青色顔料を混合した樹脂によるポア観察について

高橋 学^{*1}・薛 自求^{*2}・大和田朗^{*3}・石島洋二^{*4}

On the Study of Interconnected Pore Network using a Blue Dyed Epoxy Impregnated Thin Section

Manabu TAKAHASHI^{*1}, Ziqiu XUE^{*2},
Akira OOWADA^{*3} and Youji ISHIJIMA^{*4}

Key words : 孔隙 pore, 微細構造 microstructure, 薄片 thin section, 画像処理 image analysis

Abstract

To clarify interconnected pore network, blue dyed epoxy impregnated thin sections of various rocks were prepared. Careful microscopic photographic studies of thin sections were able to distinguish pores from grains. Pores are measured clearly by the presence of blue dyed epoxy. This blue dyed epoxy impregnation method was most suitable for rocks with porosity above a few percent, and for fractured rocks with ultimate fracture planes. Specific microcracks with width above 10 micron meter are detected clearly in granitic rocks.

Using an image processing technique, porosities and aspect ratios of pore were estimated from the segmented microsections. Porosities measured from the image, in general, different from that of the physical tests. The porosity of the Shirahama sandstone decreased by about 2% after stressed to 49 MPa. The low aspect ratio pores of the Shirahama sandstone closed completely after stressed to 49 MPa.

1. はじめに

岩石の初期構造や種々の応力条件下でのマイクロクラック進展の様子は、薄片を光学顕微鏡で観察するという方法で行われた^{1)~11)}。この手法は岩石学や鉱物学の分

野で発達したものであり、現在でも日常的に用いられる手法である。その後、岩石の構造を直接観察する方法として、SEM（走査型電子顕微鏡, Scanning Electron Microscope）が用いられるようになる。イオン研磨を用いる SEM では、岩石の薄片を用いる偏光顕微鏡と比較すると以下のような利点が挙げられる。

- ・高倍率で3次元的な分解能を有している。
- ・薄片を作るときのような研磨剤による摩耗、鉱物粒子の脱落、作業中に生じる2次クラックの生成を回避できる。

岩石の初期構造を明らかにするために、SEMを最初に用いたのは WEINBRANDT and FATT¹²⁾ である。その後、数多くの研究者が岩石の構造やマイクロクラック

^{*1} 通産省工業技術院地質調査所環境地質部 Environmental Geology Department, Geological Survey of Japan.

^{*2} 北海道大学大学院工学研究科 Graduate Student, Faculty of Engineering, Hokkaido University.

^{*3} 通産省工業技術院地質調査所地質標本館 Geological Museum, Geological Survey of Japan.

^{*4} 北海道大学工学部資源開発工学科 Faculty of Engineering, Hokkaido University.

進展の様子を調べるために積極的に SEM による観察を実施した^{13)~21)}。

中でも、MOSHER *et al.*⁸⁾は2種類の花崗岩を用い、引っ張りあるいは圧縮応力下の亀裂進展を顕微鏡で観察した。また、BATZLE *et al.*²²⁾は Westerly 花崗岩を供試体として加圧下における SEM 観察をひずみ計測と同時にを行った。従来の研究では、除荷した後に観察を行わなければならなかったが、MOSHER *et al.*⁸⁾および BATZLE *et al.*²²⁾の手法により、加圧下のクラックに関する正確な情報を得ることができるようになった。

これらとは別に、岩石内のマイクロクラックをより明確に把握するために、蛍光染料を用い、紫外線照射をすることによりクラックを明瞭化する方法も行われた^{23),24)}。西山ほか²⁵⁾は蛍光剤および染色剤を樹脂（メチルメタアクリレート）に混合し、岩石中の2次元的なクラックネットワークを抽出している。画像処理した後、定量的な議論をし、6%以下の有効空隙率においては割れ目長さとの有効空隙率との間に正の相関が成立することを述べている。画像処理の技術が進歩している現在、西山ほか²⁵⁾による成果は、岩石中のマイクロクラックの数や寸法およびそれらから推定される有効空隙率等の定量的な検討を可能にしたと言える。

岩石内の流体の輸送特性は岩石内のポアやクラックの形状、連結性などの影響を強く受ける。SEM では、これらのポアやクラックの3次元的で分解能の高い形態に関する情報は得られるが、流体が通過したかどうかに関する情報は得られない。一方、顔料で着色した粘性の低い樹脂を岩石内のポアやクラックの奥部まで浸透させ、薄片にした後、顕微鏡観察する手法では、薄片中に観察される着色した樹脂の領域が透水試験などで流体が通過した可能性のあるポアやクラックと考えることができる。このような方法では、流体が浸透した状態が明瞭に認められる点に大きな特徴があり、さらに、ポアやクラックを着色することにより、画像処理によるデータ処理の可能性を高めている。

