

CT 値ヒストグラムに基づく複合材料の 大局的構造評価法の検討

奥村真彦^{1,*} 滝 克彦² 齋藤泰洋¹ 松下洋介¹ 青木秀之¹

¹東北大学大学院工学研究科化学工学専攻

²日本ビジュアルサイエンス株式会社

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 79, No. 10 (2015), pp. 497-503

© 2015 The Japan Institute of Metals and Materials

Method of Estimating Perspective Structure for Composite Material Based on CT Value Histogram

Masahiko Okumura^{1,*}, Katsuhiko Taki², Yasuhiro Saito¹, Yohsuke Matsushita¹ and Hideyuki Aoki¹

¹Department of Chemical Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579

²Nihon Visual Science, Inc., Tokyo 160-0022

The effect of perspective structure on the computed tomography (CT) value histogram of a three-dimensional (3D) X-ray computed tomographic image was investigated. Images of sphere bead packed beds were taken and the histograms were compared with each other. Normal distributions were fitted to histogram peaks to evaluate histogram shapes. Peaks corresponding to air and alumina were observed in histograms of alumina bead packed beds. The difference between mean values of the peaks decreased and peak standard deviations increased with decreasing bead diameter because of a stronger partial volume effect. Because of this effect, the CT value of a boundary voxel is between CT values of materials present in the voxel. Peaks corresponding to air and glass were observed in histograms of glass bead packed beds. The mean value of the air peak in glass bead packed beds was smaller than that observed in alumina bead packed beds because the specific gravity of glass is smaller than that of alumina. For beds packed with both alumina and glass beads, peak positions of each material differed from those obtained for beds packed with either alumina or glass beads. This indicates that the partial volume effect is caused by boundaries between not only air and beads but also alumina and glass beads. Therefore, the shape of CT value's histogram depends on the 3D structure of the bed. This suggests that the three-dimensional structure can be evaluated on the basis of histogram shape.
[doi:10.2320/jinstmet.J2014064]

(Received December 22, 2014; Accepted July 10, 2015; Published October 1, 2015)

Keywords: image analysis, computed tomography, composite material

1. 緒 言

近年、材料の三次元構造の観察・評価に X 線コンピュータ断層撮影法 (X-ray Computed Tomography, X 線 CT) が活用されている。X 線 CT は物質の密度に相関する CT 値を三次元的に取得し、その材料の三次元構造を非破壊かつ非接触で高分解能に捉えることが可能である。そのため、工業製品の内部欠陥の評価¹⁾、多孔質体の立体構造の観察²⁾など既に多数の適用例が存在する。一例として、宇都宮らはポーラスアルミニウムの気孔の形態を評価するため、アルミニウムと空気の CT 値の差異からポーラスアルミニウム内部の三次元構造を抽出し、その気孔体積を評価している²⁾。このように複数の物質で構成された材料を X 線 CT で撮像した後、CT 値を基準として二値化することによって、三次元像から特定の構造を抽出し評価することはよく行われている。一般に X 線 CT 三次元像から構造を抽出するためには、その構造に

対して十分な分解能が必要である。山中らは、撮像時の分解能などの条件を変化させて同一のガラスビーズ充填層を撮像し、その結果を基に X 線 CT 三次元像における二相構成材料の相分離の可能性について論じた³⁾。彼らはガラスビーズの粒径を画素 (ボクセル) の大きさと除した値がある値を下回った場合に、相分離が困難であることを報告した。また、X 線 CT を用いて三次元像を得る際、分解能が高いほど撮像視野が狭くなるため、撮像対象物を小さくする必要がある。したがって、対象の寸法を小さくすることができない場合や広い空間の構造を評価する場合は、分解能に限界が生じ、結果として二値化による評価が困難になってくる。これまで著者らは X 線 CT を用いて充填層内における合金粒子充填層の変化を観察したが⁴⁾、分解能不足のため粒子と間隙の境界が不鮮明であり、合金粒子が充填された範囲の抽出を二値化のみによって行うことは困難であった。そのため、著者らは Watershed 法をはじめとした複数の画像処理を組み合わせることで、充填層画像から粒径分布を抽出した⁵⁾。このように、三次元像の評価は二値化をはじめとした画像処理技術を組み合わせて行われることが多く、特に構造に対する分解能が不足する場合には、二値化が困難であるためにその処理が

* 東北大学大学院生、現在：仙台高等専門学校 (Graduate Student, Tohoku University, Present address: National Institute of Technology, Sendai College)

