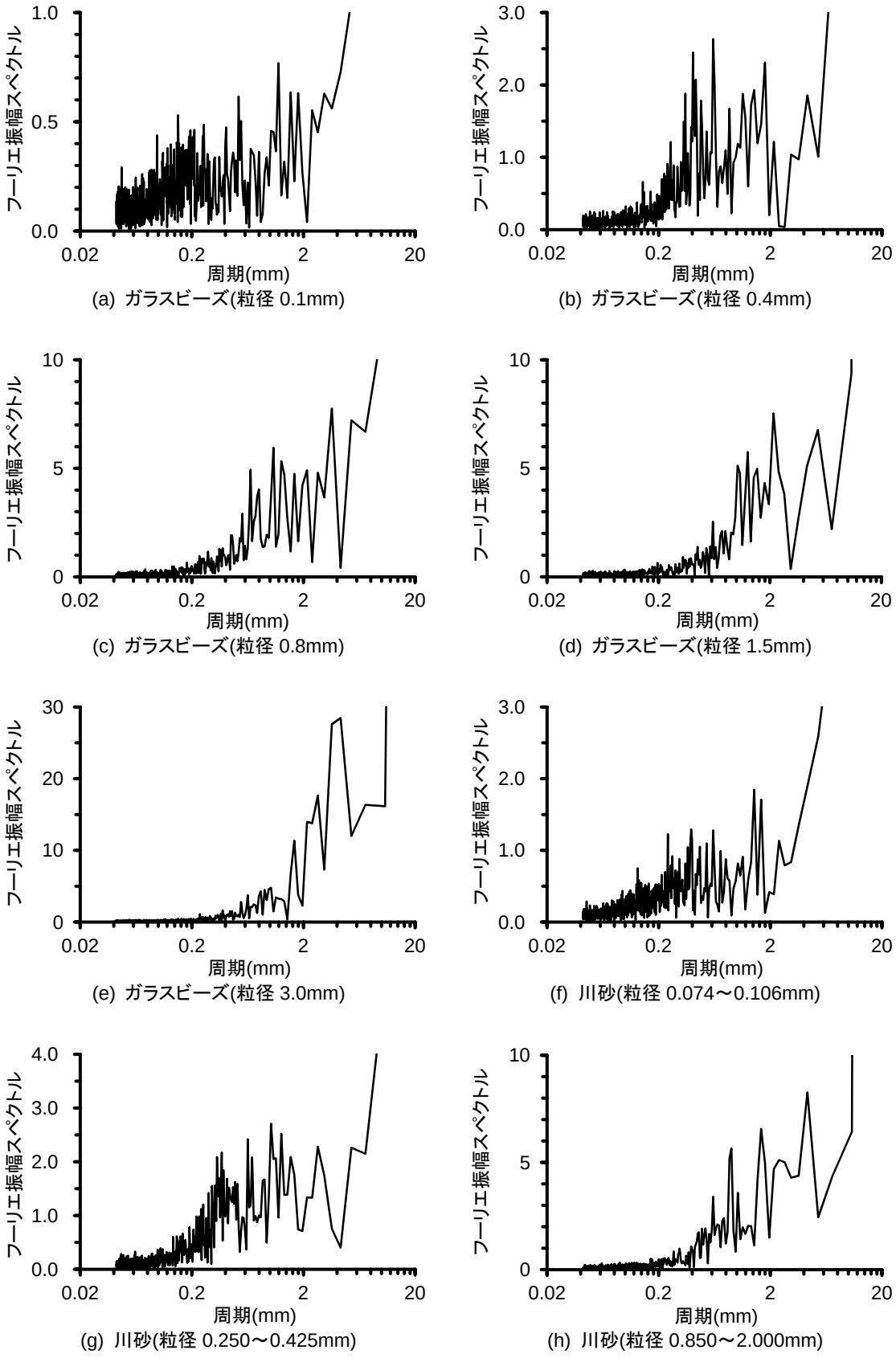


Fig. 7 走査線上の画素の濃度階調値に対する高速フーリエ変換の適用結果 . 試料厚 t=8.2mm.
Result of FFT analysis of gray level of pixels on scanning line. tickness t=8.2mm.

