

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・概要と断面観察 —

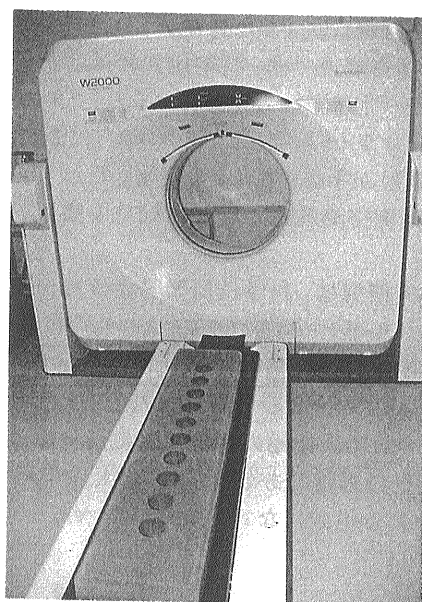
池原 研¹⁾

1. はじめに

近年, 地質試料を非破壊のままその内部構造を観察したり, 内部の物性分布を計測したりすることが進められています。非破壊分析は一般に, 分析手法が複雑でなく, 連続的なデータがとれるなどの利点があり, 非破壊分析結果を参考にしてその後の分析計画の立案を行うなど, 効率的な試料の解析に有効であるとされています。このような非破壊分析は, ガンマ線や中性子線などの放射線やX線を用いるものが多いようです。これはこれらの透過強度が物質の密度や水分量などに支配されることに基づいています。X線を用いた内部構造の観察はレントゲン写真が最も身近な例ですが, 堆積物では軟X線写真が良く知られています(有田・中村, 1981; 有田, 1983; 池原, 1989)。しかし, より良い軟X線写真を撮るためには試料の厚さの調整が必要であったり, 撮られた写真がアナログデータであるため写真の濃淡(X線の透過量に比例する)から試料の物性(密度)に関するデータを得るためには別の計測や補正が必要であったりするなど非破壊分析としては今一つの感がありました。

一方, 物体の内部を非破壊で透視するX線CT装置は, 1972年にイギリスのHounsfieldによって製作され, 人体頭部のX線写真を多数発表して臨床医学会に衝撃を与えたということです。そして近年のコンピュータ技術の進歩と共にトモグラフィ(物体内部を透過してきたビームの投影像から物体内部の様子を再構成する理論)は急速な進歩を遂げ, 実用化されてきました。地質試料についても, 医療用あるいはより加速電圧の高い産業用のX線

CT装置を用いて, 海底や湖底に堆積した未固結堆積物や土壌, 岩石・鉱物試料などについてX線CT装置を用いた内部構造の観察や物性測定が行われてきています(Petrovic *et al.*, 1982; Warner *et al.*, 1989; Holler *et al.*, 1990; 中野ほか, 1992; Orsi *et al.*, 1994; Boespflug *et al.*, 1995; 岡津, 1995; 稲崎ほか, 1995など)。地質調査所では平成7年度の補正予算で「地質試料非破壊診断装置」として医療用X線CT装置が導入されました(第1図)。この装置を用いた研究は現在行われている最中です。ここでは, X線CT装置の概要について述べると共に, この装置を用いた研究例について紹介したいと思います。

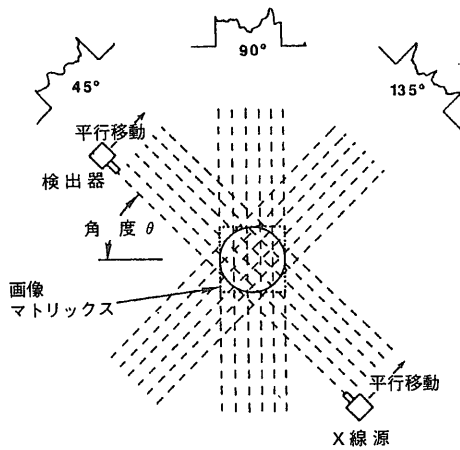


第1図 X線CT装置の外観。

1) 地質調査所 海洋地質部

2. X線CT装置の原理

X線CT装置は物体の輪切りの断層像を撮る装置であり、医療用として全国で約1万台が稼働しています。X線CT装置では、さまざまな方向から照射したX線が物体内でどれだけ吸収されるかを測定し、そのデータから断面内の各点における線吸

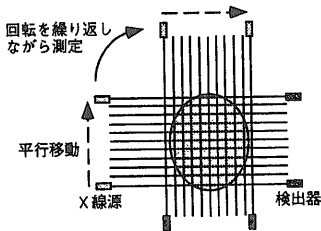


第2図 X線CT装置の撮影原理 (Colletta et al., 1991による)。

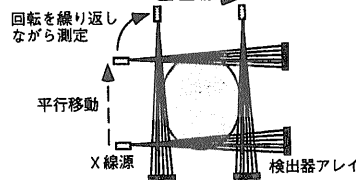
収係数を算出します(第2図)。そして、線源と検出器の配置、走査方法の違いから、第1世代から第4世代に分けられています(第1表・第3図)。第1世代は、一对の線源と検出器を用いて、角度を変えながら測定を行うことで、データを得るものです。第2世代は、複数の検出器が直線状に配置され、ある角度で扇型に発射される検出器の数に応じたX線のビームについて同時にデータを取得することができます。線源と検出器は相互の位置を固定したまま移動して(あるいは試料を回転させて)、試料に対するX線入射方向を変えて測定を繰り返し、データを採取します。第3世代では、線源と検出器は相互の位置を固定したまま試料の周りを回転し、毎秒数百回のパルス状のX線を放出して測定を行います。第4世代では検出器は円形に配置され、その内側を線源が回転して測定を行うもの

第1表 X線CT装置の世代(西澤ほか, 1995による)。

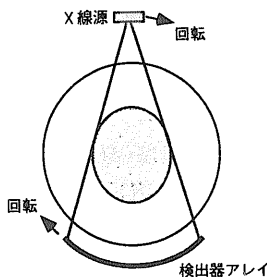
| 世代 | X線形状 | 1断面あたりの検出器数 | 撮像方式 | 1断面あたりの撮像時間 |
|-----|---------|-------------|---------------|-------------|
| I | ペンシルビーム | 1 | 線源・検出器とも回転・走査 | 4分半 |
| II | 小角扇状ビーム | 3~60 | 線源・検出器とも回転・走査 | 20~120秒 |
| III | 広角扇状ビーム | 100~300 | 線源・検出器とも回転 | 3~10秒 |
| IV | 広角扇状ビーム | 600以上 | 線源回転・検出器固定 | 1~10秒 |