そこで、従来の偏光顕微鏡を用い、青色顔料を混合した樹脂を岩石内に注入し、薄片にした観察から、どの程度岩石内のポアやクラックに関する情報が得られるのかを検討してみる。本文では、薄片作製の工程について詳しく述べ、砂岩・泥岩・花崗岩・大理石等8岩種の具体的な適用事例を紹介する。その後、砂岩などの比較的孔隙率の大きな岩石の薄片写真をもとに画像処理し、染色されたポアの分布や楕円近似した場合のアスペクト比（楕円の長軸に対する短軸の比）の分布について、その結果を紹介する。

2. 薄片の作り方

採取された試料の鉱物粒子などの脱落を防止するため、試料を切断する前の事前処理が必要となる。それにはまず、固結樹脂の適正を考慮しながら、顔料との相性など最適なものを選ばなければならない。その条件として、

- ・硬化前粘性が低く、岩石に含浸しやすいもの
- ・製作中の使用温度に耐えられるもの
- ・青色顔料（EST-2611BLUE）と混合してもその樹脂の性質が変化しないもの

これらの条件を満たす樹脂としてエポキシ系樹脂ペトロポキシ154を選定した。以下に各工程について詳しく述べる（図-1参照）。

【工程-1】

試料を55-60℃に保たれた真空乾燥器に入れ、約50時間試料内部の水分除去を行う。こうして得られた試料に青色顔料混合樹脂を図-1(1)のように真空乾燥器を用いて真空含浸させる。器内温度を55-60℃に保持したのは、樹脂の粘性低下を図り、試料に樹脂を含浸しやすくするためである。なお、他のエポキシ系樹脂はこの温度の範囲内では約15分から20分の時間内で硬化促進されるが、今回使用した樹脂（ペトロポキシ154）は時間硬化型ではなく、熱硬化型であり、80℃以下では完全硬化は望めず、著しい粘性低下を示すだけである。この状態で、180分間の真空加熱を行い、試料を器内から取り出し、90℃の恒温ホットプレート上に60分間放置し、樹脂の完全硬化を計った。

【工程-2】

樹脂硬化後の試料を電動ダイヤモンドソーで縦50×横30×厚さ10 mmに整形する（図-1(2)参照）。この際、ダイヤモンドソーの冷却潤滑剤としてオイル（ダフニーカットHL25）を使用した。また、試料内外部に付着したオイルを除去するため、70℃、50時間の真空乾燥を実施した。切断の際、オイルを使用したのは、オイルが水に比べ、試料に衝撃を与えず、鉱物粒子の脱落防止に優れているためである。

【工程-3】

摺りガラスを貼付する試料面を工程-1の要領でさらに真空含浸させた後（図-1(3)）、グリーンカーボラダム#800を用いて試料を研磨する。摺りガラスの必要性は、透明なスライドガラスに比較してその表面が微小な凹凸となっており、試料と樹脂との接着面積が大きくなるためである。また、摺りガラスの表面は透明スライドガラスのものより平行度が出ているので、試料面の平

-
- 青色顔料混合樹脂
- 試料
- 真空乾燥器
- (1) 試料を青色顔料混合樹脂で満たされた容器内に入れ、容器ごと真空含浸させる。
-
- ダイヤモンドソー
- 試料
- (2) ダイヤモンドソーで試料を50×30×10 mm に切断する。
-
- 青色顔料混合樹脂
- 試料
- 真空乾燥器
- (3) さらに、青色顔料混合樹脂を真空含浸させる。
-
- すりスライドガラス
- 青色顔料混合樹脂
- 試料
- ホットプレート
- (4) 摺りガラスと試料を接着させる。
-
- すりスライドガラス
- 試料
- ダイヤモンドソー
- (5) ダイヤモンドソーで摺りガラス付き試料を2次切断する。
-
- 試料表面 コランダム#2500仕上げ
- 青色顔料混合樹脂
- すりスライドガラス
- (6) (5)の試料をグリーンカーボランダム#400, #800, コランダム#2500で研磨し、厚さを約60ミクロンとする。
-
- 切断
- 試料
- すりスライドガラス
- (7) 摺りガラスのカット、およびスライドガラスの貼付
-
- すりスライドガラス
- 試料
- 透明樹脂
- 透明スライドガラス
- (8) 仕上げの研磨、厚さは30ミクロン

図-1 薄片作製工程

行度を上げる場合に有効となる。

【工程-4】

摺りガラスと試料との貼付工程にはいる。通常の薄片作製手順と同様、90℃に加熱したホットプレート上で摺りガラスと試料との間の樹脂から発生する気泡を完全に取り除きながら完全硬化させる（図-1(4)参照）。この際の樹脂には青色顔料を混合したものをを用いる。

【工程-5】

樹脂の硬化後、室温放置し、冷却後ダイヤモンドソーを使用し、摺りガラス貼付試料の厚さが1~2 mm になるように2次切断する（図-1(5)参照）。孔隙率が大きい岩石では、鉱物粒子の脱落などが考えられ、そのような危険性がある場合には、再度工程-3を繰り返して実施する。

【工程-6】

2次切断した試料を60℃で真空乾燥し、グリーンカーボランダム#800で研磨し、厚さを100ミクロンとする。コランダム#2500とオイルを用いて、石英ガラス板上で手作業研磨する（図-1(6)参照）。この段階での試料の厚さは約60ミクロンとなる。

