

X線CTで岩石中の空隙をイメージする

中 島 善 人*

Imaging of Rock Pores by X-ray Computed Tomography

Yoshito NAKASHIMA *

Abstract

Three-dimensional measurements of the complex shapes of pores in porous rocks are essential for quantitative discussions of material transport in strata. X-ray computed tomography (CT) visualizes the three-dimensional distribution of X-ray linear absorption coefficients of rock samples, and is a useful non-destructive technique for measuring pore shape. Some examples of the application of X-ray CT to rock pore imaging are shown to facilitate petrophysical CT studies in Japan. The 3-dimensional pore images were obtained for sandy sediment, rhyolitic/andesitic lavas, and sandstone. Pore connectivity analysis and tortuosity estimate were demonstrated using sandstone image data.

Key words : permeability, pore, porosity, porous rock, tortuosity, X-ray computed tomography (CT)

キーワード : 浸透率, 間隙, 空隙率, 多孔質岩石, 屈曲度, X線CT

I. はじめに

多孔質岩石中の空隙は、地球科学上重要な研究対象である。たとえば堆積岩形成過程は、高空隙率の堆積物の圧密現象（間隙水の排出による空隙率の減少過程）が本質的である（中島・鳥海, 1996）。地下資源形成論の立場では、岩石中の空隙は流体資源（地下水、石油、天然ガス）のリザーバーとして（石戸, 2002; Tiab and Donaldson, 2004）あるいは有用金属元素を溶解している熱水の通路として重要である。また、それらの地下資源を探查する各種物理探査法の正しいデータ解釈のためにも、空隙の性質を理解することは重要である。例を挙げれば、流体で充填された空隙は、電気探査における電流の通り道として、地震

波探査における弾性波の吸収・伝播速度変化の原因として、また、核磁気共鳴（NMR）物理探査におけるプロトン緩和の場としての役割を担っている（物理探査学会, 1999）。これらの研究分野において、空隙率は地下水や石油資源量の評価に必須であり、空隙サイズは浸透率やプロトン緩和時間に強く影響し、空隙の屈曲度（tortuosity）は物質の拡散係数や地層の電気抵抗値に寄与し、空隙の比表面積は岩石・熱水間の化学反応速度・熱交換速度を左右する。したがって、岩石中の空隙形状（空隙サイズ、屈曲度、比表面積、空隙率など）の定量的な評価手法の開発は、これらすべての研究分野の発展に貢献しうる、共通基盤的な基礎研究といえる。

しかし、多孔質岩石中の空隙形状の3次元

* 産業技術総合研究所

* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

な定量計測は、これまで技術的に困難であった。そのため、空隙を通じての物質の移動を考察する時、図1のような仮想的な円柱空隙モデルが未だに頻繁に使われているのが現状である（たとえば Guéguen and Palciauskas, 1994）。図1のモデルは、ダルシー流れやフォーメーションファクター（規格化された比抵抗値）を簡単に考察するために必要な最低限の要素（空隙率、空隙サイズ、屈曲度の3要素）をかりうじて内包してはいる。しかし、現実の岩石が持っているはずのボトルネック（隘路）、デッドエンド（行き止まり）、孤立した空隙は無視されている。ボトルネックはシステム全体のダルシー流れを律速し、デッドエンドは間隙水や溶解しているイオンなどの拡散移動能力を左右するであろう。また、試料を貫く連続した空隙クラスター（パーコレーションしたクラスター）から孤立している空隙は、流体のリザーバーではあるものの、巨視的な物質輸送ルートにはなりえない。したがって、図1よりも現実的な空隙モデルの構築が求められている。

X線 Computed Tomography (CT) は、試料内部のX線吸収係数の3次元分布を可視化するものであり（たとえば西澤ほか, 1995; 中野ほか, 2000; 土山ほか, 2000）、非破壊で多孔質媒体の特性を計測できる技術として、核磁気共鳴分光法 (Dunn *et al.*, 2002) と双璧をなしている。X線CTは、とくに空間分解能の点では、最近の技術革新によって核磁気共鳴イメージング法をはるかに凌駕してマイクロオーダー (Hirano *et al.*, 1990; Ikeda *et al.*, 2004)、サブマイクロオーダー (Yasuda *et al.*, 2005) を達成し、空隙の幾何学的な形状を計測するにはうってつけの3次元非破壊イメージング技術に成長した (Wildenschild *et al.*, 2002)。この小論では、日本の岩石物性研究者にCT利用を促すため、いくつかの典型的な多孔質地質試料（砂堆積物、溶岩、砂岩試料）について、空隙の3次元X線CTイメージを紹介する。また、砂岩試料については、より踏み込んだ定量的な空隙形状の評価（空隙のクラスターラベリングと屈曲度の解析）事例 (Nakashima *et al.*, 2004) を解説する。

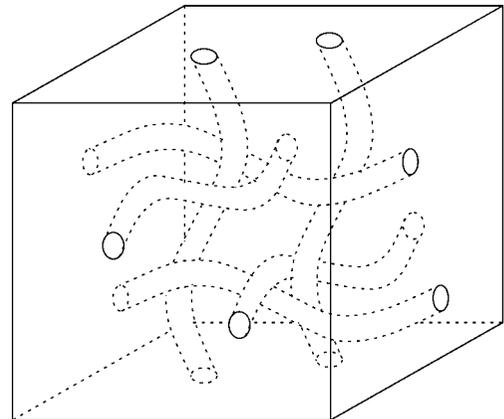


図1 多孔質媒体の円柱空隙モデル。屈曲した円柱状の空隙（パイプ直径は均一）が直交3軸方向に走っている。間隙流体や電流などはこのパイプにそって流動・拡散する。

Fig. 1 Cylindrical pore model for porous media. Tortuous equi-radii pipes run orthogonally. Pore fluid and electric current flow or diffuse in pipes.

