

染色法による岩石中微小空隙構造の同定とその特徴

Impregnation methodology for identification of the micro-pore relevant for nuclide migration in rock specimens

与語 節生 (YOGO Setsuo)¹⁾・吉田 英一 (YOSHIDA Hidekazu)²⁾・
山本 鋼志 (YAMAMOTO Koshi)³⁾

1) 名古屋大学理学部

Nagoya University, Faculty of Earth Science, 464-8602, Furocho, Chikusa, Nagoya, Japan.

2) 名古屋大学博物館

The Nagoya University Museum, Material Research Section, 464-8601, Furocho, Chikusa, Nagoya, Japan.

3) 名古屋大学環境学研究科

Nagoya University, Graduate School of Environmental Studies, 464-8602, Furocho, Chikusa, Nagoya, Japan.

ABSTRACT

Impregnation methodology for identification of the micro-pore relevant for mass transport has been developed and its usefulness is discussed. An appropriate experimental method is proposed for evaluating microscopic pore structure and fracture system generated in the intact rock. The usefulness of the method is evaluated and the results are summarized as follows:

- 1) Impregnation experiment is effective to identify the micro-crack with the scale of few micrometers physically damaged in the granitic rocks especially by faulting.
- 2) Several structural types of microscopic pore and fracture with the scale of less than few tens of micrometers can be identify with this impregnation method. This methodology is useful not only for the identification of originally formed pores but also the pores contributed for the mass transport in the matrix of rock specimens.

1. はじめに

岩石中には、大小さまざまな空隙が存在する。これらの空隙の構造やサイズ、存在の程度は岩石の種類に大きく依存する。このような岩石中に存在する空隙が、岩体中を移動する地下水や、地下水中の溶存物質(元素)の移動経路として重要な機能を果たすことが最近の調査で明らかになりつつある(例えば、Yoshida *et al.*, 1994; Frieg *et al.*, 1999)。また移動経路としてだけでなく、これらの溶存物質の吸着・遅延の場としても重要な役割をなすことが指摘されている(Yoshida, 1994)。

岩石中の空隙構造が有するこのような働きは、環境問題の1つである高レベル放射性廃棄物の地層処分など、地質環境中に埋設し、長期に渡って将来の人間の生活環境から隔離することを目的とする様々な廃棄物の処分方法において、とくに重要視されている点である(Savage, 1995)。これらの処分・隔離方法では、万が一、地質環境中に汚染物質が漏れ出た場合でも、岩石中の微小空隙内を物質が通過する際に空隙周辺の鉱物によって吸着され、汚染物質の拡散が制御されるという「バリア機能」が期待されている(Chapman & Mckinley, 1988)。このような地質環境中のバリア機能は、岩石中の微小空隙構造の特徴やサイズ・分布・量などを明らかにすることによって、はじめて定量的に評価することが可能となる。

岩石中の微小空隙構造に関しては、これまでも岩石薄片による光学顕微鏡での観察事例や走査型電子顕微鏡などでの調査報告は見られるものの(喜多ほか、2000)、物質移動との関係についてはあまり論じられていないのが現状である。また空隙構造の同定についても、従来の方法では、マイクロラックや微小空隙が、調査/観察のための岩石薄片等を作成する過程で人為的に生じたものか否かを識別することは困難である。とくに岩石薄片の作成工程は、ダイヤモンドカッターでの切断等によって少なからず岩石試料にダメージを与えることが考えられる。したがって、岩石中の地下水や溶存物質が移動すると考えられる数十~数ミクロン以下の微小空隙構造を確認し、その特徴を明らかにするためには、観察する空隙が試料を加工する過程で生じたものではないことを示すための、何らかのマーキングによる識別を行うことが必要となる。

著者らは、岩石中の微小空隙の同定に関して、これらの手法上の問題点をクリアーし、本来岩石中に存在する空隙のみを抽出・観察することを目的に、既存の樹脂や染色剤等を用いた、簡便かつ広範囲の岩石に適用することのできる方法の検討を行ってきた。本論では、岩石中の微小空隙の同定方法および手法の適用性について述べるとともに、これまでの調査結果に基づいて、これらの物質の移動経路としての微小空隙構造の特徴について報告する。

