SPring-8 マイクロX線CTによる粒状体の3次元微視構造の定量化

Microstructural Quantification of Granular Assembly studied by Micro X-ray CT at SPring-8

松島亘志*・上杉健太朗**・中野司***・士`山明**** Takashi Matsushima, Kentaro Uesugi, Tsukasa Nakano, Akira Tsuchiyama

*博士(工学), 筑波大学大学院システム情報工学研究科(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) **理学博士,(財)高輝度光科学研究センター(JASRI)(〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1丁目1-1) ***理学博士,(独)産業技術総合研究所, 地質情報研究部門(〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7) ****理学博士,大阪大学大学院理学研究科,宇宙地球科学専攻(〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1)

This paper presents a 3-D visualization and quantification of granular packing structure using a micro x-ray CT at SPring-8. SPring-8 is the world's largest third-generation synchrotron radiation facility where a high-resolution x-ray CT system is available. Specimens of Toyoura sand and Glass beads for dense and loose packings are used in the study. A newly-developed image analysis procedure enables to automatically identify each grain in the specimen. The accuracy of the identification reaches around 80 % or more even in the dense packing of irregularly-shaped grains. The obtained grain information is further processed to quantify 3-D grain shape and contact point statistics.

Key Words: Granular Material, Micro X-ray CT, Packing structure キーワード: 粒状体, マイクロX線CT, 充填構造

1. はじめに

粒状体の力学特性は、構成粒子物性とその充填構造に支配されている。粒子物性は、粒子サイズ、粒子形状、粒子破砕性などであり、充填構造は、間隙比、ファブリックテンソル、粒子長軸方向分布などで表現される。近年のコンピュータの進歩により個別要素法(Discrete Element Method, DEM)を代表とする粒子レベルの数値解析において、このような微視的パラメータの影響を検討することが可能となり、多くのデータが積み上げられてきている^{1,2,3}。一方、そのような数値解析による結果を確かめるための実験データは未だ不足している。これは、3次元粒状体中の粒子運動を観測することの困難に起因している。

X線CTは、そのような可視化・定量化に有力な手法である⁴⁵⁰⁰が、地盤工学等で通常用いられる砂質材料は、粒径0.1mmから0.5mm程度であり、通常の医療用または産業用のX線CT装置では個々の粒子まで可視化することは困難である。一方、近年はマイクロフォーカスX線CTと呼ばれる、ミクロン単位の解像度を有するX線CT装置が開発されているが、通常のX線装置同様、白色ビームやコーンビームの補正などにより解像度が落ちる難点がある。

放射光施設のX線を用いたCTは、単色・平行X線を用いるため、このような劣化がなく、非常にクリアなCT画像を得ることができる⁷⁸⁹。本研究では、特に第3世代の放

射光施設として世界最大のSpring-8 におけるマイクロX線 CTシステム(SP-µCT)を用いて、豊富な実験データのある 標準砂や、球形ガラスビーズなどの充填構造の可視化を行った。

SPring-8においてはBL20B2,BL20XUおよびBL47XUにX 線CTシステムが設置されている。BL20XUおよびBL47XU においては、最小voxelサイズ 0.5µmの高解像度CTが利用 可能であるが、撮影可能な試験体最大幅が 1mm程度と非 常に小さくなってしまう。一方、BL20B2 においては、 10mm程度の試験体まで撮影可能であり、解像度も5µmと、 0.1mm程度の粒子も十分な精度で可視化することが可能 であるため、本研究では後者のシステムを用いた^{10,11,12)}。 本論文では、まず実験の概要について述べ、続いて互いに 接触した不規則形状粒子を自動認識するための画像処理 過程について説明し、その精度の検証を行う。更に、粒度 分布や粒子形状などの粒子情報、および接触点統計など充 填構造情報を自動的に取得し、これらの関係について議論 する。