II. X線CT計測システム

X線CT計測システムは、試料のサイズ・材質によってハードウェアが特化され、マイクロフォーカス型、医療用、工業用、放射光利用型に分化している (土山ほか, 2000)。図2は、マイクロフォーカス型とよばれるもので、約 1 cm^3 の試料を空間分解能数10ミクロンでイメージングするのに適したシステムである。図2の撮影チャンバーの内部構造の模式図を図3に示す。図3でX線ビームを扇状にしているゆえんは、幾何学的な拡大で空間分解能を上げるためである。最近では平面的な扇状ではなくて、立体的なコーンビーム（円錐状に広がったX線）を採用して3次元データ取得時間を短縮したシステムも出てきている。

X線CT撮影における生データは投影 (Projection) データと言われるもので、健康診断で撮影されるレントゲン写真のように、ある方向からX線を照射して作ったいわば試料の「影絵」である。試料をX線が透過するときX線は吸収され



図 2 マイクロフォーカス型 X 線 CT 装置。撮影チャンバーの中に、試料をセットしてイメージングを行う。X 線の制御や画像再構成は隣接したパーソナルコンピューターで行う。

Fig. 2 Micro-focus X-ray CT system. A sample is located in the imaging chamber. X-ray control and image reconstruction are conducted by a Windows PC.

るが、その吸収の程度は密度と原子番号とともに大きくなる。したがって、試料内部に密度もしくは元素組成の不均一があれば、それは検出器アレイ（図 3）に飛び込んだ光子のカウント数の不均一性に反映され、影絵（投影データ）として記録される。図 3 のように、試料を回転させながらあらゆる方向からの影絵セットを収集することが、CT 撮影作業の中身である。おおざっぱに言えば、この影絵セットは試料内部の密度・元素分布のフーリエ変換データ（波数空間データ）なので、元の実空間分布を画像再構成（インバージョン）するには、逆フーリエ変換（厳密には Back Projection 法）を行えばよい。このように Back Projection 法で投影データから再構成された CT 画像は、X 線の線吸収係数の大小を、たとえば 8 ビット（256 階調）で表示したものになる。線吸収係数とは、長さの逆数の次元を持つ量で、X 線が Lambert-Beer の法則にしたがって物体中を吸収されつつ進む場合に、X 線強度が $1/e \sim 37\%$ に減衰する間に進む距離の逆数と定義される。線吸収係数は、原子番号と密度とともに増加するの

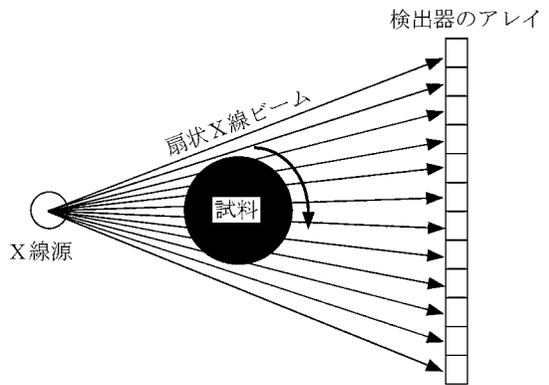


図 3 X 線 CT の撮影原理。微小な領域にフォーカスされた線源から扇状の X 線ビームが出る。X 線は、試料を通過して減衰した後に検出器のアレイに飛び込んで光子数をカウントされる。試料は回転ステージに載っており、X 線を出しながら 180 回転して、あらゆる方向からの ray path のデータセットを取得する。

Fig. 3 Principle of X-ray CT imaging. An X-ray fan beam is irradiated from a finely focused region. The X-ray penetrates the sample, and the some fractions of the X-ray photons are absorbed by the sample. The decayed ray intensity is detected by the array. The sample is set on a rotating stage. The projection data set for the ray paths from all directions are obtained by sample rotation.

で（たとえば中野ほか, 1997; Tsuchiyama *et al.*, 2005）Si や Fe 程度の原子番号からなる密度約 3 g/cm^3 の岩石固体部分と、密度がほぼ 0 g/cm^3 の空隙とでは非常に強い吸収コントラストが生じる。これが、X 線 CT が空隙の可視化に適している背景である。X 線吸収の物理と、投影データから CT 画像を再構成するインバージョンの数学については、中野ほか（2000）を参照されたい。また、CT 画像に現れる偽像（artifact）については、Ketcham and Carlson（2001）の総説がある。

CT を、堆積構造の可視化で汎用されている軟 X 線ラジオグラフィーと比較してみよう。軟 X 線ラジオグラフィーは、薄いスライス試料に法線方向から X 線を照射して、一方向のみからの影絵を作る。一方、CT は試料を回転させて（図 3）、あらゆる方向から照射した影絵セットを取得する

点が本質的に異なっている。CTは、あらゆる方向から照射する必要があるので撮影時間がかかるが、ラジオグラフィーでしばしば問題になる「前景または背景にある邪魔な物体の映り込み」を排除できるので、ターゲットの鮮明な画像を得ることができる。また、試料をスライスする必要のない非破壊検査法であるという長所を利用すれば、たとえば薄片制作などの破壊検査の前段階で試料内部の構造をあらかじめ把握したいとき、あるいは、同一試料の内部構造の時間発展を追跡したいときに有効な装置といえる。

歴史的にみれば、CTをもちいた多孔質岩石の研究は、地下資源研究の分野（石油や地熱流体の貯留岩の研究）で始まった。たとえば Wellington and Vinegar (1987) は、油田コアの空隙率の計測用および CO₂ 注入による石油の強制回収プロセスの室内模擬実験のモニタリング用として X 線 CT を採用した。中野 (1991, 1995) および中野ほか (1992) は、地熱の貯留岩などを CT してミリメートルスケールの空隙の連結性やダルシー流れを考察した。多孔質岩石中のミクロンオーダーの微小空隙を直接的に X 線 CT でイメージングしたのは、Spanne *et al.* (1994) が砂岩について行った例が最初のものである。彼らは、シンクロトロン由来の質のよい X 線源を用いて空隙率約 20% の Fontainebleau 産砂岩の空隙構造を 10 ミクロンの画素サイズで 3 次元イメージングし、その空隙構造データをもとにダルシー流れシミュレーションや電気伝導シミュレーションを行って、浸透率とフォーメーションファクターを算出した。また、比較的最近であるが、Lindquist *et al.* (2000) は、同じくシンクロトロン CT で Fontainebleau 産砂岩をイメージングし、空隙ネットワークの詳細な統計解析（分岐数や空隙パイプの長さ分布の算出）を行っている。

III . X 線 CT による多孔質地質試料のイメージングとデータ解析例

1) 空隙のイメージング

4 個の地質試料（砂堆積物 1 個、溶岩 2 個、砂岩 1 個）について、空隙の 3 次元 X 線 CT イメー

ジを紹介する。また、砂岩試料については、Nakashima *et al.* (2004) によって行われた、より踏み込んだ定量的な空隙形状の評価（空隙連結度と屈曲度の解析）を解説する。

