

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

稲崎富士*・井内美郎**・中野 司***

INAZAKI Tomio, INOUCHI Yoshio and NAKANO Tsukasa (1995) Use of medical X-ray CT scanner for nondestructive and quantitative analysis of lake sediments. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.46(11), p.629-642, 7 figs., 2 tables.

Abstract : The internal density structure of 27 m of bottom sediments cored at Lake Yunoko, Tochigi Prefecture, Central Japan, was analyzed using a medical X-ray CT scanner. Fine sedimentary structures such as lamination in interlayered tephra, alternation in organic rhythmites, and grading in episodic sandy beds were identified in the CT profiles with spatial resolution of less than a few mm. Calibration with known standards indicates that the accuracy of bulk density measurements estimated from the X-ray CT image data is better than $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$. This study shows that the X-ray CT scanner is a powerful tool for nondestructive, quantitative analysis of geologic materials.

要 旨

医療用の X 線 CT スキャナを用いて栃木県奥日光湯の湖で採取した総計約 27 m の底質堆積物コアを分析した。コアの CT 画像からは、挟在火山灰層中のラミナや有機質堆積物中の細互層などの微細堆積構造をミリメートルオーダーの分解能で明瞭に識別することができた。密度構造を分析するために特別に用意した標準試料と比較したところ、おおむね $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 以下の精度で密度推定が可能であることがわかった。以上より X 線 CT スキャナは、地球科学試料の内部構造を非破壊で定量的に分析する技法として、強力なツールであるといえることができる。

1. はじめに

地球規模の環境変動に対する国際的な関心が高まってきているなかで、過去の環境変動を明らかにするために堆積物に対する環境地質学的な分析が活発に行われるよ

うになってきている。特に湖沼や湿原などの堆積物は、陸域の環境変化情報を含んでいること、海成堆積物と比較すると堆積の連続性はやや劣るものの、堆積速度が大きいことにより変動情報を高い時間分解能で識別できるという利点を有している。このため、氷床コアサンプルとともに、代表的な分析対象試料として扱われてきている。

堆積物から環境変動情報を読みとる手法としては、同位体分析、各種化学分析、微化石・花粉分析等が一般に用いられている(たとえば日本第四紀学会, 1993)。しかし、これらの方法の多くは専用の分析機器を必要とし、また高品質のデータを得るには熟練した専門的技術者と時間を必要とする。したがって、現実的には試料分析を連続的に実施することができず、サンプリングが離散的となって細かな変動を読みとりにくいという弱点がある。粒度分析や密度・含水率測定等の物理試験は、専門的知識は必要としないものの、時間を要するため分析点を密

* 地質情報センター (土木研究所併任)

** 海洋地質部

*** 地質情報センター

Keywords : X-ray CT, tomodensitometry, lake sediment, Yunoko

にとれないという点では上記の手法と同様である。湖沼堆積物等から詳細な環境変動情報を読みとるには、mm～サブmmオーダーでのサンプリングと分析が必要とされる。

このような微細な堆積構造を識別可能な方法の一つに軟X線写真撮影法があり、湖沼堆積物中のイベント層の確認などにしばしば利用されてきている(井内, 1990)。しかしこの方法も、事前に採取試料を厚さ5～10mmの板状に整形する必要があること、露光・現像時間の調整に経験を要すること、画像が印画紙上に出力されるだけであるため、定量的な解析が困難である等の問題点があった。石井ほか(1987)は、土試料に対して事前の試料調整を省略し、サンプリングチューブに入れたままの状態ですべてX線撮影を行い、自動現像装置を用いて現像処理工程についても効率化・均質化をはかる技法を実用化している。このシステムは力学試験のためのサンプリング試料の品質管理(試料採取時の乱れ・異質片の混入の有無)を主な目的としたものであるが、X線写真の濃度を基準試料の濃度と比較することで湿度密度が推定できるほか微細な堆積構造を観察できるとしている。

X線を用いるという点では軟X線撮影法と同様であるが、原理的には全く異なる非破壊分析法にX線CT法がある。X線CTは、被検体に対して全周方向からX線を照射し、投影データを逆解析して被検体内部のX線吸収係数の分布を2次元のマトリックスとして画像化する。1970年代初頭に医療診断分野で開発・実用化された比較的新しい技術であるが、人体内部を非破壊・非観血で観察できることから画期的な診断装置として急速に普及が進んだ。近年に至って、地球科学試料の分析にもX線CTはしばしば利用されるようになってきている。この技法により、先に述べた湖沼堆積物中のテフラ層や洪水堆積物などのイベント層の存在や堆積構造を明らかにすることができる。またそれらの堆積物の物性を数値化することで、堆積過程の推定にも応用可能である。以下にX線CTスキャナを用いた地質試料分析についての研究史、およびCTの画像処理における筆者らの技法について述べる。

2. CTの概要および画像処理

2.1 地質試料分析へのCTの利用史

地質・土質試料の内部構造解析へのX線CTの利用は、まず土壌科学分野で進められた。Petrovic *et al.* (1982)は、土壌のバルク密度の3次元的变化を非破壊で推定する手法として、医療用X線CTスキャナが実用的な精度と分解能を有していることを検証した。Warner *et al.*

(1989)は、X線CTスキャナによって土壌試料中のクラックや巣穴など1mm程度以上のマクロポアが容易に識別できることを示した。

石油地質分野では、Wellington & Vinegar (1987)が貯留岩層解析の一環として、コア中の二相流体移動のモニタリングとそれに関係するコア内部の密度・空隙分布の計測に、X線CTによる非破壊分析法が極めて有効であることを多くの分析・実験例を掲げて明らかにした。Castanier (1989)は、米国における二次原油回収問題に対するX線CTの利用についてレビューし、貯留岩研究にそれが非常に有効であると結論づけている。その後X線CTの利用は大手石油会社や大学に急速に拡がり(たとえば、Hunt *et al.*; 1988, Peters & Hardham; 1990, Sprunt *et al.*; 1991, Withjack *et al.*; 1991, Hicks Jr. *et al.*; 1992, Moss *et al.*; 1992など)、今日では同分野では標準的なコア分析手法となっている。

堆積学分野でも、1980年代末からX線CTが利用されてきている。Kenter (1989)はX線CTによって深海底堆積物コアの内部堆積構造や密度構造を、迅速かつ非破壊で分析できることを示した。Orsi *et al.* (1994)は堆積物コアに対して、対象としたX線CTが高い密度再現性を有していることを示した。Boespflug *et al.* (1995)はセントローレンス川河口部で採取した後氷期の海成堆積物を調べ、CT値が粒径と有機物含有量に密接な関係があり、CT画像に認められるmm～cmオーダーの周期的な明暗縞が年縞に対応することを示した。

我が国においてもX線CTは、種々の試料分析に利用されてきている。Kawamura (1990)はX線CTによって氷床コアサンプルの3次元的な密度構造を分析している。中野ほか(1992)は、岩石内部の空隙の3次元連続性を産業用のX線CTを用いて評価している。稲崎ほか(1992)は、医療用のX線CTによって湖沼底質試料の密度構造が評価可能であることを示した。服部(1993)は、軟X線発生装置を基幹としたCTシステムを自作し、木材試料の乾燥過程による内部亀裂の伸長、含水率変化を計測している。