2. SPring-8 マイクロX線CTの概要

SPring-8 BL20B2 におけるX線CTシステム (SP-µCT) は、X 線光源、モノクロメーター、高精度回転ステージ、高解像 度X線画像ディテクターからなる(図-1)。蓄積リングからの X線は、まずモノクロメーターを通り、Si(311)単結晶によ って単波長化される。サンプルステージで利用可能なX線 は、十分な平行度を有しており、9~72 keVという高エネ ルギーにより、高空間分解能3次元像を得ることができる。 試験体を透過したX線は、蛍光板で可視光に変換され、リ レーレンズで拡大されてCCDカメラに到達する。試験体の 最大サイズと画像の空間分解能は、上記の光学系とCCD の選択によって調整できる。本研究では、1000×1018の 画素数を有するCCDカメラを用い、voxelサイズは 5.8µm ×5.8µm×5.8µmとした。用いるX線エネルギーは、試験体 の透過性によって調節するものであるが、ここでは25 keV とした。透過像の撮影は、0.5 度刻みで試験体を 180 度回 転させて行い、計 360 枚の画像をCBP(convolution back-projection)法¹³⁾を用いて再構成した。

実験では数種類の標準砂およびガラスビーズを、間隙比

を変化させて詰めたものを試験体として用いた。本研究で は、そのうちガラスビーズと豊浦砂の結果を用いる。豊浦 砂は日本において広く研究用に用いられている、主に硅砂 (石英(SiO₂)が主成分)からなる山砂である。粒径は 0.1mm ~0.3mmである。一方ガラスビーズはソーダ石灰ガラスで あり、粒径は85%以上が0.18mm~0.25mmの範囲にある。 ほとんどが球形であるが、一部非球形も含まれている。

ゆるづめ試験体は、内径3.5mm、外径4.5mmのアクリル 円筒容器(図-2)に漏斗を用い、最大乾燥密度試験の要領14) で緩く充填させて作成した。密づめの試験体は、ゆるづめ と同様に充填させた後、上面を円柱棒でタンピングするこ とによって作成した。X線撮影の後、試料の重さを計測し、 試験体寸法および平均的な粒子密度から試料の間隙比を 求めた。

図3は本研究で対象とする5種類の試験体(豊浦砂の密



図-1. SPring-8におけるX-ray CT システム



図-2. 試験体の例





(d) ガラスビーズ (密づめ)

(b) 豊浦砂 (ゆるづめ)

(e) ガラスビーズ (ゆるづめ) 図-3. 再構成された CT 水平断面画像の例



図-4. 観測された CT 値分布

づめ・中密・ゆるづめ、ガラスビーズの密づめ・中密)の 水平断面 CT 画像の例である。ひとつの試験体について、 このような水平画像が 5.8 µm 幅で 1000 枚あり、三次元の CT データを構成している。

画像の輝度0および100は、計測されたCT値での0お よび3.663cm⁻¹にそれぞれ対応させている。ここでのCT値 は、物質のX線線吸収係数(x-ray linear attenuation coefficient, LAC)と対応しており、3.663cm⁻¹は25keVのエネルギーに おける石英(SiO₂)の理論LAC値である。LACと直接対応可 能なCT値は、放射光施設のような単波長X線でのみ得られ る。豊浦砂、ガラスビーズとも、内部は非常に均質である ことがわかる。豊浦砂の白っぽく見える部分は鉄などを含 む重い鉱物からできていることを示している。

3. 粒子同定のための画像処理法



図-3 で示した CT 画像は、試験体内部の粒子の大きさや 形状、充填の仕方などを、はっきりと示している。しかし ながら、このような微視情報の定量データを三次元の CT 画像データより自動取得するのは容易ではない。試験体内 部では粒子同士は互いに接触しており、単なる二値化処理 では個々の粒子を分離できないからである。本研究では、 比較的シンプルな画像処理技術の最適な組み合わせによ って、不規則形状粒子であっても精度良く粒子同定可能な 画像処理プロセスを実現している。これによって、大量の データを人為的な曖昧さなしに処理することができる。

3-1. 二值化処理

まずは、三次元のCTデータに二値化処理を施し、固体 粒子部分を確定する必要があるが、その際の最適閾値を決 める必要がある。図4は対象とした5つの試験体のそれぞ れについてのLAC値とその頻度を表した図である。LAC