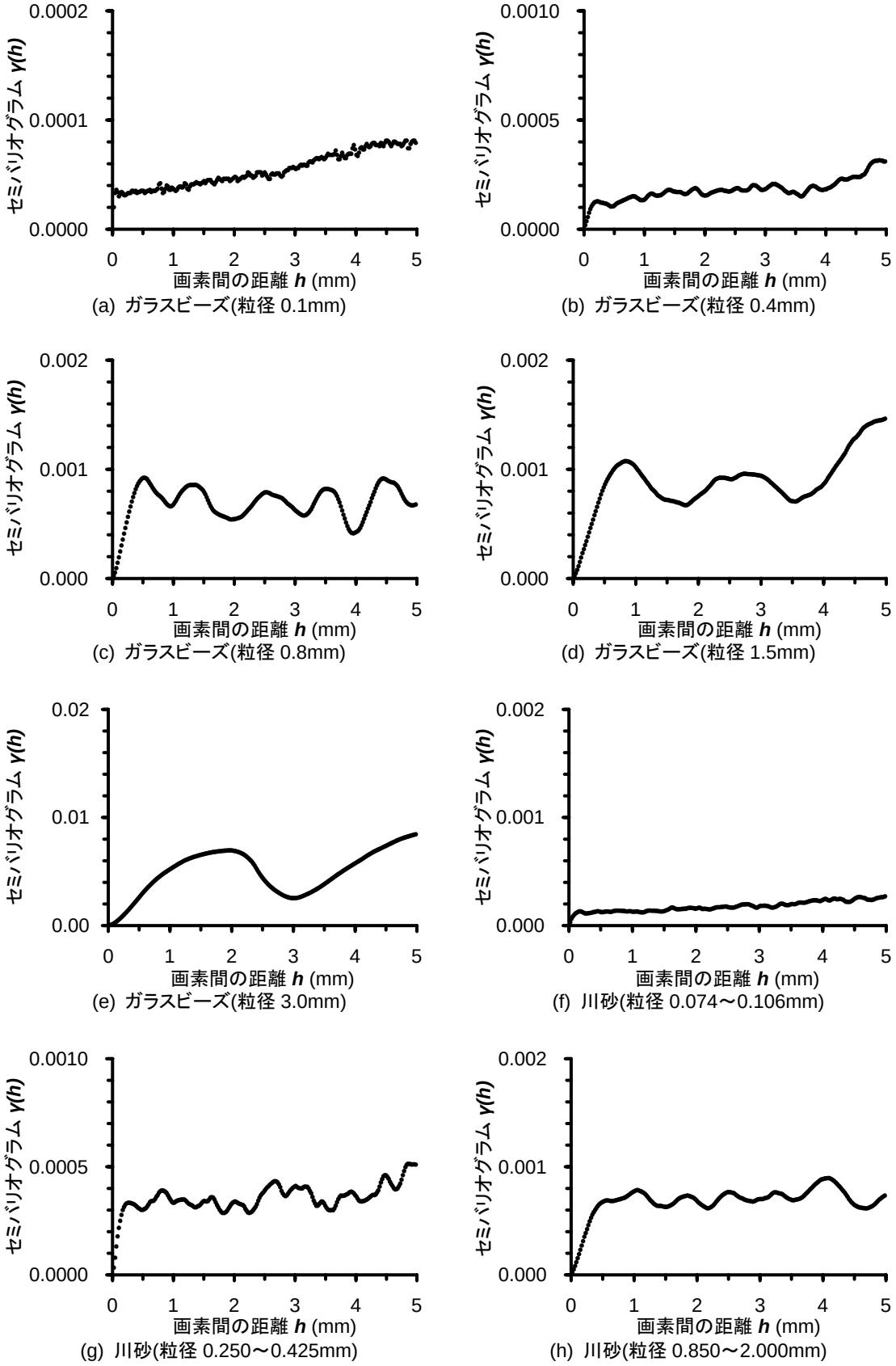
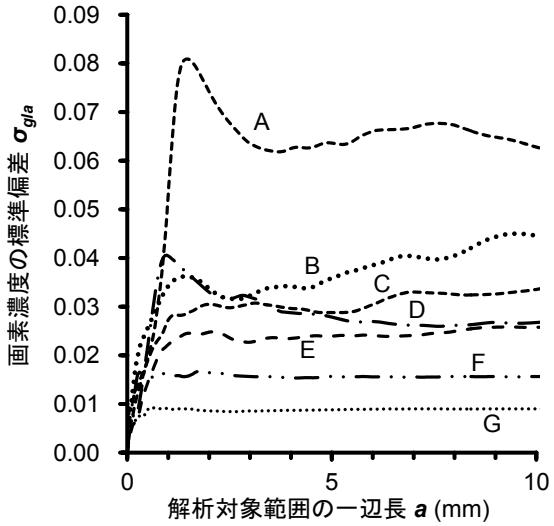