以上に紹介した例では、一部を除いて分析に医療用のX線CTを利用している。医療用X線CTは、前述のように被検体として人体を対象として開発されたため、地球科学試料の分析にあたってはいくつかの工夫を必要とする。その第一は、画像出力に関する点である。医療用CTでは、通常の場合得られた断面像はCT装置に付属するディスプレイ上に白黒で濃淡表示され、品質評価された後、X線フィルムに転写して診断に付される。このように医療診断用に特化された画像処理では、地球科学的

分析に必要な画像解析が困難である。第二に、試料の定量的分析に関する点である。比較的低密度の人体(骨部を除くと水と同程度で密度変動も小さい)を対象としている医療用CTを用いて、地球科学試料(1.1~2.5 g/cm³程度)の密度構造を解析するには、装置の密度再現特性(精度・分解能等)をあらかじめ評価しておくことが必要とされる。筆者らはこれらの課題に対して、医療用CTで得られた画像データをMS-DOSで取り扱い、パソコン上でデジタル画像処理を行うことができるシステムを開発した(稲崎・中野, 1993)。また標準試料の用意とγ線スキャナデータとの比較により、詳細な密度構造評価が可能であることを示した(稲崎ほか, 1993)。以下に、これらの処理システムによる密度評価の技法と画像データ処理の概要を報告する。

2.2 CT値の算出と密度換算

CT (Computerized Tomography) の原理および医療用CT装置概要等についてはこれまでも数多くの報告があり(たとえば, Herman, 1980, 岩井, 1979), また前報(稲崎・中野, 1993)でも報告したので、ここでは密度推定に関連する部分を概述するにとどめる。

入射強度 I_0 の単色X線が被検体内で吸収を受け、透過後に強度が I になったとすると、両者の間には以下の式が成立する。

$$I = I_0 \exp(-\sum \mu_i \Delta X_i) \quad \dots\dots\dots(1)$$

あるいは、

$$\ln(I_0/I) = \sum \mu_i \Delta X_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

μ_i : 被検体内の微小領域 (voxel) i のX線の線吸収係数

ΔX_i : 透過X線が (voxel) i を切る長さ

である。

I, I_0 は計測値であり、また ΔX_i の値はX線の入射方向と voxel を設定する際の座標のとり方によって定まる値であるから、多量の投影データを逆解析することによって μ_i の値を求めることができる訳である。通常はこの解析過程にはラドン逆変換の手法が用いられる(岩井, 1979)。

医療用X線CTでは、各部位の吸収係数の値を以下の式によって水の値を標準とした「CT値」として表示するのが一般的である。

$$N_{CT} = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \times 1000 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

N_{CT} : CT値

μ_t : 各部位の線吸収係数 (cm⁻¹)

μ_w : 水の線吸収係数 (cm⁻¹)

(3)式より、水のCT値は0となる。また空気の吸収係数は水のそれと比べると非常に小さくほとんど0とみなせるので、CT値は-1000となる。

CT値から各部位の密度を求めるには、以下の式で定義される質量吸収係数を(3)式に代入すればよい(McCullough, 1975)。

$$\sigma_t \equiv \frac{\mu_t}{\rho_t} \quad \dots\dots\dots(4a)$$

$$\sigma_w \equiv \frac{\mu_w}{\rho_w} \quad \dots\dots\dots(4b)$$

ここで、

σ_t, σ_w : 各部位および水の質量吸収係数 (cm²/g)

ρ_t, ρ_w : 各部位および水の密度 (g/cm³)

すなわち、

$$\rho_t = \frac{\sigma_w}{\sigma_t} \left(\frac{N_{CT}}{1000} + 1 \right) \rho_w \quad \dots\dots\dots(5)$$

質量吸収係数の値は入射X線の強度、X線と物質の相互作用の形式、被検体各部位の元素組成によって変動する。医療用X線CT装置では、管球電圧は120~150 kVに設定されているが、そのときのX線の実効エネルギーは60 keV程度である(岩井, 1979)。このエネルギー領域での相互作用は、水ではコンプトン散乱が主に、地球科学試料ではコンプトン散乱に加えて光電効果が支配的となる。光電効果の質量吸収係数への寄与は、特に低エネルギー領域・高原子番号で大きくなるので、高密度(通常高原子番号とみなしてよい)試料を医療用CT装置で分析する場合の密度推定には注意を要する。

被検体が多量の水を含む地質試料の場合、すなわち含水比の大きな試料を対象とする場合は、(5)式において σ_t をほぼ一定と見なすことができ、各部位の密度は次の式で近似的に求めることができる。

$$\rho_t = A \left(\frac{N_{CT}}{1000} + 1 \right) \doteq \frac{N_{CT}}{1000} + 1 \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

$$A = \sigma_w \cdot \rho_w / \sigma_t \doteq 1$$

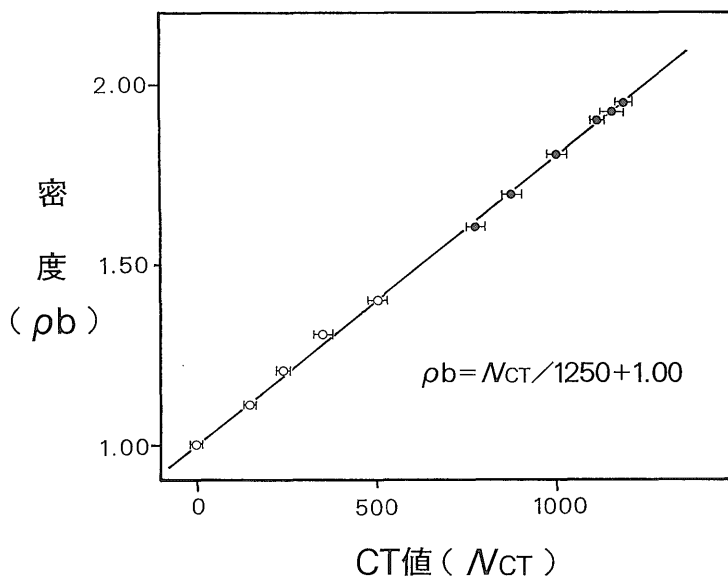
一方、あらかじめ密度の判明している試料を外部標準として用い、CT値との関係を直線回帰で求めて対象試料の密度構造を推定する手法が広く採用されている。

Wellington & Vinegar (1987) は、水と溶融石英 ($\rho_b = 2.20 \text{ g/cm}^3$) を標準に砂岩 ($\rho_b : 2.0 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$) の内部密度を直線近似して求めている。Kenter (1989) は、数海域から採取した石灰質軟泥のバルク密度とCT値との関係が、かなりばらつくことを示している。Raynaud *et al.* (1989) は数種類の岩石試料のCT値と密度との関係を調べ、石灰岩と砂岩とがそれぞれ異なる回帰直線で近似できるとした。Orsi *et al.* (1994) は、浅海底質コアについて、密度変動の小さい範囲 ($\rho_b : 1.97 \sim 2.07 \text{ g/cm}^3$) では相関係数 0.98 の値で直線近似が成り立つことを示している。Boespflug *et al.* (1995) は、鉾物試料および液体試料を分析し、CT値がバルク密度だけでなく、平均