(e) エロージョン(2回) (f) エロージョン(3回) (g) つながり解析結果 (h) 帰属処理後 図-6. 粒子同定処理(密づめ豊浦砂試験体, 水平画像の一部)

値 2~4 程度に現れる山が固体粒子を表しており、つまり 方によらず豊浦砂は 3.2 程度、ガラスビーズは 3.7 程度の peak値を持つ。前述のように石英の理論LAC値は 3.663 cm⁻¹ であるが、SPring-8 におけるCT装置は、理論LAC値の 0.9 倍程度のCT値を示すことが知られており⁹、それを考慮す れば、豊浦砂粒子の 92%が石英からなっていることと整合 し、一方、ガラスビーズは石英 72%であり、その他の成分 の影響で相対的に大きなCT値を示していると推察できる。

間隙部分と固体粒子部分を分けるCT値の閾値を合理的 に求めるために、それぞれの試験体のCTデータについて、 閾値を変化させて、水平断面内の粒子部分面積の平均値を 求めて示したものが図-5 である。図中の縦の破線は、別途 計測した試験体重量と試験体高さから粒子部分面積を求 め、それと一致するような閾値を各試料について示してい る。これによれば、ガラスビーズのゆるづめ試料を除いて は、ほぼ 1.8~2.0cm⁻¹付近が最適閾値となった。ガラスビ ーズゆるづめ試料の最適閾値が極端に大きくなっている 原因は不明であるが、重量計測時に試料の一部をこぼして しまった可能性も否定できない。これらの考察を踏まえて、 本研究では全ての試料に対してCT値 2.0 を閾値として二 値化を行った。二値化を行う前後の水平断面画像の例をそ れぞれ図-6(a)および(b)に示す。

3-2. 穴埋め処理

最適閾値で二値化した画像には、主に不均質材料のCT 撮影時に写り込む偽像(artifacts¹³)が原因となって、固体粒 子内に小空隙が含まれることがある(図-6(b)の粒子内の黒 い部分)。この空隙は、次節のエロージョン処理結果に影 響を与え、粒子同定の精度を低下させるため、あらかじめ 取り除く必要がある。本研究では、後述のつながり解析手 法を利用して、「空隙」の3次元つながり解析を行い、最 も大きなクラスター(つまり試験体の外(側)以外のクラスタ ーを除去する(図-6(b)において見られる黒のドットを白に 変更する)という処理によって、粒子内部の空隙を埋める。 処理の画像を図-6(c)に示す。図-6(b)で見られる粒子内部の 空乳が埋められているのがわかる。この手法は、粒子間の 空隙は、3次元では必ず試験体外部とつながっている、と いう性質を利用したものである。



図-7 異なるエロージョン回数でのクラスター数

なお、リングアーチファクトのような線状の偽像が粒子 内部にとどまらず、粒子境界まで達している場合には、本 手法でそれを取り除くことは不可能である。この対策につ いては今後の課題である。

3-3. エロージョン(erosion)処理

試験体内の粒子は、近傍の粒子と接触しており、二値化 後の固体粒子は、その接触点で他とつながっている。この つながりを切断し、個々の粒子を分離する処理がエロージ ョン処理である。この処理では、3次元データのそれぞれ の画素について、それと隣り合う(斜めも含めて)26の画素 を調べ、そのどれか一つでも空隙(黒 pixel)であれば、その 画素を空隙に置き換える。この操作を繰り返すことによっ て、粒子表面の空隙に接した画素から順々に空隙に置き換 わり、あたかも粒子表面が侵食(erode)されているように見 える(図-6(d)~(f))。

空隙に置き換えるときの隣接画素数の条件は、さまざま 考えられるが、ここでは接触点を効率的に分離することを 目的としていることから、少しでも空隙に接していれば侵 食される、という条件設定にしている。

一方、この処理の繰り返し回数の最適値については、画像の解像度や粒子形状などの条件で変わってくるため、後述のつながり解析結果を基に判断することとしている。

3-4. つながり解析(クラスターラベリング)

