

X線CTによる葛根田花崗岩に認められる ミアロリティックな空隙の3次元イメージング

大谷具幸*・中島善人*・村岡洋文*

(平成9年6月30日受付, 平成9年9月25日受理)

Three-dimensional imaging of miarolitic cavities
in the Kakkonda Granite using X-ray CT

Tomoyuki Ohtani*, Yoshito Nakashima* and Hirofumi Muraoka*

Abstract

Three-dimensional imaging of oriented granite cores from the borehole WD-1a, located at the Kakkonda geothermal field (Northeast Japan), was performed by a medical X-ray CT scanner. This paper confirms that X-ray CT is a powerful tool for core observation because of (1) non-destructive observation, (2) rapid three-dimensional imaging and (3) easy operation. CT images display miarolitic cavities, felsic minerals, mafic minerals and enclaves inside granite cores. Three-dimensional distribution of miarolitic cavities can be constructed from CT images and shows spatially heterogeneous development with the boundary which strikes 20°, and dips 55° to the NW. Because this trend is coincident with that of hypocenter distribution of microearthquakes, distribution of isothermal contour and resistivity gradient, these cavities may be related to the development of the Kakkonda geothermal reservoir.

1. はじめに

近年, 坑井掘削におけるコア試料採取は, 掘削期間の短縮やコスト削減のためスポットコアリングとすることが多く, ひとつのコア試料で数多くの試験, 分析を行う必要が生じている。そのため各種試験, 分析で試料が破壊される前に基本的な観察記録を残す必要がある。このような目的のために使用される機材としてコアスキャナがあるが, これはコア側面に認められる組織を記録するものであり, コア内部の組織を3次元的に記録することはできない。肉眼や光学顕微鏡を用いた従来の

方法で岩石組織の観察を行う場合, 基本的に試料表面の組織しか観察することができず, 試料内部の組織を観察するためには切断を行う必要がある。

今回, コア内部の岩石組織を非破壊で3次元観察する試みとして, 医療用X線CT装置を用いてコア観察を行った。使用した試料は深部地熱調査井WD-1aより得られた葛根田花崗岩であり, 新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下 NEDO と略記)による深部地熱資源調査プロジェクトで掘削されたものである。

WD-1aは岩手県葛根田地熱地域で深度 3,729 m

*地質調査所 〒305 つくば市東1-1-3

*Geological Survey of Japan, 1-3 Higashi 1-chome, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

まで掘削され、葛根田地熱地域の熱源と推定される葛根田花崗岩を深度2860m～3729m間の869mにわたって掘削した（NEDO，1996bのp.649）。WD - 1a掘削の際に葛根田花崗岩で3回のスポットコアリングが行われ、そのうち深度 2936～2939mのコアには2936.4～2937.6mの区間において径数 mmのミアロリティックな空隙（以下、単に空隙とよぶ）が認められた。WD - 1aは葛根田花崗岩の岩体内部で発電に利用できるような逸泥帯に遭遇しなかったものの、このような空隙がフラクチャで連結されることにより地熱貯留層になりうる可能性が考えられる。葛根田の深部地熱貯留層において透水性のよいフラクチャは葛根田花崗岩周辺、境界および内部に存在することが知られている（加藤・佐藤，1995）ので、花崗岩体の上面付近に発達する空隙が深部貯留層の形成に関与している可能性があり、このような空隙の3次元的な発達状況を理解する必要があると考えられる。

ここでは、WD - 1aコアを用いてX線CT観察を行うことにより花崗岩内部の空隙、鉱物、暗色包

有物を確認できたのでその結果を報告するとともに、CT画像から推定される空隙の分布形態、花崗岩の空隙率について考察を行う。

2. X線CTの原理・撮影手順

X線CT（Computerized Tomography）は物質内部を透過するX線の投影像から試料内部のX線吸収係数の分布を求め、内部の様子を再構成する装置であり、非破壊検査が可能であるため医療用によく用いられ、最近では地質学の分野にも応用されている。例えば、Bonner et al.（1994）は溶結凝灰岩を用いた実験で、岩石中を水が移動する様子をX線CTを用いて確認している。また、Chen et al.（1996）は多量の水が存在する砂の中を空気が移動する様子を調べる実験においてX線CTを使用している。X線吸収係数は通常、水の係数からわずれで無次元化されてCT値と呼ばれる。一般にCT値は密度が低い物質では低く、密度が高い物質では高くなる。具体的には空気は密度が低いのでCT値は低い値を示し、水、石英・長石類の密



Fig.1 X-ray CT scanner used in this study. The diameter of the core is 10.15cm.