新島の海岸には夾雑物の少ない典型的な石英砂が豊富にある。砂試料は、その新島の間々下浦海岸で採取したものをふるいで選別し粒度をそろえた（口絵 1 の図 1a）。溶岩試料は、新島の向山火山（一色, 1987）の流紋岩質溶岩（有効空隙率 58%）および秋田県澄川地熱発電所構内の焼山火山（大場, 1991, 1993）由来の安山岩質溶岩（有効空隙率 22%）である。砂岩試料は、埼玉県秩父の新第三紀層の白沙層（牧本・竹内, 1992）の砂岩である（有効空隙率 14%）。有効空隙率（effective porosity）とは、試料表面とつながっている空隙の体積分率のことであり、たとえば乾燥状態（air-filled porous rock）と水浸状態（water-saturated porous rock）の重量差から算出される空隙率である（試料表面とつながっていない孤立空隙は、有効空隙率には寄与しない）。空隙の連結性は、後述するように浸透率やフォーメーションファクターを考えると重要である。溶岩と砂岩の薄片写真を口絵 1 の図 2a, 3a, 4a にしめす。空隙を可視化するために、低粘性の青色樹脂を試料に圧入してから薄片を作成した（高橋ほか, 1992）。したがって口絵 1 の薄片写真では、青色の部分が試料表面とつながっている空隙である。砂堆積物試料（口絵 1 の図 1a）は、続成作用を受けていないので固結した岩石ではないが、砂岩の前段階と見なすことができるので、ここで取り上げる。

砂試料は、外径 10 mm 高さ 28 mm のプラスチック容器内にランダムパッキングさせた状態（有効空隙率 43%）で CT 撮影した。2 個の溶岩試料と 1 個の砂岩試料は、それぞれ直径 7.5 mm 長さ 8.1 mm、直径 4.0 mm 長さ 6.0 mm の円柱に仕上げしてから CT 撮影した。口絵 1 の図 1 ~ 3 にしめしたように、砂堆積物と溶岩は空隙サイズが大きいので比較的分解能のマイクロフォーカス型 X 線 CT でイメージングした。一方、砂岩試料は、空隙サイズが小さいので高分解能のシ

ンクロトン CT 撮影 (土山ほか, 2000) を行う必要があった。撮影所要時間 (投影データセットの取得時間) は, 砂堆積物と 2 個の溶岩は各 40 分 (投影データ数は各 1800) 砂岩は 80 分 (投影データ数は 360) であった。砂堆積物と澄川溶岩のイメージングでは X 線管球の加速電圧が 70 kV で, 新島溶岩では加速電圧が 50 kV である。これらの電圧で加速された電子のタングステンターゲットへの衝突から放出される連続および特性 X 線を光源とした。また, 秩父砂岩のイメージングでは, 8 GV で加速された高速電子から取り出した多色の放射光をモノクロメータでフィルタリングしたあとの 25 kV の単色 X 線を用いた。

投影データから再構成された 3 次元 CT 画像を口絵 1 の図 1b, 2b, 3b, 4b にしめす。それらは, 円柱試料画像システムの中心部から 256^3 又は 450^3 画素の立方体サブシステムを抽出したものである。内部構造を見せるために, 立方体の一部をえぐり取ってさらに陰影をつけてある。線吸収係数が小さい青色の画素が空隙に相当し, それ以外の色の画素は固体 (造岩鉱物) に対応している。造岩鉱物の中でも, 鉄を含まない鉱物 (石英や長石など) は, 比較的線吸収係数が低い (水色~オレンジ色の画素)。一方, 鉄を含む鉱物 (たとえば黒雲母, 輝石, ゲーサイト) は, 高い X 線吸収性のために, 図では濃い赤色に写っている。ただし, イメージング条件 (X 線のエネルギーなど) が異なると線吸収係数も異なるので, 口絵 1 の図 1b, 2b, 3b, 4b 間で画素の色を定量的に比較することは困難である。

口絵 1 図 1b では, 砂粒子同士が点接触で自重を支えている様子が見えている。口絵 1 図 2b, 3b は, とともに発泡した溶岩であるが, 流紋岩試料の方が安山岩比べてよく発泡しており, 粘性が高い餅のようにふくれ上がった泡構造がよくみえる。口絵 1 図 4b の砂岩の空隙は, 大きな空隙と小さな空隙のバイモーダル分布に分化したように見える (別途実施した NMR プロトン横緩和時間解析結果もこの解釈を支持している)。このことは, 最初は口絵 1 図 1b のような単純な空隙構造をもつ堆積物状態 (点接触状態) であったのが,

長い年月にわたる圧密やセメンテーションで空隙が部分的につぶされて, 複雑な形状の空隙に進化したことを示唆している。このように, 口絵 1 図 1a, 2a, 3a, 4a では平面的にしか見えなかった空隙構造が, 口絵 1 図 1b, 2b, 3b, 4b では複雑な 3 次元ネットワークとして視覚的に鮮やかに見えている点に注意されたい。これが, X 線 CT の威力である。

空隙サイズのバイモーダル分布を示唆している口絵 1 図 4b の砂岩について, 空隙構造をズームアップしてみよう。口絵 1 の図 5 は, 口絵 1 の図 4b の一部の領域を抽出・拡大したものである。バイモーダル分布の正体は, この図のように比較的大きな空隙 (A, B) と両者を接続している比較的小さなサイズの空隙 (ボトルネックとデッドエンド) である。空隙 AB 間の物質移動を考えると, 実線で囲ったボトルネックと点線で囲ったデッドエンド空隙の存在が重要である。ボトルネックのサイズはダルシー流れを律速し, デッドエンドは間隙水や溶解しているイオンなどの拡散移動能力を低下させるからである。図 1 と口絵 1 の図 5 を見比べると, いかにも現実の岩石の空隙が複雑であり, それに対してボトルネックとデッドエンドのない図 1 がいかにも現実とかけ離れたモデルであるかが分かる。

2) 空隙の連結性解析

口絵 1 の図 1b, 2b, 3b, 4b のような空隙形状を単に眺めて鑑賞するだけでなく, さらに一歩進んだ定量的な解析 (空隙のクラスターラベリングと屈曲度の解析) をしてみよう。空隙のクラスターラベリングとは, 空隙画素同士の連結性 (図 4) を調べて, つながっている画素を一つのクラスターとみなして, すべての空隙画素をどれかのクラスターに帰属させる作業である (スタウファー・アハロニー, 2001)。孤立した空隙中の物質は, 空隙内部に封じ込められて, 遠方に移動することは困難である。一方, 試料全体を貫く連結した空隙クラスター (パーコレーションクラスター) は, 空隙沿いに流体や電流が遠距離を移動するので, 巨視的な系の浸透率やフォーメーションファクターに寄与できる。このように, 空隙が