【工程-7】

試料周囲の余分な摺りガラスをダイヤモンドガラスペンで切断し、透明エポキシ樹脂を使用し、工程-4の要領で、透明なスライドガラスに貼付する（図-1(7)参照）。

【工程-8】

普通薄片と同様の手順で作業を進める。カーボランダム#180→#800→ボロンカーバイト#1200による瑪瑙板上手摺り（図-1(8)参照）。#180は摺りガラスの研磨のみに用いた。また、切断研磨の際に使用する冷却潤滑液および洗浄に関してはすべてオイルを用いた。こうして完成した薄片の厚さは30ミクロンとなる。

以上薄片作製工程について述べた。この手法は安部²⁶⁾により着手された手法であり、この間種々の改良が加えられている。特に、工程中の鉱物粒子の脱落に関しては注意深い作業と処理により、現在ではほとんど生じなくなるまでになった。

3. 顕微鏡写真

既述した作製方法で薄片を準備し、偏光顕微鏡写真を具体的に以下に示し、ポアやクラックの分布の様子を見ることが出来る。同手法が適用できる岩石とそうでない岩石が以下の写真から明らかとなる。

写真-1は島根県産新第三紀来待砂岩のインタクトな

場合の写真である。来待砂岩の典型的なポアの様子が示されている。ポアの周囲にはモルデン沸石が明瞭に認められる。写真-2, 3は同岩石を静水圧が40 MPa, 150 MPaに至るまでそれぞれ負荷した場合の写真である。静水圧の影響により、ポアを示す青色の部分が減少していることが認められる。本手法の最大のメリットは、ポアに浸透した着色樹脂が複雑なポアの形状を明瞭に、しかも容易に視覚化させた点にある。来待砂岩中のモルデン沸石に関しては、静水圧を150 MPaまで負荷しても、破壊したという明確な証拠は見つけることができなかった。

写真-4は真三軸試験後の和歌山県産新第三紀白浜砂岩の主破断面近傍を示している。なお、本文では供試体全体に生じた大きな破断面を主破断面と呼び、小さなものと区別することにする。白浜砂岩は孔隙率が13%あり、来待砂岩と比較すると粒子が小さく、孔隙率も小さいことが認められる。主破断面は比較的滑らかであり、粒子サイズ程度の凹凸も確認できない。主破断面から派生しているやや細い破断面には粒子サイズの凹凸が確認できる。また、粒子が破碎された様子が認められる。このような主破断面と派生した破断面との滑らかさの違いは、破壊時の変形量の違いによるものと思われる。すなわち、破壊時の解放エネルギー量が大きく変形量が多いほど、破断面の凹凸は摩擦により小さくなるからである。なお、主破断面間に破碎された粒子が認められないのは、試験後の取り扱い中に紛失したためである。

写真-5は透水係数に及ぼす中間主応力の影響を調べた白浜砂岩の薄片写真であり、写真の上下・左右方向は中間-最小主応力方向に一致する。最小主応力は15 MPa, 最大・中間主応力をそれぞれ15 MPa から65 MPaまで変化させた供試体であり、主破断面は生じていない。この写真だけからでは、中間主応力や最小主応力がポア分布に与える影響を直接確認できないが、画像処理によって得られたデータをもとに後に詳しい議論することにする。

写真-6は新第三紀幌延泥岩の静水圧透水試験後のものである。破断面がほぼ同じ方向に平行に入り、かつマトリックス中にも小さな空隙が散在しているのが認められる。薄片全体の観察結果から、各破断面が平行に、かつそれぞれ連結することなく存在し、結果として主破断面の存在が認められない。以上述べた来待砂岩、白浜砂岩、幌延泥岩の変形特性と透水特性に関しては、薛ほか²⁷⁾、石島ほか^{28), 29)}に詳しく述べられている。

写真-7, 8はインタクトな和泉砂岩のものである。和泉砂岩は大阪府海南町産中世代白亜紀の細粒砂岩であ

写真-1 インタクトな来待砂岩の薄片写真

写真-2 静水圧を40 MPaまで負荷したときの来待砂岩の薄片写真

写真-3 静水圧150 MPaまで負荷したときの来待砂岩の薄片写真

写真-4 真三軸試験後の白浜砂岩の破断面近傍の薄片写真

写真-5 真三軸応力下で透水試験を行った白浜砂岩の薄片写真

写真-6 封圧試験後の幌延泥岩の薄片写真

写真-7 インタクトな和泉砂岩の薄片写真
(オープンニコル)

写真-8 インタクトな和泉砂岩の薄片写真
(クロスニコル)

写真-9 インタクトな Westerly 花崗岩の薄片写真
(オープンニコル)

写真-10 インタクトな Westerly 花崗岩の薄片写真
(クロスニコル)

写真-11 真三軸試験後の Westerly 花崗岩の破断面近傍
の薄片写真

写真-12 インタクトな奄治花崗岩の薄片写真
(オープンニコル)