原子番号にも依存していることを明らかにしている。これらのことは、密度標準を選定する際には、それが対象とする地球科学試料と類似した密度値を有すること、密度標準間で化学組成に大きな差異がないこと、という条件を満たすことが必要であることを示している。

今回筆者らが対象とした地球科学試料(後述)は、事前の調査によって含水比が200~900%以上、バルク密度が1.05~1.30 g/cm³程度の高有機質土を主体とし、その中にバルク密度1.5~2.0 g/cm³程度のシルト質堆積物・降下テフラ堆積物を挟んでいることが知られていた(井内; 1991, 栃木県; 1992)。そこでこれらの試料と類似した組成を有する密度標準として、水ガラスおよびベントナイトを選んだ。用いた水ガラス試料は、薬液注入用として多量に生産されているものである。バルク密度は最大で1.4 g/cm³であり、これを調整して1.10~1.40 g/cm³間の4標準を作成した。またベントナイト試料については、含水比を11.1%に調整後、成形圧を変えてプレス固化したもので、バルク密度は1.60~1.95 g/cm³の間の6標準である。

ある医療機関に設置されている医療診断用X線CT装置(樹東芝製:TCT-700S)を用いて求めたCT値と標



第1図 標準試料のCT値とバルク密度との関係

○:水ガラス試料, ●:ベントナイト試料, バーは標準偏差を表わす。キャリブレーション時の機器の仕様・撮像条件は表1および表2を参照のこと。

Fig.1 Cross plot of CT number (N_{CT}) versus bulk density (ρ_b) in g/cm^3 for standard samples. ○: water glass, ●: pressed bentonite, each bar represents standard deviation of CT number. A linear relation with high correlation coefficient defined by Eq. 7 is clearly shown between the two parameters.



第2図 医療用X線CT装置でのコア撮像の様子
通常被験者が仰臥する寝台上にコアを並べ、寝台をスライドさせて各コアの中心線を通る位置で断面像を撮る。

Fig.2 A view of core analysis using medical X-ray CT scanner. Core and standard samples are lined up on the bed on which usually patients lie supinely. Head plate is slid into gantry stepwise so as to obtain the center slice image of each core.

第1表 使用したX線CT装置の仕様
Table 1 Specification of a medical X-ray CT scanner used in this study.

項 目	仕 様 概 要
機 種	TCT-700S (東芝製)
スキャン時間	3秒標準 (1.8~6.0秒)
スライス厚	1, 2, 5, 10mm
検 出 器	512個
再構成マトリックス	512×512
スキャン方式	R/R (第3世代) 方式
撮 影 領 域	180~600mmφ (5段階)
X 線 管 電 圧	120KV
“ 管 電 流	55~200mA (5段階)
再 構 成 時 間	4~7秒

準試料のバルク密度との関係を第1図に示す。この図から、多少の変動は認められるものの、バルク密度が1.0~2.0 g/cm³の範囲では、CT値との間に以下の式で示されるほぼ直線的な関係があることがわかる。

$$\rho_b = N_{CT}/1250 + 1.00 \dots\dots\dots(7)$$

再構成時のCT値のばらつきは、水ガラス試料で±30程度、ベントナイト試料で±60程度の範囲であり、標準偏差はいずれも±30以内であった。これより今回の分析における密度再現性は±0.02 g/cm³程度と見積もることができる。

2.3 画像データ取得及び処理

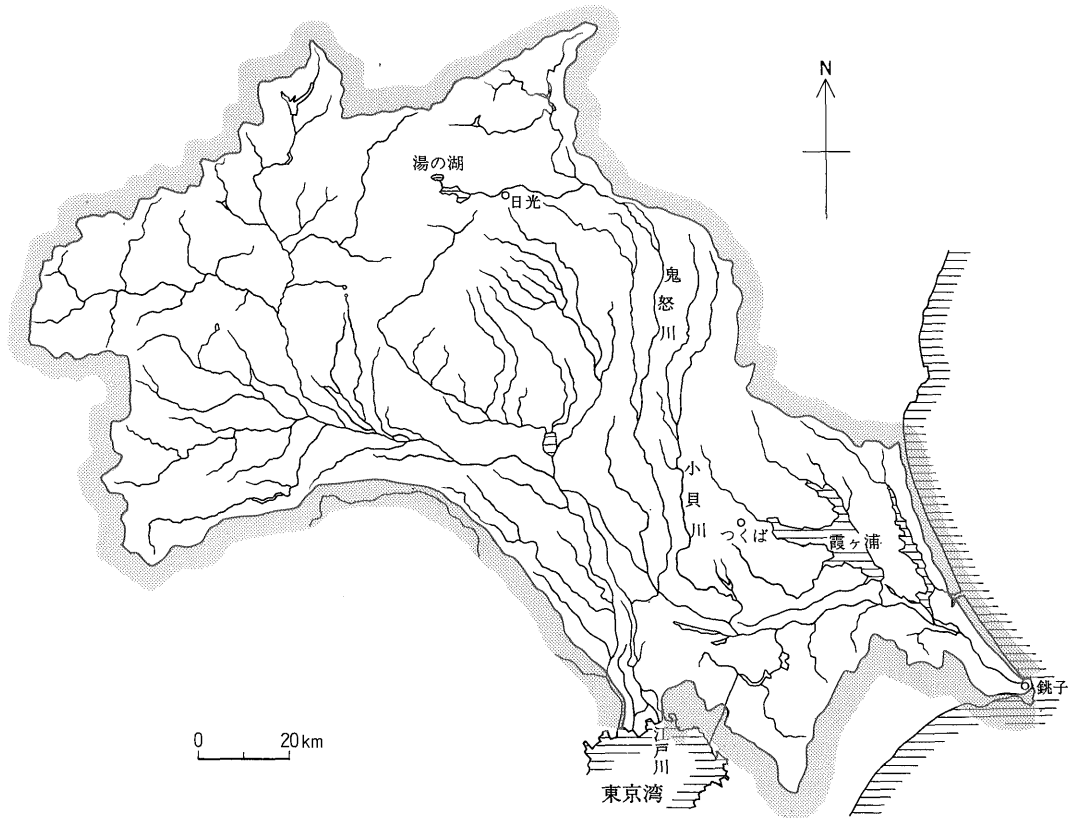
分析に用いたX線CT装置を第2図に、またその仕様を第1表に示す。本装置は、全身用の汎用CTスキャナとして国内外に広く普及している機種の一つで、約10秒の内にスキャン・画像再構成処理を行い、CRT上に表示することが可能である。同装置の寝台の天板上に、20 cm長