Fig. 8　走査線上の画素の濃度階調値に対するセミバリオグラムの適用結果 . 試料厚 t=8.2mm.
Result of Semivariogram analysis of gray level of pixels on scanning line. tickness t=8.2mm.

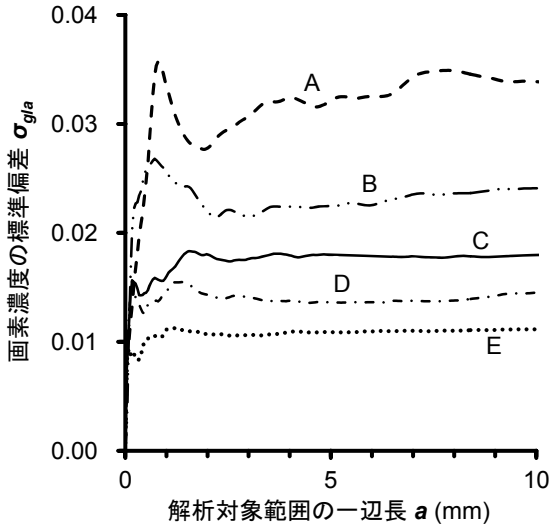


A:粒径 3.0mm, B:粒径 2.0mm, C:粒径 1.5mm,

D:粒径 1.0mm, E:粒径 0.8mm, F:粒径 0.4mm,

G:粒径 0.2mm

(a) ガラスビーズ (試料厚 *t*=8.2)



A:粒径 0.850~2.000mm, B:粒径 0.425~0.850mm,

C:粒径 0.250~0.425mm, D:粒径 0.106~0.250mm,

E:粒径 0.074~0.106mm

(b) 川砂 (試料厚 *t*=8.2)

Fig. 9　解析対象範囲の一辺の長さ a と画素濃度の標準偏差 σ_{gla}.
A, length of each side of analyzed area, and σ_{gla}, standard deviation of gray levels of pixels in this area.

4. 2 試料粒径と画素濃度の変動周期

Fig. 6 に示した走査線上の画素における濃度階調値の増減の周期性については, 径 0.1mm のガラスビーズ(Fig. 6−(a))および粒径 0.074 ～ 0.106mm の川砂(Fig. 6−(f))のような粒径が小さい試料では明瞭ではなく，粒径 3.0mm のガラスビーズ (Fig. 6−(e)) および粒径 0.850 ～ 2.000mm の川砂 (Fig. 6−(h)) のような粒径が大きい試料では明瞭であった.

そこで，この濃度階調値の増減の周期性について評価するため，Fig. 6−(a)～(h) の濃度階調値の変化に対して高速フーリエ変換を適用した結果を Fig. 7 に示す. Fig. 7−(a)～(h) のすべてのグラフにおいて，横軸に周期（mm）を，縦軸にその周期におけるフーリエ振幅スペクトルを示す.

