

## 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

西澤 修\*・中野 司\*\*・野呂春文\*\*・稲崎富士\*\*\*

NISHIZAWA Osamu, NAKANO Tsukasa, NORO Harufumi and INAZAKI Tomio (1995) Recent advances of X-ray CT technology for analyzing geologic materials. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.46(11), p.565-571, 2 figs.

**Abstract :** X-ray CT scanners were divided into four generations, based on scanning mechanism. The high speed data acquisition system of the present, fourth generation, gives high resolution three-dimensional images of objects. Combined with recent advances in computer technology, which enable us to process large image data sets, we can produce graphical images of the internal structure of geologic materials and can calculate statistical parameters describing topological features of a target structure. Recently, high energy X-ray sources above 1 MeV have revealed fine structures in many objects, ranging from low density to high density. This suggests that the new technology can also be applicable for analyzing many kinds of geologic samples, such as rocks, minerals, fossils, and unconsolidated sediments. Modern X-ray CT equipments and analyzing tools will give new, sophisticated methods for nondestructive and three-dimensional analysis of geologic samples.

### 要 旨

これまでに開発された X 線 CT 装置は、撮像機構によって 4 世代に分けられている。最近の第 4 世代型装置では高分解能の画像データが迅速に得られるので、大量の試料を簡便に分析することができるようになった。また、コンピュータ技術の進歩によって大容量データの高速処理が可能となり、X 線 CT によって地質試料内部の目標とする構造を抽出したり、その構造が持つ形態的特徴を示す統計的パラメータを算出することができるようになった。最近、1 MeV 以上の高エネルギー線源を使用することにより、各種物質の微細構造が明らかにできるようになった。これによって岩石、鉱物、化石および未固結堆

積物など、地質試料のより詳細な分析が可能となるであろう。これら X 線 CT に関する最新の装置と解析技術は、地質試料の非破壊的三次元分析に関して、より洗練された新しい手法を提供するだろう。

### X 線 CT 技術の歴史

ものの内部を非破壊で透視する X 線 CT 装置は英国の G. N. Hounsfield によって作成された。1972 年、彼は協力者の Ambrose とともに英国医学放射線学会で人体頭部の X 線写真を多数発表して臨床医学界に衝撃を与えた (Hounsfield, 1973; Ambrose, 1973)。これを契機として CT (Computed Tomography, Computerized Tomography) あるいは CAT : Compter Assisted Tomo-

\* 地殻熱部

\*\* 地質情報センター

\*\*\* 地質情報センター (建設省土木研究所併任)

Keywords : X-ray CT, nondestructive analysis, structure of geologic samples

graphy) 技術は、科学の広い分野に影響を与えるようになった。1980年代には「トモグラフィー」という言葉は自然科学と技術の広い分野で聞かれるようになった。Tomography というのはギリシャ語の *τομος* (tomos) (断面) という言葉からきているが、こうした「断面」像を求める手法は、天文学や地球物理学などさまざまな分野で使われ、現在もさかんに研究が進められている。X線など物体内部を透過するビームの投影像から内部の様子を再構成する理論はX線CT装置出現の約10年前にCormack(1963)によってすでに考え出されていたが、本質的原理は1917年オーストリアの数学者Radonによる研究にさかのぼる。CormackはHounsfieldとともに1979年のノーベル医学生理学賞を授賞している。

トモグラフィーの原理は格別新しいものではなかったが、1970年代初期に技術として確立された背景には、画像を再構成するのに必要なメモリと計算速度をもったコンピュータが現れたこと、また同時に再構成の処理に欠かせない実用的アルゴリズムの開発がある。その後もコンピュータはめざましい進歩をとげ、CT技術はより高分解能・高速をめざすようになり、すぐに実用化された。さらにX線CTは医療以外の分野にも浸透した。金属などの材料や、構造部品内部のき裂や空洞を調べるための産業用X線CTは、簡便な非破壊検査の手法となった。

### CT装置

X線CT装置はその撮像機構の変遷にもとづき、登場してから現在までを第1表のように4世代に分けられている(飯沼, 1983; 竹中, 1983)。第1世代はHounsfieldがEMIスキャナーとして発表したもので、X線源と検出器とが一对になっており、角度を変えながらビーム1本ずつの測定を行う。第2世代の機器では複数の検出器が直線に配列されており、ある角度で広がって放射される数本のビーム(扇状ビーム: fan beam)に対する同時測定ができる。線源と検出器は相互の位置を固定したまま並進移動(走査)して測定を行い、試料に対する入射角度

