

●画像解析による多孔質材料の 3 次元構造キャラクタリゼーション

TN542

3D Structural Characterization of Porous Materials Analysis Using Image

[概要]

“似ているのに違う”という現象は、実際の現場でよく見られる、悩ましい課題です。「見た目はそっくりでも、特性が異なる材料」や「これまでの分析手法では解決できていないクレーム」などへの対応として、当社は、X 線 CT による 3 次元観察と複数の画像解析手法を組み合わせることで、材料内部の構造や分布の違いの見える化を可能にしました。本稿では、製造条件を変えた際に、「平均構造」がどのように変化するかを比較・指標化した事例を紹介します¹⁾。

Keywords： 固形化粉末、圧縮挙動、3 次元画像、ボトルネック、連通構造

[事例]

(1) 試料および画像解析

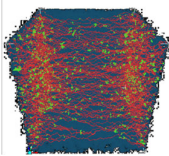
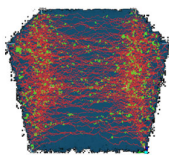
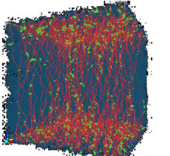
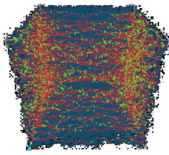
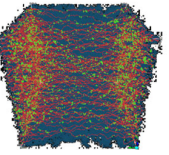
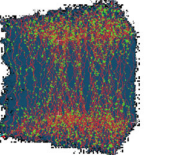
市販の粉ミルクを秤量し、試料 A では低圧圧縮、試料 B では高圧圧縮を維持するロードセルにセットし、大型放射光施設 SPring-8 にて X 線 CT 画像を取得しました。得られた三次元画像に対して、空隙構造の評価に有効な「多孔体解析²⁾」、粒子分散評価に有効な「粒子間距離解析」ならびに構造の「複雑さ」を定量的に評価できる「キュービック解析」の結果を示します。

(2) 数値化

① 多孔体解析

X 線 CT 像から抽出した空隙を細線化し、空隙の中心を通る軸（MA: Medial axis）を決定します。この MA に直交する面の中で、局所的に断面積が小さくなる部分を「Throat」と定義し、空隙ネットワークのボトルネックとして評価します。Table 1 に、それぞれの空隙 MA を赤線、Throat を緑点で、方向別表示した結果を示しています。圧密化に伴い、Throat 数は約 48 % 増加しており、製造条件の違いが空隙ネットワークの構造変化として捉えられています。

Table 1 Results of shrinking void areas to the medial axis

Sample	Throats (Counts)	X	Y	Z
A	19,622			
B	37,641			

② 粒子間距離解析

近接する粒子群に対して領域分割に基づくセグメンテーションを行い、各粒子の重心座標を算出します。その上で、隣接粒子との座標間距離を求め、各粒子から他のすべての粒子への距離のうち「最短距離」を粒子間距離としました。粒子間距離から粒子の大きさも求める事ができます。

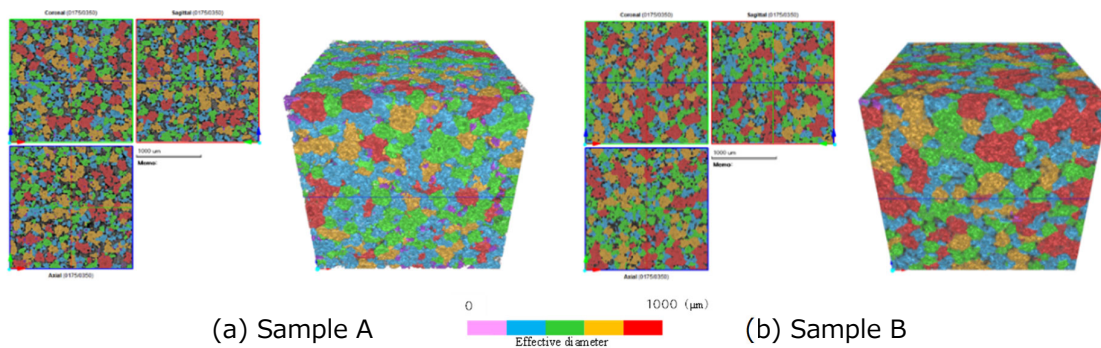


Fig. 1 Comparison of samples using inter-particle distance analysis

Fig. 1 に、粒子間距離解析におけるセグメンテーション結果を示します。粉ミルク粒子は粒径に応じて 5 段階のサイズ分割を行いました。試料 B では、圧密化に伴う粒子の粗大化が確認されました。粒子間距離の平均値は、試料 A が $44.7 \mu\text{m}$ 、試料 B が $66.0 \mu\text{m}$ であり、両者を比較すると粒子間距離の平均値は約 47.7 %増加しています。この結果から、圧縮条件の違いが粒子の配置状態や粗大化の程度に影響し、その差異を定量的に把握できることが示されました。