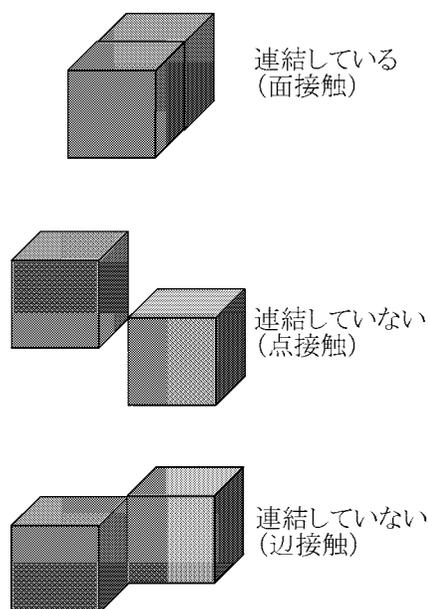


図 4 単純立方格子状の3次元画像システムにおける空隙画素の連結性の判定基準。立方体の画素の面同士が接しているときのみ、その空隙画素同士は「連結している」とみなす。「連結している」とは、クラスターを形成しているということであり、空隙がもしも水で満たされていたら、水分子がダルシー流れやランダムウォークで画素を飛び越えて自由に移動できるという意味である。

Fig. 4 Criterion of pore voxel connectivity in a 3-dimensional simple cubic image system. Adjacent voxels are judged to be "connected" when they share a face. Voxels are "not connected" when they contact an edge or vertex. The connected pore voxels form a single pore cluster, and pore fluid molecules can migrate within the pore cluster by Darcy flow or diffusion.

連結しているかどうかは、空隙に沿った物質の巨視的な移動を考える時重要である。そこで秩父砂岩試料について、空隙の連結度を解析して、すべての空隙クラスターを数え上げてみた。画素の連結性の判断基準(図4)は、クラスターラベリングの一般的なルール(Ikeda *et al.*, 2000)にしたがった。

口絵1の図4bをクラスターラベリング解析し

て空隙を分類した結果を、口絵1の図6aにしめす。茶色の空隙(450³画素からなる画像システムにしめる体積分率は1.4%)は、孤立した空隙であり、画像システムを横切るような長距離の物質移動には貢献できない。緑色の空隙(体積分率は有効空隙率と同じ値、14%)は、最大空隙クラスターであり、それに沿って物質は遠距離移動できる。ダルシー流れなどの巨視的な物質移動シミュレーションは、この緑色のクラスター上で行うべきである。紫色の微小クラスター(体積分率は0.4%)は、今回のクラスターラベリング結果では緑色のクラスターとは連結していないと判断されたものである。しかし、紫色のクラスターは、茶色のクラスターとは異なり、450³画像の六面体システムの表面に顔を出している。したがって、もしも450³画素より大きなシステムサイズのCT画像を撮影していれば、緑のクラスターとつながっている可能性があり、いわば茶色が緑色かどちらに塗り分けるべきか厳密には判断できない空隙である。幸いなことに、紫色の画素は450³画像システムでわずか0.4%の空隙率にしか寄与しないので、緑色の最大クラスター(14%)にくらべて無視できる。口絵1の図6bは、図6aの一断面であるが、Cの緑色の空隙がDの緑色の空隙とはつながっているがEの茶色の空隙とはつながっていないことをしめしている。これは、口絵1の図2a, 3a, 4aのような薄片の2次元観察からでは原理的に判断できないことがらである。このように図6bは、空隙構造の研究における3次元解析の重要性を例証している。

秩父砂岩中の茶色と紫色の微小空隙クラスターは、全部合わせても空隙率として1.8%の寄与しかないが、数は122,206個もあるので統計を取ってみよう。興味深いことに、これらの微小空隙クラスターの体積と表面積を両対数プロットすると、べき乗に従うことが分かった(図5)。秩父砂岩もかつては口絵1の図1bの新島の砂堆積物のような空隙状態であったと思われる。球形をした砂粒子の堆積物では、六面体画像システムの8つの隅と砂粒子内部の空洞をのぞいて、すべての空隙がパーコレーションクラスター(緑色)であ

り、茶色や紫色の孤立空隙は存在しえない。その後の続成作用（圧力溶解やセメンテーション）によって砂粒子の点接触状態が徐々に面接触に変化し、空隙が次第に縮小・孤立していくと、口絵1の図4bのような複雑な空隙構造に進化する。その状態の孤立空隙（茶色および紫色）が、べき指数0.79のラインに乗っている（図5）。体積 - 表面積プロットにおけるデータ点の理論的な上限値（両対数プロットで傾き1）を与える空隙構造の種類は一義的に決められるものではないが、たとえば一直線状にのびている空隙構造がそれである。一方、下限値（傾き2/3 ~ 0.67）は、球形の空隙に対応する。秩父砂岩データの傾き0.79は、両者の中間の値であり、続成作用における空隙変化のなんらかの物理過程を反映しているものと思われる。122,206個の孤立空隙の中にはX線検出器のノイズ起源のゴーストも含まれている可能性があり（とくにわずかに数画素から構成されている小さいクラスターはその疑いが強い）、今後丁寧な解析作業が必要である。しかし、圧密やセメンテーションによる空隙の縮小・孤立プロセスの進化の軌跡が図5の平面でどのように記述できるかは、堆積岩岩石学における重要な研究テーマになりそうである。

3) 屈曲度解析

秩父砂岩の空隙の屈曲度を計算機シミュレーションで調べた例を紹介する。屈曲度の定義としては、電気伝導度（Guéguen and Palciauskas, 1994）や図1の空隙パイプ長さの比（石戸, 2005）で定義する流儀もあるが、このシミュレーションでは拡散係数の比としての定義を採用する。すなわち流体で満たされた多孔質岩石を考えた時、屈曲度とは、自由空間（空隙率100%のバルクの流体）における自己拡散係数を、岩石空隙中の流体分子の自己拡散係数で割ったものである。これで定義された屈曲度は、石戸（2005）の定義する迂回率 τ を自乗したもの（ τ^2 ）に相当する。屈曲度は、パイプ中の間隙流体分子（および溶存しているイオン）の拡散移動能力を支配し、フォーメーションファクター値にも影響を及ぼす重要な量である。また屈曲度は、NMR物理

