

X線CTによる地質試料の分析： これから始める人のために

中島善人¹⁾・中野 司²⁾

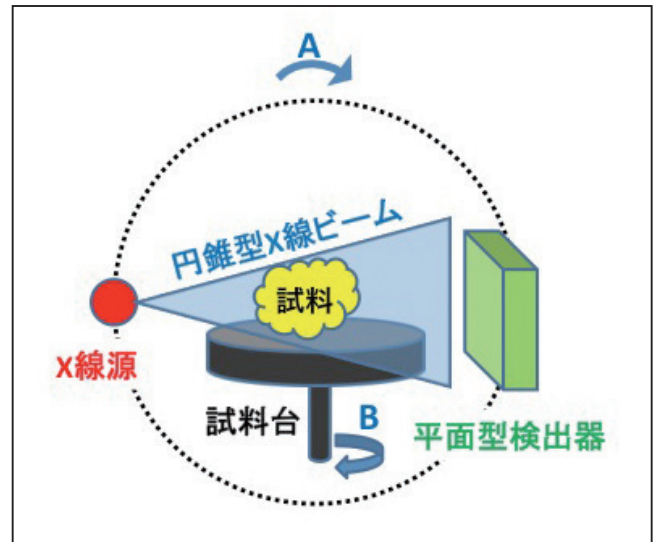
1. はじめに

X線Computed Tomography (CT) とは、試料にX線をあらゆる方向から照射して、光線の道筋ごとのX線吸収率を生データとして獲得し、逆問題を解くことで試料内部のX線の線吸収係数の3次元空間分布を再構成する手法です。その略図を第1図に示しましたが、CT装置の構造は、試料をX線源と検出器ではさみこむ位置関係になっています。この位置関係、およびX線の吸収の程度で内部構造を推定するという点では、健康診断で撮影する肺のレントゲン写真と同じです。しかし、レントゲン写真は1方向からのみ照射しますが、CTはX線源あるいは試料を回転させることで1方向ではなくあらゆる方向から照射する点が本質的に異なります。

CTは、人体を対象にした医療用のマーケットシェアが高いのですが、地質学的サンプルの3次元的な内部構造を高分解能（たとえば数百nm～数百 μ m）・短時間（たとえば数分～数十分）で非破壊デジタル計測できる技術として、地球科学の分野にも着実に導入されつつあります（たとえば田辺ほか、2006；Takahashi *et al.*, 2008；中島・中野、2009；Tanaka *et al.*, 2011；Tsuchiyama *et al.*, 2011）。本論は、CTの高いポテンシャルに魅せられてこれから本格的にCTを使おうという地球科学系の研究者・技術者向けの初歩的な解説です。なお、地球科学に特化したCTのより本格的な解説は、中野ほか（2000）をご覧ください。

2. さまざまなタイプのCT

インターネットで検索すると、さまざまなタイプのCTがヒットして、初心者混乱させます。まず、この点を整理しましょう。第2図に5つに分類したCT装置を示しました。第2図bの医療用CTは、病院でおなじみだと思います。第2図c, dの装置の名称に含まれている「フォーカス」と