ガラスビーズについては，試料粒径付近の周期において，高いフーリエ振幅スペクトルが集中する傾向がみられた. たとえば, 粒径0.4mm(Fig. 7−(b))では周期0.4mm 付近に，粒径 3.0mm (Fig. 7−(e)) では周期 3.0mm 付近に，それぞれフーリエ振幅スペクトルのピークがみられた．しかし, 粒径 0.1mm (Fig. 7−(a))では, 周期 0.1mm 付近におけるフーリエ振幅スペクトルは，それ以外の周期におけるフーリエ振幅スペクトルと大きな差はみられなかった．また，川砂についても，ガラスビーズと同様に試料粒径付近の周期において，高いフーリエ振幅スペクトルが多くみられる傾向があったが，ガラスビーズに比べてより広い周期に高いフーリエ振幅スペクトルが分布していた．たとえば，粒径 0.250 ～ 0.425mm (Fig. 7−(g)) では周期 0.2～3.0mm において，粒径 0.850 ～ 2.000mm (Fig. 7−(h)) では周期 0.5～3.0mm において，高いフーリエ振幅スペクトルが多くみられた.

以上のことから，試料の軟 X 線画像の濃度階調値の増減には周期性があり，その周期は試料粒径が大きいほど大きく，試料粒径に近いことがわかった．また，川砂は，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性成分を含んでいることがわかった. 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，川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た.

4. 3 画素間の距離と濃度変化の相関性

Fig. 6−(a)～(h) の濃度階調値の変化に対してセミバリオグラム解析を適用した結果を Fig. 8 に示す．Fig. 8−(a) ～ (h) のすべてのグラフにおいて，横軸に画素間の距離 h(mm) を，縦軸にそのときのセミバリオグラム $\gamma(h)$ を示す.

セミバリオグラム解析によって得られたシルおよびレンジについては，それぞれ粒径が大きくなるほど大きくなった．レンジについて, ガラスビーズでは, 粒径 0.1mm (Fig. 8−(a)) でおよそ 0.05mm，粒径 0.4mm (Fig. 8−(b)) でおよそ 0.15mm，粒径 0.8mm (Fig. 8−(c)) でおよそ 0.45mm，粒径 1.5mm (Fig. 8−(d)) でおよそ 0.75mm，粒径 3.0mm (Fig. 8−(e)) でおよそ 1.85mm となり，粒径の 1/3 ～ 2/3 の値をとった．また，川砂では, 粒径 0.074 ～ 0.106mm (Fig. 8−(f)) でおよそ 0.1mm，粒径 0.250 ～ 0.425mm (Fig. 8−(g)) でおよそ 0.2mm，粒径 0.850 ～ 2.000mm (Fig. 8−(h)) でおよそ 0.5mm

であった．川砂では，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がなくなる画素間の距離を表している．ガラスビーズおよび川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わかった．

4. 4 解析対象範囲の大きさと濃度階調値の標準偏差

深さ8.2mmの試料容器に充填した各試料における解析対象範囲の大きさとその解析対象範囲内の画素濃度の標準偏差との関係をFig. 9に示す．Fig. 9－(a)，(b)のすべてのグラフにおいて，横軸は解析対象範囲として設定した正方形の一辺長 a を，縦軸はその解析対象範囲内に含まれるすべての画素の濃度階調値の標準偏差 σ_{gla} を示す．

ガラスビーズ（Fig. 9－(a)）および川砂（Fig. 9－(b)）のいずれの粒径の試料でも，ある値までの増加とともにが急激に増加し，その後の値は増減を繰り返しながらゆるやかに推移した．こののの急激な増加は，a < 2mmの範囲でみられ，試料粒径が大きいほどの急激な増加が継続するの値も大きくなった．さらに，ガラスビーズ（Fig. 9－(a)）では a > 5mmで，川砂（Fig. 9－(b)）では a > 2mmで，の変動の幅が小さくなりその値がほぼ安定し，また，試料粒径の大きさとの大きさの順序が一致するようになった．

以上のことから，ガラスビーズではおよそ5mm × 5mm以上，川砂ではおよそ2mm × 2mm以上の寸法を持つ供試画像に対して，そこに含まれる画素の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た．