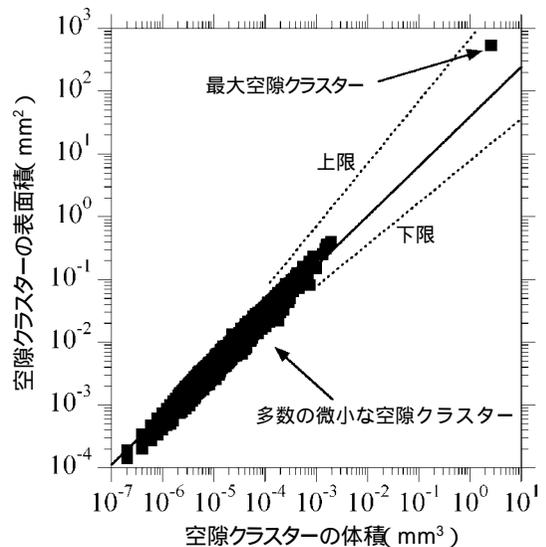


図5 秩父砂岩画像システム（口絵1の図4b, 450^3 画素 = 2.6^3 mm^3 ）中の空隙画素のクラスターラベリング結果。122,207個の空隙クラスターが確認された。体積が最大のもの（口絵1の図6の緑の画素）が突出しており、全空隙画素の89%をしめる。残り11%を、多数（122,206個）の微小な空隙クラスターで奪い合っている。最大空隙クラスター以外のすべての空隙クラスターの分布をべき乗関数で最小自乗フィッティングしたら（実線）、傾きつまりべき指数は0.79であった。十分大きなクラスターに関する理論的な上限値（傾き1）と下限値（傾き2/3）を点線で表示してある。

Fig. 5 Results of cluster labeling analysis for pores in Chichibu sandstone (450^3 voxels = 2.6^3 mm^3). 122,207 pore clusters were identified. The largest pore cluster (green) occupies 89% of the pore voxels; the total volume fraction of the isolated clusters (brown and purple) is as small as 11%. The distribution of the pore clusters is fitted by a power law function using the least-squares method to obtain an exponent of 0.79. The theoretical upper/lower bounds for sufficiently large clusters are also indicated.

探査（中島, 2002）によって原理的に野外で原位計測できる基本データであり、さらに浸透率にも換算できる重要な量（Nakashima and Watanabe, 2002）である。

間隙流体分子の自己拡散係数を求めるために

は、ランダムウォークシミュレーションを行う必要がある。ここでは、lattice walk といわれる、離散格子的に並んでいる3次元画素システム中で固体部分の画素を避けてランダムに方向を変えながら1画素づつ渡り歩くアルゴリズムを採用した。ただし、今回の秩父砂岩データのようにボトルネックサイズと画素サイズがほぼ同じオーダーの時に lattice walk を行うときは、画素サイズの有限性に起因するアーチファクトが発生し、屈曲度が過大評価される可能性があるので注意が必要である。このアーチファクトを防ぐためには、画素のオーバーサンプリング(再分割)による補間が有効である。

ここでは、オリジナルの画像システム(450³画素 = 2.6³ mm³)の各画素(5.83³ μm³の立方体)を2 × 2 × 2 = 8個, 3 × 3 × 3 = 27個, 4 × 4 × 4 = 64個の3通りに再分割した、見かけ上高分解能な画像データセット上でランダムウォークを行った(したがって、再分割された画像システムのサイズは、それぞれ900³画素 = 2.6³ mm³, 1350³画素 = 2.6³ mm³, 1800³画素 = 2.6³ mm³である)。分割数を3種類採用したのは、分割数の大小の屈曲度への影響を調べるためである。また、参考までに、オリジナルの画像システム(450³画素)でもランダムウォークを行った。時間ステップ(無次元)の上限は、たとえば、450³画素のケースでは1,000,000とし、1800³画素のケースでは16,000,000とした。各ケースについて、100,000個のウォーカーを放出して平均自乗変位を時間の関数として求めた。平均自乗変位は、その平方根が特徴的な移動距離を意味し、またその時間微分から自己拡散係数を求めることができるので、重要な基本量である。指定した時間ステップの上限までにウォーカーが正六面体画像システムの表面に到達したら、そのウォーカーの計算を打ち切って次のウォーカーのシミュレーションに移った。

1800³画素上でのランダムウォークは、32ビットOSのパソコンではメモリ不足で実施できない。そこで、8GBのメモリを搭載したクロック数1.4GHzのIntel Itanium2をCPUにもつ64

ビットマシンでランダムウォークを行った(Intel Cコンパイラ ver. 9を使用)。計算所要時間は、たとえば、450³画素のケースでは2時間かかり、1800³画素のケースでは35時間かった。なお、大量の乱数を発生させるシミュレーションでは、優れた疑似乱数生成アルゴリズムを用いることが肝要である。ここでは、メルセンヌ・ツイスター(Matsumoto and Nishimura, 1998)という従来にはない長周期、高次元均等分布を持つアルゴリズムを採用した。

緑色の最大空隙クラスター上でランダムウォークを行った結果を図6にしめす。ランダムウォークの軌跡の例が図6aで、100,000個のウォーカーを3次元画像システムの中央から放出して平均自乗変位を時間の関数として表したのが図6bである。すべてのウォーカーはいつかは画像システムの外側へ漏れ出していくが、図6bでは、100,000個すべてが画像システム内部にとどまっている時間帯のデータについてのみ表示してある(この時間帯の平均自乗変位データは、直線に乗るので解析しやすい)。ウォーカーが画像システム表面に到達する時間は、システムサイズの2乗に比例するので、画素数が大きい(再分割数が大きい)ケースほど長大なデータが表示されている。縦軸の長さの単位は、再分割された立方体画素の一辺の長さである(たとえば再分割しない場合なら5.83 μm, 4 × 4 × 4分割した場合は1.46 μm)。こうすれば、画素の実長の値にかかわらず、すべての分割ケースのデータを一つのグラフで定量的に議論できる。自由空間(空隙率100%)のlattice-walkでは、平均自乗変位は傾き1の直線になることが理論的に分かっている。したがって、屈曲度は、図6bのデータの傾き(時間微分)の逆数である。図6bを見ると、砂岩中のランダムウォークの初期には、平均自乗変位は自由空間の場合のように短時間で変位が増加しているが、やがて空隙の屈曲性のためにウォーカーの移動が妨げられ増加速度は頭打ちになり、一定の傾きをもった直線に落ち着いている。この初期の過渡的な急激な変位増加は、ウォーカーの移動距離が空隙サイズより小さいかほぼ同じオーダー