何度かのエロージョン処理後、粒子の「核」の部分がそれぞれ分離した状態で残る。この3次元データから、それ ぞれの画素のつながり解析を行い、クラスターに番号を振っていく処理がクラスターラベリングである。本研究で用いているような大量のデータを効率的に処理するアルゴリズムが既に提案されており¹⁵、本研究ではそれを用いている。結果の一例を図-6(g)に示す。独立したクラスターは異なる色で色分けされている。

エロージョン処理の最適回数を決定するために、異なっ たエロージョン回数を施した画像のクラスターラベリン グを行い、得られたクラスターの数をまとめて示したもの が図-7 である。これによれば、豊浦砂、ガラスビーズ両試 験体共に、エロージョン回数3回でほぼ一定値となってい



図・8 異なるエロージョン回数での最大クラスター



る事がわかる。これは、3回の処理でほぼ接触点が分離され、その後は粒子が小さくなるだけで数は余り変わらないことを示している。豊浦砂の場合、5回の処理を施すと粒子数がやや減少しているが、これは余り多くの処理を加えすぎると、小さな粒子やいびつな形状の粒子が消失してしまっていることを示している。

また、図-8は、各エロージョン処理の後、得られる最大 のクラスターの体積から、球で置き換えた場合の粒子径 (等価粒子径)を求めた結果を示している。これによれば、 豊浦砂はエロージョン処理2回、ガラスビーズは3回で急 激に最大粒子径が減少し、その後は一定値になっている。 更に、図-9はエロージョン後のクラスターの等価粒子径 の分布を示しているが、特に密づめ豊浦砂の場合に、20µm 以下の小さなクラスターが多数存在していることがわか る。これはエロージョンの過程で、粒子の一部が不当に分 離して生じたものと考えられ、粒子の「核」からは除外す べきであると考えられる。エロージョン3回の結果(図 -9(a))では、このような微小クラスターの山と、実際の粒子 の核の山はよく分離されているが、図-9(b)に示すようにエ ロージョンを5回繰り返すとこれらの山が重なり、クラス ターの分類分けが困難になる。

上述のような考察から、本研究では最適なエロージョン 回数を3回として、次の帰属(attribution)処理を行う。



3-5. 帰属(attribution)処理

ここでは、エロージョンで取り去った画素および図-9(a) に示されているような微小クラスターを構成する画素を、 核となるクラスターに帰属させる処理を行う。具体的には、 これらの画素に隣接する画素のうち、核のクラスターに帰 属しているものがある場合に、そのクラスターに帰属させ る。異なる核クラスターに所属する複数の画素に隣接して いる場合には、数の多い方に帰属させることにする。1回 の処理では全ての帰属先は決まらず、何度か同じ処理を繰 り返して、最終的な残留粒子が変化しなくなったところで 処理を終了する。本研究で処理したケースでは、最終残留 粒子数は十分少なく、全体の体積にほとんど影響を及ぼさ ない程度であることを確認している。

図-10 は、このようにして最終的に得られたクラスター の等価粒子径分布である。詰め方によらず、豊浦砂は100 ~300µm,ガラスビーズは180~250µmの範囲に分布して おり、ふるい分け試験結果と良く整合している。

また、表1は、豊浦砂の密づめおよび中密づめの試験体 について、目視で最終画像をチェックした結果を示してい る。これによれば、密づめでは78%の粒子が完全に同定で き、90%以上が2割の体積誤差以内で同定できた。中密で は90%が完全に同定、全てが2割の体積誤差以内で同定で きた。また、ガラスビーズ試験体については、ほぼ100% の同定精度を得ている。

表-1	日祖に	上ろ精度検証結果	1
13-1			~

α(クラスターが目視で	豊浦砂密づめ	豊浦砂中密
求めた粒子の何割から	(030525a-3)	(030525c-3)
構成されているか)		
0.5	3	0
0.9	4	3
1	78	45
1.1~1.2	8	2
1.5	3	0
2.0	4	0
計	100	50