を変えて再び走査を繰り返す。第3世代では検出器の数も数百と、けた違いに多くなっている。線源は検出器と一体で回転し、毎秒数百個のパルスX線を放出する。第4世代ではさらに多くの検出器を円形に配置し、この内側を管球が回転するので、投影したときのビームの範囲は試料の実際の寸法より大きくなり、投影時の倍率は1を越す。

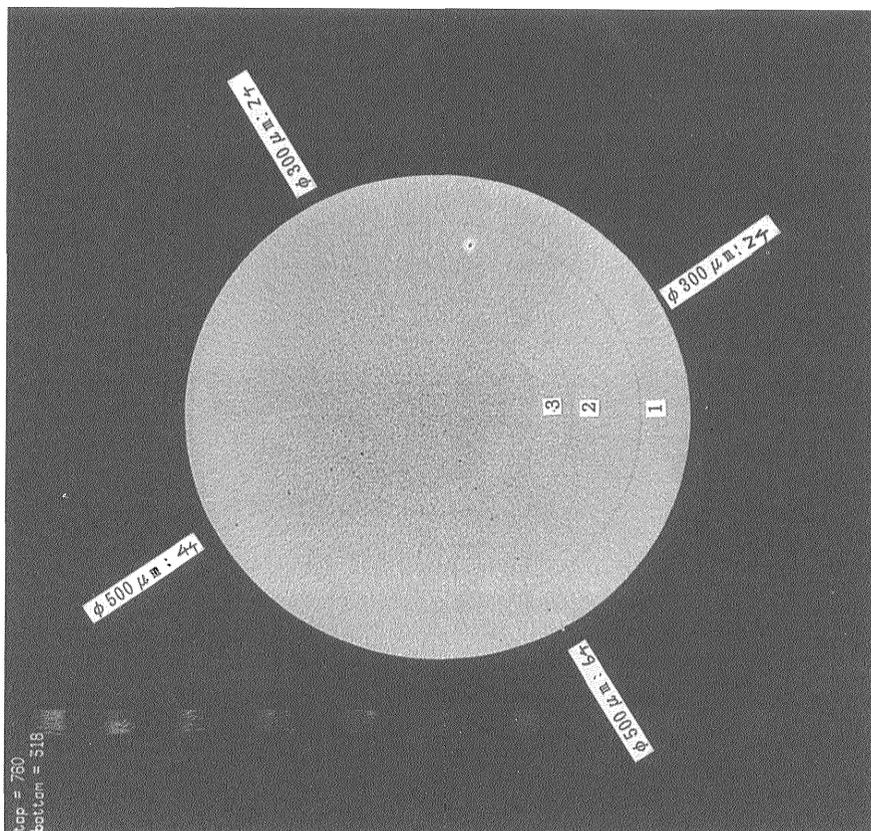
ここまでは線源と検出器はつねに同じ平面を移動するだけであったが、最近では平面に直交する軸に沿った移動を伴いながら撮像することのできるヘリカルスキャン方式も現れた。さらに、X線源に小型の加速器を用いたものも実用化され、高い分解能を持つ(伊東, 1993)。この装置には数メートルに及ぶ物体を対象とするものまである。

すでに述べたように、現在普及しているX線CTには医療用と産業用とがある。物質に対するX線の線吸収係数はほぼ物質の密度に比例する。したがって、密度の大きい物質の内部をX線CTで調べる場合は、透過能の高い高エネルギーのX線を用いる必要がある。地球科学試料には密度の大きい鉱物を含むものから、通常の岩石、粘土、さらに海や湖沼の底にたまった低密度未固結堆積物などがある。未固結堆積物は水の含有量が多く、有機物質も含んでいる。硬い岩石や鉱物に対しては、加速電圧が400 kVを越すエネルギーの高い産業用CT装置が用いられる(中野ほか, 1992)。いっぽう、未固結堆積物などには加速電圧が140 kV以下の医療用CTを利用することができる(Orsi *et al.*, 1994)。

この他に大型の加速器によって作り出されるシンクロトロン放射のX線を利用することもできる。放射されたX線を結晶格子の回折によって単色化し、10 μmオーダの高分解能を得ることができる(Hirano *et al.*, 1989a; Hirano and Usami, 1989)。Hirano *et al.* (1989b)はさらに隕石中のNiの分布を同じ分解能で調べることができることを述べており、密度だけでなく特定元素の3次元分布が把握できる可能性を示唆している。この装置は大