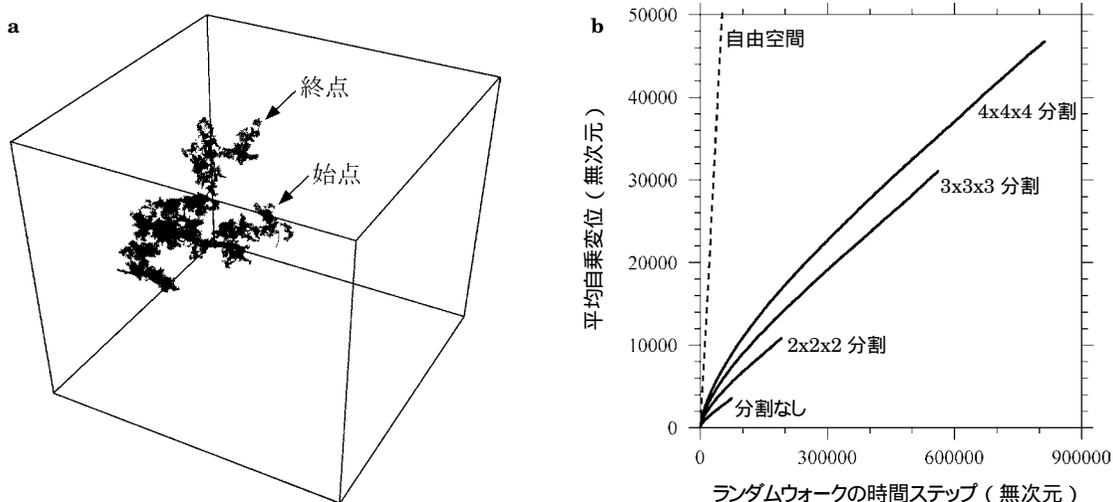


図 6 秩父砂岩中の最大空隙クラスター（口絵 1 の図 6 の緑色の画素）上での 3 次元ランダムウォーク。(a) 450^3 画素 = 2.6^3 mm^3 の画像システム中での 1,000,000 時間ステップにわたる軌跡の例。ランダムウォークの始点と終点を矢印で示した。(b) オリジナルの 450^3 画素データをオーバーサンプリング（再分割）したデータセットに関する、100,000 個のウォーカーの平均自乗変位。比較のため、自由空間（空隙率 100%）における理論値（傾き 1 の点線）と分割なし（オリジナルの 450^3 画像システム）のケースのデータも示してある。

Fig. 6 3-dimensional random walk (lattice walk) on percolation pore cluster (green voxels) in Chichibu sandstone. (a) Example of a 3-dimensional trajectory (1,000,000 time steps). Start and goal of the lattice walk are indicated by arrows. (b) Mean-square displacement averaged over 100,000 walkers for the original (i.e. 450^3) and 3 over-sampled image systems as a function of the integer time step. A theoretical mean-square displacement (broken line) for the random walk in the free space (porosity 100%) is also shown for comparison.

の時に起こる現象である。この時間帯のデータを解析すれば空隙の比表面積の推定が可能である (Nakashima *et al.*, 2004) という意味で興味深いものであるが、ここではその解析は割愛する。再分割なしのケースも含めて計 4 ケースについて、平均自乗変位が直線的な増加状態に落ち着いた時間領域を選んでその直線の傾きを最小自乗法で決定し、その逆数を屈曲度とした。その結果、オーバーサンプリング（再分割）なし、 $2 \times 2 \times 2 = 8$ 個分割、 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 個分割、 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 個分割のケースの屈曲度は、それぞれ、24, 21, 21, 21 になった。オーバーサンプリングしない場合だけやや高めの値になったが、オーバーサンプリングすれば、再分割数によらない値、21, に収束したので、この値を真の屈曲度と結論づけた。

口絵 1 で図 4b の砂岩を図 1b の砂堆積物と比

べると、図 5 で述べたように孤立空隙が増えるだけでなく、パーコレーション空隙クラスターの屈曲度も増大していることが定性的にわかる。砂堆積物での点接触が面接触になり空隙構造が複雑になると、ランダムウォーカーはデッドエンドで引き返したり狭いボトルネックを経由しないと（口絵 1 の図 5）遠距離を移動できないからである。その結果、等大粒子のランダムパッキングの屈曲度は 2 弱だが (Nakashima and Watanabe, 2002) 秩父砂岩では 21 に増大した。ところで、Nakashima *et al.* (2004) の lattice walk シミュレーションではオーバーサンプリングをせずにオリジナルの画像システム (450^3 画素) 上でシミュレーションを行った結果、秩父砂岩の屈曲度を 21 でなく 23 と見積もってしまった。これは、上述のアーチファクトが原因と思われる。ここに記して訂正するものである。

上記の秩父砂岩の屈曲度値, 21, は, 同じ岩石ブロックから切り出した供試体について, 他の手法 (非吸着性の臭素およびヨウ素イオンの拡散実験) でもとめた値 (それぞれ 3.4, 4.7) よりかなり大きい。この食い違いの理由として以下の 2 つが考えられる。まず, 天然試料のもつ不均一性である。屈曲度の値 21 はわずかに 2.6^3 mm^3 という小さな体積しかない試料からのデータである。一方, 拡散実験で用いた供試体のサイズは, それより体積が数万倍も大きい。CT 用試料選定の際, 特別に屈曲度の高い「異常な」部位を岩石ブロックから切り出してしまった可能性は否定できない。もう一つの原因として, 今回使用したシンクロトロン CT システムの空間分解能 (立方体画素のサイズは $5.83 \mu\text{m}$) の有限性が考えられる。水銀ポロシメーター分析によれば, 秩父砂岩にはサブミクロンサイズの空隙が少なからずあることがわかっている。画素サイズ $5.83 \mu\text{m}$ の CT では, かならずしもそれらを検知できない。これらの微小な空隙のネットワークは, 巨視的なダルシー流れには寄与しないが拡散係数 (およびフォーメーションファクター) には無視できない影響を与える可能性がある (Auzerais *et al.*, 1996)。今回は画素サイズ $5.83 \mu\text{m}$ の CT 画像を用いたが, 最近の技術開発によって画素サイズがサブミクロンのシンクロトロン CT システムが完成しており (Yasuda *et al.*, 2005), それを用いればより実測値に近い屈曲度を与えるような空隙の高分解能イメージングができるであろう。