度の低い鉱物，黒雲母・角閃石・黄鉄鉱などの密度の高い鉱物の順にCT値もだんだん高い値を示すようになる。したがって，X線CTを使用すれば岩石中の密度の異なる鉱物を非破壊で認識することができる。

今回，撮影に用いた装置は地質調査所所有の（株）日立メディコ社製医療用X線CT装置 CT-W2000である（Fig.1）。この装置は768素子のX線検出器をもちX線源と検出器が一体で回転する第3世代型の特徴を備えたCT装置であり，空間分解能0.75mm，最小スライス厚1mm，最大X線管電圧130kV，最小撮影領域直径160mmである。この装置によるCT画像の撮影は容易であり，数少ない操作で撮影を行うことができる。なお，撮影は装置の患者用ベッドの上にコアの形にくりぬいたウレタンをのせて，その上にコアをのせて行われた。

今回，撮影を行ったのは深度2936～2938mの葛根田花崗岩である。この岩石は，中～細粒で弱斑状組織を示す花崗閃緑岩であり，部分的に径数mmのミアロリティックな空隙が認められる。斑晶の石英と斜長石は半自形を示し，粒径は0.7～4.5mmである。石基の石英と斜長石，カリ長石は他形～半自形を示し，粒径は0.1～0.7mmである。また径5～40mmの暗色包有物が認められ，これらは角閃石・黒雲母・不透明鉱物から構成される。

撮影は以下の3カ所の区間で行われた。コアa：2936.040～2936.136m，コアb：2936.350～2936.446m，コアc：2937.000～2937.096m。コアaではコア表面上で空隙が観察されない。コアbではコア表面上のある境界をもって空隙を含む部分と含まない部分が認められる。コアcではコア表面上のいたるところで空隙が認められる。なお，これらはいずれも定方位コアである。

行った作業を以下に示す。（1）X線CT装置を用いてコアを軸方向に1mmずつ移動させながら1試料につき97枚のX線CT画像の撮影を行った。このときの条件はスライス厚1.0mm，スキャン時間4.0秒，X線管電流175mA，X線管電圧130kV，撮影領域直径160mm，再構成マトリックス512×512，フィルタno.9（頭部・耳鼻部用）とした。97枚のCT画像を撮影するのに要した時間は約50分

あった。（2）撮影したCT画像の16ビットTIFF画像をネットワークを經由してパソコン（Apple Power Macintosh 8100/100AV）に転送した。（3）X線CT装置で作成された16ビット画像をパソコンの画像処理ソフト Adobe Photoshop 3.05Jを用いて8ビット画像に変換した後に，「イメージ」-「色調補正」-「レベル補正」のコマンドを用いて入力レベルを133から141の間に設定した。これによりコアをとりまく空気の部分が黒色になり，かつコアにおける岩石組織のコントラストを明瞭にした。この状態では花崗岩に含まれる空隙もコアをとりまく空気の部分も同じ黒色であるので，画像解析の際に空隙のみ抽出できるようにするために，空気の部分を白色にぬりかえて空隙のみが黒色になるようにした。（4）Photoshopで加工を加えた97枚のCT画像を3次元画像表示ソフト Fortner Slicer に読み込ませて空隙の3次元分布の可視化を可能にした。（5）ある特定のCT画像に対応する箇所ではコアを切断，研磨して，この実像とCT画像を比較した。

3. 2次元画像観察結果

X線CT装置で得られたCT画像からさまざまな岩石組織を観察することができた。以下にCT画像と同じ深度でコアを切断して作成した研磨片を比較して，CT画像で観察された組織がなにを示しているのか確認を行う。なお医療用X線CTでは，CT値は水の値を標準として，具体的には水のCT値を0，空気のCT値を-1000として表示するのが一般的である（稲崎ほか，1995）が，ここではCT画像をパソコン上で256階調のグレースケールで表示したため便宜上CT値を0から255とし，空気のCT値を0として取り扱うことにする。

深度2936.445m地点のX線CT画像と研磨片写真をFig.2に示す。CT画像にみられる黒色部は花崗岩の空隙に対応している（記号a）。また，明灰色部の集合体として有色鉱物の濃集部（暗色包有物）が観察できる（記号b）。白色部は比較的粗粒の有色鉱物に対応する（記号c）。同じ有色鉱物でも細粒の場合には周囲に存在する低CT値を示す鉱物の影響により，CT値が低くなり明灰色を示す。