第1表 CT装置の世代

世代	X線形状	1断面あたりの 検出器数	撮像方式	1断面あたりの 撮像時間
I	ペンシルビーム	1	線源・検出器とも回転・走査	4分半
II	小角扇状ビーム	3~60	線源・検出器とも回転・走査	20~120秒
III	広角扇状ビーム	100~300	線源・検出器とも回転	3~10秒
IV	広角扇状ビーム	600以上	線源回転・検出器固定	1~10秒



セラミックス( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )内の微小欠陥  
直径: 150mm, クリアランス: No.1 MAX 200  $\mu\text{m}$   
No. 2, 3 MAX 100  $\mu\text{m}$

第1図 窒化珪素のCTイメージ。No.1で示された同心パイプの隙間は200 $\mu\text{m}$ , No.2, 3で示された隙間は100 $\mu\text{m}$ である。300 $\mu\text{m}$ 500 $\mu\text{m}$ の直径の小孔があけられているが、隙間や小孔を明瞭に識別できる。

Fig.1 Tomogram of siliconnitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). The clearance of the inner and the outer pipes are 200  $\mu\text{m}$  for No.1, and 100 $\mu\text{m}$  for No.2 and 3. There are small holes with 300 $\mu\text{m}$  diameter and 500  $\mu\text{m}$  diameter. Those small gaps and holes can be clearly identified.

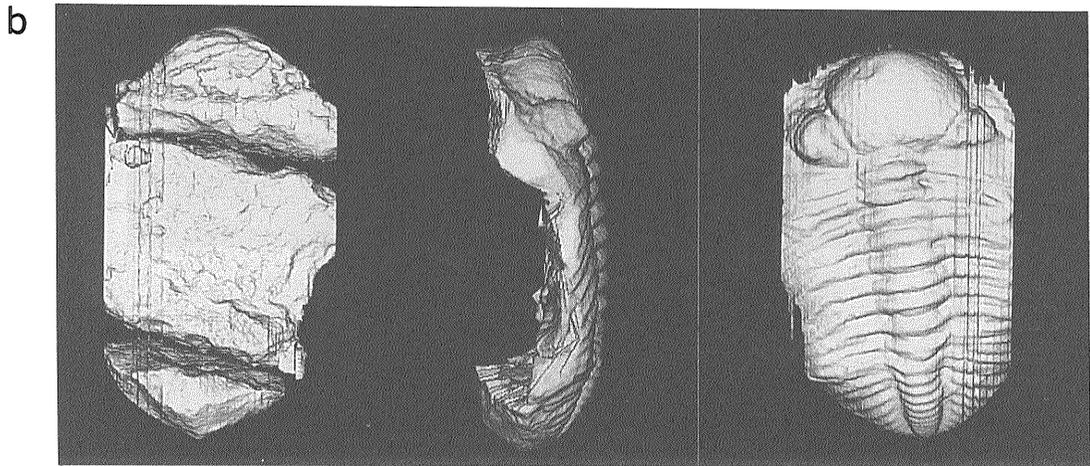
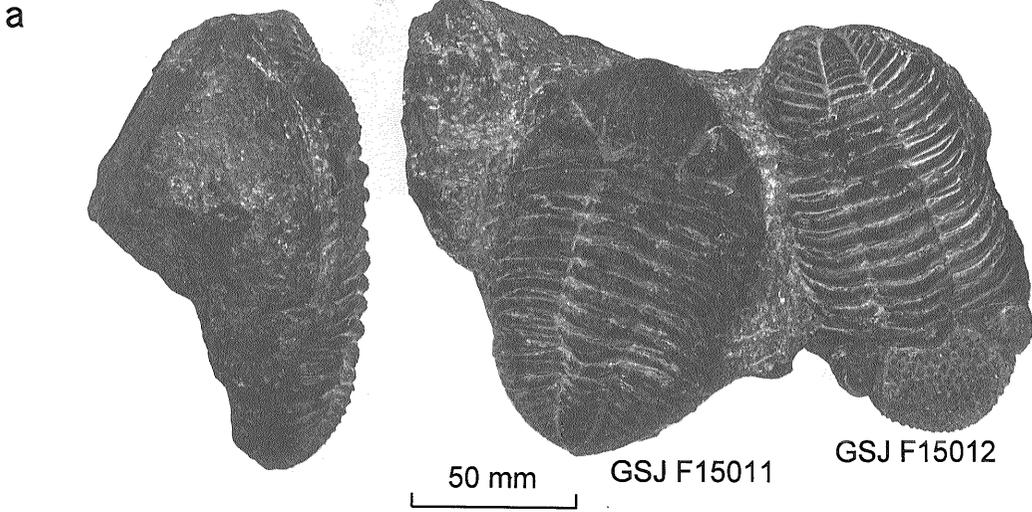
きな可能性を持つものの、地球科学試料の分析に常時利用できるものでなく、一般的分析装置とは言い難い。