に分割した試料を10本程度立てた状態で並べ、試料の中心軸をとる断面像が得られるように天板を電動で移動して連続撮像した。

柱状のコアを分析する場合、従来は水平方向でスライスし、等間隔で連続的にスキャンして断面像を取得し、それを合成して鉛直方向の断面像を得る方法が採用されていた(たとえば Orsi *et al.*; 1994, Moss *et al.*; 1992)。これに対し、本研究では試料を鉛直方向(軸方向)にスライスし、単一画像で鉛直断面を得る手法を採用した。この場合、直線状の試料境界からの「端部効果」(岩井, 1979)によってアーティファクトが生じ、画像が乱れることを考慮する必要がある。当該装置で後述する形状・構成の試料をスキャンした場合、試料周辺領域にCT値で20~70程度のアーティファクトが認められた。この数値は、試料端部を除くと密度標準試料に対する変動の範囲

と同程度である。したがって内部密度構造の非破壊分析という当初の目的に対して、実用的には大きな影響はないものと判断した。

この装置には、CT画像出力のための専用のX線フィルム焼き付け装置が付属しているほか、デジタルデータの受け渡し用として8インチのディスクドライブが接続している。しかし画像データは専用のフォーマットで記録されているため、パソコン/ワークステーション上でデータ処理を行うにはフォーマット変換操作が必要となる。筆者らはこの画像データをMS-DOSフォーマットへ変換し、パソコン上でデジタル画像処理を行うことができるシステムを構築し(稲崎・中野, 1993)、それによってCT画像を処理/出力した。



第3図 利根川流域図と湯の湖の位置

湯の湖は利根川の支流鬼怒川の最上流部に位置する。

Fig. 3 A map showing the system of the Tone River with the location of the Lake Yunoko, situated at the upper-most reach of the Kinu River; one of the main branch of the Tone River.

3. 湖沼底質試料への適用例

3.1 採取地の概要

分析・解析した試料は、栃木県日光市湯元に位置する湯の湖で、1992年11月に採取された底質試料である。

湯の湖は、茨城県北相馬郡大野村で利根川と合流する鬼怒川の最上流端に位置する(第3図)。周辺には日光白根山(標高2578m)をはじめとする2000m以上の山岳が連なり、年間降水量(2100mm; 1940~1970年間平均)が利根川流域で最も多い地域の一つである。一方鬼怒川・利根川下流域では、758年(天平宝字2)以降数十回にわたる洪水被害が記録に残されている。したがって上述のような降雨条件が、過去約1000年の間大きくは変化しなかったと仮定すると、上流部の湯の湖周辺での降水が下流域に洪水被害を引き起こしたと考えられ、その降水の影響が何らかの形で湯の湖の底質堆積物にも記録されている可能性が高い。すなわち、湯の湖は、過去の洪水を主とするイベントの変動の「記録ステーション」としての性格が期待される(井内ほか, 1995)。

採取地の湯の湖は、湖面標高1478m、面積0.35km²、周囲約3.0kmの小規模な湖で、湖盆の最大水深は約14mである。流入河川は白根沢と日光湯元温泉の泉源からの排水路の二川で、流域面積は約14km²である。南側の流出部は、比高約100mの「湯滝」を形成しており、湯川として戦場ヶ原を流下し、中禅寺湖に注ぐ。湖容積は 1.7×10^{-9} km³と見積もられている(田中, 1992)ので、湖容積と流域内での降水量から単純に計算すると、滞留日数は約21日となる(回転率では約17回/年)。細見ほか(1984)は、1979~1982年の4年間にわたって湯の湖の水収支を調査し、年平均滞留日数として29~39日の値を出している。湯の湖は近年、温泉排水・生活排水の増加に伴って富栄養化が進行し、特定藻類の異常発生などが認められるようになったので底質のヘドロを浚渫し、脱水・固化して白根沢上部に埋め立てる大規模な浄化事業が展開されている。以上のような湖沼環境は、湯の湖の底質堆積物が年周期以下の環境変動も記録されていることが期待できること、また洪水性堆積物や有機質底泥の生産が活発で堆積速度が大きいことを示唆している。

3.2 採取試料

X線CTを用いて分析した試料の採取地点は、第4図に示す18a地点である。採取地点は湖の南西の湖縁部で、水深は10.6m、地形的には湖南端から湖心に向かって延長する小規模な埋没谷の谷底平坦面として特徴づけることができる。同地点の湖上に台船を浮かべ、その上にボ

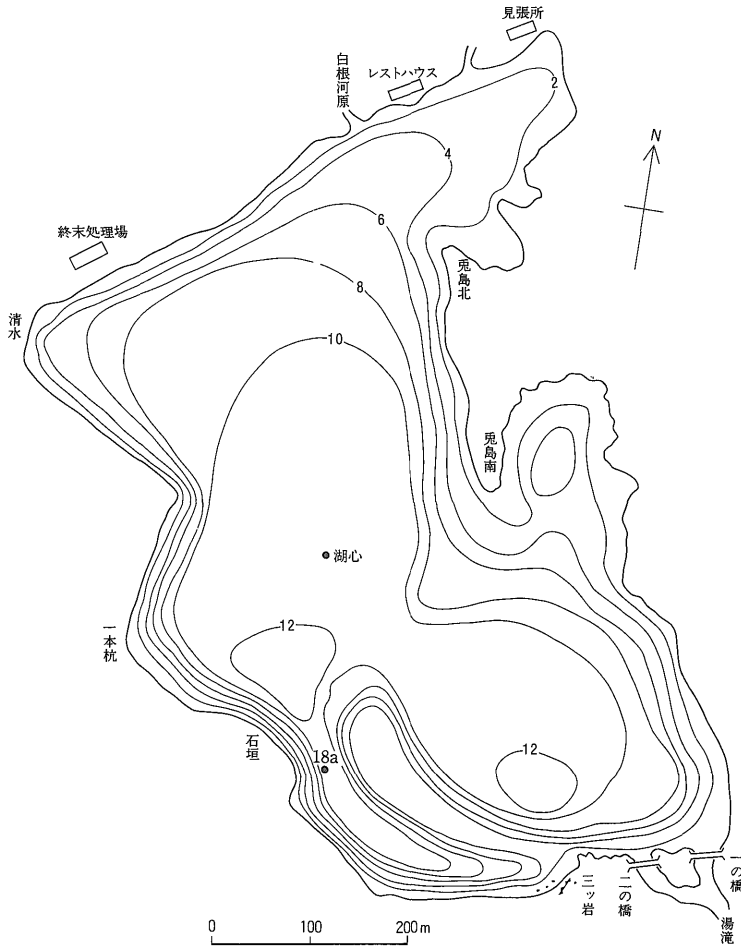
ーリングマシンを設置してピストン式柱状採泥器を圧入させて連続試料を採取した。この採泥器は2重管式で口元部にコアキャッチャを配備しており、内径60mmのインナーチューブに最大3mの試料を一度に採取することができる。なお湯の湖では、1988年に約3mの柱状採泥が計24地点で実施されている(井内, 1991)。本報告では、それらと整合するように採取地点番号をつけている。