③ キュービック解析

Fig.2 に示すように、元の三次元画像を 8 個～343,000 個までの小さなキューブ（単位空間）に分割し、横軸に分割されたキューブ数、縦軸に材料と空隙の比率をプロットします。そして、比率変化に基づき空隙割合の高いものからソートすることで、Fig. 3 に示すような結果が得られます。

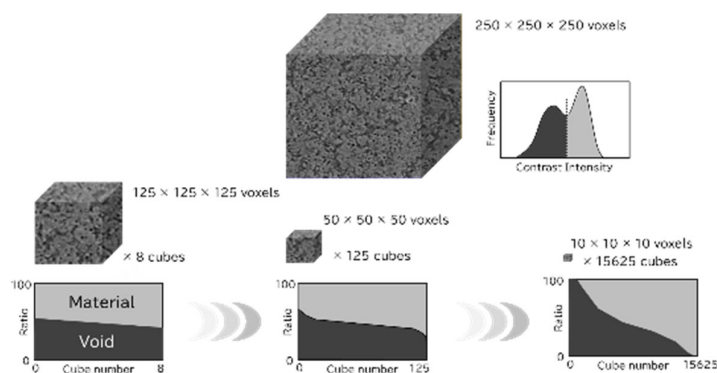


Fig. 2 Illustration of the cubic analysis.

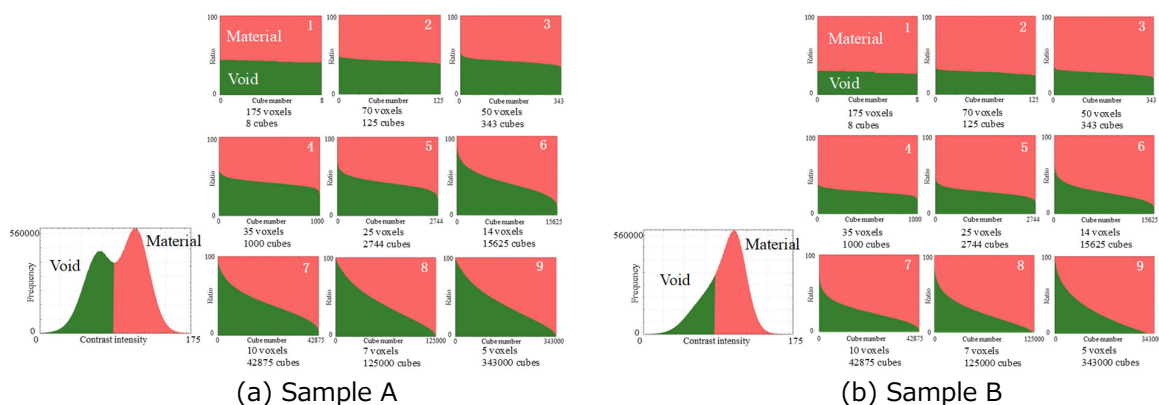
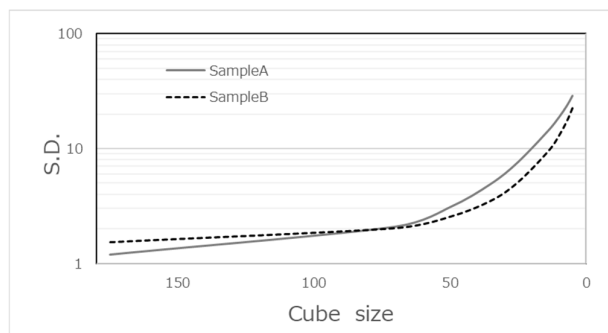


Fig. 3 The result of cubic analysis

Ratio of each partitioned area (Larger partition [1] → Smaller partition [9])