#### 岩石試料のX線CT

石油と地熱の開発はともに地下の流体を対象としているので研究対象には共通の技術課題が多い。原油、天然ガス、熱水、蒸気などは岩石の割れ目や空隙中を移動する。岩石中の流体の移動に関する物性は輸送特性(transport property)と呼ばれる。岩石の浸透率、電気伝導度は輸送特性を表すパラメタである。岩石の輸送特性は岩

石中に存在する隙間(空隙)によって支配される。空隙の形や大きさとそれらのつながり具合(ネットワーク構造)、あるいは流体の流路がどの程度複雑に曲がっているかといった係数(tortuosity)などが形状に関する要素である(Paterson, 1983; Walsh and Brace, 1984)。輸送特性を予測するには空隙の3次元像を把握する必要がある。X線CTはそのための有力な手法である。本特集号の稲角ほか(1995a, b)による2編の論文は空隙の形態抽出とその統計解析に関わる手法の詳細を記述している。

いっぽう、X線CTによって分析された岩石内部の形



第2図 三葉虫化石 (*Phacops* sp.: 地質標本館登録番号 GSJ F15011) のその外観(a)とトモグラム(b). 外観からは一体のものとしてクリーニングされたように見えるが, 実は3個のブロックを合わせたものである. 画像処理によって, 接着に使われた石膏や余分の岩石を除くことができる. なお, (a)は(b)の鏡像となっている.

Fig.2 Tomogram of trilobite (*Phacops* sp. GSJ F15011) : photoimage (a) and CT image (b). The sample actually consists of three blocks. The combining plaster and unnecessary matrix were removed from the CT image by processing the original data. (b) is a mirror image of (a).

態的特徴から, 計算によって流体移動の様子を予測することができる. このためには, 原データであるCT画像イメージを処理する手法が必要となる. 中野・藤井の一連の研究(中野・藤井, 1991 a, 1991 b, 1992)は原画像イメージから, 流体の流路と流れの挙動を特定するためのものであり, 本特集号に掲載された中野の論文(中野,

1995)には特定された流路を通過する流体の挙動についての詳しい計算結果が示されている. 流体移動を直接X線CTでとらえることも試みられた. 例えば, 岩石中を移動する流体にX線吸収係数の大きい物質を混ぜることにより, 既存の油や水など吸収係数の小さい流体との間に強いコントラストを与えることができる. こうして岩石

内部を移動する流体の様子を直接見ることができる (例えば Wellington and Vinegar, 1987; Peters and Hardham, 1990). この種の研究は EOR (Enhanced Oil Recovery; 2, 3 次回収) による原油の生産率向上に関連してさかんに行われた。

この他に 3 軸圧縮応力下で変形・破壊を受けた岩石の X 線 CT も報告されており (Raynaud *et al.*, 1989), 応力下で発生する微小割れ目を含む領域が CT 値の変化としてとらえられている。

### 未固結堆積物や軟岩の X 線 CT

近年の地球環境問題への関心の高まりにより, 海, 河川, 湖あるいは水床の堆積物から地球の環境の変動を推定する研究の重要性が理解され始めた。この研究ではかなり以前から軟 X 線による堆積物の分析が行われていた。しかし, 写真撮影のみによる解析では撮影前の処理の煩雑さや分解能の限界などから, 大量のデータを精密に処理することはできない。X 線 CT はこの問題に有効な解決法を与えてくれる。近年, 高速・高分解能の X 線 CT 装置の出現により短時間のうちに大量の X 線 CT 画像が得られるようになった。Kenter (1989), Orsi *et al.* (1994), あるいは Boespflug *et al.* (1995) によって, X 線 CT を用いた海底コア試料の定量的分析が有効であることが示されている。本特集号の稲崎ほか (1995) では湖の堆積物を例として, 未固結堆積物の X 線 CT による解析技術の詳細が記載されている。