第1図 X線CT装置の概略。

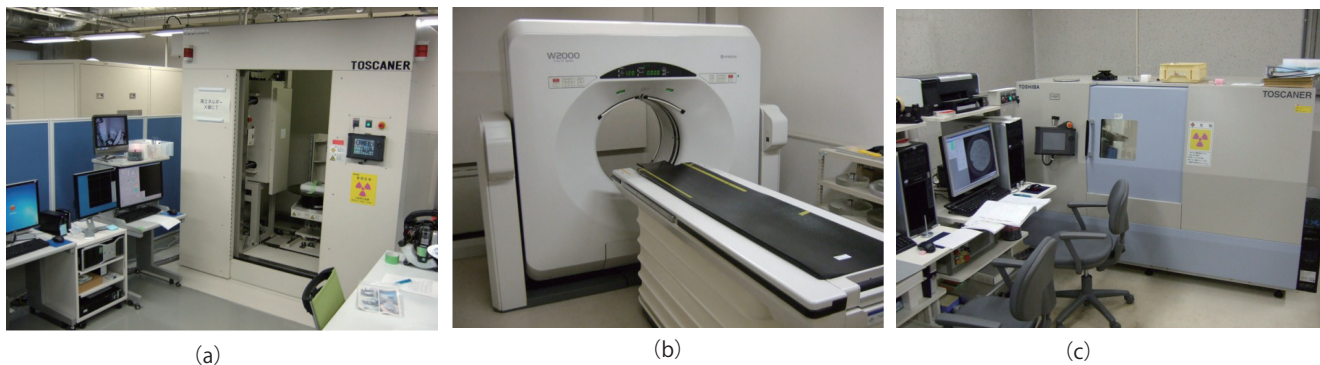
撮影対象（試料）を動かさず、X線源と検出器のセットを360°回転させるタイプ(A)と、X線源と検出器のセットは撮影中は不動で試料台を360°回転させるタイプ(B)の2種類があります。CTのほとんどはBのタイプですが、医療用CTはAのタイプです。

は、X線の線源の領域（焦点）のことで、このサイズが小さいほど（マイクロフォーカスよりナノフォーカスの方が小さい）、X線の指向性が良く結果として空間分解能も優れたものになります。シンクロトロンCTを除けば、装置の大きさは物置小屋サイズ～家庭用洗濯機サイズです。シンクロトロンCTでは、電子をタングステンターゲットに衝突させるのではなく、シンクロトロンで加速させた超高速電子を磁場で進路を曲げることで発生させた非常に輝度の高いX線をCTの線源に採用しています。そのために装置が非常に大がかりなものになっています（第2図e）。

第2図の5機種を分類したのが第3図です。X線の吸収の物理学によれば大きなサイズの試料を確実にイメージングするには透過力の強い（つまりエネルギーの高い）X線を使用する必要がありますので、第3図の5つの楕円はすべて右上がりの形状をしています。第3図は、(i) 試料サイズに対応したX線のエネルギーごとに4機種（高エネルギーCT、医療用CT、マイクロフォーカスCT、ナノフォー

1) 産総研 地圏資源環境研究部門
2) 産総研 地質情報研究部門

キーワード: 非破壊分析, 岩石物性, X線CT, 計算機シミュレーション, 3次元構造



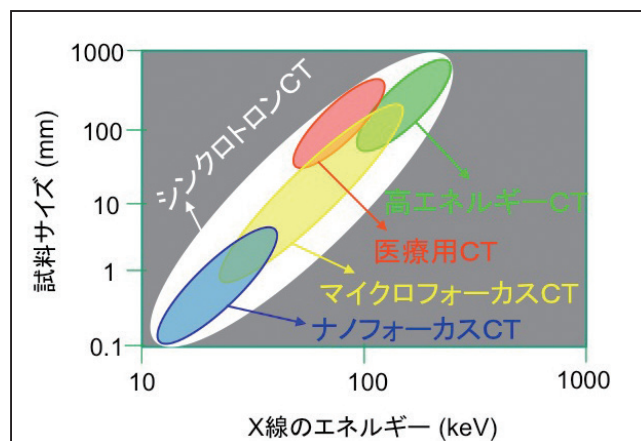
第2図 5種類のCT装置の例。
 (a) 東京都立産業技術研究センターにある高エネルギーCT。(b) 産業技術総合研究所にある医療用CT。(c) 東京都立産業技術研究センターにあるマイクロフォーカスCT。(d) 東京都立産業技術研究センターにあるナノフォーカスCT。(e) 高輝度光科学研究センターの大型放射光施設 (SPring-8) にあるシンクロトロンCTのビームライン (背景の白い壁が、周長約 1400 m の蓄積リングの一部)。