採取した試料をまず1m長に分割し、現地において可搬式のγ線スキャナ(吉村ほか, 1989)を用いて1次元密度分布を計測した(稲崎ほか, 1993)。この装置は小型可搬で商用電源を必要としないため現場での利用性は高いが、法的規制によって線源強度を小さくせざるを得ないため、計測データのノイズが大きくそのままでは解析が困難である。そこで、情報量統計学に基づいて計測データの平滑化を行うシステムを開発し(野呂ほか, 1993)、それにより平滑化曲線を計算して密度プロファイルとしている。次に試料を20cm長さに細分割して密封し、持ち帰ってX線CT装置で分析した。インナーチューブは長さ20cmのアクリルパイプをテープで接続したもので

第2表 撮像時の機器設定条件

Table 2 An example of setting of the CT scanner applied to core analysis.

object ID.	343
object name	TEST2
acquisition date	93/02/25
slice number	07
scan rate	3.0
slice width	02 MM
tube voltage	120KV
tube current	140MA
pulse width	
table location	-0082 MM
oblique angle	+00 DEG
object location	SUPINE
insert direction	HEAD FIRST
reconstruction function	FC1
comment	
display direction	FROM FEET
image area	M
pixel size	585



第4図 底質試料採取地点位置図
Fig.4 Sampling location at the Lake Yunoko.

ある。したがって実際の試料分割はパイプ接合部をナイフで試料ごと切断し、上下端にキャップをして密封し直すことで可能である。

一般に、軟弱な堆積物に対して採泥器を圧入させて試料採取する場合、コアの収縮が生じる。当該試料についても、ピストン貫入長2.52 mに対して、採取コア長は脱落分8 cmを除くと2.20 mであった。したがってコアの短縮率は約10%と計算される。しかし、コアの縮退が全長にわたって一様であるという仮定が成り立つ保障がないため、以後コアの実長を指標として議論を進める。

採取試料は、暗黒色の腐植泥を主体とし、厚さ1~10数cm程度の灰白色の火山灰、黄褐色のシルト、軽石粒を主とした砂質堆積物を挟む。最上位では植物組織はほとんど分解してコロイドのゾル状を呈し、試料を転置する

と容易に擾乱される。

3.3 CT撮像・編集および再現性の検討

分割・密封した試料を、医療機関において前述の方法で医療用X線CT装置にかけ、鉛直方向の断面像を撮像した。撮像時の機器設定条件は、第2表に例示するような画像情報ファイルとして記録されている。表中 scan rate の単位は秒、pixel size のそれは μm である。

table location には撮像面の基準位置からの距離が記されている。また image area: M は領域サイズが $\phi=300$ mmであることを意味している。slice width については、同一断面で02 mmと10 mmの2種類を設定している。

撮像データを、前述の手順にしたがって処理し、256階調のグレースケールおよび64色の疑似カラーで表示して

出力した例を第5図に示す。図左は画像のほぼ中心線(線分表示位置)上のCT値をプロファイル表示したものである。プロファイル図では、中央の太実線がCT値0に、細実線は±1000に対応している。この図にも認められるが、一般に試料のCT値には出現頻度に偏りがある(特定の範囲に集中する)傾向がある。この場合、CT値を等間隔に分割して配色すると、微細なCT値の変動を表現するためには色数を多量に用意する必要がある。そこで、各画像単位でCT値の累積頻度分布を求め、各階調ごとのCT値の出現頻度(画素数)が均等になるように平滑化して配色した。この手法はヒストグラムイコライゼーションと称される手法であり、色数取扱いに制限のあるハードウェア上で、効率的な画像表示する手法としてしばしば用いられている。この手法・アルゴリズムは中野(1994)が詳述しているので参照されたい。なおCT値と各色調との対応関係をプロファイル図の上下に示してある。

第5図に示したCT画像は、18a地点で採取された連続試料のうち、深度120~160cm間の分割コア2本分を表示したものである。撮像後にこのコアを縦方向に半割にし、内部堆積構造を観察してX線CT画像の再現性を評価した。まず試料18a22上部から18a21下部に連続する顕著な高CT値部は、層厚約16cmの降下テフラに対応していた。CT画像に特徴的に表示されているように、この部分には数mmオーダーの微細なラミナが発達していた。同部は灰白~青灰色の極めて細粒の火山灰を主体とし、最下部直上(CT値がスケールアウトしている部分)にやや粗粒の軽石濃集部を挟んでいた。プロファイル図では、下面境界でシャープに立ち上がり、上方に向かって徐々にCT値が低下する密度グレーディング構造が認められる。試料18a22最下部にある厚さ約2cmの高CT値部はやや粗粒の軽石粒を含むテフラであった。グレースケールのCT画像では、軽石に対応する数mm程度の斑状の内部構造が再構成されている。他の部分は暗オリーブ色ないし暗緑黒色を呈するシルト質有機質土で、かなり腐植化し多量の黒色腐植泥を含有していた。植物組織はほとんど残されていない。CT画像でもこの部分は低CT値を示し、明瞭な内部堆積構造も認められない。

以上のようにコア観察との比較の結果より、CT画像から肉眼と同程度である数mm以下の内部構造の識別が可能であること、CTプロファイルからは密度構造とその変動が明瞭に読みとれること、が明らかにされた。