2. 実施方法

岩石を固化させる樹脂には、さまざまな用途のものが開発されている。その中でも岩石中の微小空隙や割れ目の観察には、粘性が低く、浸透性に優れた接着力も強いメチルメタアクリレートが既存の研究報告からは良好と考えられている。本論ではメチルメタアクリレートを用いた方法のうちから、とくに西山ほか(1990)で報告されている方法を基に、メチルメタアクリレートを主成分とする染色および紫外線発光機能を有する樹脂を用いた応用試験による適用性調査を行った。

今回実施した試験手法は、採取した岩石試料に真空チャンバー内で、赤色の染色剤と蛍光性を有するメチルメタアクリレート(以下レジンを省略)を減圧浸透させるものである。具体的なレジンの岩石試料への注入工程と岩石の薄片作成の手順は、以下の通りである(図1)。

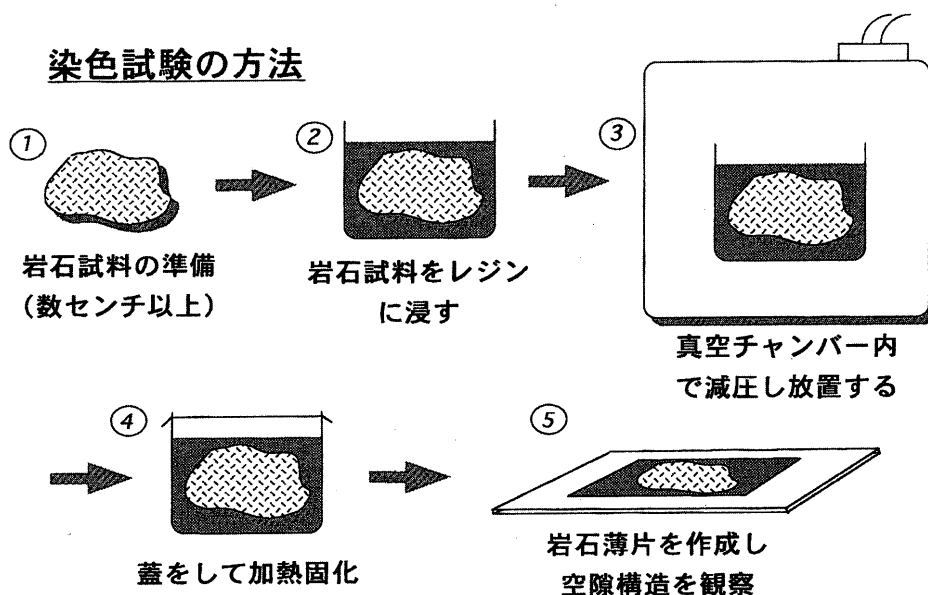


図1：染色試験方法の概念図

- (1) 内部空隙構造を調査したい岩石試料を準備する。この際、岩石試料の加工作業による人為的なダメージを受けていない試料を準備することが重要である。また岩石内部のオリジナルの空隙構造を見るために、最低数センチメートル角以上の岩石試料を用いる。
- (2) 岩石試料を40～50℃の低温で数日乾燥させる。
- (3) 岩石試料をビーカー等の容器に入れ、レジンで浸す。
- (4) デシケータで減圧し2～3日程度放置することによって岩石中へのレジンの浸透を促す。
- (5) 放置後、ビーカー共に約60～80℃程度に加熱し、レジンを固化させる。この際に岩石の空隙率が高い場合、小さい気泡の発泡が生じ、レジンの固化作用を妨げることがある。したがって、空隙率の高い岩石においては、60℃前後の温度で長時間かけて固化させることが望ましい。
- (6) 固化後、岩石カッターで切断し、岩石試料内部の薄片を作成することで岩石が有する本来の空隙構造調査に供する。
- (7) 作成した岩石薄片を、偏光顕微鏡と水銀ランプ発光の蛍光装置とを組み合わせた紫外線発光観察装置で観察する。

今回、この手法を用いて微小空隙構造調査を行った岩石試料は、中粒砂岩、凝灰岩および花崗岩である。これらの試料を試験対象として選んだ理由は、1) 基本的に堆積岩と火成岩とでは成因が異なり、その違いから生じる空隙構造の特徴が比較できること、また、2) 成因の異なる堆積岩と火成岩の代表的試料に適用することで手法の適用範囲を把握することができること、にある。また花崗岩については、断層運動の物理的なダメージを受けたと考えられる試料を比較材料として加えた。