カスCT) が棲み分けていることと, (ii) 別格としてシンクロトロンCTがオールマイティにすべてをカバーしていることを示しています。なお, 試料のX線透過率は試料サイズだけでなく密度や原子番号で異なるので (中野ほか, 2000), 第3図はおおざっぱな半定量的な分類にしすぎないことを付記しておきます。CTユーザーがまず決断しなければいけない重要な点は, 撮影希望の試料のサイズを決め, それにふさわしいCT装置を5機種から選択することです。

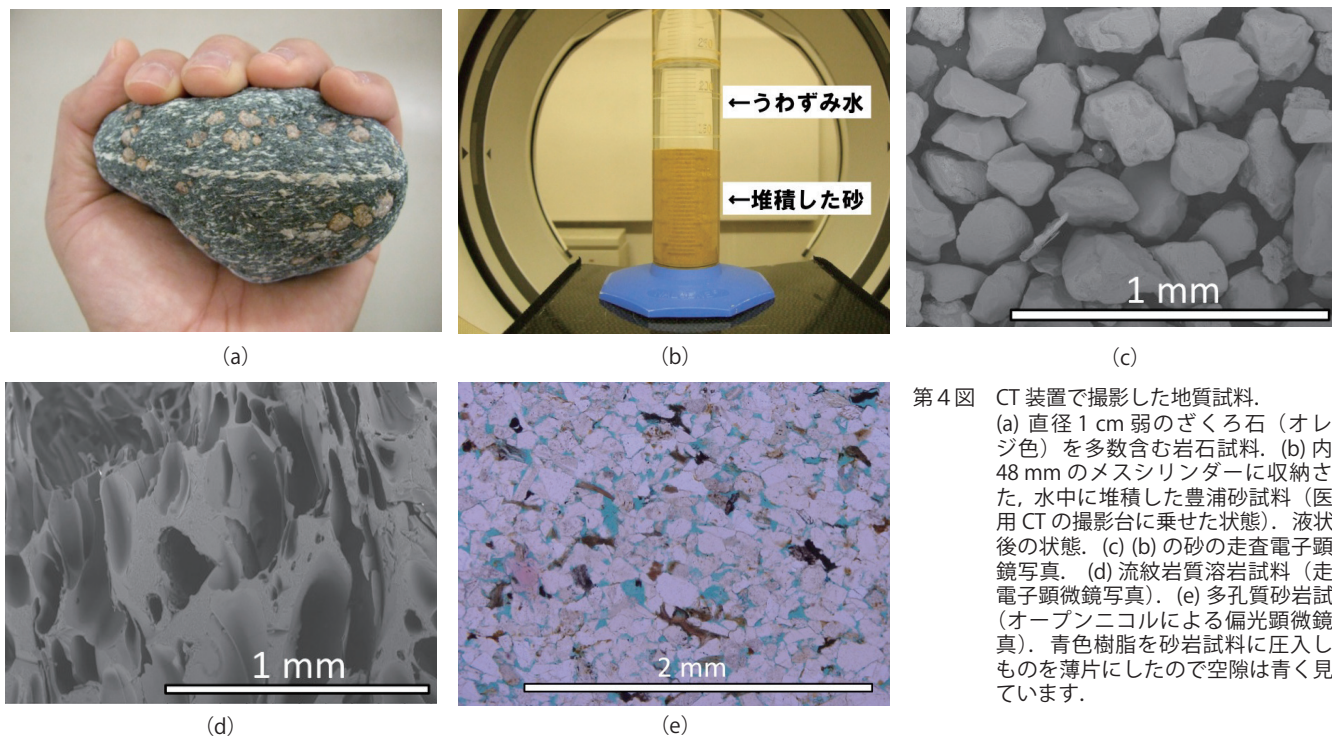
3. CT撮像例

「そもそもCTで地質試料を撮影するとどういふ風に見えるのだろうか?」という素朴な疑問にお答えしたいと思います。今回は, 第4図の地質試料を第2図の5機種でデモ撮影しました。第4図aは, 四国の三波川変成帯で採取した肉眼で見えるほどの大きなざくろ石を含む岩石試料です。高密度岩石ゆえにX線の透過力を要求されるので, 第2図aの高エネルギーCTで撮影しました。第4図bは, 内径48 mmのプラスチック製メスシリンダーに収納された, 水で飽和した山口県豊浦産の珪砂試料です。まず, ゆる詰めの状態を第2図bの医療用CT (スペックは, 池原 (1997) を参照) で撮影したあと, メスシリンダーに機械的衝撃を与えて液状化を意図的に起こし, 再び医療用CTで撮影して液状化の前後のCT画像を比較しました。第



第3図 試料サイズとX線のエネルギーの視点で分類した5種類のCT装置。

4図cは, 豊浦砂試料の走査電子顕微鏡写真です。直径数百ミクロンの粒度がほぼそろった砂粒子が確認できます。この数百ミクロンの砂粒子の微視的な堆積状態を確認するために, 豊浦砂試料を水で飽和させて内径6 mmのプラスチック容器に移し, 液状化を起こさせた後に第2図cのマイクロフォーカスCT装置で撮影しました。第4図dは, 東京都新島産の高度に発泡した流紋岩質溶岩試料 (中島, 2005) の走査電子顕微鏡写真です。この数百ミクロンサイズの空隙を第2図dのナノフォーカスCT装置で撮影しました。第4図eは, 埼玉県秩父産の空隙率14 vol. %の砂岩 (中島, 2005) の偏光顕微鏡写真です。この多孔質砂岩の円柱試料 (第4図eのような青色樹脂の圧入はせず) を濃厚なヨ