高度かつ複雑となる．そのため，三次元像に対する複雑な画像処理を伴わずに三次元構造を評価するための技術が求められている．

上記のようにその構造の複雑さに対して分解能が充分でない条件において X 線 CT を撮像すると，三次元像を構成する全ボクセル数に対し，異なる密度を持った材質の界面に位置するボクセル数の割合が大きくなる．このようなボクセルには部分体積効果(Partial Volume Effect, PVE)と呼ばれる影響が生じるため，ボクセルに含まれる全材質の密度の中間付近に相当する CT 値を示す⁶⁾．ここで，横軸に CT 値を，縦軸にその CT 値を持ったボクセル数をプロットしたグラフは CT 値ヒストグラムと呼ばれている．分解能を変化させて，同じ対象を X 線 CT で撮像すると，全ボクセル数に対する PVE を受けたボクセル数の比率が変化し，ヒストグラムの形状に変化が生じることが知られている．さらに，この PVE を受けたボクセル数の比率は構造による影響も受けるため，構造の差異がヒストグラムのピーク形状に影響を及ぼすことが予想される．特に X 線 CT を用いて微細な構造を撮像した場合，単位体積当たりの界面が増加し，PVE を受けたボクセルの比率が増加する．そのため，X 線 CT の分解能が撮像した構造よりも粗い場合，X 線 CT で撮像した三次元像のヒストグラムの形状を評価することによって，対象としている材料の三次元構造の特徴が評価できる可能性が高い．このヒストグラムの形状に基づく三次元構造の評価は，高度かつ複雑な画像処理を必要としないため，簡便な手法として期待できる．しかしながら，既往の研究において，ヒストグラムの形状に着目し，撮像物の構造を評価した例は皆無である．

このような背景のもと，本研究では CT 三次元像の CT 値ヒストグラムを基に微細な三次元構造を評価する手法について検討する．同一の分解能で構造の細かさが異なる構造を撮像し，その CT 値ヒストグラムを比較するため，粒径および材質の異なる球で構成した充填層を対象に，その X 線 CT 三次元像から取得した CT 値ヒストグラムを統計的手法によって評価することで，三次元構造がヒストグラムに及ぼす影響について詳細に検討した．

2. 実 験

ポリスチレン容器(内径 26 mm, 外径 32 mm)にアルミナ球(粒径 1 mm, 2 mm, 3 mm, 密度 $3.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)およびガラス球(粒径 2 mm, 密度 $2.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)をそれぞれ Table 1 に示す配分で充填したものを試料とした．これらの試料から得られる結果を比較することで，粒径および密度の差異による影響，および密度の異なる粒子の混合による影響を検討した．なお，本研究では同一の条件でデータを比較するために，Table 1 の上段 3 つおよび下段 3 つを充填した容器をそれぞれ Fig. 1 のように組み合わせ，何も充填されていない容器を含めて撮像した．

Fig. 1(b)の容器を対象に，その三次元像を X 線 CT 装置 SMX-225CT-SV3(Shimadzu Corporation, Japan)を用いて撮像した．その際，管電流および管電圧をそれぞれ 100 μA

Table 1 Amount of packed beads.

	Alumina			Glass
	3 mm	2 mm	1 mm	2 mm
Only 3 mm	12.1	—	—	—
Only 2 mm	—	12.5	—	—
Only 1 mm	—	—	12.8	—
Alumina	—	12.6	—	—
Glass	—	—	—	8.39
Alumina + glass	—	7.22	—	4.01

(Unit: g)

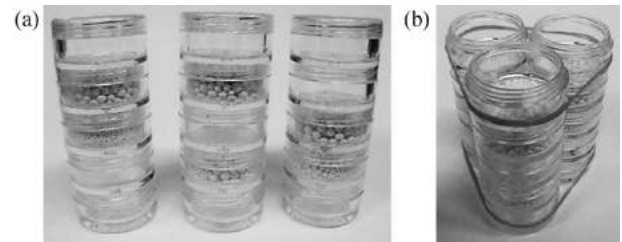


Fig. 1 Example of (a) stacked packed bed case, and (b) imaging object.

および 200 kV と設定した．撮像視野は $67 \text{ mm} \times 67 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ とした．ボクセルサイズは $0.131 \text{ mm} \times 0.131 \text{ mm} \times 0.131 \text{ mm}$ である．

得られた三次元像から，各試料に相当する充填層の中心部 $120 \times 120 \times 60 \text{ voxel}$ ($15.7 \text{ mm} \times 15.7 \text{ mm} \times 7.86 \text{ mm}$)をそれぞれ容器部分の成分を含まないように抽出し，ヒストグラムを作成した．このヒストグラムは各ボクセルの CT 値の頻度分布であり，撮像対象物を構成する各材質の密度に応じたピークがそれぞれ現れる．しかしながら，X 線 CT によって得た CT 値には物質内部の密度のムラ等による誤差が発生するため，ヒストグラム中の各ピークはある CT 値を中心に分布を持つことが予想される．一般に，このような誤差に起因する分布の形状は正規分布に従うとみなせるものが多い．そこで，本研究では，各ピークに対し正規分布をフィッティングすることでその形状を評価した．ピークが単一である場合，ヒストグラム全体との差の二乗和が最小となるように，正規分布をフィッティングした．一方，ピークが複数存在する場合には，各ピーク周辺の CT 値に対し，以下の手順で正規分布でフィッティングした．まず，最も高い CT 値側のピークに対して，Fig. 2(a)に示すように，ピークの領域を頂点付近の CT 値を境に分割し，そのうちの高い CT 値側との差の二乗和が最小となるように正規分布でフィッティングした．次に，中間に存在するピークに対し，Fig. 2(b)に示すようにヒストグラムから正規分布の値を差し引き，最も高い CT 値側に存在するピークに対し，ピーク前後の値との差の二乗和が最小となるように正規分布でフィッティングした．なお，この操作は中間のピークが存在する場合のみに行った．その後，最も低い CT 値側に位置するピークに対し，Fig. 2(c)に示すようにさらにヒストグラムから正規分布の値を差し引き，ピークの領域を頂点付近の CT 値を境に分割し，そのうちの低い CT 値側との差の二乗和が最小となるよ