3. 試験結果（空隙構造の特徴）

今回の注入試験によって明らかとなった岩石の空隙構造の特徴について、以下に述べる。まず堆積岩（砂岩・凝灰岩）については、堆積岩を構成する石英や長石等の粒子境界および長石中の微細なネットワーク状の構造が、主な空隙構造として認められる（図2-a, b）。染色の結果から、石英中の微小割れ目は長石中に認められる微細なネットワーク状の空隙よりも染まりにくい傾向にあることが観察される。これは、石英中のクラックは周辺の空隙との連結の度合いがあまりよくないか、あるいは石英中の割れ目はほとんど開口した割れ目ではないことを示すものと思われる。

また凝灰岩では、構成粒子である火山ガラス内のチューブ状の空隙構造が特徴的な構造として認められる。このような凝灰岩中のチューブ状の空隙構造は、走査型電子顕微鏡による岩石断面の観察からも数十ミクロンサイズでの空間構造として確認することができる（図2-c, d）。岩石内においては、このようなスケールの空隙が地下水や物質を浸透させる移行経路としての機能を有しているものと考えられる。

次に、まず断層運動による物理的ダメージを受けていない花崗岩の場合、ごく部分的に微細なクラックが見られるものの、頻度は非常に少なく蛍光反応はほとんど見られない。これは花崗岩が堆積岩に比べ、マトリクスを構成する鉱物粒子間が緻密で密着しており、マトリクス部分でのレジンの浸透がないことを示している。

一方、断層によるダメージを受けたと考えられる試料として、岐阜県付知町の阿寺断層近傍で採取した花崗岩のレジン注入結果について以下に述べる。この岩石の露頭での産状の特徴は、粘土鉱物などはほとんど肉眼では確認できないものの、全体的に脆い。岩石を構成する個々の石英や長石粒子も肉眼ではガラス質の光沢を有しており、岩石全体が熱水等による変質作用を受けたとは考えにくい。また、岩