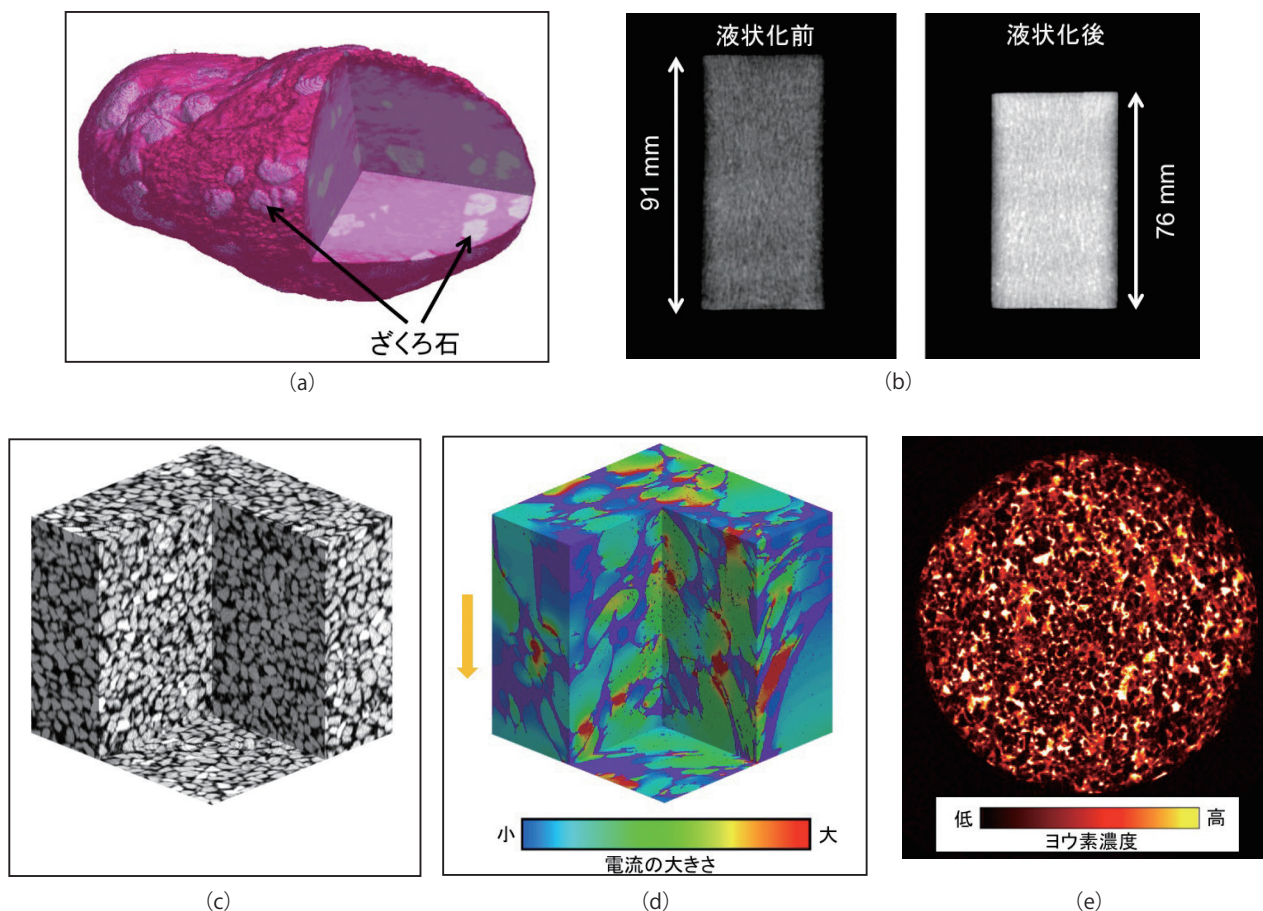


第4図 CT装置で撮影した地質試料。
 (a) 直径1 cm 弱のざくろ石（オレンジ色）を多数含む岩石試料。 (b) 内径48 mm のメスシリンダーに収納された、水中に堆積した豊浦砂試料（医療用CTの撮影台に乗せた状態）。液状化後の状態。 (c) (b) の砂の走査電子顕微鏡写真。 (d) 流紋岩質溶岩試料（走査電子顕微鏡写真）。 (e) 多孔質砂岩試料（オープンニコルによる偏光顕微鏡写真）。青色樹脂を砂岩試料に圧入したものを薄片にしたので空隙は青く見えています。

ウ化カリウム水溶液（50数wt. %）で飽和させて、第2図eの装置でdual-energy CT法という特殊な撮影をしました。すなわち、33 keV付近にあるヨウ素のK吸収端を挟んで2種類の単色光CT撮影を行い、両者の画像セットを差分してヨウ素原子濃度のマッピングを行いました。

第4図の試料の撮像結果を第5図に示します。第5図aでは、高密度で平均原子番号も高いざくろ石が強いX線の吸収体として明瞭に識別できています。なお、CT画像はX線の線吸収係数の大小を画像化しているのが本来は16ビットグレースケール画像ですが、見やすくするため第5図aでは疑似カラー表示してあります。高エネルギーCTは透過力が強いので、高密度岩石以外にも鉄筋コンクリートなどの土木工学的試料にも適用できます（Ito *et al.*, 2004）。第5図bは、医療用CTで見た液状化前後の砂堆積層です。この図では16ビットグレースケールを調整して砂の堆積層のみを明瞭に表示させているので、第4図bのうわずみ液と周囲の空気とプラスチック製メスシリンダー容器はすべて同じ色（黒）に写っています。液状化により、砂の堆積層の厚さが91 mmから76 mmに圧密され、その結果として空隙率が49 vol. %から39 vol. %に低下しました。ちなみに砂の堆積層のCT数（画素の輝度値）は、液状化前が1200 HU、液状化後が1400 HUでした（圧密のせいでバルクの密度が上昇したので、液状化後の砂堆積層はより明るく画像表示されます）。このように液状化の室内模擬実験のモニタリング用として、医療用