4. 粒子物性および充填構造

試験体内の粒子同定が精度良く行われれば、その後の粒 子物性の取得は比較的容易である。以降では、粒子形状お よび配向についての統計、および粒子接触点についての統 計を整理して示す。砂などの不規則形状粒状体の3次元内 部構造に関するこのような情報は、これまでほとんど得ら れておらず、粒状体力学の発展に極めて重要なデータであ ると言える。

4-1. 粒子形状

ここでは、豊浦砂を対象とした粒子形状データの取得手 法について示す。砂のような不規則形状粒子の形状指標に ついては、古くから様々な提案がなされている。ここでは 最も低次の形状情報として、慣性二次モーメントが一致す るような楕円体近似を行い、長軸・中軸・短軸を計算する ¹⁰。

まず、粒子を構成する全てのvoxelに対して和を取って、 重心と重心周りの慣性モーメントを以下の式で求める。

$$\boldsymbol{x}_g = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{N} \boldsymbol{x}^k \Delta V \tag{1}$$

$$I = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{N} (x_2^2 + x_3^2) \Delta V & -\sum_{k=1}^{N} x_1 x_2 \Delta V & -\sum_{k=1}^{N} x_3 x_1 \Delta V \\ & \sum_{k=1}^{N} (x_3^2 + x_1^2) \Delta V & -\sum_{k=1}^{N} x_2 x_3 \Delta V \\ SYM & \sum_{k=1}^{N} (x_1^2 + x_2^2) \Delta V \end{pmatrix}$$
(2)
$$-V \begin{pmatrix} (x_{g2}^2 + x_{g3}^2) & -x_{g1} x_{g2} & -x_{g3} x_{g1} \\ & (x_{g2}^2 + x_{g3}^2) & -x_{g2} x_{g3} \\ & (x_{g1}^2 + x_{g2}^2) \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

その後、*I*を直交化して主軸を求める。また主値の値が、 直交楕円体(*a*,*b*,*c*)の慣性モーメント

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \frac{1}{5} V \begin{pmatrix} b^2 + c^2 \\ c^2 + a^2 \\ a^2 + b^2 \end{pmatrix}$$
(3)





図-12 粒子長軸・短軸の鉛直方向角分布

と等しいと置いて、等価楕円体の長、中、短軸(*a*,*b*,*c*)を 求めることができる。

更に直交化行列 R を Euler 角で表現して、それぞれの軸の鉛直方向からの垂直角(vertical angle)および水平面内の水平角(horizontal angle)を求める。

まず、3つの形状特性(c/a (アスペクト比), b/a (細長度:elongation ratio), c/b (扁平度:flatness ratio))について、密づめ、中密づめ、ゆるづめの豊浦砂試験体で確認したところ、ほぼ完全に一致した(図-11)。このことからも、粒子分離はうまくできていることが確認できる。なお、縦軸は、全体の面積が1になるように正規化した粒子個数(つまり、全体で1となる粒径加積曲線の勾配)である。また、ここでは3次元データの上下端にかかる粒子は除いて解析し、豊浦砂の密づめ、ゆるづめ、中密で、それぞれ、3479個、3514個、2297個の粒子を用いている。

図-12 は、豊浦砂各試験体の長軸および短軸の方向を、 鉛直方向からの角度(鉛直角)で表したものである。ただし、 方向分布においては、鉛直方向に近いほど、鉛直角θに対 応する断面積が小さくなる影響を考慮して、sin θ で除し てある。図-12(a)は3つの試験体の比較であるが、いずれ も長軸が水平方向を向き、短軸が鉛直方向を向く傾向が見 られる。図-12(b)は、豊浦砂ゆるづめ試験体において、ア スペクト比*c*/*a*によって粒子を3つに分類し、それぞれ の方向角の統計をとったものであるが、アスペクト比が大 きくなるほど、長軸が水平方向を向き、短軸が鉛直方向を 向く傾向が高くなることがわかる。