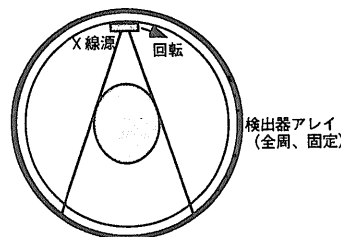
第1世代
X線管球の反対側に検出器があり、平行移動と回転を繰り返して測定する



第2世代
X線管球の反対側に検出器アレイがあり、平行移動と回転を繰り返して測定する

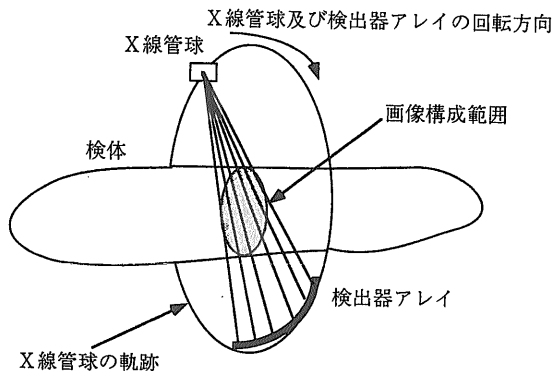


第3世代
X線管球の反対側に検出器アレイがあり、両者が回転して測定する



第4世代
検出器が全周にあり、その内側をX線管球が360°回転して測定する

第3図
X線CT装置の世代と撮像方式。



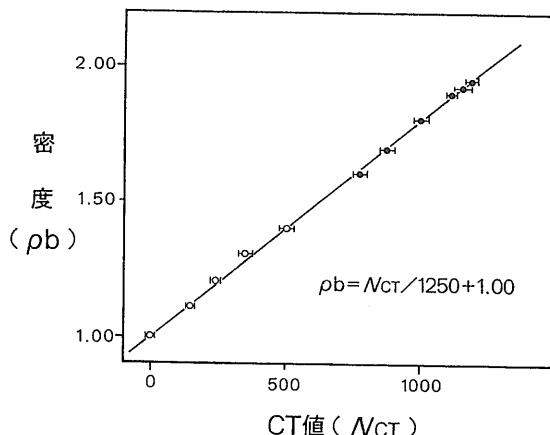
第4図 第3世代X線CT装置の撮影方法。

です。検出器の数は世代の増加と共に多くなり、第1世代では1個であったものが、第2世代では3～60、第3世代では100～300、第4世代では600以上となっています。これに伴って1断面の撮像に要する時間も短くなっています。現在医療用に広く使われているのは、第3世代の装置ですが、より高出力の得られる産業用の装置では第2世代のものが多くようです。

第3世代のX線CT装置では前述の様に、X線管が扇型に広がったX線を照射しながら物体の周りを一回転します(第4図)。物体を透過してきたX線は、線源の反対側に並べられた検出器アレイによってその強度が測定されます。検出器としては高圧キセノンガス検出器が使われています。X線源から放出された強度 I_0 の単色X線が検体内で吸収を受け、透過後の強度が I になったとしたときに、検体内の微小領域のX線の線吸収係数(μ_i)とその微小領域におけるX線の軌跡の長さ(ΔX_i)との間には以下の関係が成り立ちます。

$$I = I_0 \exp(-\sum \mu_i \Delta X_i)$$

ここで、 I と I_0 は実測値ですし、 ΔX_i はX線の入射方向と微小領域を設定する際の座標のとり方で決まりますので、測定された数百万点のデータをコンピュータにより処理することで各微小領域の線吸収係数を求め、その分布として画像の再構成を行います(第2図)。X線CTの画像再構成は、「投影からの再構成法」に基づいて行われます(南部, 1995)。すなわち、検出器によって捕えられた透過X線量の対数をとって試料物体の「投影(X線源と検出器を結ぶ直線に沿った物質の線吸収係数を積分したもの)」に変換し、これからコンボリューション



第5図 標準試料のバルク密度とCT値との関係(稲崎ほか, 1995による)。○:水ガラス試料, ●:ペントナイト試料。

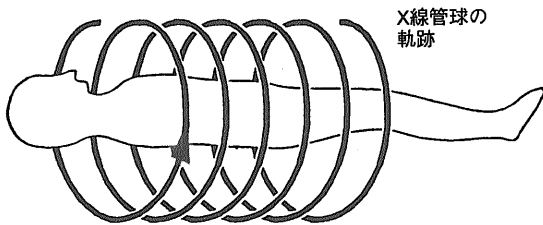
ン・バックプロジェクション法などによって画像が作られます。

このようにして得られたX線断層画像は、最大で0.3mm程度の空間分解能をもちます。空間分解能は、視野の大きさと視野を構成するマトリクスの数で決まります。また、CT値で表わされる物体の密度分布については、水の温度1℃の違いに相当する密度差を検知できる密度分解能を持っています(南部, 1995)。また、レントゲン写真では密度がほぼ均一ではっきりした像を作らない脳のようなものでも、適当なCT値の中央値と表示範囲を指定してやることで、わずかな密度差から構造を明瞭に識別することが可能です。CT値とは、各部位のX線吸収係数を水の吸収係数を標準として表示したものであり、水のCT値を0とし、空気は吸収係数がほとんど0なので、CT値は-1000となります。CT値から物質の密度への変換は、あらかじめ密度の判明している試料を標準試料として用いて、両者の関係から行われる場合が多いです(Wellington and Vinegar, 1987; Kenter, 1989; Raynaud *et al.*, 1989; Orsi *et al.*, 1994; Boespflug *et al.*, 1995; 稲崎ほか, 1995; 徐ほか, 1996など)。これらの結果は、同じ種類の標準試料についてはCT値と密度が良い直線関係にある(第5図)ことを示す一方、標準試料の種類によって関係が異なることを示しています。稲崎ほか(1995)はこのため、密度標準を選定する際の注意事項として、測定試料と類似した密度値を有すること、測定試料と標

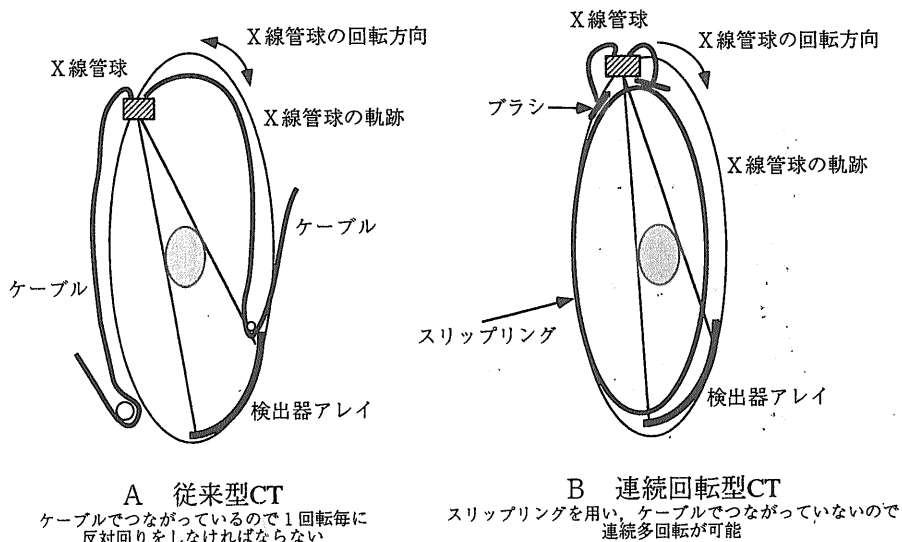
準試料の間に化学組成の大きな違いがないこと、を上げています。また、医療用CT装置を用いた密度の高い試料の密度測定には、光電効果の影響が大きいため注意が必要であるとされています(稲崎ほか, 1995)。