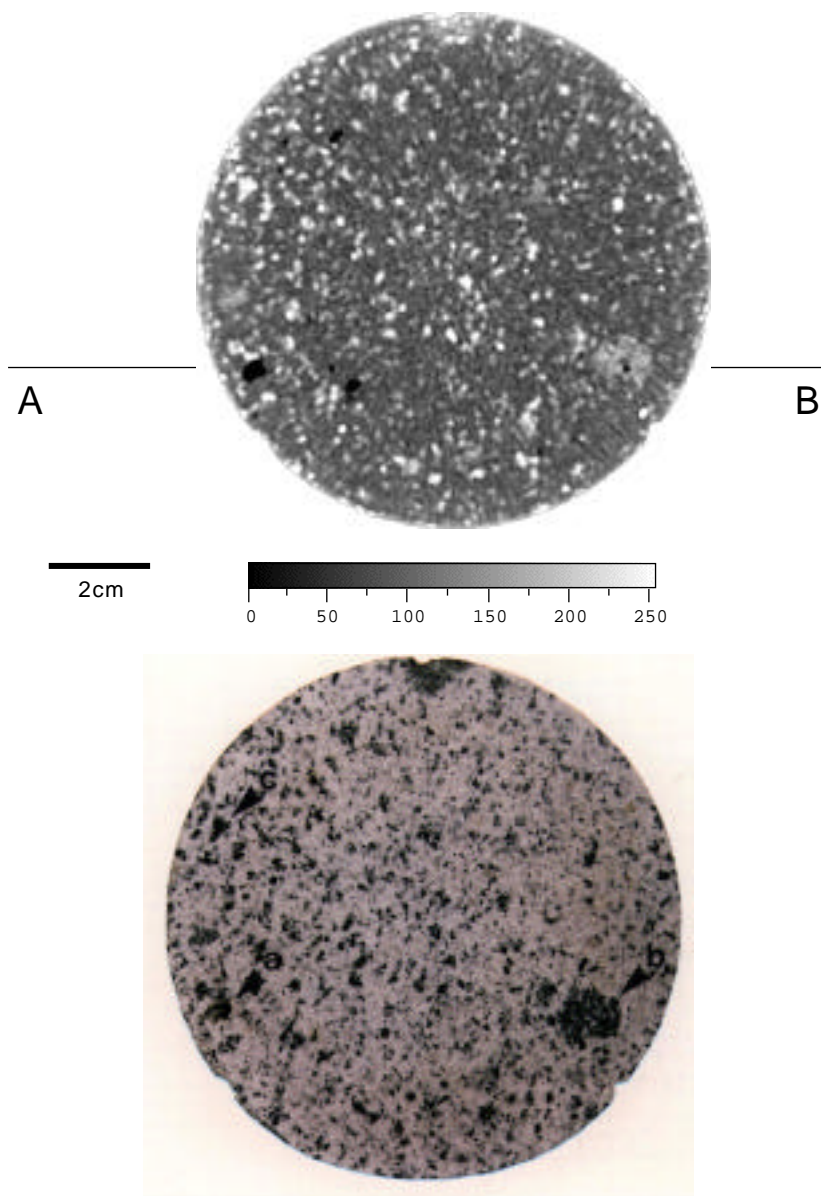


Fig.2 (a)X-ray CT image of a core from WD-1a 2936.4450m depth. (b) The corresponding photograph of polished surface. Both are observed from downside.

これらをのぞく暗灰色部は石英・長石類に対応する。なお、このコアは定方位コアであるので、コア表面に刻み込まれた3つのスクライブナイフの痕跡が認められる。

これらのCT値の変化はCT値プロファイルでも読みとることができる (Fig.3)。このプロファイルは Fig.2aの線分AB間におけるCT値の変化を示している。コアの周囲はPhotoshopで白色にしたのでCT値255を示し、空隙では0に近くなる。有色鉱物の集合体である暗色包有物は150前後の値で、

それ以外の石英・長石類は100前後の値を示している。

4. しきい値の設定

CT画像から岩石組織を調べる場合、観察したい組織に対応するCT値がどのような範囲を示すのか検討する必要がある。そこで空隙の近傍におけるCT値の変化を詳細に検討してみる。