3.4 X線CTによる分析結果

18a地点で採取された延長2.2mの連続試料(分割コア11本分)のCT画像とCTプロファイルを第6図に、

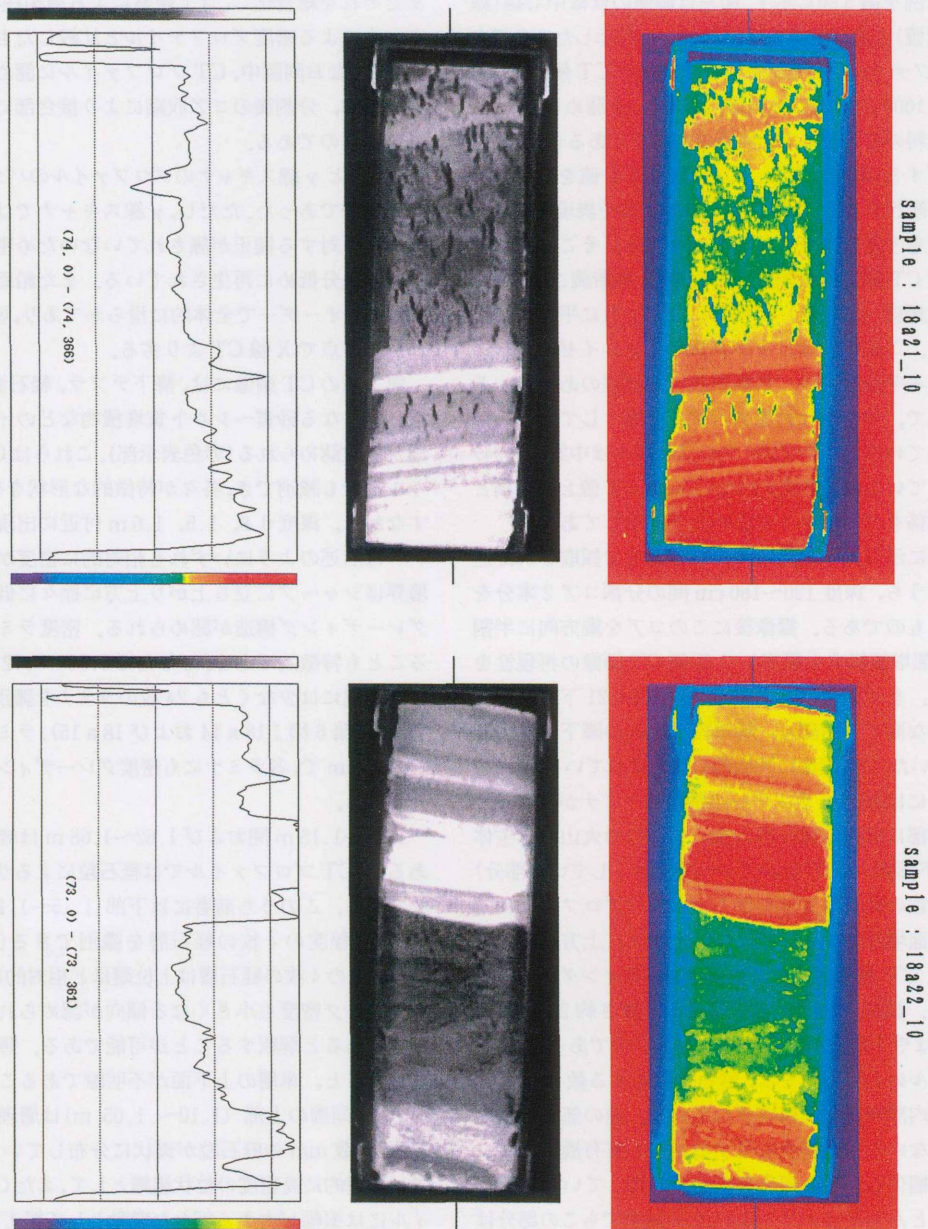
またそれを総合化し、コア観察による層相柱状と、 γ 線スキャナによる密度プロファイルと比較したものを第7図に示す。なお同図中、CTプロファイルに認められる急激な低下は、分割後のコア収縮により接合部に生じた間隙によるものである。

CT値と γ 線スキャナのプロファイルのパターンは極めて調和的であった。ただし、 γ 線スキャナでは円柱状のコア形状に対する補正が施されていないため密度値が実際よりも幾分低めに再生されている。また鉛直方向の分解能もcmオーダーで全体的に滑らかであり、密度再現性・分解能の点でX線CTより劣る。

第7図のCT画像には、降下テフラ、軽石濃集層、軽石以外からなる砂質~シルト質堆積物などのイベント性薄層が多数認められる(赤色表示部)。これらはCTプロファイル上でも識別でき、各々が特徴的な形状を有している。すなわち、深度0.8、1.5、1.6m付近に出現する降下テフラは前述のようにいずれも相対的に密度が高く、下面境界はシャープに立ち上がり上方に徐々に低下する密度グレーディング構造が認められる。密度ラミナが発達することも特徴的である。たとえば0.90~0.72m間の降下テフラ内には少なくとも24枚のラミナを識別することができる(第6図;18a14および18a15)。ラミナの層厚は2~28mmで、各ラミナにも密度グレーディング構造が認められる。

1.05~1.15m間および1.62~1.68mは軽石濃集層であるが、CTプロファイルでは軽石粒によるサージが特徴的である。このうち前者には下部(1.15~1.10m)に、厚さ1cm程度の4枚の軽石層を識別できる(第6図;18a16)。この4枚の軽石層は上位層ほど相対的に薄層化し、またピーク密度も小さくなる傾向が認められ、一連の降下物であると解釈することが可能である。降下テフラ層に比べると、単層の上下面が不明瞭であることが特徴的である。同層の上部(1.10~1.05m)は層理構造が発達せず、径数mmの軽石粒が斑状に分布している。CT画像では相対的に高密度の粒状組織として、またCTプロファイルには振幅が大きく細かな変動として捉えられている。なおこの部位での軽石粒のCT値は、おおむね800~1100の範囲にある。(7)式により密度換算すると、1.64~1.88g/cm³の値を得る。

砂質ないしシルト質堆積物は0.55m付近および1.9m以深に数枚挟まれる。0.55m付近のイベント層は、暗灰色を呈する層厚約2cmと1cmの2枚の薄層からなり(第6図;18a13)、有機質シルトの基質に細粒の砂、軽石を含む。また1.9m以深には、CT画像およびプロファイルから厚さ0.5~3cmの12枚の薄層を認めることができ