写真-13 インタクトな奄治花崗岩の薄片写真
(クロスニコル)

写真-14 奄治花崗岩中の長石内の青色樹脂の様子

写真-15 インタクトな大島花崗岩の薄片写真
(オープンニコル)

写真-16 インタクトな大島花崗岩の薄片写真
(クロスニコル)

写真-17 三軸試験後の於福大理石の薄片写真
(クロスニコル)

写真-18 インタクトな白浜砂岩の薄片写真

写真-19 静水圧を49 MPaまで負荷した白浜砂岩の薄片写真

り、空隙率が1%以下、一軸圧縮強度も2500 kg/cm²を越える均質な砂岩である。写真からもわかるように、青色樹脂は写真中央部を除いては全く浸透せず、空隙らしいものも薄片全体(40 mm×27 mm)の観察からも確認できなかった。中央部の青色樹脂は、この領域が鉱物粒子の脱落によってできた箇所であることを示している。空隙の形状としては三角形は不安定であり、辺の軌跡が直線的であることなどから考えて、粒子部分の脱落と判断できる。細心の注意を払って薄片作製を実施しているが、このような粒子の脱落もまれに生じうる。和泉砂岩のような空隙率が1%以下と小さく、続成作用を強く受けた粒子形状の小さな岩石には同手法は適さないことがわかる。

写真-9, 10はインタクトな Westerly 花崗岩のものである。青色樹脂は一部の粒界で確認できたが、鉱物粒子内の潜在亀裂(マイクロクラック)には全く確認できなかった。写真-11は Westerly 花崗岩を真三軸圧縮試験で最終的に破壊させたものである。中央に主破断面が入り、破断面間には小さく破碎された粒子が残されているのが認められ、破壊時のエネルギー解放の大きさを示している。主破断面にはほぼ平行で規模の小さな破断面(マイクロクラック)が主破断面近傍に認められる。既述した堆積岩類には認められない特徴である。

写真-12, 13はインタクトな庵治花崗岩のものである。庵治花崗岩は、香川県木田郡庵治町付近で産出される日本を代表する石材の1つである。和泉砂岩同様、青色樹脂は粒界・粒内とも薄片全体で確認することはできなかったが、写真-14に示すように、長石内のごく一部にわずかな青色樹脂を確認することができた。

写真-15, 16は愛媛県伊予大島産の大島花崗岩の薄片写真である。薄片全体を通じ、石英内、長石内の潜在亀裂が卓越しており、力学的な異方性が大きい岩石である。潜在亀裂が粒界で止まった状態を示しており、粒界の方がより濃く青色樹脂が浸透したことがわかる。このときの粒界の幅は10ミクロン程度である。

写真-17は山口県於福産大理石の写真である。封圧20 MPaの三軸圧縮試験後の供試体である。封圧20 MPaにおいてこの大理石は延性挙動を示し、各粒子サイズ規模のマイクロクラックが卓越する。青色樹脂はこの倍率では局所的に分布しているように見えるが、倍率を上げてみるとほぼ全域に浸透していることが認められる。したがって、この大理石の場合には、青色樹脂が通過できる程度の連結性のよいマイクロクラックが存在していたものと思われる。

以上、砂岩3岩種、泥岩1岩種、花崗岩3岩種、大

理石1岩種の8岩種について青色樹脂を含浸させた場合の薄片写真を観察してみた。インタクトな状態では和泉砂岩では全く含浸することなく、花崗岩類は10ミクロン程度のマイクロクラックならば含浸することが確かめられた。しかし、同じ開口幅を持つマイクロクラックが数多く存在する中で、特定のもののみが青色樹脂の含浸の度合いが高かった事実は、マイクロクラックの開口幅のみが流体の移動・浸出を決定しているのではないということを示していると思われる。このようなマイクロクラックの存在は、流体の移動・浸出がある特定のマイクロクラックによって支配的に行われていることの証拠となるだろう。

青色樹脂を岩石に浸透させ、薄片を用いて岩石中のポアやクラックの3次元分布を解明しようとする試みは、多くの研究者によって実施されている。今回紹介したものは、原理的には既往の研究によって採用された手法と同じであるが、より細心の注意をして薄片を作り上げることで、鉱物粒子の脱落や2次クラックの発生を極力抑えることができた点に成果があると思う。今回実施した供試岩石のうち、インタクトな和泉砂岩には適用できないことが判明したが、適用できる岩石の孔隙率の下限値は今後事例を増やし検討することによって求められるものと思われる。

写真-1から写真-17までに示したように、同手法がすべての岩種に適用できるというわけではないが、インタクトな状態で空隙率が数%以上の岩石には十分適用できるものと思われる。また、主破断面を有するような破壊後の供試体のクラックなどの観察にも適していることがわかった。この場合、樹脂が浸透するクラックの幅は10ミクロンが限度と思われる。ただし、孔隙率やマイクロクラックの開口幅のみが青色樹脂の含浸の度合いを決定しているのではなく、あくまでもポアやマイクロクラックの連結性が支配していることも明らかとなった。青色樹脂を浸透させた薄片を用いることにより、ポアと粒子との境界がより明瞭に確認できるようになったことは、次に述べる画像処理を実施する場合の大きなメリットとなっている。