う正規分布をフィッティングした。最後に、さらにヒストグラムから正規分布の値を差し引くことで、Fig. 2(d)に示すような結果を得た。このようにして得られた正規分布の標準偏差 σ 、平均値 μ および元のヒストグラムからフィッティング結果を差し引いた値(Remained Voxels)を基に、ヒストグラムの形状を評価した。

3. 結果と考察

粒径のみが異なるアルミナ粒子の充填層を比較し、X線CTで撮像した対象の構造がヒストグラムに及ぼす影響につ

いて検討する。Fig. 3に粒径3, 2および1 mmのアルミナ粒子充填層の断面像と三次元像を示す。図中の色はCT値に対応しており、白色に近いほどCT値が高く、図中の黒色の部分は空気に、灰色の部分は粒子に相当する。粒子部分に着目すると、いずれの粒径の充填層においても粒子の形状が画像から確認できる。空隙部分に着目すると、粒径3 mmの充填層の内部に粒子間の狭い間隙と、大きな空隙が存在することが確認できる。一方、粒径1 mmの場合には内部に狭い間隙が高密度に存在することがわかる。つまり、粒子の粒径が小さくなるほど、充填層の構造は細かくなるといえる。この構造の違いがヒストグラムの形状に及ぼす影響を検討するため、Fig. 3の三次元像から取得したヒストグラムをFig. 4に示す。(a)は空気のみを対象としてヒストグラムを取得した結果であり、(b)、(c)および(d)において、高いCT値の側と低いCT値の側にそれぞれピークがみられるが、アルミナの密度は空気より大きいので、これらのピークはそれぞれアルミナ粒子とその間隙の空気に由来するものである。(a)、(b)にみられる空気のピークについて、三次元像中にアルミナ粒子が存在する場合、空気のピークは高いCT値の側へシフトし、幅が広く(ブロード)になることがわかる。さらに、アルミナ粒子の粒径が小さくなるほど、ピークはより高いCT値の側へシフトし、さらにブロードになる。一方、アルミナのピークの場合にはアルミナ粒子の粒径が小さくなるほど、ピークはより低いCT値の側へシフトし、空気のピークと同様、ブロードになることがわかる。ヒストグラムに現れたこれらの変化を定量的に評価するため、Fig. 5にFig. 4で得られたCT値に対し、空気およびアルミナのピークに対してフィッティングした正規分布と、元のヒストグラムから空気およびアルミナの正規分布の値を差し引いた残ボクセル(Remained voxels)を示す。Fig. 5より、アルミナ粒子の粒径の大きさにかかわらず2つの正規分布の間には残ボクセルが存在していた。アルミナ粒子の粒径が小さくなると、残ボクセルの量が増加した。空気とアルミナ粒子のピークにフィッティングした正規分布の標準偏差と平均値をFig. 6に示す。空気のみに対してフィッティングした正規分布の標準偏差および平均値は、それぞれ102および34504であった。図より、アルミナ粒子の粒径が小さくなると、空気およびアルミナの正規分布の標準偏差が増加

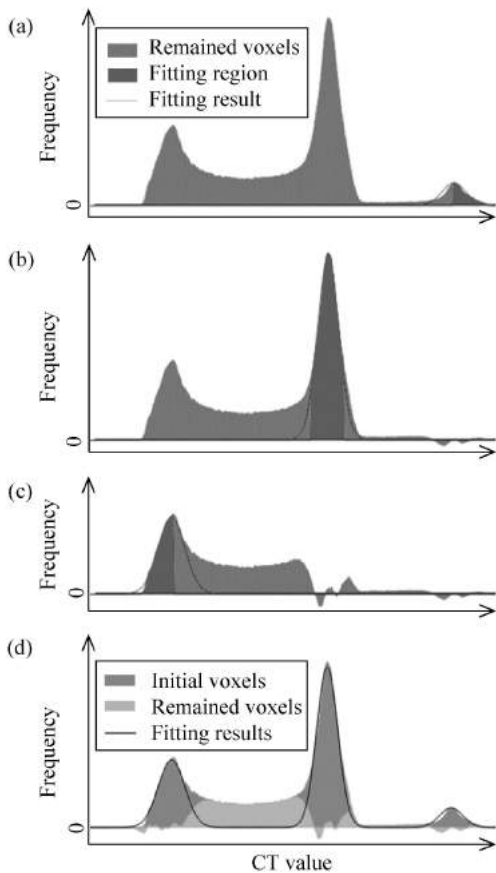


Fig. 2 Schematic of fitting procedure; (a) first, (b) second, (c) third step, and (d) result.