Fig.4aにコアに認められる空隙とCT値のコンター図、Fig.4bにCT画像、Fig.4cにFig.4bの記号AB

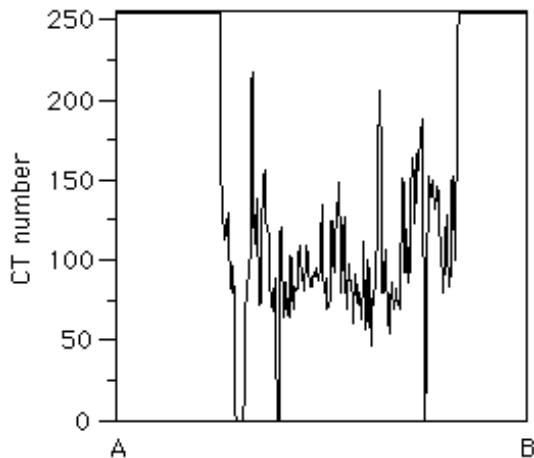


Fig.3 Profile of X-ray CT number along the line AB in Fig.4b.

間におけるCT値プロフィールを示す。Fig.4aのコンターは空隙の内側からCT値10, 30, 50, 70, 100, 200, 253を示している。花崗岩中の空隙の内部には自形の結晶が認められ、かなり複雑な形態を示している。CT画像では空隙内部に発達する個々の結晶の形態はとらえられていない。コンター図より空隙の形態はCT値30の境界線がもっとも近いように読みとることができる。また、Fig.3より空隙以外における最低のCT値は約50であることがわかる。そこで、CT値30をしきい値として考え、CT値30未満の領域を空隙として認識することにした。空隙の左下ではCT値30の境界線が空隙の外側まで膨らんでいるが、これは空隙が奥に向かって低角で続いているためである。今回の撮影におけるスライス厚は1mmであるので、このようなことが生じることがある。なおここでは、石英・長石類のCT値は100程度、有色鉱物は200程度であることが確認できる。

5. 3次元画像観察結果

次にコア内部の空隙の3次元分布を示す。Fig.5はX線CT画像より構成された3次元画像を直交3平面で切断したものであり、青色から紫色を示す部分が空隙に対応する。コアaでは空隙の発達は乏しい。コアbでは空隙はかたよった位置に分布していることがわかる。コアcでは空隙が広範囲に分布していることがわかる。Fig.6はコアをコ

ア軸と平行に上方、コア軸に直交して西と南からそれぞれ透視したときに認められる空隙を示したものである。コアaでは空隙は小規模のものしか認められず、コア全体に広がっている。コアbでは小規模な空隙はコア全体に広がっているものの、大きめの空隙はかたよった位置に発達していることがわかる。これらの2種類の空隙の分布領域の境界面はFig.6b右上の図に破線で示したようにその走向がN16°Eであり、Fig.6b右下の図から東西断面におけるみかけの傾斜は62°Wと読みとることができる。境界面の真の傾斜方向を求めると63°Wとなる。ただしこれらの数値は坑井が鉛直方向に掘削された、つまりコア軸方向が鉛直方向と平行であるときの値であるので、WD-1aの深度2940m地点での掘削方位S72.23°W、傾斜角10.27°(NEDO, 1996bのp.68)を考慮に入れて補正を行うとN20°E55°Wとなる。コアcでは大きめの空隙が広範囲に発達していることがわかる。このように、コアa, b, cにおける空隙の分布よりコアbにおいて空隙の多い部分と少ない部分の境界がとらえられていることがわかる。また、いずれの深度においても個々の空隙の形態は楕円形ではなく球形に近いことが読みとられる。

6. 空隙率

今回のX線CTから葛根田花崗岩の空隙率を求めてみた。算出方法は空隙率 = CT値30未満の値を示す領域の体積 / コア全体の体積である。その結果、コアa, b, cでそれぞれ0.02, 0.1, 0.5%であった。

7. 議論

今回、葛根田花崗岩に認められる空隙に着目してX線CT撮影を行い、非破壊でコア内部の空隙を観察することができ、またその空間分布を知ることができた。例えば、コアaではコア表面の観察からは空隙の存在を確認できなかったのに対して、CT画像からは小規模な空隙の存在を確認できた。これはコア表面が粗いため、小規模な空隙を認識できなかったものと思われる。またFig.6bでは、比較的大きい空隙がかたよった位置に発達していることを確認することができた。コア表面の