4. 画像処理に関して

ここでは、白浜砂岩の例を中心にポア状の空隙を対象に画像処理し、それらの結果について紹介する。今回採用した一連の画像処理システムを図-2に示す。ここでは、偏光顕微鏡による薄片観察を行い、岩石中に含まれるポアの様子を撮影した写真を入力情報とした。薄片の写真は、最高解像度400 DPIのカラーイメージスキャナ

図-2 画像処理のフロー

ーを紹介し、位置と明るさの情報を持つ画素としてコンピュータに取り込まれる。この際、取り込み画像の解像度、中間調、濃度補正、色補正などの各種処理が施される。取り込まれた画像は、対象とする領域のみを抽出することができるように2値化処理が施される。

図-3 (a), (b)は写真18, 19を入力画像として図-2に示された手順に従って抽出された空隙の領域（黒い領域）とマトリックス粒子（白い領域）のバイナリーイメージである。この領域の大きさは実寸法で3.6 mm×5.2 mmであり、画素の数は328×480となっている。岩石中に含まれるポアやクラックの大きさおよびその分布形態に関する解析は、このバイナリーイメージをもとに行われる。図-3 (a), (b)は静水圧負荷前と静水圧49 MPa 負荷後の白浜砂岩中のポアの様子をそれぞれ示している。ポアの総面積が全体に占める割合は (a) の試験前が6.54%であるが、(b) の試験後は4.86%となった。静水圧の負荷によってポアの量が減少することがこのような事実からも認められる。なお、これらの詳しい結果については薛ほか³⁰⁾にまとめて報告する予定である。バイナリーイメージでは、空隙の領域の全体に占める割合を2次元の空隙率と考えることができる。この空隙率は強制乾燥重量・湿潤重量・水中重量などから求める物理的方法で得られた空隙率（以後、3次元の空隙率と称する）と異なる。岩石の空隙率は、孤立した状態の空隙をも評価していることになる。透水試験などの流体の移動や浸出に関連した問題では、あくまでも供試体内の連結した空隙の割合、すなわち有効空隙率に着目

(a) 静水圧負荷前

(b) 静水圧49 MPa 負荷後

図-3 画像処理によって得られた2値化イメージ

する必要がある。有効空隙率は空隙率よりも小さな値を示すこと、本手法では樹脂が浸透した領域のみを扱っていることなどから、イメージから求めた2次元の空隙率は有効空隙率に近いものと考えられる。

DOYEN³¹⁾はイメージから求めた2次元の空隙率の方が物理的方法で求めた3次元の空隙率よりも大きくなることを報告している。今回の白浜砂岩の空隙率は13%であり、イメージから求めた2次元の空隙率の方が小さいというDOYEN³¹⁾の結果と逆の関係を示した。以下、この理由について岩石の構造上の観点および画像処理上の観点から考えてみることにする。

岩石の構造上の観点から考えると、3次元的な分布をしているものを2次元の断面で見て、その空隙率を比較する場合、両者が異なることは当然ありうる。そこで、3次元の空隙率と2次元の空隙率が大きく異なることを図-4のような簡単な砂岩の粒子モデルを用いて考えてみる。図-4は砂岩の構成粒子はその大きさが均一で、しかも粒子の配列の仕方がピラミッド状と仮定した場合の平面図と側面図を示している。この場合の基準となる単位あたりの空隙率は25.95%となる。図-5(a), (b)は

平面図

側面図

図-4 岩石の粒子配列モデル (ピラミッド型)

A - A 断面

B - B 断面

図-5 粒子配列モデルの各断面の様子

右側は粒子の中心で見た場合、左側は空隙の中心で見た場合。

図-4の側面図において、測線A-A断面、B-B断面で切断した場合の単位当りの平面図である。前者は断面内に孔隙の占める割合が一番少ない場合であり、後者は一番多い場合である。断面内の2次元の孔隙率はそれぞれ、21.46%、34.96%となる。右側の図は粒子の中心で見た場合であり、同様に左側は空隙の中心で見た場合である。2次元の空隙率は断面によって、3次元で求めた空隙率よりも小さい場合も大きい場合もあり、これらの積分値が3次元の空隙率に相当するものと考えられる。最も単純な場合を想定し、3次元と2次元の場合の空隙率を計算しても、両者はどこの断面をとるかによって大きく異なることが示された。実際の砂岩供試体においては、図-4で示されるような単純な粒子配列はむしろ考えずらいので、3次元の空隙率とイメージから求めた2次元の空隙率との違いは、薄片毎に異なる、ある