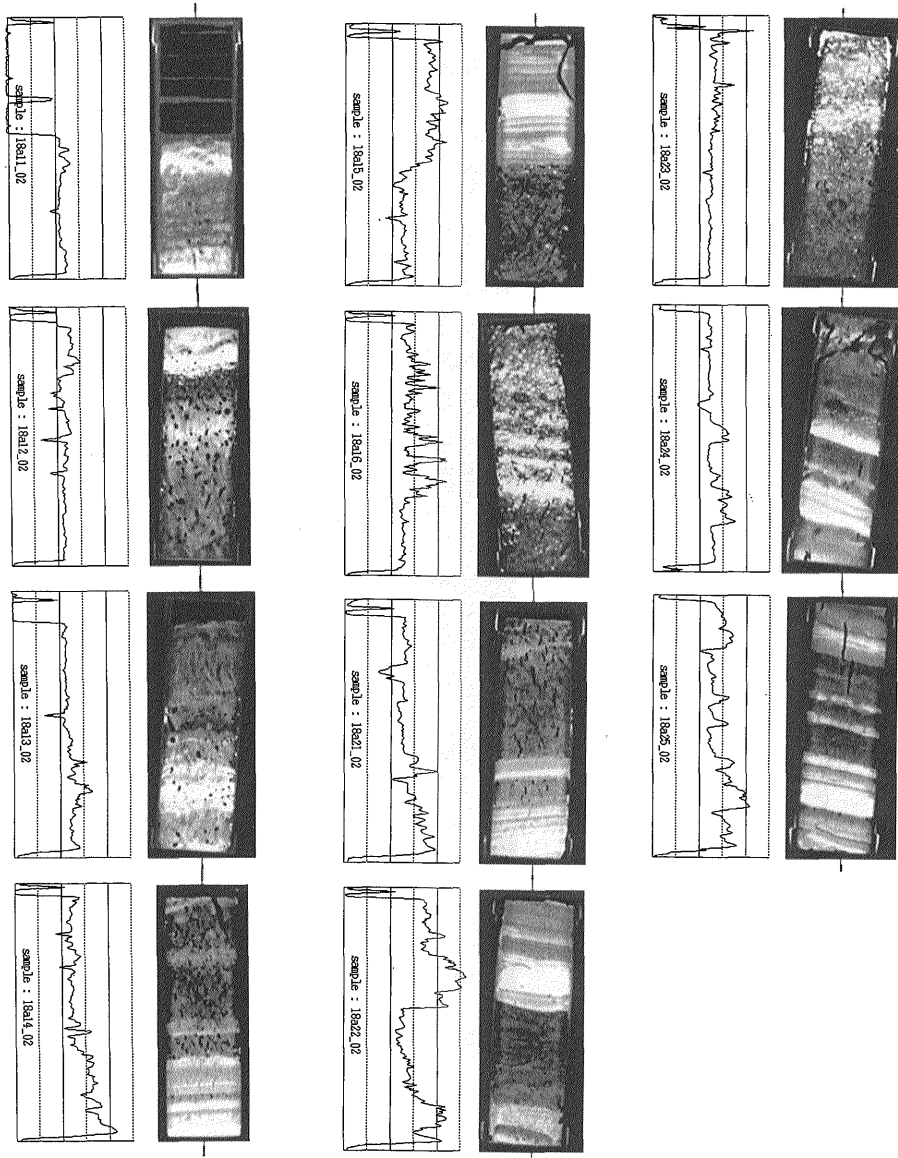


第5図 CT処理画像の例

18a地点の「深度」1.20~1.60m間のコアのCT画像。

図下側が下位。試料長さは各々20cm。左図は画像中央(線分表示位置)でのCT値プロフィール。表示範囲は±1250である。CT値と各色階調との対応を上下のバーで示す。

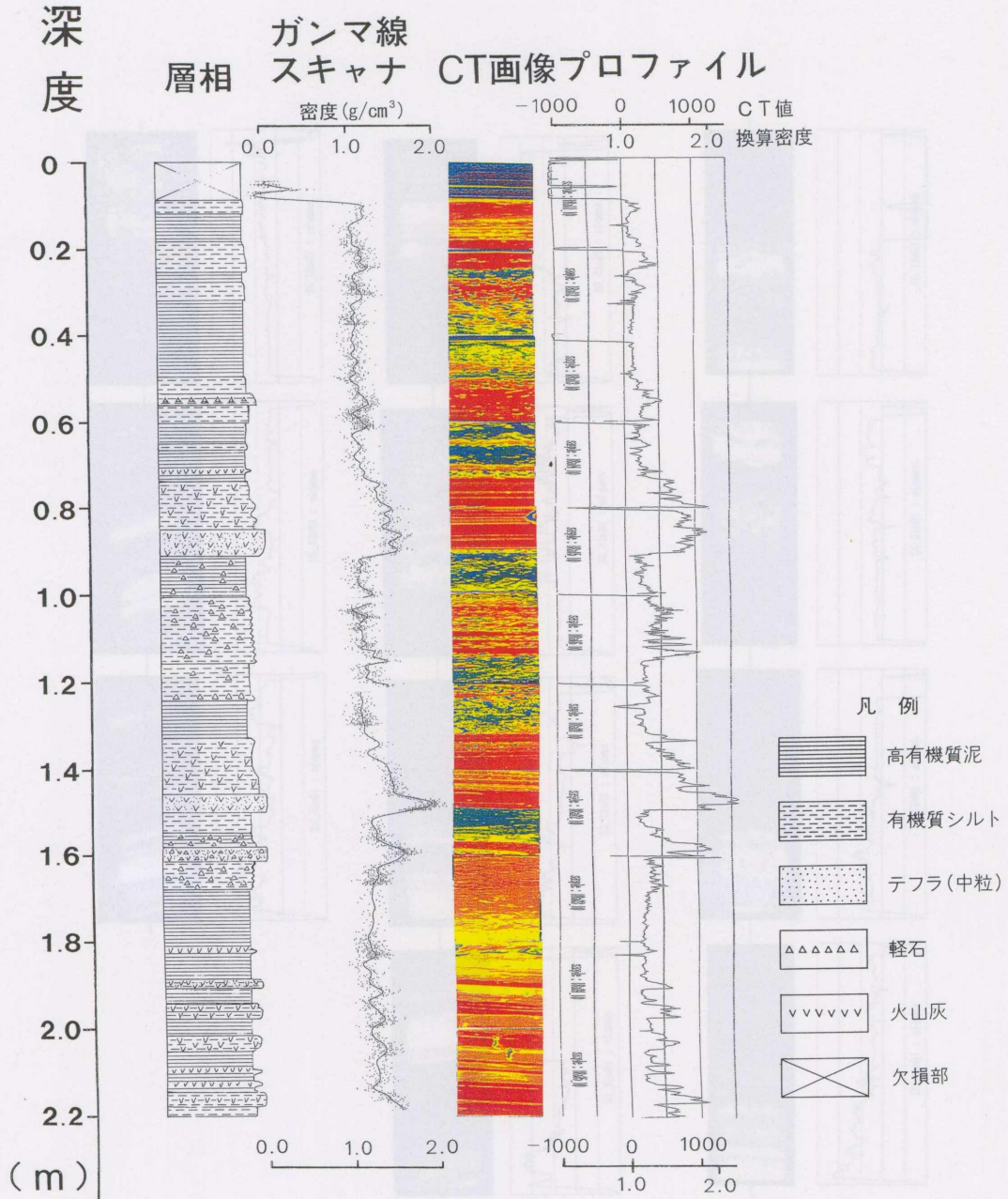
Fig.5 Selected longitudinal tomograms after image processing for the cores from the apparent depth of 1.20m to 1.60m at the 18a site. The length of each core is 20cm. CT profiles through the center of core are shown left. Range of CT number is from -1250 to +1250. Correlation of CT number and gradations are represented as color bars on and below the CT profiles.



第6図 採取試料のCT画像(18a底質試料)

18a地点の各コアのCT画像。左上が最上位試料で、右下が最下位試料。CT値プロファイルの表示範囲は、-1000~+1500。

Fig.6 CT images of the studied cores at the 18a site from top (upper left) to bottom (lower right). The range of CT profiles is from -1000 to +1500, which corresponds to 0.2 to 2.2 g/cm³ in bulk density.



第7図 総合柱状図 (18a 底質試料)

Fig.7 Correlation of pasted up CT image and profile to lithofacies and density log data for the 18a cores

る。最下位層を除いて、暗灰色の火山灰質のシルトからなる。これらの薄層は高有機質土層と互層しており、上述の3枚の降下テフラ層とは明らかに産状を異にしている。

井内ほか (1995) は、この底質試料に含まれる3枚のテフラを下位から浅間B(西暦1108年噴出)、日光白根旧期(13世紀初頭)および日光白根新期(1649年)火山灰に比定している。また砂質ないしシルト質薄層について

は、湖内での各層の連続性、河口から湖心方向への層厚変化(薄層化)の調査結果から、洪水性の堆積物であるとの判断を下している(井内, 未公表資料)。なお洪水の規模と洪水堆積物の堆積構造・層厚・粒度組成・密度分布等については現在分析を進めており、別途報告する予定である(井内ほか, 準備中)。

4. ま と め

本報告は、湖沼底質堆積物に代表される未固結・低密度の地質試料の非破壊分析・内部構造解析に対してのX線CTの適用性を評価したものである。栃木県日光市に位置する湯の湖湖底で採取された柱状試料を、医療用のX線CTスキャナを利用して連続的に分析した。その結果、同装置が数mm程度以下の空間分解能を有しており微細なラミナや砂粒の識別が可能であること、断面内の密度構造を $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 程度の精度で推定できることが明らかになった。