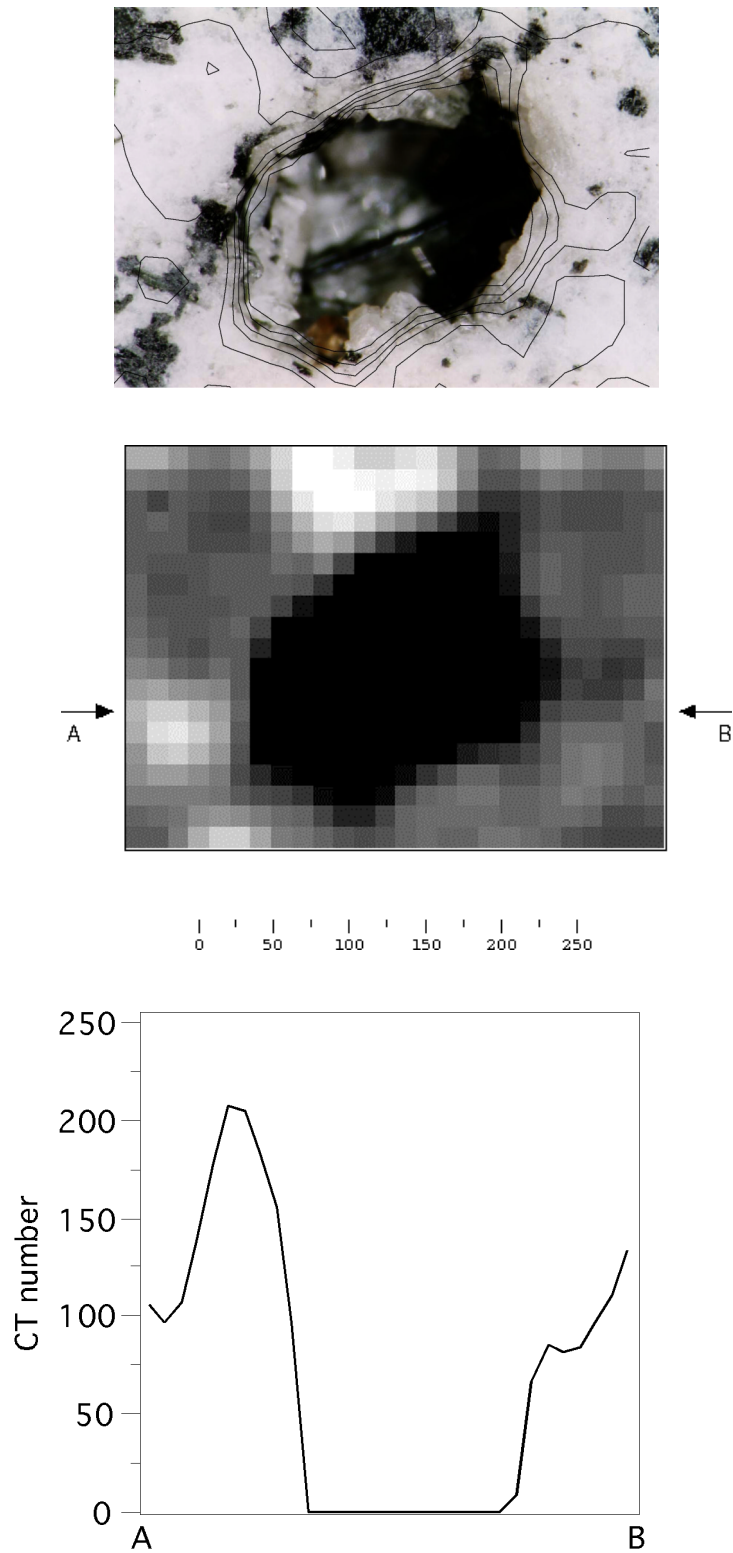


Fig.4 The miarolitic cavity labeled *a* in Fig.2a in the Kakkonda Granite. (a) The polished surface of the rock and the contour map of the CT number. (b) CT image. (c) Profile of the CT number along the line AB in Fig.4b.