いは薄片の中でも場所毎に異なると言っても良いであろう。DOYEN³¹⁾は、薄片の厚さや、薄片を作る位置の違いによる理由を述べているが、このような理由は図-4のような均質な粒子の一定配列構造によってもたらされることが明らかである。したがって、今後薄片を用いて供試体の孔隙率等を評価する場合には、できるだけ大きな薄片を準備し、薄片全体について検討することが必要であり、さらに同一供試体からより多くの薄片を作ることも大事である。

一方、画像処理上からこの問題を考えた場合、2値化する時のしきい値の設定が重要と思われる。しかしながら、2値化して得られた画像は、常に元の入力値である写真と比べて、両者の差が最小になるよう繰り返し2値化を実行している。したがって、2値化による空隙率の測定誤差は小さいものと思われるが、現段階では実施例も少ないので、今後の検討課題としたい。なお、樹脂の浸透の程度が十分でない場合も考えられるが、薄片の作り方のところでも述べたように、慎重な含浸過程の繰り返しによって、これによる可能性は少ないものと思われる。薄片観察中に、樹脂の含浸が不十分と思われる空隙の存在を確認することはできなかった。

以下、ポアの最も長い径の方向分布やポアを楕円近似した時のアスペクト比の分布などについて述べることにする。

図-6は図-3のバイナリーイメージより得たポアの最も長い径の方向と各ポアの周囲長との関係を示している。静水圧49 MPaまで負荷した(b)後では、試験前(a)に存在した20°と170°付近の2つのピークがなくなっている。ポアと同じ面積を持つ楕円を仮定し、アスペクト比の分布を示したのが、図-7である。静水圧負荷前(a)に存在した面積が大きく、しかも、アスペクト比の小さいポアは負荷後(b)閉鎖していることがわかる。ある大きさのアスペクト比 α を持つクラックが完全に閉鎖する静水圧 P_c は、WALSH (1965)³²⁾によれば、

$$P_c = \pi E \alpha / 4(1 - \nu^2)$$

で与えられる。ここで、 E は媒質のヤング率、 ν はポアソン比を示す。上式からも容易に理解できるように、閉鎖する圧力 P_c はアスペクト比 α と比例関係にあるので、ある任意の静水圧を媒質に与えるとアスペクト比の小さいものから順に閉鎖することになる。ちなみに、今回の実験では、静水圧49 MPaの負荷に対し、体積ひずみは0.8%の収縮量を示している。したがって、前述した画像処理の結果は、試験後の供試体の薄片を用いているが、静水圧の増加に伴う内部組織の変化を正確に反

映していることになる。

真三軸応力下で最大主応力および中間主応力方向の透水係数を測定した供試体の画像処理結果の一部について以下に示す。用いたデータは写真-5を画像処理したものである。図-8はポアの最も長い長軸の値と短軸の平均長さとの関係を示している。長軸が大きくなるほど、短軸の長さも大きくなる傾向が認められる。図-9はポアの長軸の方位分布とそれらの画像全体に占める割合を示している。方位は大きく中間・最小主応力方向の2つに分かれているのが認められる。この試験では、中間・最大主応力を段階的に変えているので、この結果だけからでは、応力の変化とポアの長軸の方位分布との関連については言及できない。図-10はポアを楕円近似した時のアスペクト比とそれらが画像全体に占める割合を示している。アスペクト比が1.0すなわち球状のものが卓越していたことがわかる。なお、これらの詳しい結果については杉田ほか³³⁾に述べられている。

以上、今回用いた画像処理の構成とデータ整理の内容について簡単に述べた。画像処理上重要な概念である連結性の問題、エッジ検出の問題や輪郭の処理、線の抽出などの各種処理方法が最終的な出力画像に与える影響に関しては、今後十分な検討がなされなければならない。青色樹脂を混合した薄片を用いる観察方法では、主にポア状の領域の抽出に優れていることがわかった。西山ほか²⁵⁾の蛍光染料を充填した供試体に紫外線を照射する方法では、数ミクロン以上のマイクロクラックの検出に優れていることが報告されている。対象物がポアかマイクロクラックかによる画像処理上の問題点は、今後多くの事例研究を積み上げていく過程で解決されなければならない。

5. 今後の課題

薄片を用いた岩石中のポアの形態から、岩石の流体輸送特性を推定する試みは多くの研究者によって行われている。BERRYMAN and BLAIR³⁴⁾はSEM画像中の2点間の空間相関関数を用いて空隙率とポアの比表面積を求め、Kozeny-Karmanの式から透水係数を求めている。こうして得られた透水係数は、用いた空隙率や比表面積の倍率に依存することを報告している。また、空隙率では50倍から200倍の倍率の画像を用いて求めた場合が、実際に用いた場合と良く一致することを報告している。KOPLIK *et al.*³⁵⁾はMassillon砂岩の薄片から、電気回路の抵抗と同じように、空隙のネットワークモデルをつくり、岩石の透水係数の評価を行っている。こうして得られた透水係数は実際に測定した値よりも10倍も