4-2. 接触点特性

粒子情報が同定されていれば、異なる粒子に属する画素 が隣り合っている条件から粒子の接触点を抽出でき、また その画素数から接触面積、その最小自乗近似面より接触面 方向角を求めることができる。図-13(a)(b)は、それぞれ豊 浦砂、ガラスビーズの配位数 N_c (粒子1つ当たりの接触点 数)の頻度分布を表している。図には、それぞれの結果を 正規分布で近似して、その中央値を求めた結果(N_c)_{ave} も 示している。これによれば、豊浦砂、ガラスビーズいずれ も、密づめになるほど配位数が大きくなる傾向が確認でき る。図-13(b)には、Smith et al.(1929)¹⁷による鉛玉の実験結





図-14 $N_c - n$ 関係

果(ゆるづめのみ)も合わせて示しているが、本実験でのゆ るづめ結果と比較して、分散がかなり小さめとなっている。 一方、豊浦砂はガラスビーズよりも更に*N_c*の幅が広くな っている。豊浦砂はガラスビーズよりも広い粒度分布を持 ち、これにより相対的に大きな粒子が大きな*N_c*を持ち、 ばらつきが大きくなっていることが考えられる。

図-14 は、それぞれの試験体についての、間隙率nと平均配位数 $(N_c)_{ave}$ の関係を図示したものである。破線は、やはりSmith et al. (1929)¹⁷⁾によって提案された理論式の結果を示している。そこでは、球のランダム充填において、最密充填と単純立方(ゆるづめ)がある比率で混在していると単純化して導いたものであり、 (n, N_c) = (0.260,12), (0.476,6)を通る。

図を見ると、豊浦砂、ガラスビーズとも、Smith らの式 よりも勾配が緩やかとなっている。ガラスビーズの曲線に ついては、n=0.476において(N_c)_{ave}=6に漸近するが、密 づめに向かうランダム充填状態では、より小さい配位数で 安定な構造を作っている。この原因として考えられるのは 粒子の構造の異方性である。配位数は、間隙率と比較して 異方性に敏感であると考えられる。これは、等方につめた 粒子構造をある方向に少しだけ広げることで、広げられた 方向の配位数が大きく減少するはず、という思考実験から 予測できる。すなわち、異方性が高いほど、同じ間隙率を 少ない配位数で実現可能である。更にこの傾向は、ゆるづ めの供試体の場合には粒子構造の安定性の消失につなが るため、密づめの充填において顕著となると考えられる。 以上により、ガラスビーズ供試体の計測結果が、Smith ら の式よりも勾配が緩やかとなっている、と説明できる。

一方、豊浦砂の試験体の結果が、ガラスビーズの結果より上に来ている理由については、異方性、粒子形状、粒度分布等を総合的に検討する必要があり、今後の検討課題である。このような間隙率配位数関係は、粒状体のマイクロメカニックスには重要な役割を果たすものである^{6,18}。

5. おわりに

本研究では、SPring-8 マイクロX線CTによって取得された粒状体の3次元微視構造を定量化する手法について詳細に検討した。用いた手法は、十分な精度で粒子同定が可能であることが示され、それを用いて大量のデータを自動的に取得し、様々な粒子物性や粒子充填物性を直接計算できることが示された。

不規則形状粒子群の粒子配向や微視的充填構造に関し ては、未だ十分な知見が得られておらず、本研究で得られ たデータは有用な基礎データとなると考えられる。また、 竿本ら¹⁹は、本研究で用いたデータを同様のデータを用い て3次元多孔質体中の透水シミュレーションを行ってい るが、このようなイメージベース数値解析にも応用が期待 される。

更に、本手法と文献6)の手法を併用することで、力を受けて変形する不規則形状粒子群の粒子挙動を追跡することも可能である¹¹⁾。このように、本研究を基礎として、今後様々な発展が期待される。

謝辞

実験は、(財)高輝度光科学研究センターの承認により、 提案番号 2003B0479-ND2b-np として、SPring-8 内 BL20B2 で行われたものである。また、本研究の一部は、科学研究 費補助金(基盤研究(C)課題番号 18560481)を用いて行われ た。