X 線 CT はこの他に次のような研究にも用いられている。Kawamura (1990) は氷河から採取された気泡を含むコアの密度の違いが X 線 CT によって細かく調べられることを示した。Colleta *et al.* (1991) は実験装置を医療用 CT の中に置き, モデル物質を変形させて地層の褶曲や断層の発生についてシミュレーションを行い, 連続的に変形の様子をとらえている。

### X 線 CT 装置の今後の動向

すでに述べたように, 医療用 X 線 CT 装置は現在第 4 世代に入っており, 短時間で高分解能の画像を得ることができる。ところがより高いエネルギーを必要とする産業用 CT については従来の X 線管球を線源とするには限界がある。管球による線源は結晶構造解析に使われるような特性 X 線ではなく, 連続スペクトルを持つ X 線を利用しており, 極間電圧を高くすることによって高エネルギー X 線の強度を大きくしている。しかし, この方法では X 線エネルギーを数百 keV より大きくすることは困難であり, X 線の透過能をこれ以上強めることはできない。

最近, 加速器 (電子ライナック) を線源とすることで 1 MeV 以上のエネルギーを持つものが現れ, 透過能が向上してより高い分解能が得られるようになった。画素数も最大  $512 \times 512$  から,  $1024 \times 1024$  あるいは  $2048 \times 2048$  といった高い分解能のものも実現されはじめた。小型加速器を用いた装置では線源を複数取り付けることが, 寸法, コストおよびノイズの面から困難であるため, 撮像方式は第 2 世代型となっている。しかし, X 線のエネルギーと瞬時線量の大きいこと, 検出器のダイナミックレンジが広いことにより, 非常に鮮明な画像が得られる (伊東, 1993)。

第 1 図はこの装置を用いて得られた CT 画像の例である。エンジニアリングセラミックス (切削加工のできるセラミックス) のひとつである窒化珪素 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 密度  $3.2 \text{ g/cm}^3$ ) の管を同心円状に 3 本はめ合わせ, 外側とその内側との隙間 No 1 は最大  $200 \mu\text{m}$ , さらにその内側の No 2 と No 3 の隙間は最大  $100 \mu\text{m}$  となっており, それぞれに  $300 \mu\text{m}$  および  $500 \mu\text{m}$  の小孔が空けられている。岩石と同程度の密度をもつセラミックス中のわずかな隙間が X 線 CT 像からよみとれることは, この手法が岩石中の空隙やジョイントなど流路の詳細な解析に利用できることを示唆している。

第 2 図 a は同じ装置によるモロッコ産デボン紀の三葉虫 (*Phacops* sp.) 化石の X 線 CT 像である。同図 b は化石の外観であり, 形態が完全なままクリーニングされているように見えるが, 処理をほどこした CT 像からはこの標本がいくつかに分かれたものを一体として復元したものであることを見ることが出来る。この画像では化石の表面の細かな凹凸まで再現されているので, 化石のクリーニングや復元像の作成に役立つものと思われる。

今後の X 線 CT 技術を考えるとき撮像技術だけを論じても不十分である。得られた画像イメージの処理についても併せて考えなければならない。コンピュータによってデジタルイメージを処理し, 目標とする試料内部の構造や特徴を簡単に抽出することができれば, これをディスプレイ上で自由な角度から観察することができる。こうした処理のための技法の改良も技術の発展にとって重要なポイントである。新しい機器と解析技術とを組み合わせることにより, X 線 CT 技術は地球科学試料の分析に新しい可能性を開くであろう。

謝辞: ここに掲載された三葉虫試料 (地質標本館登録番号 GSJ F 15011: 燃料資源部渡辺芳夫技官提供) の CT 写真および外観写真はそれぞれ, 株式会社日立製作所日立工場核融合・加速器開発センターの伊東新一氏, 地質標本館利光誠一技官の提供による。これらのかたがたに