(a) 静水圧負荷前

(a) 静水圧負荷前

(b) 静水圧49 MPa 負荷後

(b) 静水圧49 MPa 負荷後

図-6 ポアの長径の方向と周囲長の関係

図-7 アスペクト比の分布

図-8 ポアの長軸長さと短軸平均長さとの関係

図-9 ポアの方位分布と全体に占める割合

図-10 楕円近似した場合のアスペクト比と全体に占める割合

大きかった。この理由として、ごく限られた領域の薄片を用いていることや岩石本来の不均一性等、あるいは岩石には初期構造異方性があること、計算には楕円柱を仮定しているが、実際のポアにはこのような単純な形をしたものが少ないなどの理由を挙げている。DOYEN³¹⁾は透水係数の変化を空隙率の関数として評価する手法について述べている。この場合の空隙率は薄片で観察される空隙率を定量的に評価している。同様の研究に EHRlich³⁶⁾がある。彼は巨視的な岩石の輸送特性と throat (ポアとポアをつなぐクラック状の通路) サイズのヒストグラムや2次元のポア連結性とは良い相関があることを述べている。

ポアの3次元分布形態を直接観察しようと、WARDLAW³⁷⁾, PITTMAN and DUCHANKO³⁸⁾は岩石のマトリックス部分を溶かし、樹脂を充填したポアの骨格のみを取り出すことに成功している。また、岩石にウッド合金を圧入し、反射型顕微鏡を用いてポアの3次元分布を観察した RINK and SCHOPPER³⁹⁾の例もある。

画像から得られる透水係数は、実験によって得られる値よりも大きくなる。この主原因はポアなどのネットワークを3次元で定量的に評価する手法が確立していないためと思われる。今後、2次元の画像情報から3次元におけるポアのネットワーク情報を引き出すための理論と、より多くのデータの蓄積が必要となるだろう。筆者らはおもに堆積岩の透水特性について、種々の応力条件下での透水係数を測定している。さらに、透水特性をより詳細に把握するために、変形特性や弾性波伝播特性も同時に測定している。今後は、画像処理から得られる結果をもとに、これら各種物理量との相関を比較・検討し、ポアの3次元情報の蓄積を図るつもりである。

【謝辞】 地質調査所地殻物理部 柴原保人氏には画像処理装置一式をお借りした。ここに記して、感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 小出 仁・星野一男(1967): 三軸変形下の岩石中の微小割れ目の発達について, 地震, 第20巻, pp. 85-97.
- 2) WILLARD, R. J., and MCWILLIAMS, J. R. (1969): Microstructural techniques in the study of physical properties of rock, Int. J. Rock Mecha. Min. Sci., Vol. 6, pp. 1-12.
- 3) PENG, S., and PODNIEKS, E. R. (1972): Relaxation and the behavior of failed rock, Int. J. Rock Mecha. Min. Sci., Vol. 9, pp. 699-712.
- 4) HALLBAUER, D. K., WAGNER, H. and COOK, N. G. W. (1973): Some observations concerning the macroscopic and mechanical behavior of quartzite specimen in stiff, triaxial compression test, Int. J. Rock Mecha. Min. Sci., Vol. 10, pp. 713-726.
- 5) DUNN, D. E., LAFOUNTAIN, L. J., and JACKSON, R. E. (1973): Porosity dependence and mechanism of brittle fracture in sandstones, J. Geophys. Res., Vol. 78, No. 14, pp. 2403-2417.
- 6) BONBOLAKIS, E. G. (1973): Study of the brittle fracture process under uniaxial compression, Tectonophysics, Vol. 18, pp. 231-248.
- 7) OLSSON, W. A. (1974): Microfracturing and faulting in a limestone, Tectonophysics, Vol. 24, pp. 277-285.
- 8) MOSHER, S., BERGER, R. L., and ANDERSON, D. E. (1974): Fracturing characteristics of two granites, Rock Mechanics, Vol. 7, pp. 167-176.
- 9) PENG, S. S. (1975): A note on fracturing propagation and time dependent behavior of rocks in uniaxial tension, Int. J. Rock Mecha. Min. Sci., Vol. 12, pp. 125-127.
- 10) OLSSON, W. A., and PENG, S. S. (1976): Microcrack nucleation in marble, Int. J. Rock Mecha. Min. Sci., Vol. 13, pp. 53-59.
- 11) Hirota UI (1976): Experimental study of the mechanical properties and microfracturing of some brittle rocks by compression tests, J. Earth Sci. Nagoya Univ., Vol. 23/24, pp. 57-91.
- 12) WEINBRANDT, R. M., and FATT, I. (1969): A scanning electron microscope study of the pore structure of sandstone, J. Petrol. Technol., Vol. 21, pp. 543-548.
- 13) TIMUR, A., HEMP KINS, W. B. and WEINBRANDT, R. M. (1971): Scanning electron microscope study of pore systems on rocks, J. Geophys. Res., Vol. 76, No. 20, pp. 4932-4948.
- 14) PENG, S. S., and JOHNSON, A. M. (1972): Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, Int. J. Rock Mecha. Min. Sci., Vol. 9, pp. 37-86.
- 15) SPRUNT, E. S., and BRACE, W. F. (1974): Direct observation of microcavities in crystalline rocks, Int. J. Rock