近年では、X線源と検出器を試料の周りを回転させ測定を行いながら、試料台を移動させることによって螺旋状にデータを採取し、X線吸収係数の三次元的分布を測定できるようになりました(第6図)。これにより従来の単純断面の撮像の繰り返しに比べて、短時間で高精度の三次元構造を容易に知ることが可能となりました。このような螺旋走査型CT(メーカーにより、ヘリカルスキャン、ボリュームスキャンなどと呼ばれる)は、スリッピング技術を応用した高速連続回転型X線CT装置の実現により可能となったものです(柴田, 1994)。この実現は、(1)連続多回転スキャン、(2)試料台等速度スライド、(3)再構成技術の新たな進展、などの新

技術の開発によるものです。連続多回転スキャンは、X線源とこれに電力を供給する高電圧発生器、検出器と検出データの送信装置の間の電力及びデータのやり取りをスリッピングを用いて、ケーブルによる接続をやめたことで実現できました(第7図)。従来のCTでは、これらの間はケーブルで接続されていたため、1回のスキャン(360°回転)の度毎に回転方向を変えてやる必要があったため、回転方向変更のための休止時間が必ず必要でした。次にこの方法では、試料を連続的にスキャナーに送り込むことが必要です。そして画像の再構成にあたっては、撮影断面が試料のどの位置にあっていたかを知ることが重要です。そのため、試料台を等速度で移動させると共に撮影中の試料台の位置情報も同時に収集するようなシステムとなっています。また、従来のスキャンでは撮影域が円盤状であるのに対して、螺旋状のスキャンでは撮影中に試料が移動するために1回転の撮影の開始点と終点の位置が異なることになります。これを従来の方法のまま画像を作ると、試料によっては強いアーチファクト(人工的に作られた模様)を生じることがあります。そのため、同じ回転角の空間的に隣り合うデータから、線形補間により、ある位置の断面のデータを再構築して画像を再構成する補間再構成法と呼ばれる手法が開発されました。さらに、実行スライス厚の増大を解決するために対向ビーム補間再



第6図 螺旋走査型CTスキャナー(南部, 1995による)。



第7図 従来型CTと連続回転型CTの構造の比較。

構成法が開発されています。これらの新技術により実用化された螺旋状スキャンの体軸方向の分解能はスライス厚、試料台移動速度、再構成間隔、画像再構成法などによって変わりますが、最新の機器では最高性能で0.5mmとなっています。

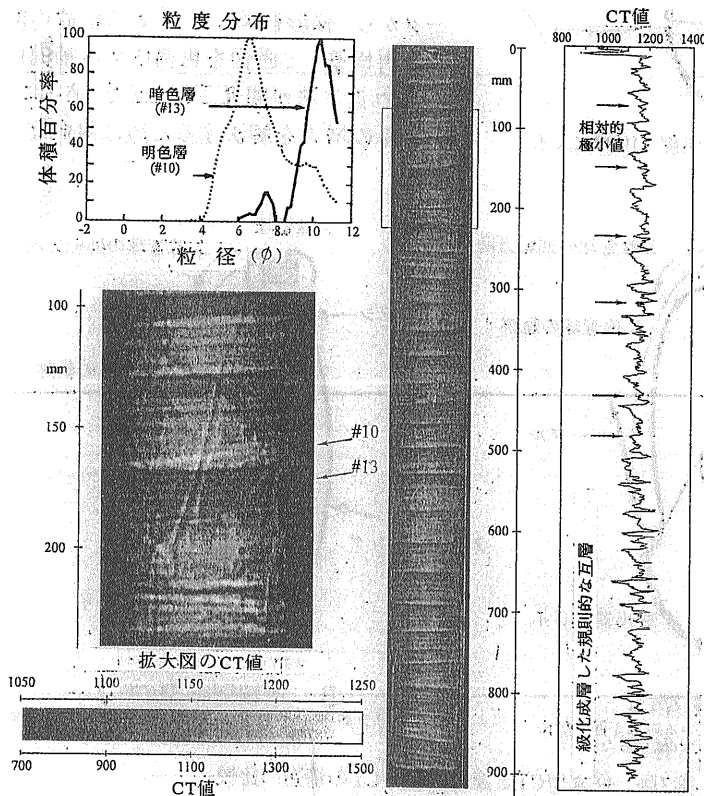
3. X線CT装置の地球科学試料への適用例

X線CT装置の地球科学試料への適用は1980年代から推進されてきました。利用は、土壤分野、石油地質分野、堆積学分野、岩石学分野、構造地質分野、古生物学分野などの幅広い分野で行われてきています。

土壤や堆積学分野では、試料の湿潤密度の三次元的変化や内部構造の観察を迅速かつ非破壊で分析可能であることを示しました(Petrovic *et al.*, 1982; Warner *et al.*, 1989; Kenter, 1989; 稲崎ほか, 1992, 1995; Orsi *et al.*, 1994; Boespflug *et al.*, 1995; 徐ほか, 1996; 横川ほか, 1997; 池原ほか, 1997など)。これらの研究によって、土壤から湖沼・浅海・深海底堆積物にいたるまでの試

料についてX線CT装置による分析の有効性が示されました。特に、Boespflug *et al.* (1995)によるmm~cmオーダーの明暗縞模様様のCT画像と各種分析結果をあわせた解析例(第8図)は今後の堆積物の非破壊迅速分析の一つの方向を示すものでしょう。また、螺旋走査型CTを利用すれば、斜交層理などの堆積構造の三次元的形態を容易に観察できる事から、浅海堆積物やタービダイトなどの分野での利用もさらに増大することが予想されます。