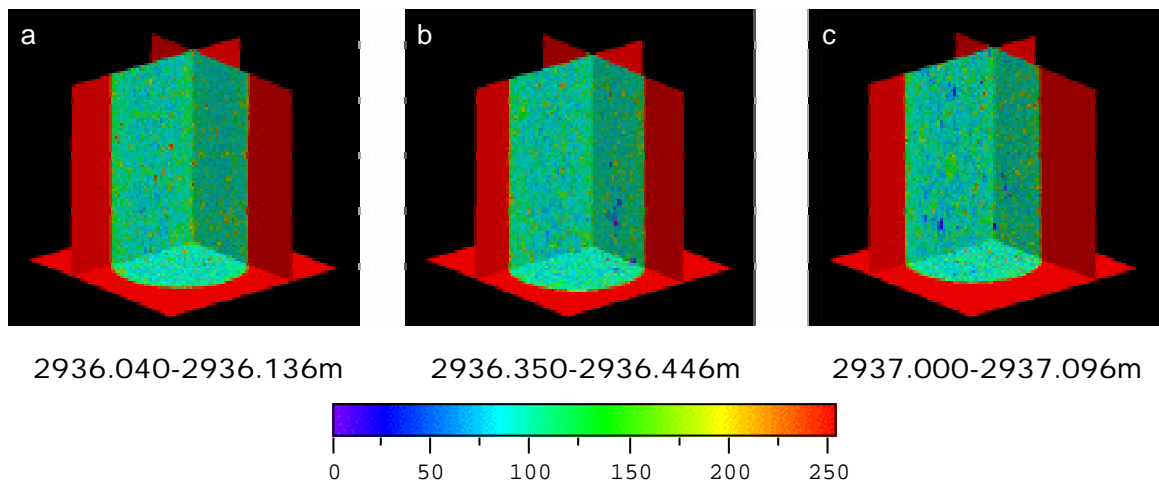


Fig.5 Three-dimensional X-ray CT images(1). CT images are displayed as pseudo level color. The diameter and length of the core is 10.15cm and 9.6cm, respectively.

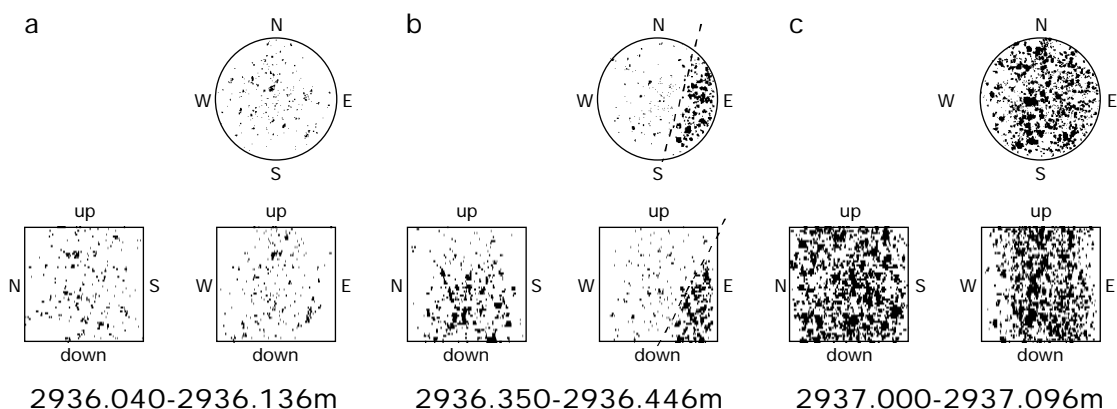


Fig.6 Three-dimensional X-ray CT images(2). a, b and c are transmitted views observed from upside (top), south (bottom left) and west (bottom right).

肉眼観察では空隙の濃集部とそうでない部分との境界面がはっきりしなかったが、X線CTによる3次元観察から空隙の分布形態は高角度の帯状であることが明らかとなった。このようにコア表面から空隙を観察する場合、コア表面の粗さのために空隙の3次元的な発達状況を正確に観察できないことが起こりうるが、X線CTによる非破壊検査ではこのような試料の表面形態を考慮せずに空隙を観察することができる。

今回、CT画像から算出された葛根田花崗岩の空隙率は他の手法で求められている空隙率に比べて低い値を示している。NEDO(1996aのp.97-99)は水を空隙中に充填させてその分の重量増加より