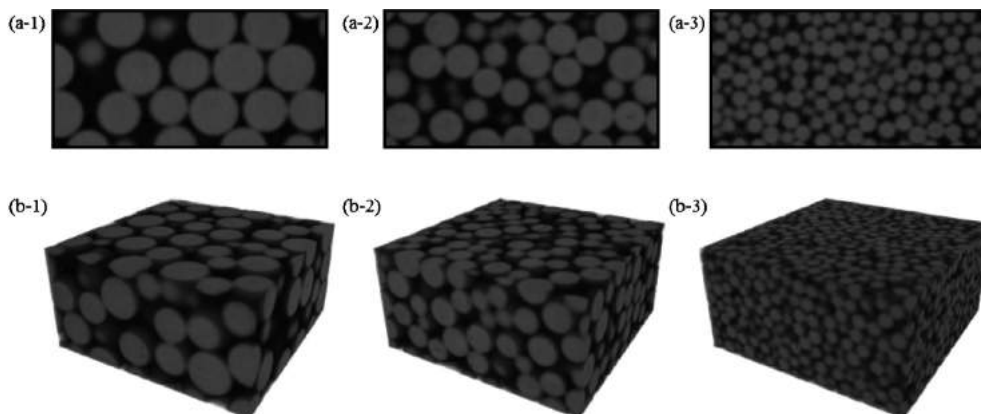


Fig. 3 (a) Cross-sectional and (b) three-dimensional images of (1) 3 mm, (2) 2 mm, and (3) 1 mm alumina bead packed beds.

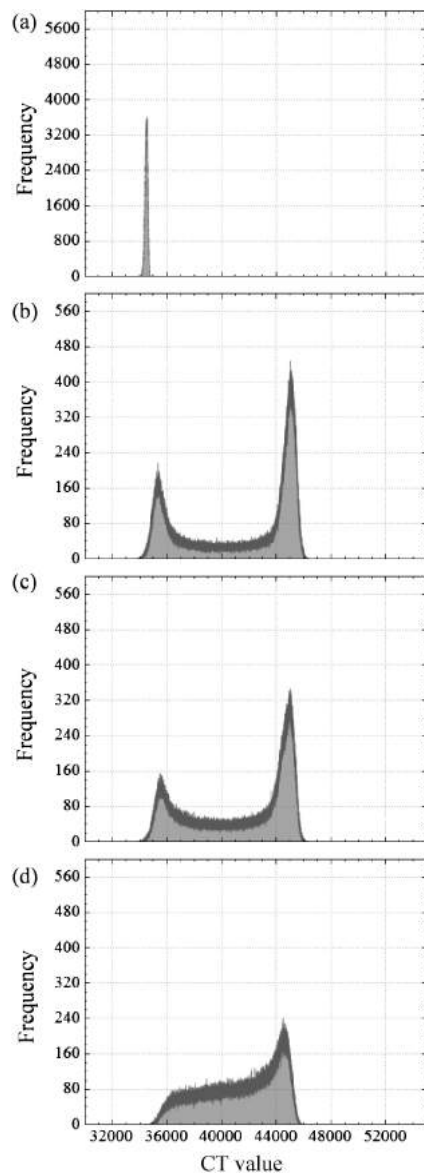


Fig. 4 Histograms of (a) air (void) and (b) 3 mm, (c) 2 mm, and (d) 1 mm alumina bead packed beds.

し、空気の正規分布の平均値は増加し、アルミナの正規分布の平均値は減少した。アルミナの場合と比較して、空気の正規分布における標準偏差と平均値は、粒径の変化がより大きく影響していることがわかる。Fig. 7 および Fig. 8 に粒径 3 mm および 1 mm のアルミナ充填層 X 線 CT 断面像の一部およびラインプロファイルを示す。Fig. 7(a) および Fig. 8(a) の X 線 CT 断面像は CT 値に応じて着色されており、残ボクセルが多かった CT 値の範囲については、Fig. 7(c) および Fig. 8(c) に示すように低い CT 値の側から青、赤、緑、黄で着色し、アルミナの正規分布に近い領域は白で着色している。Fig. 7(b) および Fig. 8(b) のラインプロファイルは、Fig. 7(a) および Fig. 8(a) 中の灰色の線分 AB 上における CT 値の変化を示している。残ボクセルが多かった CT 値を持つボクセルは、アルミナ粒子と空気の境界部分に存在する。このような境界部分では 1 つのボクセル空間に 2 つの物質が混在するため、ボクセルの CT 値がボクセルに含まれるすべての物質の密度の中間値となる、Partial Volume Ef-

fect (PVE) が生じる。つまり、残ボクセルは PVE を生じたボクセルであるといえる。Fig. 7(a) と比較して、Fig. 8(a) の X 線 CT 断面像には PVE を生じたボクセルが多く含まれる。さらに、Fig. 7(b) および Fig. 8(b) のラインプロファイルより、粒径 3 mm のアルミナ充填層と比較して粒径 1 mm のアルミナ充填層の X 線 CT 断面像における CT 値の変動が大きい。特に、ラインプロファイル中における CT 値の最大値はほぼ等しいものの、CT 値の最低値は粒径 1 mm のアルミナ充填層のほうが大きな値を示している。これは粒径 1 mm のアルミナ粒子充填層において、アルミナ粒子間の間隙が画像の分解能より狭く、PVE を生じたボクセルのみで間隙が表現されるためである。このことから、充填層を構成する粒子の粒径が小さいほど空気とアルミナのピークが近接する理由は、PVE が生じたことによって、空気およびアルミナが持つ本来の密度に対応した CT 値を示すボクセルが減少したためである。特に、アルミナと比較して空気のピークが粒径の減少に対して大きく変化したのは、アルミナ粒子で構成される構造よりも、その間隙の構造が細く解像しにくく、PVE による影響を強く受けたためである。つまり、対象とする物質の構造が細かく複雑であるほど、その物質に対応したピークの形状が分解能の変化に対して大きく変化するものと考えられる。さらに、ピークの形状を正規分布にフィッティングし、標準偏差や平均値などのパラメータを比較することで、構造の複雑性を定量的に評価できることが示された。