石油地質の分野では、貯留岩層解析の一環としてボーリングコアなどの試料中の流体移動やコア中の密度・空隙率分布の測定、フラクチャ分布や形状の観察・測定にX線CT装置が広く用いられてきています(Wellington and Vinegar, 1987; Vinegar and Wellington, 1987; Hunt *et al.*, 1988; 岡津, 1995など)。岩石中の空隙の形や大きさとそれらのつながり具合や流体流路の複雑さは、石油や天然ガス、熱水、蒸気などの輸送特性に大きな影響を与えます。X線CT装置では空隙の三次元的形態を捕えられるほか、画像イメージから流路と流路を通過する流体の挙動を解析したり



第8図
X線CT装置を用いた堆積物の縞構造の解析例 (Boespflug *et al.*, 1995 による)。

(中野, 1995), 試料内部を移動する流体の様子を直接観察したりできます (Wellington and Vinegar, 1987; Peters and Hardham, 1990; 岡津, 1995など). これらの研究結果は, 原油の二次・三次回収 (原油の生産率の向上) に貢献しています. また, 最近将来の資源として注目を集めてきている天然ガスハイドレートについても, その存在や物性測定にX線CT装置が用いられています (内田ほか, 1996など). これもX線CT装置の非破壊迅速性が評価されているところでしょう.

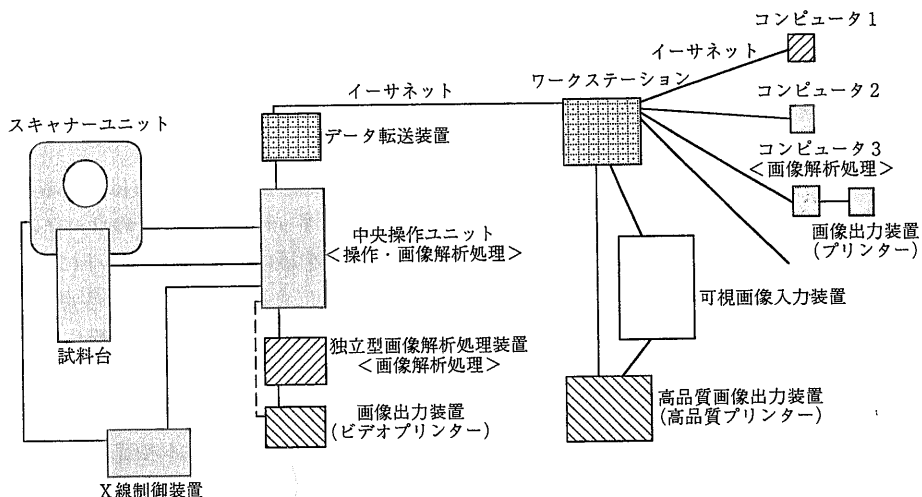
X線CT装置はこのほか, 岩石学分野では自然あるいは三軸圧縮実験を受けた岩石の内部構造の三次元的観察から割れ目の解析や鉱物分布の測定など (Raynaud *et al.*, 1989; 中野ほか, 1992, 1997; 川方ほか, 1997など), 構造地質の分野では地層の褶曲や断層の発生の理解のための変形実験における物質の変形の連続的観察 (Colleta *et al.*, 1991), 古生物学分野では化石の含有状況の観察 (西澤ほか, 1995), 珊瑚の年輪の解析 (Logan and Anderson, 1991; Bosscher, 1993), 環境分野では氷床コア中の気泡の含有状況 (三次元密度分布) の解析 (Kawamura, 1990) などに使われていて, 成果を上げています.

これらの研究には, 比較的低密度の試料については医療用X線CT装置で十分ですが, 岩石試料の様な高密度の試料の分析や高分解能での分析には産業用X線CT装置を用いなければなりません. 産業用のCT装置では, 医療用 (通常の管電圧

の場合, 実効エネルギーは60keV程度) に比べて発生させるX線のエネルギーが高い (1MeV以上のものもある) のでX線の透過能が高く, 瞬時線量が大きい上, 検出器のダイナミックレンジが広く, 画素数も大きいものがある (医療用通常512×512, 産業用512×512~2048×2048) ため, 高密度の試料についても分解能の高い鮮明な画像を得ることが可能です (伊東, 1993). ただし, 産業用のCT装置は一般に大型かつ高額であり, 撮影に時間がかかるなどの特徴があります. したがって, 試料の分析にあたっては, 試料の種類と数・必要とするデータの種類などを考慮して目的にあった装置を用いることが必要です. また, 定量的なデータの取り扱いの際に重要なCT値から密度への変換にあたっては分析に用いた機器・条件で, 標準試料との比較分析を行うことが必要です.

4. 地質調査所に導入されたX線CT装置の概要

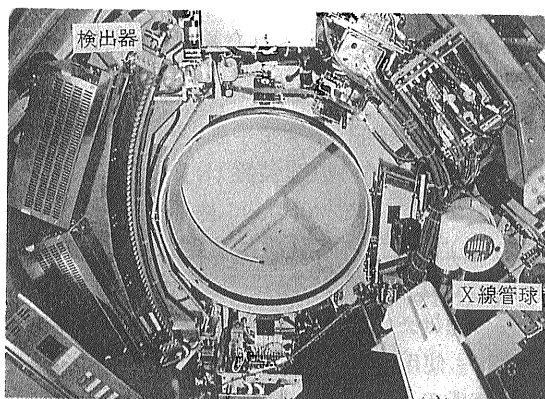
平成7年度の補正予算で平成8年3月に地質調査所に導入されたX線CT装置 (日立全身用CTスキャナシステムCT-W2000; 第1,9,10図) の概要は第2表のとおりです. 本装置は地質調査所の共同利用機器になっており, 地質調査所の人であれば, 機器使用のための講習を受け, 使用者に登録すれば誰でも使用することができます. 所外の方は, 地質調査所の人 (もちろん登録使用者) との共同研究



第9図 地質調査所に導入されたX線CT装置の構造.