4. 5 画素濃度の標準偏差による試料粒径の測定

供試画像に含まれる画素の濃度階調値の標準偏差から試料粒径を推定できるか調べるため，試料粒径ごとに供試画像全面に含まれるすべての画素の濃度階調値の標準偏差を求め，両者の関係を調べた．供試画像の寸法は21.7mm × 21.7mmであるため，試料画像全面の画素を解析対象範囲とすることで，ガラスビーズおよび川砂の

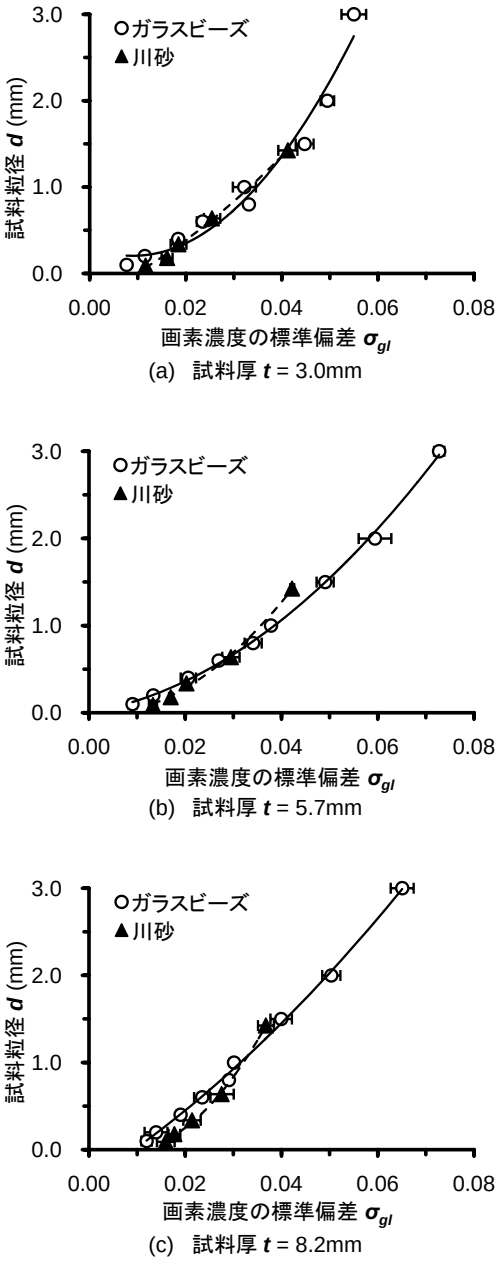


Fig. 10 試料の粒径 d と供試画像の画素濃度の標準偏差 σ_{gl}. 画像寸法は21.7mm × 21.7mm.
D, particle size of specimens, and σ_{gl}, standard deviation of gray levels of pixels in soft X-ray digital image. image size: 21.7mm × 21.7mm.

Table 2 試料の粒径 d と供試画像の画素濃度の標準偏差 σ_{gl} の関係式．
Approximation between d, particle size of specimens, and σ_{gl}, standard deviation of gray levels of pixels in soft X-ray digital image.

試料	試料厚 t(mm)	近似式	決定係数 r^2
ガラスビーズ	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
川砂	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

いずれの試料粒径の推定にも十分な画像寸法を確保できると判断した．また，試料の厚さは供試画像の画素濃度の変化に影響するため，試料厚の違いによる試料粒径と画素濃度の標準偏差の関係の変化についても調べた．

試料粒径と供試画像の画素濃度の標準偏差との関係を試料容器の深さ，すなわち試料厚ごとに Fig. 10 に示す．Fig. 10－(a)～(c) のすべてのグラフにおいて，横軸はその試料の供試画像に含まれるすべての画素の濃度階調値の標準偏差を，縦軸は試料粒径を示す．なお，川砂については，粒径範囲の中央値をとした．

Fig. 10－(a)～(c) のすべてにおいて，ガラスビーズおよび川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 =8.2mm 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（Fig. 10－(c)）が，t =3.0mm においてはの増大とともに σ_{gl} の増加量が減少する傾向があった（Fig. 10－(a)）．一方，川砂では，t = 3.0mm 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（Fig. 10－(a)）が，t =8.2mm においては d の増大とともに σ_{gl} の増加量が減少する傾向があった（Fig. 10－(c)）．d と σ_{gl} の関係は，Table 2 に示す式でそれぞれ近似でき，いずれも極めてよく適合した．