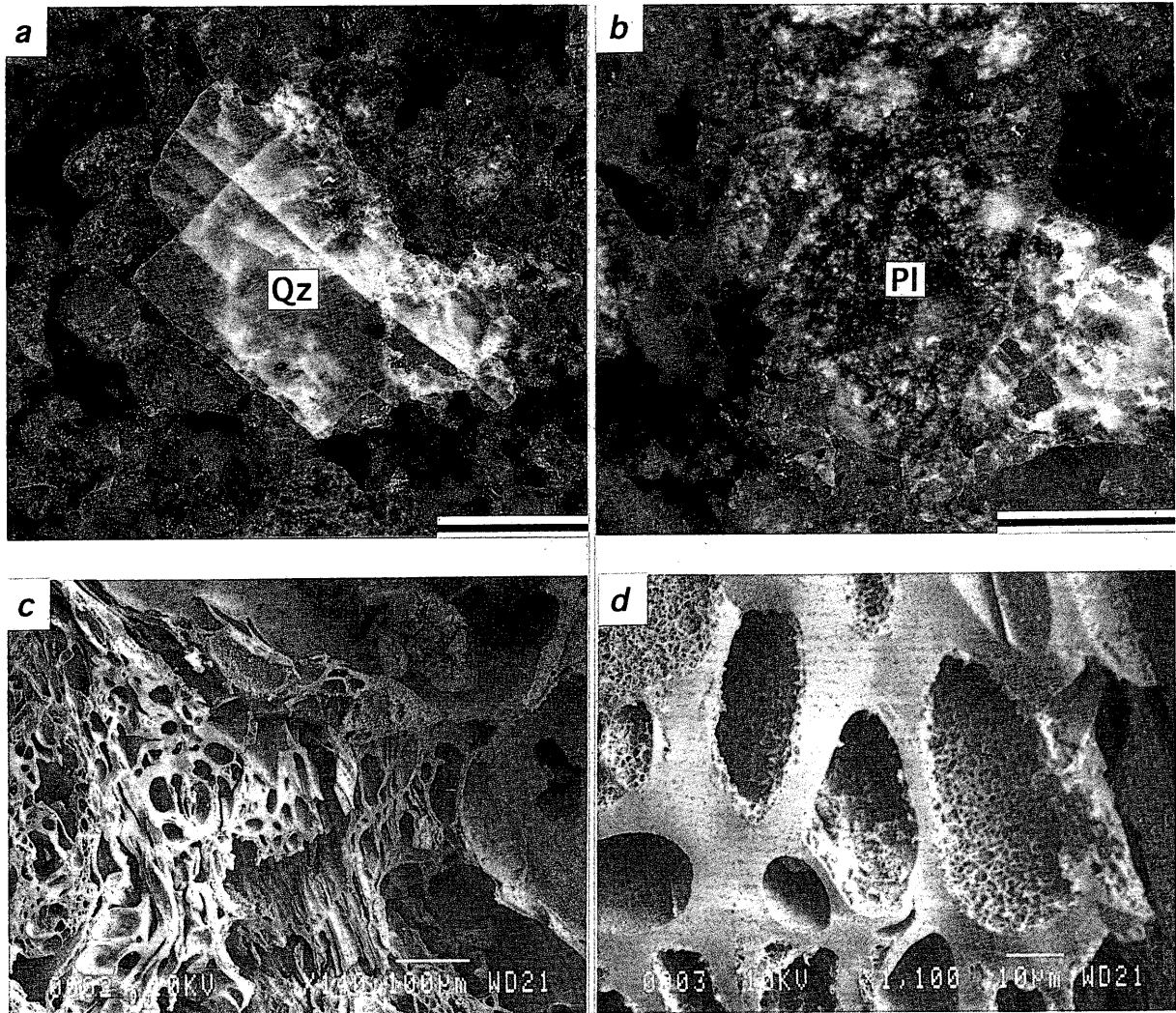


図2：凝灰岩中に見られる空隙構造。図2a, b;実体顕微鏡下で確認される赤色に染色された凝灰岩中の石英粒子 (Qz) と長石粒子 (Pl)。スケールは1 mm。図2c, d：走査型電子顕微鏡による凝灰岩中の火山ガラス内微小空隙構造。

石薄片による顕微鏡観察でも、粘土鉱物などは認められず、石英や長石類の個々の鉱物粒子は、物理的ダメージを受けていない花崗岩と同様にほぼ新鮮な状態として確認できる。しかし染色試験の結果は、岩石全体および個々の石英 (図3a)、黒雲母 (図3b) や長石粒子中 (図3c) にも密度の高い微小割れ目が発達していることを示した。顕微鏡下での観察の結果から、ほとんどの構成粒子間に数ミクロン幅で蛍光レジン注入が確認される。例えば黒雲母中には、数ミクロンオーダーでのへき開に沿った蛍光レジンの浸透が確認される (図3b)。また長石中では、数ミクロンオーダーでの微細なネットワーク状の空隙が長石粒子の内部に広がっているのが特徴的である (図3c)。これらの他にも、岩石全体に石英や長石粒子が、数十ミクロン程度のいくつかの角礫状のブロックに破壊されていることを確認することが可能である。