第2表 地質調査所に導入されたX線CT装置の概要。

| | |
|--------------|--|
| スキャン方式 | スリッパリング連続回転方式 ローテート・ローテート+オフセットディテクタ方式 |
| スキャン時間 | 0.6, 1.0, 2.0, 4.0秒 |
| 有効視野 | 16, 20, 25, 30, 35, 42, 48cm φ |
| スライス厚 | 1, 2, 5, 10mm |
| スライス数 | 1スライス/1スキャン |
| ガントリ開口径 | 700mm φ |
| ガントリ傾斜角 | ±30° |
| ビームの形状 | 47.1° ファンビーム |
| X線発生方式 | 連続X線 (高周波インバータ制御) |
| 管電圧 | 100, 120, 130kV |
| 管電流 | 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350mA(125kV) |
| X線管 | 陽極熱容量1420kJ(2000kHU) |
| X線検出器 | 高圧Xeガス検出器768素子 |
| 画像再構成マトリックス数 | 320×320/512×512 |
| 再構成画像画素寸法 | 最小0.3mm (ズーム機能により0.3mm以下の任意の画素寸法の設定が可能) |
| 再構成フィルター関数 | 標準10種類, 高解像用4種類 |
| X線吸収係数の測定範囲 | -1,000~+4,000 (120kVにおける水の吸収値を0, 空気の吸収値を-1,000とする) |
| 画像再構成時間 | 5~10秒 |
| 中央演算処理装置 | マルチプロセッサ方式 (メインプロセッサ32ビットCPU, イメージプロセッサ3台) |
| 画像記憶装置 | 1.1GBハードディスク 1台 5インチ光磁気ディスクユニット |
| 画像表示マトリックス数 | 512×512, 1024×1024 |
| 寝台高さ | 360~1050mm |
| 寝台幅 | 670mm (天板幅380mm) |
| 寝台長さ | 2135mm |
| 天板の移動範囲 | 1435mm (有効撮影範囲; 天板先端から1110mm) |
| ピッチ送り | 0.5mm単位 |
| 天板の送り精度 | ±0.25mm |



第10図 地質調査所に導入されたX線CT装置のX線管球部と検出器部。

という形をとっていただければ、使用することは可能です(機器の操作は登録使用者が行う)。

装置は、螺旋状スキャンの可能な連続回転方式の医療用CT装置で、各種設定や操作は容易に行えます。搭載しているX線管球は2,000kHU(1,420kJ)で高周波インバータ制御により連続X線を発生させます。管電圧は、100, 120, 130kVの三種類から選択可能です。X線の検出器としては、高圧キセノンガス検出器を用いており、主検出器760素子、補正用検出器8素子からなっています。画像のスライス厚は、1, 2, 5, 10mmから選択可能になっています。有効視野は直径160mm~480mmの間で7つを選択可能(ズーム機能によ

り16~480mmの間で任意に設定可能)であり、320×320マトリックスでは最小画素寸法0.5mm、512×512マトリックスでは0.3mmとなっています。なお、ズームにより0.3mm以下の任意の画素寸法が設定可能になっています。ガントリの開口径は700mmで通常の地質試料であれば、撮影・計測が可能です。撮影された画像は、添付のソフトウェアにより、距離計測やCT値のプロファイル、ある範囲内のCT値表示やヒストグラムの作成、容積計算、三次元立体表示などの画像解析処理が可能です。また独立の画像解析処理装置を別に有していて、CT装置本体で、スキャン、画像解析作業中でも、独立して画像の呼びだし、各種画像解析を行うことが可能になっています。また、専用のビデオプリンターにより、モニター上の画像のハードコピーを撮ることができます。

本装置の最も特徴的な点は、採取した画像データをイーサネットを通じて別のワークステーションに送り、これを経由してイーサネットにつながるどのコンピュータにも送ることができる点です(第9図)。医療用のX線CT装置では一般に、得られた画像はディスプレイ上でその画質を評価した後、X線フィルムとして残されます。X線CT装置自体には、フロッピーディスクユニットや光磁気ディスクユニットが装備されていることが多いですが、これらへの書き込み様式には医療データとしての機密保持など

のためあって、独自の様式がとられているので一般のコンピュータでそのデータを処理するにはいくつかの問題がありました(稲崎・中野, 1993; 稲崎ほか, 1995)。稲崎・中野(1993)は、医療用CT装置で得られた画像データをMS-DOSで取り扱い、パソコン上で処理できるシステムを開発しています。本装置の場合、得られた画像データを特別な処理をすることなく、転送用のソフトウェア・ハードウェアを介して決められたワークステーションに送ることが可能です。さらに自分のコンピュータからこのワークステーションにアクセスすることによって、デジタル画像データを各自のコンピュータで任意のソフトウェアを用いて容易に処理することが可能になっています。

5. 撮影準備と撮影

それでは試料を撮影して見ましょう。まず、機器への通電状況を確認します。そして、スキャナー本体のあるCT室と操作室の温度制御用空調装置のスイッチをいれます。X線CT装置ではX線管球から多量の熱が発生します。測定値となるCT値には温度依存性がありますので、室内温度を一定に保つことが必要となります。室温は、中心値20～28℃、変動範囲±2℃の範囲で設定する必要があります。本装置では、21℃に設定されています。続いて装置本体のスイッチをいれましょう。数分の待ち時間の後、ソフトウェアが立ち上がります。機器の指示にしたがって、ウォームアップを行います。次に、エアキャリブレーションを行います。これは、空気CT値を測定してキャリブレーションを行うものです。必ず測定に使用する管電圧・管電流の条件でキャリブレーションを行うことが必要です。

これで撮影前の準備が整いました。まず、画像を保存するためのファイルを作成します。このヘッダーに試料の種類や番号などをいれておきます。使用する測定条件が前もって設定されていれば、それを選ぶだけで管電圧・管電流・フィルター・視野の大きさ・撮影枚数・撮影間の試料台の送り距離などは撮影時にいちいち選ぶ必要はなくなります。医療用の装置ですので、患者データ(Patient Data)となっており、性別や生年月日を入れる項目