感謝する。

文 献

- Ambrose, J. (1973) Computerized transverse axial scanning (Tomography), Part 2, clinical application. *Brit. J. Radiol.* vol.46, p.1023-1047.
- Boespflug, X., Long, B. and Occhietti, S. (1995) CAT-scan in marine stratigraphy : a quantitative approach, *Marine Geology*, vol.122, p.281-301.
- Colletta, B., Letouzey, J., Pinedo, R., Ballard, J. F. and Balè, P. (1991) Computerized X-ray tomography analysis of sandbox models : examples of thin-skinned thrust systems, *Geology*, vol.19, p.1063-1067.
- Cormack, A. M. (1963) Representation of a function by its line integrals with some radiological applications, *J. Appl. Phys.*, vol.34, p.2722-2727.
- Hirano, T., Eguchi, S. and Usami, K. (1989 a) Study of quantitative elemental analysis of monochromatic X-ray CT using synchrotron radiation. *Japanese J. Appl. Phys.*, vol. 28, p.135-139.
- and Usami, K. (1989) High resolution monochromatic X-ray tomography using synchrotron radiation. *Japanese J. Appl. Phys.*, vol.28, p.263-266.
- , Funaki, M., Nagata, T., Taguchi, I., Hamada, H., Usami, K. and Hayakawa, K. (1989 b) Observation of Allende and antarctic meteorites by monochromatic X-ray CT based on synchrotron radiation. 14th Symposium on Antarctic Meteorites, National Inst. Polar Res., June 1989, p.158-159.
- Hounsfield, G. N. (1973) Computerized transverse axial scanning (Tomography), Part 1, description of system, *Brit. J. Radiol.* vol 46, p.1016-1022.
- 飯沼 武 (1983) コンピュータ断層撮影法, 岩波講座情報科学 21, パターン認識と図形処理, 第5章, p.179-206.
- 稲崎富士・井内美郎・中野 司 (1995) 湖沼底質試料の非破壊・密度構造分析への医療用 X 線 CT スキャナの利用. 地調月報, vol.46, p.629-642.
- 稲角忠弘・中野正則・笠間俊次 (1995 a) CT による鉄鉱石焼結鉱の通気構造解析. 地調月報, vol.46, p.573-594.
- ・晝間信治・鳥居順次・金田裕恵 (1995 b) 焼結体 CT 画像解析システムの開発. 地調月報, vol.46, p.595-603.
- 伊東新一 (1993) X 線 CT 装置の応用, 鋳物, vol.65, p.957-960.
- Kawamura, T. (1990) Nondestructive, three-dimensional density measurements of ice core samples by X-ray computed tomography. *J. Geophys. Res.*, vol.95, p.12407-12412.
- Kenter, J. (1989) Application of computerized tomography in sedimentology, *Marine Geotechnology*, vol.8, p.201-211.
- 中野 司 (1995) X 線 CT 画像中の 2 次元ネットワークを伝わった流れのシミュレーション. 地調月報, vol.46, p.605-627.
- ・藤井直之 (1991 a) 画像処理のためのソフトウェア(3)粒子像の識別と輪郭線の抽出. 情報地質, vol.2, p.23-44.
- ・——— (1991 b) 画像処理のためのソフトウェア(4)画像データからのネットワーク構造の抽出. 情報地質, vol.2, p.45-64.
- ・——— (1992) 画像処理のためのソフトウェア(5)画像中のネットワーク構造の流れ解析. 情報地質, vol.3, p.139-148.
- ・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 3 次元観察. 月刊地球, vol.14, p.616-620.
- Orsi, T., Edwards, C. and Anderson, A. (1994) X-ray computed tomography : a nondestructive method for quantitative analysis of sediment cores, *J. Sediment. Res.*, A 64, p.690-693.
- Paterson, M. S. (1983) The equivalent channel model for permeability and resistivity fluid-saturated rock —A re-appraisal. *Mech. Materials*, vol.2, p.345-352.
- Peters, E. J. and Hardham, E. J. (1990) Visualization of fluid displacements in porous media using computed tomography imaging, *J. Petrol. Sci. Eng.*, vol.4, p.155-168.
- Raynaud, S., Fabre, D., Marzerolle, F., Geraud,

- Y. and Latière, J. (1989) Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method : X-ray tomography. *Tectonophysics*, vol.159, p.149-159.
- 竹中栄一 (1983) コンピュータ断層法, 数理科学, vol.21, No.12, p.44-54.
- Walsh, J. B. and Brace, W. F. (1984) The effect of pressure on porosity and transport properties of rock. *J. Geophys. Res.*, vol.89, p.9425-9431.
- Wellington, S. L. and Vinegar, H. J. (1987) X-ray computerized tomography, *J. Petrol. Tech.*, vol.39, p.885-898.
- Walsh, J. B. and Brace, W. F. (1984) The effect of pressure on porosity and transport properties of rock. *J. Geophys. Res.*, vol.89, p.9425-9431.

(受付：1995年10月4日；受理：1995年10月26日)