微細な堆積構造を定量的示標を用いて分析することによって、我々は堆積環境とその経時変動をより系統的・具体的に評価することが可能となる。本研究は、X線CTがそのような堆積物の微細内部構造解析の強力なツールであることを実証した。たとえば、湖沼堆積物中に挟まれるテフラ層が1次的テフラか、周辺地域に降下したものが運搬され再堆積した2次的テフラか、あるいは両者の混合層であるのかを、密度構造(CT値プロファイル)を示標にして判定することができる可能性がある。また洪水堆積物についても、密度構造から洪水の規模を評価できる可能性もある。

湖沼堆積物以外の地質試料としては、すでに含化石試料のクリーニングの際にX線CTが標準的に利用されつつある。また三軸試験の供試体内のせん断クラックの発達過程のモニタリング等にも利用することができよう。

医療用のX線CTスキャナでは、空間分解能を1mm程度以下にすることは困難であるが、産業用の特殊なX線CT装置では0.1mm程度の分解能を有しているものも開発されているので、より微細な構造を解析したい場合にはそれらを利用することで対処可能である。

謝辞: 本研究は、平成5年度重点基礎研究「X線CTによる堆積物コアの非破壊・定量的分析法の研究」の成果にその後の検討を加えたものである。本研究でのCT画像取得にあたっては、(医)筑波胃腸病院に便宜を図っていただいた。利用を御快諾くださった同病院の大橋理事長、伴田卓事務次長、およびCTスキャナの操作に携われた志田雅生放射線技師長に深甚の謝意を表します。湯の湖

での試料採取には、地質情報センターの安田 聡副センター長、地形情報課の渡辺和明氏の手をわずらわせました。また、密度標準試料について、ベントナイト試料をクニミネ工業㈱の伊藤氏から、水ガラス試料は東亜合成化学㈱の鈴木氏から提供していただいた。海洋地質部西村 昭課長には内容についての議論と詳細にわたるコメントをいただいた。以上の方々に、ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- Boespflug, X., Long, B. F. N. and Occhietti, S. (1995) CAT-scan in marine stratigraphy : a quantitative approach, *Marine Geology*, vol.122, p.281-301.
- Castanier, L. M. (1989) An introduction to computerized X-ray tomography for petroleum research, DOE Rep. BC/14126-7, 24 p.
- 服部芳明(1993) 軟X線による高分解能CTシステムの開発と木材研究への応用, 平成4年度科学研究費補助金研究成果報告書, 55 p.
- Herman, G. T. (1980) Image Reconstruction from Projections, Academic Press, 316 p.
- Hicks Jr., P. J., Deans, H. A. and Narayanan, K. R. (1992) Distribution of residual oil in heterogeneous carbonate cores using X-ray CT, *SPE Formation Evaluation*, vol.7, p.235-240.
- 細見正明・岡田光正・八木修身・山根敦子・須藤隆一 (1992) 湯の湖における富栄養化とその防止対策, 国立公害研究所研究報告第56号, 222 p.
- Hunt, P. K., Engler, P. and Bajsarowicz, C. (1988) Computed tomography as a core analysis tool : applications, instrument evaluation, and image improvement techniques, *J. Pet. Technol.* vol.40, p.1203-1210.
- 稲崎富士・井内美郎・安田 聡(1992) X線CTによる湖沼底質試料の微細密度構造の評価, 日本地質学会第99年学術大会講演要旨, p.554.
- ・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, vol.4, p.9-23.
- ・井内美郎・中野 司・野呂春文(1993) : X線CT及び γ 線による土質試料の密度構造解析, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, p.57-60

- 井内美郎(1990) 栃木県湯の湖堆積物中の洪水堆積物, 日本陸水学会第55回大会講演要旨集, p.130.
- (1991) 栃木県湯の湖の洪水堆積物, 日本地質学会1991年学術大会講演要旨, p.500.
- ・公文富士夫・稲崎富士(1995) 日光市湯の湖底質堆積物中の洪水堆積物, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会講演論文集, p.468.
- 石井一郎・吉田 稔・堀江宏保(1987) X線透過試験によるサンプリングチューブ内の土の品質評価(その2), 港湾技研資料, No.575, 45 p.
- 岩井喜典(1979) CTスキヤナ, コロナ社, 288 p.
- 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. A. M (1989) Application of computerized tomography in sedimentology, *Marine Geotechnology*, vol.8, p.201-211.
- McCullough, E. C. (1975) Photon attenuation in computed tomography, *Medical Physics*, vol.2, p.307-320.
- Moss, R. M., Pepin, G. P. and Davis, L. A. (1992) Direct measurement of constituent porosities in a dual-porosity matrix, *The Log Analyst*, p.126-135.
- 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3次元観察, 月刊地球, vol.14, p.616-620.
- (1995) 画像処理のためのソフトウェア:(7)色数削減のアルゴリズム, 情報地質, vol.5, p.187-210.
- 日本第四紀学会(1993) 第四紀試料分析法, 554 p
- 野呂春文・稲崎富士・井内美郎・吉村 貢(1993) 土質柱状試料のガンマ線スキヤナによる密度解析システム, 日本情報地質学会第5回講演会講演予稿集, p.5-6.
- Orsi, T. H., Edwards, C. M. and Anderson, A. I. (1994) X-ray computed tomography: a non-destructive method for quantitative analysis of sediment cores, *J. Sediment. Res.*, A 64, p.690-693.
- Peters, E. J. and Hardham, W. D. (1990) Visualization of fluid displacements in porous media using computed tomography imaging, *J. Pet. Sci. Eng.*, vol.4, p.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.*, vol.46, p.445-460.
- Raynaud, S., Fabre, D., Mazerolle, F., Geraud, Y. and Latiere, H. J. (1989) Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodesitometry, *Tectonophys.* vol.159, p.149-159.
- Sprunt, E. S., Desal, K. P., Coles, M. E., Davis, R. M. and Muegge, E. L. (1991) CT-scanned electrical-resistivity measurements show problems achieving homogeneous saturation, *SPE Formation Evaluation*, vol.6, p.134-140.
- 田中正明(1992) 日本湖沼誌, 530 p., 名古屋大学出版会
- 栃木県日光土木事務所(1992): 国庫補助河川環境整備事業費調査業務報告書, 89 p.
- Waner, 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.* vol.53, p.653-660.
- Wellington, S. L. and Vinegar, H. J. (1987) X-ray computerized tomography, *J. Pet. Technol.*, vol.39, p.885-898.
- Withjack, E. M., Graham, S.K. and Yang, C.T. (1991) CT determination of heterogeneities and miscible displacement characteristics, *SPE Formation Evaluation*, vol.6, p.447-452.
- 吉村 貢・西田一彦・井上啓司・大竹将夫(1991) 透過型RI計器によるシンウォールチューブ内の不攪乱土密度測定, 第24回土質工学研究発表会講演集, Vol.1, p.251-252.

(受付:1995年10月4日;受理:1995年10月26日)