CTは有望です。なお、試料内部で起こっている高速に変化する現象をモニタリングしたいなら、1秒間に数百枚もの高速2次元撮影が可能なCTもあります（Misawa *et al.*, 2004）。第5図cは、前述のように豊浦砂試料を内径6 mmの水で飽和したプラスチック容器に移して衝撃を与えて液状化を起こさせたあとに、第2図cのマイクロフォーカスCT装置でズーム撮影したものです。水と砂では密度も元素組成も異なるのでX線の線吸収係数もかなり異なり、そのおかげでCT画像上で両者を明瞭に識別することができます。結果として、第5図bの医療用CTの粗い分解能では見えなかった数百マイクロサイズの砂粒子の3次元配置状況が、第5図cでは手に取るようにわかります。第5図dは、第4図dの溶岩試料を第2図dのナノフォーカスCT装置で撮影したものです。第5図c, dのような空隙スケール画像が得られれば、空隙にそった物質移動などの計算機シミュレーションが可能です（Nakashima and Nakano, 2012）。その一例が第5図dです。固体部分を不導体とみなし、空隙部分に海水などの電導性流体を仮想的に充填させ、オレンジ色の矢印方向に巨視的な直流電位差を与えた場合の、局所的な電流の3次元分布をシミュレートしました。このような空隙スケールシミュレーションは、実際に地面に電流を流して地下構造をイメージする物理探査のデータ解釈に貢献できます。第5図eは、第4図eと同じ産地の砂岩の円柱試料を濃厚なヨウ化カリウム水溶液で飽和させて、第2図eのシンクロトロンCT装置で撮影した結果です。第4図eの青色樹



第5図 地質試料のCT画像。

(a) 第4図aの試料を第2図aの装置で撮影。(b) 第4図bの状態の豊浦砂試料を第2図bの装置で撮影。図中の白抜き数値は、液状化前後の砂の堆積層の厚さ。(c) 内径6mmのプラスチック容器に収めた液状化後の豊浦砂試料を、第2図cの装置で撮影。画像サイズは、 400^2 画素 = 3.8^3 mm³。明るい部分が砂粒子、暗い部分が空隙水。(d) 第4図dの試料を第2図dの装置で撮影。画像サイズは、 600^3 画素 = 2.3^3 mm³。固体部分は紫色。空隙部分に直流電流を流したシミュレーション結果を重ね合わせて表示。(e) 秩父砂岩の円柱試料を dual-energy CT 法を用いて第2図eの装置で撮影。ヨウ素濃度の2次元マッピング画像。砂岩の直径は4mm。

脂で例示したような空隙部分に浸入したヨウ素のマッピングができています。単色X線が使えるシンクロトロンCTならば、他にもセシウム (Ikeda *et al.*, 2004) や鉄 (Tsuchiyama *et al.*, 2013) などの非破壊3次元元素マッピングが可能です。これは、電子線マイクロアナライザ (EPMA) などの従来の分析機器には困難な芸当です。

4. おわりに

以上でCTという機器の威力をわかっていただけたと思います。最近の技術革新のおかげで、CTは以前よりはるかに高性能・低価格・簡単操作になってきています。また、3次元CT画像処理用のソフトウェアの整備も着実に進んでいます (たとえば中野ほか, 2006)。まさに今が旬の分析技術といえます。これから本気でCT研究を始める方には、性能がダントツに優れている第2図eのシンクロトロン

CTがイチオシですが、初心者は全国の公設試験研究機関 (たとえば <http://unit.aist.go.jp/col/sgr/sonota/map/zenkoku.html> 2012/12/10 確認) にある時間貸しCTから始めるのがよいでしょう (依頼分析も可能な公設試験研究機関もあります)。まずは、手元の試料を気軽にCT撮影することから始めましょう。

謝辞: 第5図e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」で中村光一、池田 進、土山 明、上杉健太郎各氏の協力のもとで撮影されました (課題番号2001B0501-NOD-np)。