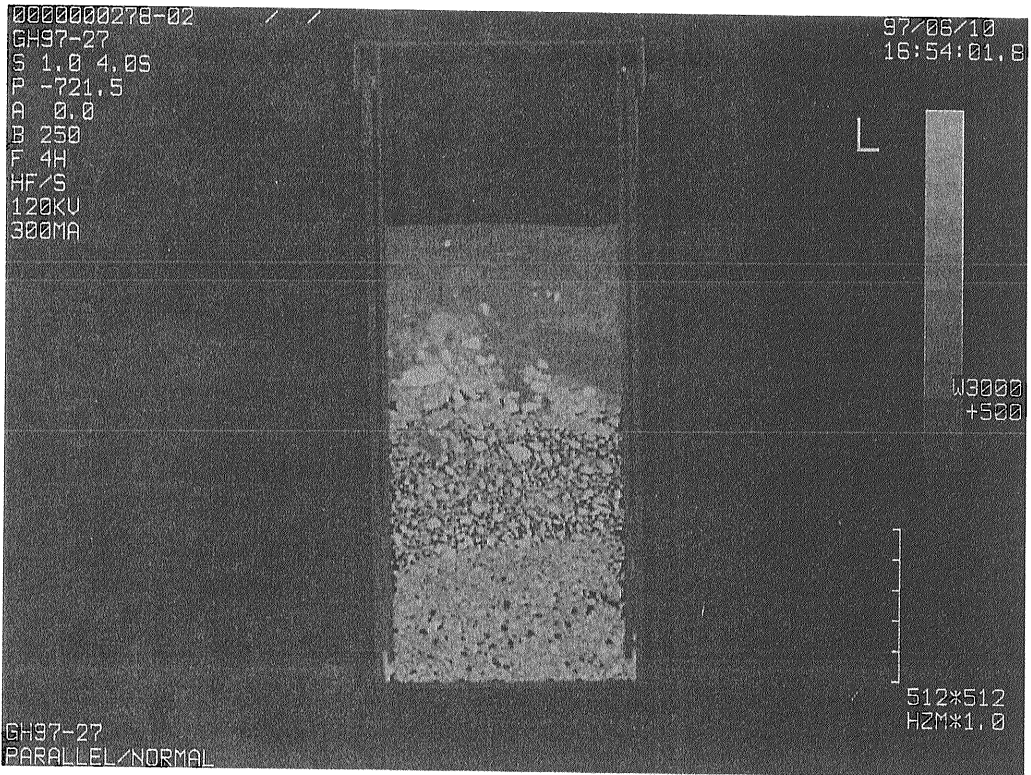
がありますが、地球科学の試料では空欄でよいでしょう。簡単なコメントなどを書き入れることもできます。ファイルが作成できたら、撮影に移りましょう。試料台に試料を乗せます。視野の中央に試料が来るように注意しましょう。視野の中央にあるほどアーチファクトがでづらくなります。試料がセットできたら、撮影を始めます。撮影方法には、従来の1回転1スキャンを繰り返す方法(ノーマルスキャン)、最短0.1秒間隔のCT画像の再構成が可能な高速連続で撮影する方法(ダイナミックスキャン)、試料台を一定速度で送りながらスキャナーを連続回転させて撮影する方法(ポリウムスキャン)が選択できます。また撮影条件の設定には、スキャノグラムという画像を撮ってその上で種々の設定を行っていく方法と、操作盤上で設定していく方法があります。撮影方法の選択・撮影条件の設定が終わったら、あとはスタンバイ(STANDBY)ボタンを押してスタート(START)ボタンが点滅するのを待ちましょう。スタートボタンが点滅すれば、機械の方の準備はOKです。ボタンを押して撮影を開始します。

画像の再構成が終わると、装置のディスプレイ上に画像が現われます。CT値の中央値や表示範囲を適当に操作して、最も見やすい画面を作りましょう。このときアーチファクトの入り方などを確認して、目的に耐えうる画像かどうかを確認してください。これらの画像はすべて、装置のハードディスクに書き込まれています。もちろん不必要な画像は後で消去することは容易です。また、誤って消去されたくなければ、プロテクトをかけておくことも可能です。画像は前述の様にこの装置を使っても画像解析処理は可能ですし、イーサネットを通じて必要な画像だけを自分のコンピュータに送ることも可能です。それぞれ好みに応じて解析処理をしてください。

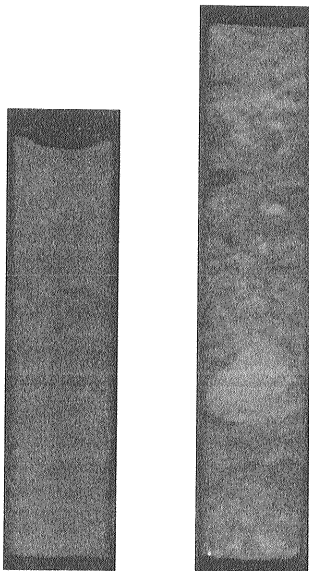
6. X線CT装置を用いた堆積構造の観察例

それではX線CT装置によって撮られた画像をいくつかお見せしましょう。第14図を除いて、地質調査所に導入された装置で撮影されたものです。

第11図は、静岡県清水市沖の駿河湾から採取された表層堆積物です。表層の泥質堆積物の下に細



第11図 静岡県清水市沖駿河湾から採取された表層堆積物のX線CT画像(試料の幅7.5cm).

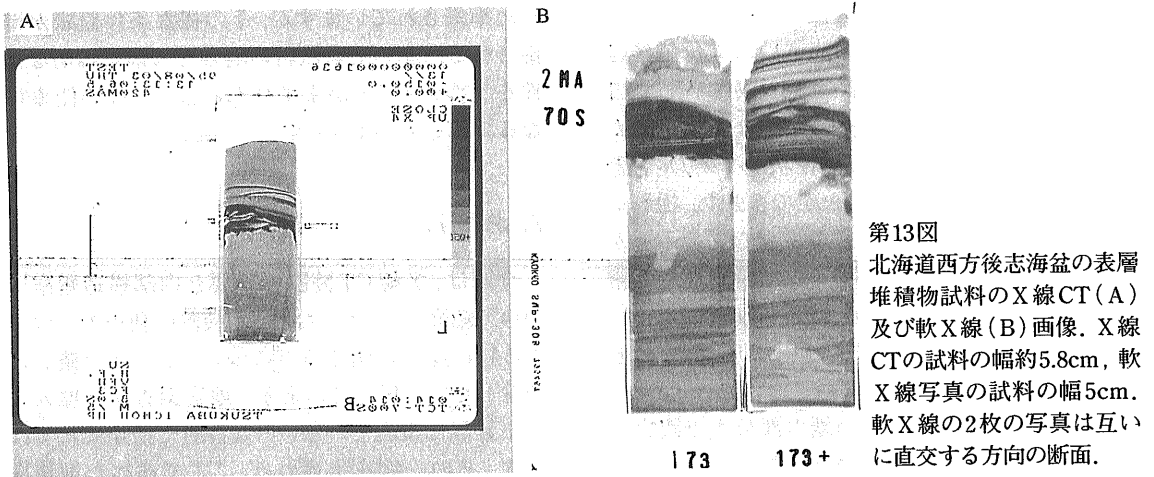


第12図 「しんかい2000」により秋田沖日本海から採取された柱状試料のX線CT画像(池原, 1997)による, 試料の幅5cm).