- Mecha. Min. Sci., Vol. 11, pp. 139-150.
- 16) MONTGOMERY, C. W. and BRACE, W. F. (1975): Micropores in Plagioclase, *Contrib. Miner. Petrol.*, Vol. 52, pp. 17-28.
- 17) TAPPONNIER, P., and BRACE, W. F. (1976): Development of stress-induced microcracks in Westerly granite, *Int. J. Rock Mecha. Min. Sci.*, Vol. 13, pp. 103-112.
- 18) HADLEY, B. C. (1976): Comparison of calculated and observed crack densities and seismic velocities in Westerly granite, *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, pp. 3484-3494.
- 19) KRANTZ, R. L. (1979): Crack growth and development during creep of Barre granite, *Int. J. Rock Mecha. Min. Sci.*, Vol. 16, pp. 23-35.
- 20) KRANTZ, R. L. (1979): Crack-crack and crackpore interactions in stressed granite, *Int. J. Rock Mecha. Min. Sci.*, Vol. 16, pp. 37-47.
- 21) HOWARTH, D. F. (1987): The effect of pre existing microcracks on mechanical rock performance in sedimentary and crystalline rocks, *Int. J. Rock Mecha. Min. Sci.*, Vol. 24, No. 4, pp. 223-233.
- 22) BATZLE, M. L., SIMMONS, G., and SIEGFRIED, R. W. (1980): Microcrack closure in rocks under stress: direct observation, *J. Geophys. Res.*, Vol. 85, No. B12, pp. 7072-7090.
- 23) GARDNER, R. D. and PINCUS, H. J. (1968): Fluorescent dye penetrants applied to rock fractures, *Int. J. Rock Mecha. Min. Sci.*, Vol. 5, pp. 155-158.
- 24) KOTTE, J. J., BERCZES, Z. G., GRANBERG, J. and SELDENRATH, Th. R. (1969): Stress-strain relations and breakage of cylindrical granitic rock specimens under uniaxial and triaxial loads, *Int. J. Rock Mecha. Min. Sci.*, Vol. 6, pp. 581-595.
- 25) 西山 孝・楠田 啓・北川元紀(1990): 蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出, *資源・素材学会誌*, 106巻, 10号, pp. 19-25.
- 26) 安部正治(1988): 岩石の空隙を薄片で探る, *地質ニュース*, 404号, pp. 60.
- 27) 薛 自求・大和田朗・高橋 学・楠瀬動一郎・石島洋二(1991): 砂岩の内部構造とその透水特性について, *地質ニュース*, 439号, pp. 50-53.
- 28) 石島洋二・薛 自求・高橋 学(1991): 静水圧下における砂岩の透水特性について, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 393-398.
- 29) 石島洋二・薛 自求・高橋 学(1991): 新第三紀堆積岩の透水挙動と等価管路モデルによる解釈, *応用地質*, Vol. 32, No. 5, pp. 1-12.
- 30) 薛 自求・石島洋二・高橋 学(1992): 砂岩の透水特性と内部構造資源と素材, 1992年11月号, pp. 769-775.
- 31) DOYEN, P. M. (1988): Permeability, conductivity and pore geometry of sandstone, *J. Geophys. Res.*, Vol. 93, No. B7, pp. 7729-7740.
- 32) WALSH, J. B. (1965): The effect of cracks on the compressibility of rock, *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, pp. 381-389.
- 33) 杉田 裕・石島洋二・高橋 学(1992): 真三軸応力下における白浜砂岩の透水係数に及ぼす中間主応力の影響について, 平成4年度資源・素材学会春季大会講演予稿集, pp. 31-32.
- 34) BERRYMAN, J. G., and BLAIR, S. C. (1986): Use of digital image analysis to estimate fluid permeability of porous materials: Application of two point correlation functions, *J. Appl. Phys.*, Vol. 60, No. 6, pp. 1930-1938.
- 35) KOPLIK, J., LIN, C., and VERMETTE, M. (1984): Conductivity and permeability from microgeometry, *J. Appl. Phys.*, Vol. 56, No. 1, pp. 3127-3131.
- 36) EHRLICH, R., CARBTREE, S. KENNEDY, S. and CANNON, R. (1984): Petrographic image analysis of reservoir pore complexes, *J. Sediment. Petrology*, Vol. 54, No. 4, pp. 1365-1378.
- 37) WARDLOW, N. C. (1976): Pore geometry of carbonate rocks as revealed by pore casts and capillary pressure, *A. A. P. G. Bull.*, Vol. 60, pp. 245-257.
- 38) PITTMAN, E. D. and DUCHANKO, R. W. (1970): Use of pore casts and scanning electron microscope to study pore geometry, *J. Sed. Pet.*, Vol. 40, pp. 1153-1157.
- 39) RINK, M., and SCHOPPER, J. R. (1978): On the application of image analysis to formation evaluation, *The Log Analyst*, Jan.-Feb., pp. 12-22.

(1992年4月21日受付, 1992年7月29日受理)