次に、粒径を等しくし、材質が異なる粒子から構成される充填層を比較し、材質が X 線 CT のヒストグラムに及ぼす影響について検討する。Fig. 9 にアルミナ粒子のみ、ガラス粒子のみ、およびアルミナ粒子とガラス粒子を体積比 1 : 1 で混合して充填した充填層の断面像および三次元像を示す。なお、いずれの粒子の粒径も 2 mm である。図中の色は Fig. 3 と同様に CT 値と対応している。Fig. 9 に示した粒子充填層は等粒径の粒子で構成されているため、充填層の構造については、ほとんど差異はない。一方、密度の差異により、アルミナ粒子がガラス粒子と比較して明るく表示されている。こうした条件下で、密度の差異および密度の異なる物質の混合が CT 値のヒストグラムに及ぼす影響を検討する。Fig. 10 に Fig. 9 の三次元像から取得したヒストグラムを示す。なお、Fig. 10(a) は Fig. 4(a) と同様に、空気のみを対象としてヒストグラムを取得した結果である。各材質間の密度の差異より、Fig. 10(b) および Fig. 10(c) では低い CT 値の側のピークが空気、高い CT 値の側のピークがアルミナあるいはガラスに由来し、Fig. 10(d) でのピークは低い CT 値の側から空気、ガラス、アルミナに由来する。Fig. 10(b) と (c) を比較すると、アルミナ粒子充填層よりもガラス粒子充填層から得たヒストグラムにおける空気のピークのほうがより先鋭(シャープ)であり、Fig. 10(a) に示したヒストグラムのピークの位置に近いことがわかる。また、Fig. 10(d) のガラスおよびアルミナのピークの位置は、Fig. 10(b) および (c) においてヒストグラムにそれぞれ現れたガラスおよびアルミナのピークの位置と比較して高い CT 値の側にシフトしていることがわかる。ヒストグラムに現れたこれらの変化を定量的に評価するため、Fig. 11 にヒストグラムとそれに対

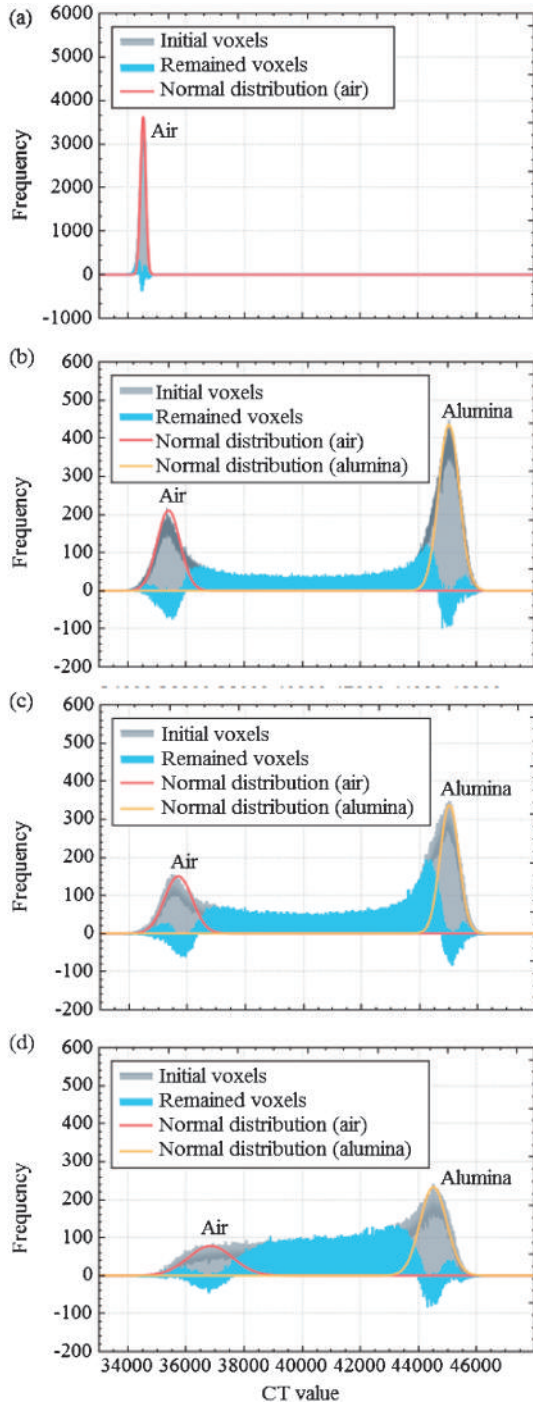


Fig. 5 Fitting results of (a) air (void) and (b) 3 mm, (c) 2 mm, and (d) 1 mm alumina bead packed beds.