以上のことから，試料粒径の増大とともに，試料の軟 X 線画像の画素濃度の標準偏差が増加し，両者は極めて密接に関係していることがわかった．また，この関係は，2 次関数を用いることによって近似でき，この近似式は極めてよく適合した．この近似式を用いることによって，試料の軟 X 線画像から試料粒径を測定できることが明らかになった．

5. おわりに

本論では，新たに開発した軟 X 線画像法による土壌の粒度分布測定の足掛かりとするため，粒径が比較的大きく均一なガラスビーズおよび砂を用いて，軟 X 線画像法による粒径測定について検討した．

まず，軟 X 線が直進性および透過性を持ち物質によって減弱される程度が異なる性質を利用し，均一な球形の粒子を充填した土壌構造モデルから，本法による粒径測定の理論を示した．そして，この理論に基づき，試料粒径と，軟 X 線画像の濃度階調値の変化量，変化の周期性および分布状態などとの関係を調べ，軟 X 線画像法による粒径測定に必要となる測定項目および測定条件などを選定した．

その結果以下のことが明らかになった．

(1) 試料粒径が大きいほど，試料の軟 X 線画像の濃度階調値の増減の変動範囲および周期が大きいことがわかった．

(2) 試料粒径が大きいほど，濃度階調値が類似性を持つ画素間の距離が長いことがわかった．

(3) 軟 X 線画像に設定した解析対象範囲に含まれる画素濃度の標準偏差は，ある値まで解析対象範囲の寸法の増加とともに急激に増加し，その後，増減を繰り返しながらゆるやかに推移することがわかった．また，解析対象範囲の寸法がある程度大きくなると，この標準偏差はある値にほぼ安定することがわかった．

(4) 軟 X 線画像に含まれる画素濃度の標準偏差と試料粒径との間には極めて密接な関係があり，画素濃度の標準偏差の増加とともに試料粒径が増加することがわかった．また，両者関係は 2 次関数によって近似できることがわかった．

これらのことから，十分な画像寸法を確保した軟 X 線画像に含まれる画素濃度の標準偏差を測定することによって，ガラスビーズおよび川砂の試料粒径を測定できることが明らかとなった．

本論では，粒径が比較的大きく均一なガラスビーズおよび砂を対象として，軟 X 線画像法による粒径測定ができることを示した．今後はさらに粒径が小さく形状も複雑なシルトおよび粘土などに対する本法の可能性を検討したい．また，その結果を踏まえて，土粒子の粒度分布の測定やその配列様式の評価など，総合的な土壌構造の測定法に発展させたい．

謝辞

本論で行った実験にあたって，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．ここに記し謝意を表する．

引用文献

羽多野重信 , 森英利 , 浅井信義（2003）: 図解粉体技術最前線 .pp.104-112, 工業調査会 , 東京 .

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.

木庭元晴 , 青山千彰 (2005) : ピペット法による粒度分析再考 . 関西大学博物館紀要 ,11 : A1-A19.

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 , 福士政広 , 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 .

宮崎毅 , 西村拓編著（2011）: 土壌物理実験法 .pp.39-54, 東京大学出版会 , 東京 .

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.

栗原宏彰 , 北川靖夫 , 伊丹勝彦（1999）: レーザー回折法による土壌粒度分布測定 . 日本土壌肥料学会講演要旨集 ,45 : 419.

要　　旨

筆者らが新たに開発した軟 X 線画像法による土壌の粒度分布測定の足掛かりとするため，ガラスビーズおよび砂に対して軟 X 線画像法による画像解析を行い，その解析結果と試料粒径との関係について検討した．その結果，試料粒径とその軟 X 線画像の画素濃度の標準偏差との間には密接な関係があり，この関係を用いることで軟 X 線画像法による粒径測定ができることを示した．また，その際には，試料の粒径の大きさに応じて必要とする画像の大きさがあることを明らかにした．

キーワード：軟 X 線画像法，土壌構造，一次構造，ガラスビーズ，砂