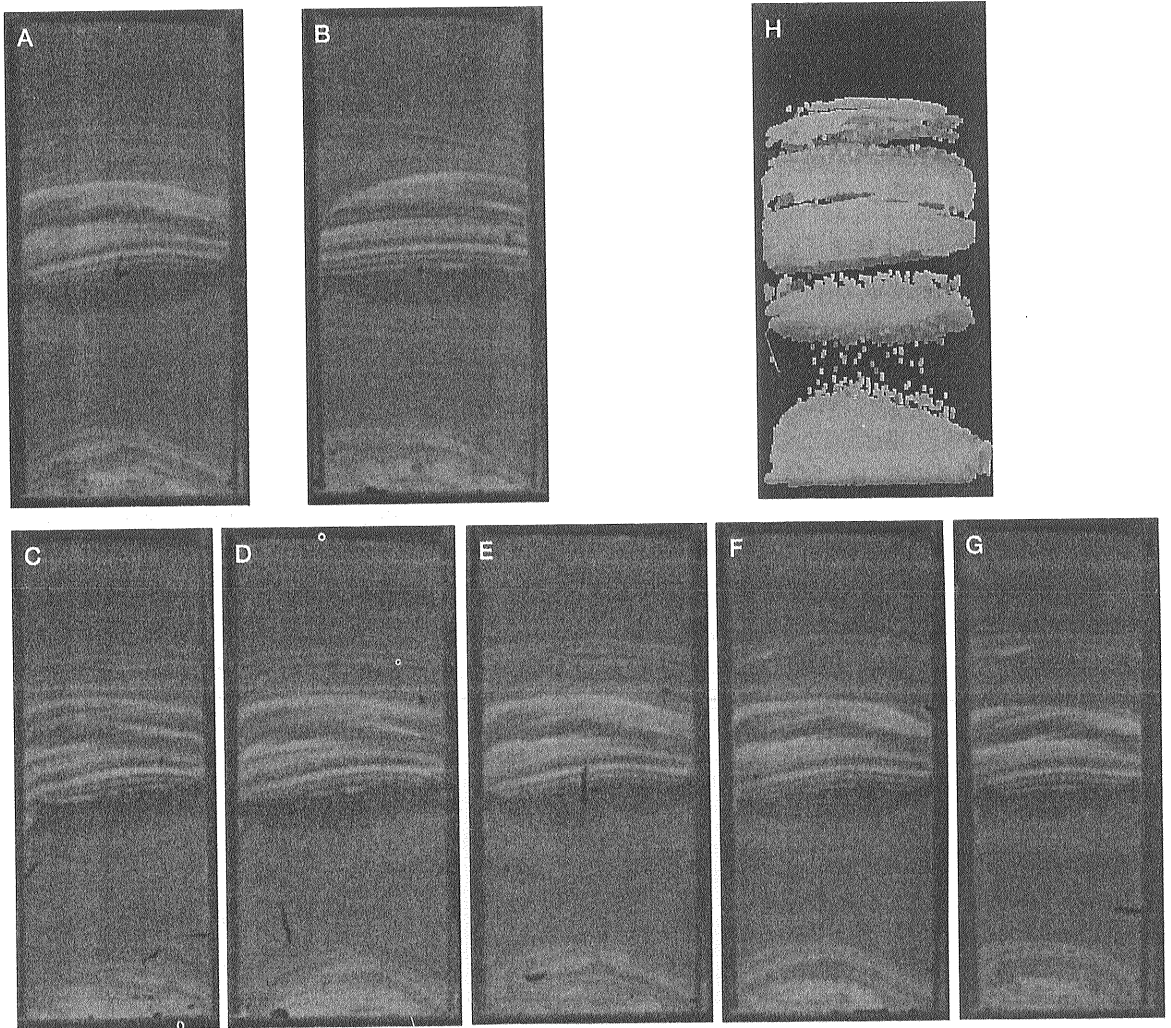
変形構造があることも観察できます。第12図は、潜水調査船しんかい2000により秋田沖日本海から採取された2本の柱状試料です(池原, 1997)。左は半遠洋性粘土からなっていて、生物擾乱が著しいことが分かります。一方、右は崖の中腹から採取されたもので、試料のほぼ中央部に軽石(白い楕円状の部分)が挟在しています。この軽石の存在は、コアの外側からは認識できなかったもので、この画像があったおかげで、試料の処理がスムーズにいきました。また、軽石よりも下位の部分のほうが軽石周辺の粗粒部やその上の表層部分に比べて粒度が細粒(黒っぽい=CT値が小さい=密度が小さい)であることが分かります。

第13図は、北海道奥尻島の北方の日本海(後志海盆)から採取された表層堆積物試料の断面です。表層下に北海道南西沖地震の地震性タービダイトが見られます。AはX線CT装置による画像、Bは1cmの厚さに整形した試料の軟X線撮影装置による画像です。比較すると画像の分解能は軟X線写真の方が高いことが分かります。軟X線写真は写真用印画紙に直接焼き付けていますから印画紙表

礫からなる層があることが分かります。細礫の一つ一つが認識できます。さらに、細礫層に脱水に伴う



第13図
北海道西方後志海盆の表層堆積物試料のX線CT(A)及び軟X線(B)画像。X線CTの試料の幅約5.8cm, 軟X線写真の試料の幅5cm. 軟X線の2枚の写真は互いに直交する方向の断面。



第14図 奥尻島西方日本海盆の表層堆積物試料のX線CT画像。A,Bは互いに直交, C~GはAに平行に1cm間隔の断面の画像。Hは螺旋状スキャンから作成した三次元画像。A,Bの試料の幅7.5cm. 他の画像の縮小率は同じ。

面の銀粒子の大きさが画素寸法になりますので、X線CT装置の画素寸法よりも小さいので分解能は軟X線写真の方がよくなる訳です。しかし、X線CT装置の画像は特別な整形をすることなく(採られた表層堆積物試料の表面から円柱状の亚克力容器を押し込むだけ)撮影することができます。撮影後も軟X線写真のように印画紙の現像などの手間がかかりませんので、画像を得るまでの時間も非常に短縮できます。Logan and Anderson (1991)は、珊瑚についての両者の画像を比べて、分解能は軟X線の方が高いこと、X線CTでは試料調整をする必要がないので、壊れやすい端の部分まで観察できること、あまり年輪のはっきりしない珊瑚については整形をして軟X線写真を撮ったほうがよいこと、CTでは非破壊・迅速な撮影ができるので生きている珊瑚の内部構造も撮影できるであろうことを述べています。どのくらいの精度の構造まで観察したいか、撮影にかけられる時間はどのくらいあるか、試料を壊してもよいかどうかによって両者を使い分ければよいのではないかと思います。第14図は、奥尻島西方の日本海から採取された試料です。やはり北海道南西沖地震の地震性タービダイトが観察できます(池原・井内, 1997)。AとBは互いに90°直交する断面の構造であり、C~GはAと平行に1cmおきに撮った断面の画像です。この間隔でも地震性タービダイトの断面構造が変化していくことが容易に認識できます。Hは螺旋状スキャンにより作成したこの試料の三次元画像です。やや解像度は粗いもののタービダイト砂層の三次元的形態がある程度分かります。もう少し適当な条件で表現してやることで、もう少し見やすい三次元画像になると思われれます。ところで、第11図及び第14図A~Gで試料を斜めに横断している模様があります。これはアーチファクトと呼ばれる人工的な模様です。この場合、試料容器の端から端に向かってアーチファクトができています。アーチファクトは密度が急激に変化する部分や形態的に突出した部分から発生しやすく、この場合は試料容器(亚克力製)の角から発生しています。アーチファクトの出方は、撮影条件(管電圧・管電流・使用するフィルターの種類など)によっても変化します。医療用のCT装置では、撮影する人体の各部位によって適切な管電圧・管電流・フィルター・スライス厚などがあらか