IV. おわりに

X 線 CT による多孔質岩石の解析例をいくつか紹介した。これらの例によって, CT の岩石物性研究への有効性や将来性を理解していただけたことと思う。今回は単に空隙に空気が充填されている乾燥試料の空隙構造を可視化するだけの研究例を紹介したが, アイデアと工夫次第ではいろいろな使い方ができる。たとえば, 空隙に高い原子番号の造影剤を注入すれば, 空隙をより感度よくイメージングできる (PyrakNolte *et al.*, 1997; Ikeda *et al.*, 2004)。また, 単に静置した試料のイ

メージングをするのではなく, 動的な変化を観察するという使い方もできる。たとえば, 試料に応力をかけて変形・破壊させたり (Colletta *et al.*, 1991; Kawakata *et al.*, 1999; Takemura *et al.*, 2004), 加熱したり (Geraud *et al.*, 1998; Polak *et al.*, 2003), 物質を拡散させたり (Nakashima, 2000; Nakashima and Watanabe, 2002), 流体を流したり (Wellington and Vinegar, 1987; Hicks *et al.*, 1994; Hirono *et al.*, 2003), 化学反応を観察したり (Mikami *et al.*, 2000) することができる。このように, X 線 CT は非破壊モニタリング装置として室内岩石物性実験に適した装置といえる。

しかし, 読者がこの小論を読んで実際に CT 研究に参入する場合, 2 つの現実的な問題, () どうやって CT 装置を入手するか, () 3 次元画像処理をどうやって行うか, に直面するであろう。() については, 技術革新によって一昔前に比べればかなりリーズナブルな価格になってきており, 大きな大学なら共同分析センター用として購入できるであろう。あるいは, 千葉県柏市の東葛テクノプラザや兵庫県佐用郡の (財) 高輝度光科学研究センターでは, マシントimeを申請して CT システムを借用することも可能である。() については, 生の CT 画像をもとに空隙のクラスター解析 (図 5), 酔歩シミュレーション (図 6), prolate/oblate に歪んだ空隙の楕円体フィッティング (Ohtani *et al.*, 2001) 等を行おうとしても, 市販の 3 次元画像解析ソフトでは対応できない (できたとしても高価すぎる) ことが多い。かといって, プログラミングが必ずしも得意でない研究者が複雑で長いプログラムを作成するのは困難であり, これが岩石物性研究者が CT を使わない一因になっていると思われる。学術雑誌 Computers & Geosciences や研究者の個人ホームページ (たとえば <http://staff.aist.go.jp/nakashima.yoshito/index.htm>) では無料で 3 次元画像処理オリジナルプログラムを公開しているので, それを利用するののも一つの方法である。

空隙の形状把握は, 多孔質岩石中の物質移動の定量的理解にむけての第一歩である。たしか

に CT 装置は高価で、膨大な 3 次元画像データ処理は骨が折れるうえに、画像再構成理論や X 線の吸収の物理も難解である。しかし、貯留層の輸送特性や物理探査データ解釈を研究する者にとって、空隙構造を 3 次元的に計測することは、避けて通れない基本中の基本の作業である。岩石物性を研究する者は、空隙をありのままに（つまり図 1 でなく口絵 1 の図 5 として）把握する努力を怠ってはいけない。X 線 CT はそのための有効な武器である。

謝 辞

西澤 修氏からは有益な査読コメントをいただいた。中野 司氏と雷 興林氏には、ランダムウォークシミュレーションと口絵の顕微鏡写真撮影でそれぞれお世話になった。秩父産の砂岩の X 線 CT 画像は、(財)高輝度光科学研究センターの大型放射光施設 (SPring-8) のビームライン BL20B2 の CT システム「SP- μ CT」で撮影された(課題番号 2001B0501-NOD-np)。本研究の一部は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

文 献

Auzerais, F.M., Dunsmuir, J., Ferréol, B.B., Martys, N., Olson, J., Ramakrishnan, T.S., Rothman, D.H. and Schwartz, L.M. (1996) Transport in sandstone: a study based on three dimensional microtomography. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 705-708.
 物理探査学会 (1999) 物理探査ハンドブック. 物理探査学会.
 Colletta, B., Letouzey, J., Pinedo, R., Ballard, J.F., and Balé, P. (1991) Computerized X-ray tomography analysis of sandbox. models: examples of thin-skinned thrust systems. *Geology*, **19**, 1063-1067.
 Dunn, K.-J., Bergman, D.J., and Latorraca, G.A. (2002) *Nuclear Magnetic Resonance Petrophysical and Logging Applications*. Pergamon.
 Geraud, Y., Mazerolle, F., Raynaud, S., and Lebon, P. (1998) Crack location in granitic samples submitted to heating, low confining pressure and axial loading. *Geophys. J. Int.*, **133**, 553-567.
 Guéguen, Y. and Palciauskas, V. (1994) *Introduction to the Physics of Rocks*. Princeton University Press.
 Hicks, P.J., Narayanan, K.R. and Deans, H.A. (1994) An experimental study of miscible displacements in heterogeneous carbonate cores using X-ray CT. *SPE Form. Eval.*, **9**, 55-60.
 Hirano, T., Funaki, M., Nagata, T., Taguchi, I.,