空隙体積を求める方法(建設省, 1970)によりミアロリティックな空隙を含まない葛根田花崗岩の空隙率を測定し、CT画像観察を行った深度付近で1.98%と報告されている。NEDO(1996aのp.97-99)で報告されているミアロリティックな空隙を含まない葛根田花崗岩は、コア表面からの観察で空隙の存在が確認されなかったコアaの試料に対応すると考えると、NEDO(1996aのp.97-99)により求められた空隙率とX線CTから求めた空隙率0.02%は大きく異なる。この相違はX線CT装置の分解能に由来すると思われる。今回観察に用いた装置の空間分解能は0.75mmであるので、径が数mmのミアロリティックな空隙はX線CTで観察で

きるものの、分解能より小さいマイクロラックは今回用いたX線CT装置では観察できない。そこでX線CTから算出された空隙率はコアに含まれているミアロリティックな空隙の存在比を示しているものと考えられる。

X線CTを用いた観察で花崗岩内部の空隙を可視化できたとともに、花崗岩に含まれる鉱物の組織も観察することができた。X線CTにより各鉱物の量比は求められないものの、有色鉱物の量比はCT値の違いから算出できる可能性がある。また暗色包有物を認識することができるので、花崗岩の中における暗色包有物の3次元形態を観察することができるであろう。

これらの解析は従来の岩石の肉眼観察、顕微鏡観察よりも解像度の点からみて精度は落ちる。しかしながら、X線CTは非破壊検査であること、3次元構造を観察できること、測定時間が短いと装置の操作が容易であることからボーリングコアの観察において有効な手段であるといえよう。

深部地熱貯留層がこのような空隙の連結により形成されると仮定すると、空隙の分布が高角度の帯状であることから深部貯留層内のフラクチャの分布も高角度の帯状であると予想される。また今回X線CT撮影を行った深度では逸泥はなかったことから、空隙が連結されて深部貯留層に発展するためには、今回観察した深度よりもさらに数多くの空隙が存在する必要があるのかもしれない。高角度に分布する空隙はN20°Eの方向に発達しており、これは葛根田花崗岩体より浅所で発生している微小地震の震源分布の方位、MT法探査による低比抵抗領域の分布方位（NEDO, 1996bのp.468-482）および標高-500m準の等温線の分布方位（玉生, 1994のFig.8）にほぼ一致している。花崗岩に空隙が含まれる位置では微小地震は発生していないものの、花崗岩体の内部にN20°Eの既存の構造が存在することは浅所における貯留層形成と何らかの関係があるのかもしれない。葛根田地域の深部貯留層において透水性のよいフラクチャは葛根田花崗岩周辺、境界および内部に発達することが知られているものの、貯留層内に透水性のよいフラクチャが一様に分布しているわけではないことが

これまでの掘削の結果（加藤・佐藤, 1995）からわかっている。コア内部の急傾斜の空隙分布と葛根田花崗岩体の上面付近における透水性のよいフラクチャの分布形態がほぼ同様な高角度構造を示すとすれば、花崗岩周辺、境界および内部で透水性のよいフラクチャに到達する坑井とそうでない坑井が存在しうることを説明することができる。ここでは深部貯留層の成因として既存の空隙の連結のみを取り扱って考えてみた。深部貯留層の発達を理解する上では、空隙の存在がどの程度深部貯留層の形成に関係するのか評価することが今後重要であろう。

謝辞

WD - 1aコアの使用に際しては、NEDO関係者各位に便宜を図っていただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- Bonner, B. P., Roberts, J. J. and Schneberk, D. J. (1994) Determining water content and distribution in reservoir graywacke from the northeast Geysers with X-ray computed tomography. Geothermal Resources Council Transactions, 18, 305-310.
- Chen, M. R., Hinkley, R. E. and Killough, J. E. (1996) Computed tomography imaging of air sparging in porous media. Water Resources Research, 32, 3013-3024.
- 加藤 修・佐藤 浩 (1995) 第四紀花崗岩をターゲットにした葛根田地熱地域の深部貯留層開発について。資源地質, 45, 131-144.
- 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。地質調査所月報, 46, 629-642.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1996a) 平成6年度地熱探査技術等検証調査, 深部地熱資源調査報告書。p.1-567.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1996b) 平成7年度地熱探査技術等検証調査, 深部地熱資源調査報告書。p.1-887.
- 玉生志郎 (1994) 地熱系モデリングから見たマグマ溜り - 豊肥・仙岩・栗駒地熱地域を例にして - 。地質学論集, 43, 141-155.
- 建設省 (1970) 土木試験基準 (案)。全日本建設技術協会, 98-100.