じめ準備されていますが、その様な条件設定が準備されていない地質試料の場合では最も適切な条件を見つけることがまず行わねばならない仕事になる場合も多いようです。

7. おわりに

今回は、X線CT装置の概要と内部構造観察について紹介しました。なお、本装置の利点の一つである物性測定に関する点については、次の機会に紹介したいと思っています。地質調査所に導入された装置は現在、いろいろな目的で使用されています。その一例を上げれば、ここで述べた堆積構造の解析のほか、岩石破壊実験試料中のクラックの解析、変成岩試料の構造解析、堆積物試料の物性測定、化石の三次元構造の解析、変形モデル実験の連続観察・解析などです。このほかにも、天然ガスハイドレートの分析などにも使用しようと計画中です。

メーカーの人にいわせれば、この手の装置は使えば使う程よいということですので、多くの人に使っていただきたいと思っております。決して安い装置ではありませんし、年間の保守・管理費用も安いものではありません。しかし、せっかく買った装置ですから、広く使用していただきたいというのが現在管理をしている者の思いです。前述の様に、地質調査所外の方の利用には多少面倒なところもあるかと思いますが、これは機器の管理の上からのものです。もし御利用になりたい場合には、お気軽にお問い合わせいただければと思います。いろいろな試料について、いろいろな使い方をし、少しでも諸現象の解明に役立てれば良いと思っています。

文 献

- 有田正史(1983): 堆積物の軟X線撮影法—その2—. 地質ニュース, no.350, 46-56.
- 有田正史・中村康夫(1981): 堆積物の軟X線撮影法—その1. 地質ニュース, no.320, 29-33.
- Boespflug, X., Long, B.F.N. and Occhietti, S. (1995): CAT-scan in marine stratigraphy: a quantitative approach. *Marine Geol.*, 122, 281-301.
- Bosscher, H. (1993): Computerized tomography and skeletal density of coral skeletons. *Coral Reefs*, 12, 97-103.
- Colletta, B., Letouzey, J., Pinedo, R., Ballard, J.F. and Bale, P. (1991): Computerized X-ray tomography analysis of sandbox models:

- examples of thin-skinned thrust systems. *Geology*, 19, 1063-1067.
- Holler, P. and Kogler, F.-C. (1990): Computer tomography: a non-destructive, high-resolution technique for investigation of sedimentary structures. *Marine Geol.*, 91, 263-266.
- Hunt, P.K., Engler, P. and Bajsarowicz, C. (1988): Computed tomography as a core analysis tool: applications, instrument evaluation, and image improvement technique. *J. Petrol. Tech.*, 40, 1203-1210.
- 池原 研 (1989): 軟X線による未固結堆積物の堆積構造観察法。地質ニュース, no.418, 17-25.
- 池原 研 (1997): 潜航調査からみた日本海東縁秋田沖佐渡海嶺の活断層。JAMSTEC深海研究, 13 (投稿中)。
- 池原 研・井内美郎 (1997): 北海道西方後志海盆の北海道南西沖地震の地震性タービダイトの三次元堆積構造。堆積学研究会1997年春の例会講演要旨集, 51.
- 稲崎富士・中野 司 (1993): 地質試料解析のためのX線CT画像データ処理システム。情報地質, 4, 9-23.
- 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, 46, 629-642.
- 伊東新一 (1993): X線CT装置の応用。鋳物, 65, 957-960.
- 川方裕則・長 秋雄・柳谷 俊・島田充彦 (1997): 封圧下の岩石の破壊過程の解明に向けて(2) - X線CTスキャン。地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集, 285.
- Kawamura, T. (1990): Nondestructive, three-dimensional density measurements of ice core samples by X-ray computed tomography. *J. Geophys. Res.*, 95, 12407-12412.
- Kenter, J. (1989): Application of computerized tomography in sedimentology. *Marine Geotech.*, 8, 201-211.
- Logan, A. and Anderson, I.H. (1991): Skeletal extension growth rate assessment in corals, using CT scan imagery. *Bull. Mar. Sci.*, 49, 847-850.
- 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ュミレーション。地調月報, 46, 605-27.
- 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。地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集, 341.
- 中野 司・西澤 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, 14, 616-20.
- 南部恭二郎 (1995): 医学におけるトモグラフィ。地学雑, 104, 941-951.
- 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。地調月報, 46, 565-571.
- 岡津弘明 (1995): X線CTスキャナーそのコア分析への応用技術開発一。非破壊検査, 44, 319-324.
- Orsi, T.H., Edwards, C.M. and Anderson, A.L. (1994): X-ray computed tomography: a nondestructive method for quantitative analysis of sediment cores. *J. Sed. Res.*, A64, 690-693.
- Peters, E.J. and Hardham, E.J. (1990): Visualization of fluid displacements in porous media using computed tomography imaging. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 4, 155-168.
- Petrovic, A.M., Siebert, J.E. and Rieke, P.E. (1982): Soil bulk density analysis in three dimensions by computer tomographic scanning. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 445-460.
- Raynaud, S., Fabre, D., Marzerolle, F., Geraud, Y. and Latiere, J. (1989): Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a nondestructive method: X-ray tomography. *Tectonophy.*, 159, 149-159.
- 柴田 豊 (1994): ヘリカルCT原理・歴史。映像情報メディカル特別号, ヘリカルCTの実践的活用法, 2-6.
- 徐 垣・岡津弘明・鈴木清史 (1996): アマゾン海底扇状地に見られる崩壊堆積物ーガスハイドレートの溶解と斜面崩壊一。月刊地球, 18, 667-674.
- 内田 隆・山本純治・岡田真一・岡津弘明 (1996): メタンハイドレート天然試料のX線CTおよびNMRを用いた分析ーODP Leg164から得られた天然試料の例一。月刊地球, 18, 704-709.
- 横川美和・土山 明・平井秀明・小石川篤 (1997): 水槽実験の未固結堆積物のX線CT法による撮影の試み。堆積学研究, 44, 71-74.
- Vinegar, H.J. and Wellington, S.L. (1987): Tomographic imaging of three-phase flow experiments. *Rev. Sci. Instrum.*, 58, 96-107.
- Warner, G.S., Nieber, J.L., Moore, I.D. and Geise, R.A. (1989): Characterizing macropores in soil by computed tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 653-660.
- Wellington, S.L. and Vinegar, H.J. (1987): X-ray computerized tomography. *J. Petrol. Tech.*, 39, 885-898.

IKEHARA Ken (1997): X-ray Computer Tomography: A Nondestructive Method for Quantitative Analysis of Geological Materials (Part1) - Instrument and Imaging.

<受付: 1997年7月9日>