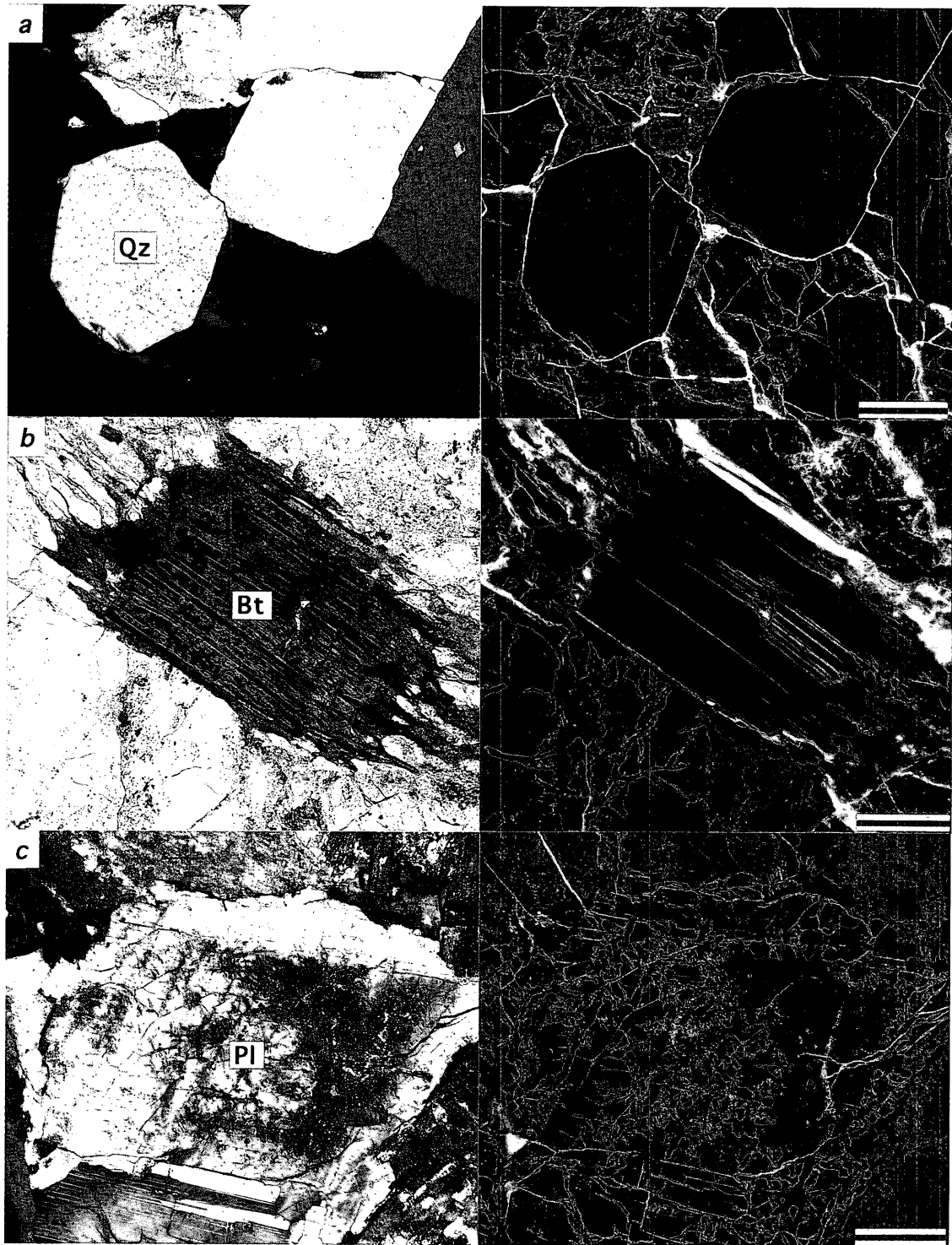


図3：断層運動による物理的ダメージを受けた花崗岩中の、紫外線による蛍光反応で確認される微小割れ目及び空隙構造。スケールは0.1 mm。

- 3-a 石英粒子 (Qz) および周辺の微小亀裂：左) 偏光顕微鏡写真 (直交ポラー)、右) 蛍光反応を示す石英粒子周辺および粒子内の微小割れ目とネットワーク状構造。このようなネットワーク構造は、物理的ダメージを受けていない花崗岩においては確認できない。
- 3-b 黒雲母 (Bt) 中の空隙；左) 偏光顕微鏡写真 (単ポラー)、右) 黒雲母のへき開に沿ってレジンの浸透 (蛍光反応) が確認される。
- 3-c 長石粒子 (Pl) 中の微小空隙：左) 光学顕微鏡写真 (単ポラー)、右) 長石粒子にレジンの浸透 (蛍光反応) が確認され、同様の部分に二次的に形成されたセリサイトと思われる微小鉱物の形成が確認される。

4. 考察（主に試験方法の適用性について）

今回用いた染色試験による岩石中の微小空隙の同定方法について、その適用性と意義についての考察を以下に述べる。

まず今回のレジンをを用いる手法は、試験結果として、花崗岩中の微小空隙や割れ目の同定に有効であると考えられる。これは、物理的ダメージを受けた花崗岩試料とそうでない試料との比較において明瞭に示される。とくに紫外線照射によって今回確認されたこれらの微小割れ目は、従来の透明なエポキシ樹脂を用いた岩石薄片の顕微鏡観察ではほとんど確認不能であり、レジンによる染色がこれらの微小割れ目の同定に有効であることを示すものである。またこれらの割れ目や空隙は、岩石内部に原位置で形成されたものであり、浸透試験によって染色されるということは、これらが地下水や物質の移行経路としての機能を有していることを示すものと考えられる。また今回の試験によって、数ミクロンオーダーの空隙も観察可能であることが示された。従来このような微小スケールでの地質環境中での物質移動現象についての理解は十分ではなく、微小スケールでの物質移動現象を明らかにする上でもこの手法による空隙構造の同定は有用と言える。