Cube size ごとに「空隙と材料の比率」の標準偏差を算出し、その変化を Fig. 4 のように比較しました。最大および最小の Cube size での標準偏差は、試料 A : 約 24 倍、試料 B : 約 15 倍となり、試料 A は試料 B に比べて約 1.6 倍大きな変動を示しました。

一般に、より緻密で複雑な内部構造を持つ試料では、Cube size を小さくしても標準偏差の変動は相対的に低い傾向があります。すなわち、試料 B は試料 A よりも相対的に複雑な構造を有していると判断できます。



(3) 差別化（キャラクタリゼーション）

各画像解析から得られた複数の数値指標を組み合わせることで、試料ごとの構造的特徴を定量的に切り分け、その違いを

Fig. 4 Transition of standard deviation of the material-to-void ratio

明確に示すことができます。例えば、空隙と Throat の直径比を比較することで、理想的な空隙設計（流体・ガスの通りやすさや保持性の良さ）がなされているかを評価できます。また、配位数の情報からは、空隙ネットワーク構造の形成状態を把握できます。各方向の曲路率の平均値のばらつき（標準偏差）から、空隙構造の異方性を評価できます。粒子径および粒子間距離は、圧密化の進行に伴って増加傾向を示しました。

以上の結果から、試料間の構造の違いがどのパラメータに起因しているかを特定するために、Fig. 5 に示すレーダーチャートで示しました。これにより、各試料の構造プロファイルを「指紋（フィンガープリント）」のように描き分けることが可能となります。最終的に、構造の独自性を「排他的」に保護するための技術的根拠としても活用しうる点が特長です。

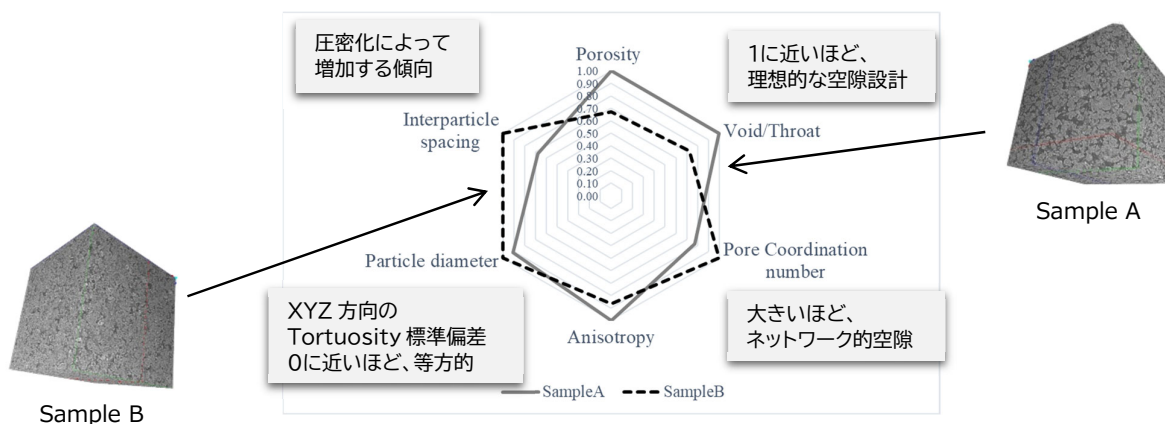


Fig. 5 Structural differences between the samples

本評価手法は食品分野に限らず、二次電池電極、セラミックス焼結体、触媒担体、ポリマー発泡体、コンクリート・セメント系材料、フィルター材料など幅広い産業分野への応用が可能です。最終的には、お客様の独自指標によるブランディング・IP 戦略までを視野に入れた、構造評価プラットフォームとしてご活用いただけます。

【文 献】

- 1) 末広省吾: *Adv. X-Ray. Chem. Anal., Japan* **57**, 55 (2026).
- 2) 特許第 5815617 号

【関連技術リンク】

リチウムイオン電池電極の 3 次元空隙ネットワーク解析と薄板積層模型の作製

<https://www.scas.co.jp/technical-topics/technical-news/qkuajm0000001g68-att/tn493.pdf>

試料情報ならびに X 線 CT 画像をご提供いただきました長瀬産業株式会社 神谷 哲氏、佐藤 貴紘氏に、心より感謝申し上げます。