参考文献

- Discrete Element Methods –Numerical Modeling of discontinua, B.K. Cook and R.P. Jensen editors, Geotechnical special Publication No. 117, ASCE, 2002.
- 2) Powders and Grains 2005, Garcia-Rojo, Herrmann, McNamara editors, Balkema, 2005.
- Lathama, J-P., Munjiza, A., Lu, Y., On the prediction of void porosity and packing of rock particulates, Powder Technology, 125, 10-27, 2002
- Aste, T., Saadatfar, M., Sakellariou, A., Senden, T.J. Investigating the geometrical structure of disordered sphere packings, Physica A, 339, 16-23, 2004.
- 5) Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, Desrues, Viggiani, Besuelle eds., ISTE, 2006.
- 6) Chang, C.-S., Matsushima, T., Lee, X., Heterogeneous Strain and Bonded Granular Structure Change in Triaxial Specimen Studied by Computer Tomography, Journal of Engineering Mechanics, ASCE. 129, 11, 1295-1307, 2003.
- Bonse, U. and Busch, F., X-ray computed microtomography (μCT) using synchrotron radiation (SR), Prog. Bio-phys. molec., 65, 133-169, 1996.
- Uesugi, K., Tsuchiyama, A., Nakano, T., Suzuki, Y., Yagi, N., Umetani, K. and Kohmura, Y., Development of

micro-tomography imaging system for rocks and mineral samples, Proc. SPIE, Developments in X-ray Tomography II, 3772, 214-221, 1999.

- 9) Tsuchiyama, A., Uesugi, K., Nakano, T., Ikeda, S., Quantitative evaluation of attenuation contrast of X-ray computed tomography images using monochromatized beams, Americal Mineralogist, 90, 132-142, 2005.
- 10) Matsushima, T., Saomoto, H., Uesugi, K., Tsuchiyama, A. and Nakano, T.: Detection of 3-D irregular grain shape of Toyoura sand at SPring-8, X-ray CT for Geomaterials: Proc. International workshop on X-ray CT for geomaterials (Otani and Obara eds.), Balkema, 121-126,2004.
- Matsushima, T., Katagiri, J., Uesugi, K., Nakano, T., Tsuchiyama, A., Micro X-ray CT at SPring-8 for Granular Mechanics, Ling et al. eds, Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis, Springer, 225-234, 2007.
- 12) Matsushima, T., Katagiri, J., Uesugi, K., Tsuchiyama, A., Nakano, T.: 3-D Shape Characterization and Image-based DEM simulation of Lunar soil simulant, FJS-1, Journal of Aerospace Engineering, ASCE, accepted.
- 13)中野司、中島善人、中村光一、池田進, X線CTによる 岩石内部構造の観察・解析法, 地質学雑誌, 106, 5, 363-378, 2000.
- 14)土質工学会:土質試験の方法と解説, JSF T161-1990, 1990.
- 15) Hoshen, J., Kopelman, R., Percolation and cluster distribution. I. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm, Physical Review B, 14, 8, 3238-3445, 1976.
- 16) Ikeda, S., Nakano, T., Nakashima, Y., Three-dimensional study on the interconnection and shape of crystals in a graphic granite by X-ray CT and image analysis, Meneralogical Magazine, 64(5), 945-959, 2000.
- 17) Smith, W.O., Foote, P.D., Busang, P.F., Packing of homogeneous spheres, Physical Review, 34, 1271-1274, 1929.
- 18) Matsushima, T., Chang, C.-S.: An elasto-plastic constitutive model of granular materials based on contact force distribution, Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media (Proc IS-Yamagushi), Hyodo, Murata, Nakata eds, Balkema, 293-298, 2006.
- 19) 竿本英貴, 松島亘志, 山田恭央、羽田野祐子: 豊浦砂の 高解像度 X 線 CT 画像を利用した三次元多孔質体モデ ルの構築および SPH による透水シミュレーション, 応 用力学論文集, 土木学会, Vol. 9, 649-657, 2006.

(2008年4月14日 受付)