さらにこのような微小割れ目の形態や分布の把握は、将来的には、割れ目構造の解析と断層運動による影響評価にも活用可能と考えられる。今回採取し、試験に用いた岩石は、活断層と考えられる阿寺断層付近から採取したものである。染色試験の結果から示される染色状況と微小割れ目の存在形態から、これらの微小割れ目や粒子の脆性的破壊様式は、粘土鉱物などの熱水変質やあるいは地表風化によるものではなく、断層活動の物理的な要因によって形成されたことを強く示している。このことは、このような空隙構造の断層からの距離に応じた空間的分布調査を行うことによって、断層の活動に伴う岩石破壊の程度を把握できることを示唆しており、今後の応用地質的な野外調査の一手法として活用することが可能と考えられる。

一方、堆積岩中の空隙構造については、必ずしも花崗岩ほど明確に確認できるほどの適用性は現在の手法では難しい。これは今回用いた砂岩や凝灰岩などの堆積岩が、粘土鉱物などの微細鉱物をマトリクス中に有していることによる目詰まり現象によって、レジンの注入が妨害されている可能性が考えられる。堆積岩のレジン注入試験でのこのような微小空隙構造調査に関しては、これらの試験結果を基に、さらに手法の適用性を確認するための追調査を行うことが必要である。

今回実施したこれらの試験によって、岩石中のいくつかの特徴的な空隙構造を抽出することができた。これらの微小空隙は、従来の岩石薄片作成作業の前にレジンを浸透させるという実験の行い方から、基本的に岩石中に存在する本来の空隙を表現しているものと考えられる。つまりこれらの微小空隙や割れ目が、岩石や地層中を移動する地下水や溶存物質の移動経路に相当することになる。したがって、本調査研究の目的である、例えば汚染物質や放射性元素などの地層中での物質移動現象を理解するために必要と思われる微小空隙の同定法として当方法は、若干の改良の部分はあるものの、その適用性を十分に有していると思われる。

今後はこれらの知見を踏まえた上で、地層中の微小空隙構造のパターン化と物質移動に係わる分析調査等と組み合わせた相関調査を行っていく予定である。

5. 謝 辞

本研究の取りまとめにあたって、名古屋大学大学院環境学研究科の竹内 誠助教授、大学院田中姿郎氏、名古屋大学博物館東田和弘助手に有益な助言と御議論を頂いた。また染色薄片の実体顕微鏡画像の撮影および走査型電子顕微鏡の操作、写真撮影にあたって名古屋大学博物館の蛭薙観順助教授ならび

に野崎ますみ氏の協力を得た。以上の方々に、記して感謝申し上げます。

6. 文 献

- Chapman, N. A. and Mckinley, I.G. (1988) The geological disposal of nuclear waste, John Wiley & Sons Press, 98-132.
- Frieg, B., Alexander, W. R., Dollinger, H., Buhler, C., Haag, P., Mori, A. and Ota, K. (1999) In situ resin impregnation for investigating radionuclide retardation in fractured repository host rocks, *Journal of Contaminant Hydrology*, **35**, 115-130.
- 喜多治之・佐藤稔紀・辻上博司・陳 友晴・西山 孝・金子勝比古 (2000) 「温度履歴に伴う砂岩の間隙構造の変化」資源と素材、**116**、656-661頁。
- 西山 孝・楠田 啓・北川元紀 (1990) 「蛍光法による岩盤割れ目の観察」資源と素材、**106**、573-579頁。
- Savage, D. (1995) The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste, John Wiley & Sons Press, 321-353.
- Yoshida, H. (1994) Relation between U-series Nuclide Migration and Micro-structural Properties of Sedimentary Rocks. *Applied Geochemistry*, **9**, 479-490.
- Yoshida, H., Yui, M. and Shibutani, T. (1994) Flow-path Structure in relation to Nuclide Migration in Sedimentary Rocks — An Approach with Field Investigations and Experiments for Uranium Migration at Tono Uranium Deposit, Central Japan —, *Jour. Nucl. Sci. Tech.*, **31**, 803-812.