文献

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. *Am. Miner.*, **89**, 1304–1312.
- 池原 研 (1997) X線CT装置を用いた地質試料の非破壊観察と測定 (1) —X線CT装置の原理・概要と断面写真—. 地質ニュース, no. 516, 50–61.
- Ito, F., Aoki, T. and Obara, Y. (2004) Visualization of bond failure in a pull-out test of rock bolts and cable. In Otani, J. and Obara, Y., eds., *X-ray CT for geomaterials : soils, concrete, rocks*, A. A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, 305–314.
- Misawa, M., Ichikawa, N., Tiseanu, I., Tomita, Y. and Shiroyanagi, Y. (2004) Development of a time-resolving X-ray tomography system and its application to multi-phase flows. In Otani, J. and Obara, Y., eds., *X-ray CT for geomaterials : soils, concrete, rocks*, A. A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, 111–119.
- 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. 地質雑, **106**, 363–378.
- 中野 司・土山 明・上杉健太郎・上相真之・篠原邦夫 (2006) "Slice" -Softwares for basic 3-D analysis-, Slice Home Page (web), <http://www-bl20.spring8.or.jp/slice/>, 財団法人 高輝度光科学研究センター (2012/12/10 確認)
- 中島善人 (2005) X線CTで岩石中の空隙をイメージングする. 地学雑, **114**, 1032–1043.
- 中島善人・中野 司 (2009) Rambo : 岩石中の空隙を散歩する話. 地質ニュース, no. 655, 39–46.
- Nakashima, Y. and Nakano, T. (2012) Steady-state local diffusive fluxes in porous geo-materials obtained by pore-scale simulations. *Transp. Porous Media*, **93**, 657–673.
- Takahashi, M., Takemura, T., Lin, W. and Urushimatsu, Y., (2008) Microscopic visualization of rocks by micro X-ray CT under confining and pore water pressures. *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, **27**, 2455–2462.
- 田辺 晋・中島 礼・中西利典・木村克己・柴田康行 (2006) 東京都足立区本木地区から採取した沖積層ボーリングコア堆積物 (GS-AMG-1) の堆積相, 放射性炭素年代と物性. 地調研報, **57**, 289–307.
- Tanaka, A., Nakano, T. and Ikehara, K. (2011) X-ray computerized tomography analysis and density estimation using a sediment core from the Challenger Mound area in the Porcupine Seabight, off Western Ireland. *Earth Planets Space*, **63**, 103–110.
- Tsuchiyama, A., Uesugi, M., Matsushima, T., Michikami, T., Kadono, T., Nakamura, T., Uesugi, K., Nakano, T., Sandford, S. A., Noguchi, R., Matsumoto, T., Matsuno, J., Nagano, T., Imai, Y., Takeuchi, A., Suzuki, Y., Ogami, T., Katagiri, J., Ebihara, M., Ireland, T. R., Kitajima, F., Nagao, K., Naraoka, H., Noguchi, T., Okazaki, R., Yurimoto, H., Zolensky, M. E., Mukai, T., Abe, M., Yada, T., Fujimura, A., Yoshikawa, M. and Kawaguchi, J. (2011) Three-dimensional structure of Hayabusa samples: origin and evolution of Itokawa regolith. *Science*, **333**, 1125–1128.
- Tsuchiyama, A., Nakano, T., Uesugi, K., Uesugi, M., Takeuchi, A., Suzuki, Y., Noguchi, R., Matsumoto, T., Matsuno, J., Nagano, T., Imai, Y., Nakamura, T., Ogami, T., Noguchi, T., Abe, M., Yada, T. and Fujimura, A. (2013) Analytical dual-energy micro-tomography: a new method for obtaining three-dimensional mineral phase images and its application to Hayabusa samples. *Geochim. Cosmochim. Acta* (in press).

NAKASHIMA Yoshito and NAKANO Tsukasa (2013) Analysis of geo-materials by X-ray computed tomography: an introduction for beginners.

(受付：2012年12月10日)