Hamada, H., Usami, K. and Hayakawa, K. (1990) Observation of Allende and Antarctic meteorites by monochromatic x-ray CT based on synchrotron radiation. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites*, **3**, 270-281.
 Hirono, T., Takahashi, M. and Nakashima, S. (2003) In situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT. *Eng. Geol.*, **70**, 37-46.
 Ikeda, S., Nakano, T. and Nakashima, Y. (2000) Three-dimensional study on the interconnection and shape of crystals in a graphic granite by X-ray CT and image analysis. *Miner. Mag.*, **64**, 945-959.
 Ikeda, S., Nakano, T., Tsuchiyama, A., Uesugi, K., Suzuki, Y., Nakamura, K., Nakashima, Y. and Yoshida, H. (2004) Nondestructive three-dimensional element-concentration mapping of a Cs-doped partially molten granite by X-ray computerized tomography using synchrotron radiation. *Amer. Miner.*, **89**, 1304-1312.
 石戸経士 (2002) 地熱貯留層工学. 日本地熱調査会.
 石戸経士 (2005) 岩石の輸送特性と貯留層工学. 地学雑誌, **114**, 885-900.
 一色直記 (1987) 新島地域の地質. (5 万分の 1 地質図幅) 地質調査所発行.
 Kawakata, H., Cho, A., Kiyama, T., Yanagidani, T., Kusunose, K. and Shimada, M. (1999) Three-dimensional observations of faulting process in Western granite under uniaxial and triaxial conditions by X-ray CT scan. *Tectonophysics*, **313**, 293-305.
 Ketcham, R.A. and Carlson, W.D. (2001) Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Comp. Geosci.*, **27**, 381-400.
 Lindquist, W.B., Venkatarangan, A., Dunsmuir, J. and Wong, T.-F. (2000) Pore and throat size distributions measured from synchrotron X-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones. *J. Geophys. Res.*, **105**, 21509-21527.
 牧本 博・竹内圭史 (1992) 寄居地域の地質. (5 万分の 1 地質図幅) 地質調査所発行.
 Matsumoto, M. and Nishimura, T. (1998) Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, **8**, 3-30.
 Mikami, J., Masuda, Y., Uchida, T., Satoh, T. and Takeda, H. (2000) Dissociation of natural gas hydrates observed by X-ray CT scanner. *Ann. NY Acad. Sci.*, **912**, 1011-1020.
 中野 司 (1991) 上部マントルでのマグマの移動と集積の素過程. 液相ネットワークの解析. 月刊地球, **13**, 341-345.
 中野 司 (1995) X 線 CT 画像中の 2 次元ネットワークを伝った流れのシミュレーション. 地質調査所月報, **46**, 605-627.
 中野 司・西沢 修・増田幸治・稲角忠弘・笠間俊次 (1992) X 線 CT による岩石内部構造の三次元観察. 月刊地球, **14**, 616-620.

- 中野 司・中村光一・染谷利明・大塚浩士 (1997) X線 CT による岩石内部構造の3次元観察:(1)CT値と物体密度の関係式の決定. 情報地質, **8**, 239-255.
- 中野 司・中島善人・中村光一・池田 進 (2000) X線 CT による岩石内部構造の観察・解析法. 地質学雑誌, **106**, 363-378.
- Nakashima, Y. (2000) The use of X-ray CT to measure diffusion coefficients of heavy ions in water-saturated porous media. *Eng. Geol.*, **56**, 11-17.
- 中島善人 (2002) NMR 物理探査の原理. 物理探査, **55**, 105-126.
- 中島善人・鳥海光弘 (1996) 地殻深部を水はどう流れるか:クラックの役割. 科学, **66**, 873-879.
- Nakashima, Y. and Watanabe, Y. (2002) Estimate of transport properties of porous media by microfocus X-ray computed tomography and random walk simulation. *Water Resour. Res.*, **38**, article number 1272.
- Nakashima, Y., Nakano, T., Nakamura, K., Uesugi, K., Tsuchiyama, A., and Ikeda, S. (2004) Three-dimensional diffusion of non-sorbing species in porous sandstone: Computer simulation based on X-ray microtomography using synchrotron radiation. *J. Contam. Hydrol.*, **74**, 253-264.
- 西澤 修・中野 司・野呂春文・稲崎富士 (1995) X線 CT による地球科学試料の内部構造分析技術の最近の進歩について. 地質調査所月報, **46**, 565-571.
- 大場 司 (1991) 秋田焼山火山の地質学的・岩石学的研究 1. 山体形成史. 岩鉱, **86**, 305-322.
- 大場 司 (1993) 秋田焼山火山の地質学的・岩石学的研究 2. マグマ組成の変化. 岩鉱, **88**, 1-19.
- Ohtani, T., Nakano, T., Nakashima, Y. and Muraoka, H. (2001) Three-dimensional shape analysis of miarolitic cavities and enclaves in the Kakkonda granite by X-ray computed tomography. *J. Struct. Geol.*, **23**, 1741-1751.
- Polak, A., Elsworth, D., Yasuhara, H., Grader, A.S. and Halleck, P.M. (2003) Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, article number 2020.
- PyrakNolte, L.J., Montemagno, C.D. and Nolte, D.D. (1997) Volumetric imaging of aperture distributions in connected fracture networks. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2343-2346.
- スタウファー, D.・アハロニー, A. (2001) パーコレーションの基本原理解 (小田垣孝訳) 吉岡書店.
- Spanne, P., Thovert, J.F., Jacquin, C.J., Lindquist, W.B., Jones, K.W. and Adler, P.M. (1994) Synchrotron computed microtomography of porous media: Topology and transports. *Phys. Rev. Lett.*, **73**, 2001-2004.
- 高橋 学・薛 自求・大和田朗・石島洋二 (1992) 青色顔料を混合した樹脂によるポア観察について. 応用地質, **33**, 294-306.
- Takemura, T., Oda, M. and Takahashi, M. (2004) Microstructure observation in deformed geomaterials using microfocus X-ray computed tomography. In: *X-ray CT for Geomaterials; Soils, Concrete, Rocks.* (Edited by Otani, J. and Obara, Y.) A. A. Balkema Publishers, pp. 299-304.
- Tiab, D. and Donaldson, E. C. (2004) *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties.* 2nd Edition. Elsevier.
- 土山 明・上杉健太郎・中野 司 (2000) 高分解能 X線 CT 法による岩石・鉱物の3次元構造の研究. 太陽系初期物質とコンドリユール. 地学雑誌, **109**, 845-858.
- Tsuchiyama, A., Uesugi, K., Nakano, T. and Ikeda, S. (2005) Quantitative evaluation of attenuation contrast of X-ray computed tomography images using monochromatized beams. *Amer. Miner.*, **90**, 132-142.
- Wellington, S.L. and Vinegar, H.J. (1987) X-ray computerized tomography. *J. Petrol. Technol.*, **39**, 885-898.
- Wildenschild, D., Hopmans, J.W., Vaz, C.M.P., Rivers, M.L., Rikard, D. and Christensen, B.S.B. (2002) Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations. *J. Hydrol.*, **267**, 285-297.
- Yasuda, H., Ohnaka, I., Mizutani, Y., Morikawa, T., Takeshima, S., Sugiyama, A., Waku, Y., Tsuchiyama, A., Nakano, T., and Uesugi, K. (2005) Three-dimensional observation of the entangled eutectic structure in the Al₂O₃-YAG system. *J. European Ceram. Soc.*, **25**, 1397-1403.

(2005年12月21日受付, 2006年1月11日受理)