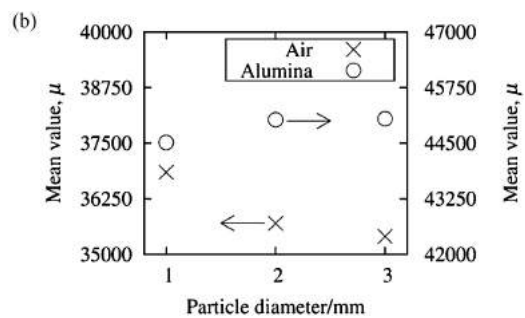
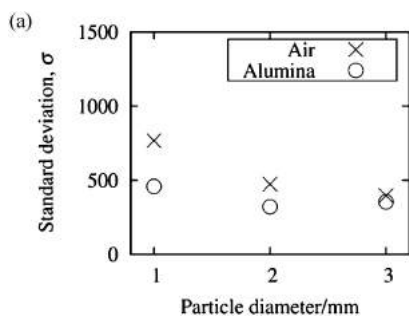


Fig. 6 (a) Standard deviation and (b) mean value of fitting results in Fig. 5.

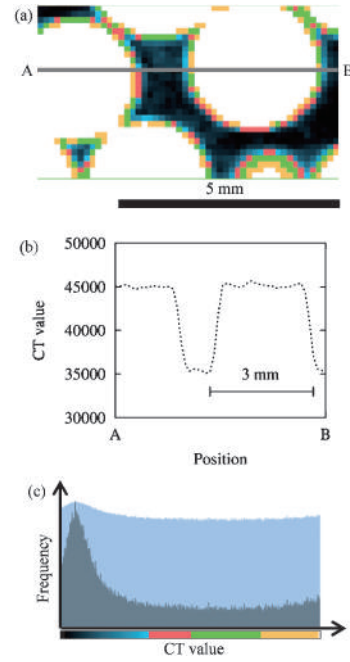


Fig. 7 (a) Cross-sectional image, (b) line profile of the 3 mm alumina bead packed bed image, and (c) contour map of (a).

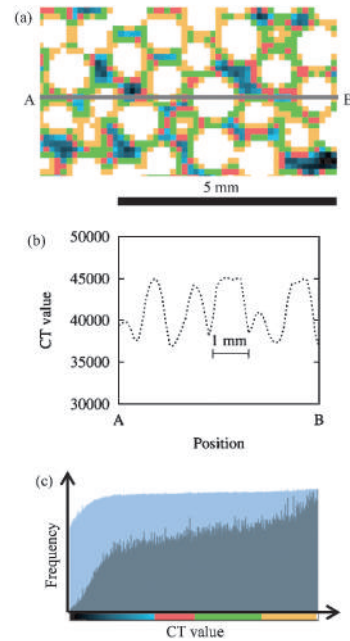


Fig. 8 (a) Cross-sectional image, (b) line profile of the 1 mm alumina bead packed bed image, and (c) contour map of (a).

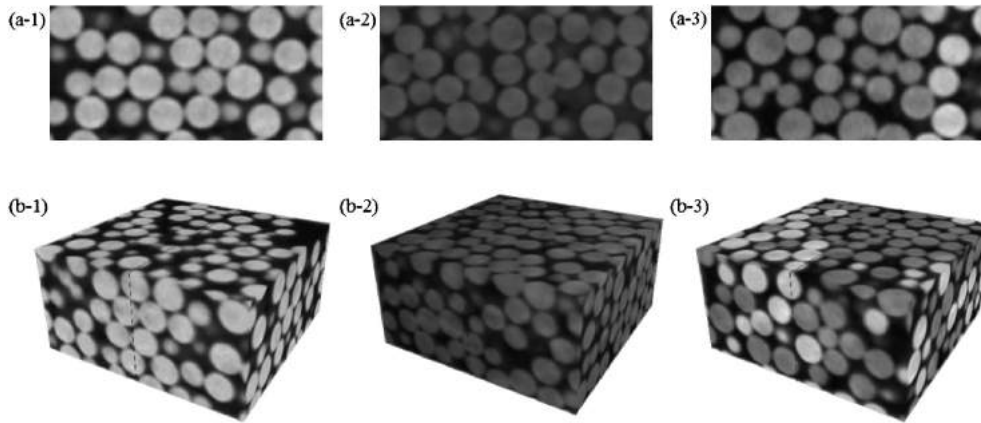


Fig. 9 (a) Cross-sectional and (b) three-dimensional images of (1) alumina, (2) glass, and (3) alumina and glass bead packed beds.

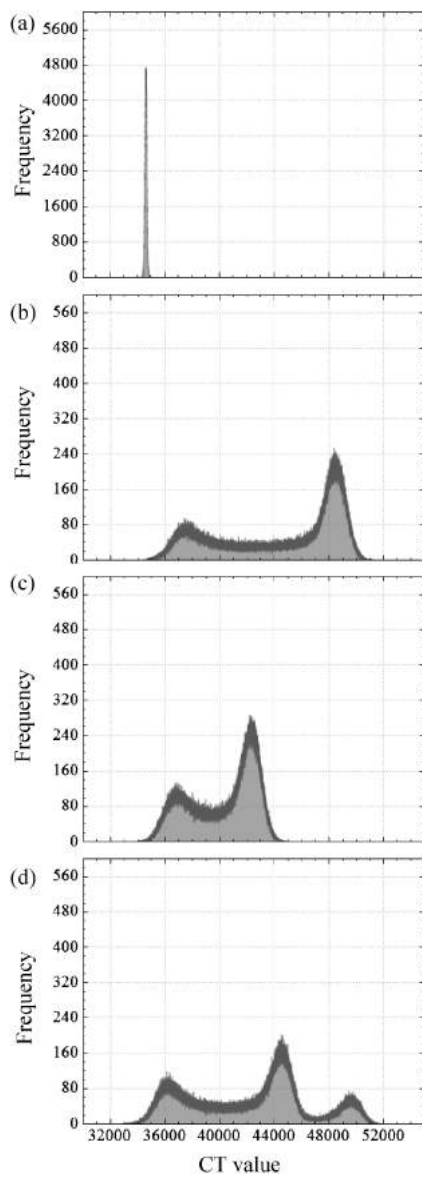


Fig. 10 Histograms of (a) air (void), (b) alumina, (c) glass, and (d) alumina and glass bead packed beds.

してフィッティングした正規分布を, Fig. 12 にフィッティングした正規分布の標準偏差および平均値をそれぞれ示す. 空気のためのピークに対してフィッティングした正規分布の標

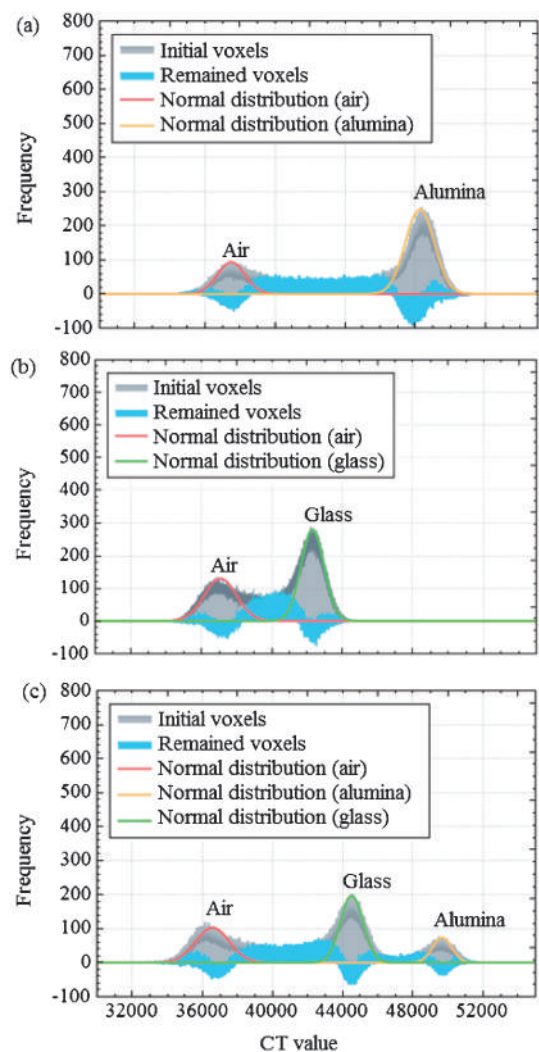


Fig. 11 Fitting results of (a) alumina, (b) glass, and (c) alumina and glass bead packed beds.

準偏差および平均値はそれぞれ 81 および 34671 である. アルミナ粒子充填層の三次元像と比較して, ガラス粒子充填層の三次元像から抽出したヒストグラムにおける空気の正規分布の標準偏差は小さく, 平均値も若干ではあるが小さな値を示した. これはアルミナよりもガラスの密度が小さいことが原因であり, 空気との境界で PVE を生じたボクセルの CT

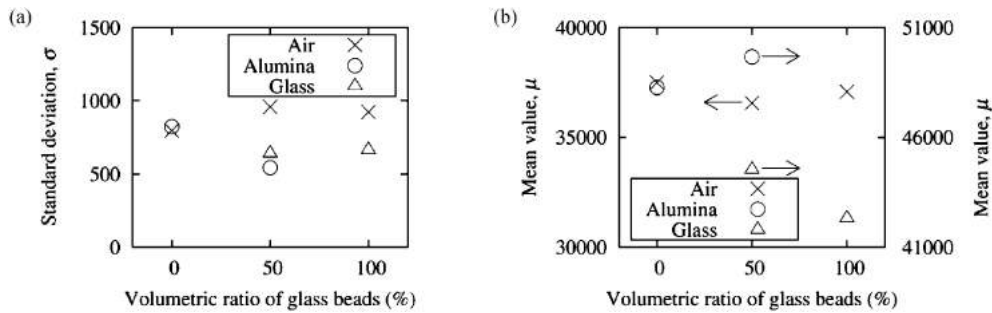


Fig. 12 (a) Standard deviation and (b) mean values of fitting results in Fig. 11.

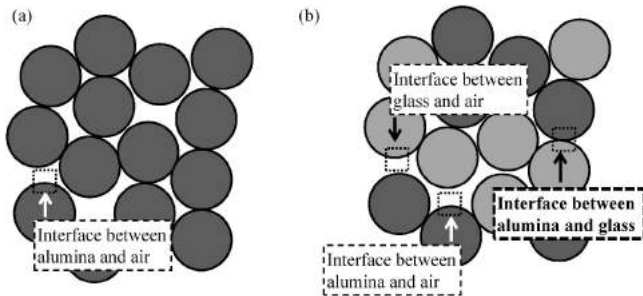


Fig. 13 Schematic of (a) alumina and (b) alumina and glass bead packed beds.

値が本来の空気の密度に対応した CT 値により近い値となり、PVE の影響が小さくなったためと考えられる。また、アルミナ粒子とガラス粒子を混合した充填層においては、Fig. 11(c) より、すべての正規分布の間に残ボクセルの存在が確認される。さらに、Fig. 12 より、アルミナおよびガラスの正規分布の標準偏差が低下し、平均値が増加している。ここで、同じ材質の粒子の充填層および異なる材質の粒子を混合した充填層について、それぞれに存在する PVE を生じる界面の概念図を Fig. 13 に示す。撮像領域中に存在する粒子個数が等しい場合、粒子の体積に対する界面の量は減少するため、各物質のピークに対する PVE の影響は小さくなり、アルミナ粒子の正規分布の位置が高い CT 値の側にシフトしたものと考えられる。また、同じ材質の粒子の充填層においては空気とその物質との間でしか PVE が生じないのに対し、異なる材質の粒子を混合した場合、それぞれの材質の粒子と空気の界面および異なる材質の粒子の界面で PVE が生じる。そのため、ガラスの正規分布の位置が高い CT 値の側にシフトしたものと考えられる。

以上より、X 線 CT 三次元像から取得したヒストグラムには、その像が含む各材質に対応したピークが現れる。しかしながら、各ピークは必ずしも各材質の密度に対応する固定した CT 値に現れるわけではなく、それらのピークの位置は三次元構造・材質の混合状態によって生じる PVE に左右される。このような傾向は、特に粒子・多孔体といった複雑構造において顕著にみられるものである。これに関して、正規分布をそれぞれの材質のピークに対しフィッティングすることで、ピークの特徴を定量的に評価することが可能である。さらに、異なる構造の三次元像を X 線 CT で取得し、そのヒ

ストグラム中に存在するピークの変化を定量的に評価することで、その構造を相対的に評価できると考えられる。

4. 結 言

本研究では、CT 三次元像の CT 値ヒストグラムを基に微細な三次元構造を評価する手法について検討するため、アルミナ球およびガラス球の充填層を種々の条件で作製し、X 線 CT 三次元像から CT 値ヒストグラムを取得してその形状を比較した。その際、ヒストグラム中に現れるピークを正規分布で近似することで評価し、三次元構造がヒストグラムに及ぼす影響について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 内部に複数の材質が混在する構造を X 線 CT で撮像した三次元像について、その CT 値ヒストグラムにおける各材質由来のピークの位置は、PVE による影響を受けるため、必ずしも材質の密度に対応する固定した CT 値に現れるわけではない。PVE による影響の大きさは構造によって異なるために、ピークは構造の特徴から影響を受ける。
- (2) X 線 CT の三次元像から CT 値ヒストグラムを取得し、各材質由来のピークに正規分布をフィッティングすることで、ヒストグラムの形状を定量的に評価することができる。
- (3) X 線 CT 三次元像の CT 値ヒストグラムの形状を定量的に評価し、比較することで、その三次元構造の複雑性を相対的に評価できると考えられる。

本研究における撮像試験は榊島津製作所にご協力いただいた。本研究は JSPS 科研費 13J06639, 24760619 の助成を受けたものである。

文 献

- 1) H. Toda, M. Kobayashi, T. Kubo, K. Moizumi, D. Sugiyama, Y. Yamamoto, T. Harada, K. Hayashi, Y. Hangai and Y. Murakami: *J. JILM* **63**(2013) 343-349.
- 2) T. Utsunomiya, K. Takahashi, Y. Hangai, S. Kawano, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: *J. JILM* **60**(2010) 590-595.
- 3) H. Yamanaka, S. Kawasaki, M. Kato, T. Mukunoki and K. Kaneko: *Japanese Geotech. J.* **6**(2011) 273-284.
- 4) M. Okumura, A. Ikado, Y. Saito, H. Aoki, T. Miura and Y. Kawakami: *Int. J. Hydrogen Energy* **37**(2012) 10715-10723.
- 5) M. Okumura, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki, Y. Kawakami and K. Taki: *J. Japan Inst. Met. Mater.* **79**(2015) 16-22.
- 6) I. Mori, H. Yamagata and Y. Machida: *CT&MRI: Principles and Technologies*, (Corona Publishing Co., Ltd., Japan, 2010).