砂岩の微視的構造と透水特性*

薛 自 求¹ 石 島 洋 二² 高 橋 学³

Permeability and Microgeometry of Sandstones Under Hydrostatic Pressure

by Ziqiu XUE¹, Yoji ISHIJIMA¹ and Manabu TAKAHASHI²

1. Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060

2. Environmental Geology Department, Geological Survey of Japan

The microgeometry or texture of a porous medium determines the physical properties, e.g., the transport and acoustical properties of sedimentary rock. In order to better understand the relation between microgeometry and permeability, samples of two sandstones (Shirahama and Kimachi) were submitted to hydrostatic pressure cycles while pore pressure was kept constant.

For loading, the permeability decreased obviously at the low pressure level, and decreased slightly when the pressure increasing. For unloading, the permeability was little altered by the pressure change, contrary to the loading condition. Cycling the hydrostatic pressure caused nonrecoverable changes (hysteresis) in permeability, volumetric strain and velocity (P-wave and S-wave).

A series of blue dye epoxy-impregnated thin sections of the two sandstones was prepared from the stressed and unstressed samples. Using an image analyzer the porosity of Shirahama sandstone decreased from 6.54% to 4.86% after stressed to 49 MPa. Closure of pores caused the hysteresis in permeability, volumetric strain and velocity of Shirahama sandstone. Instead of pore closure, compaction of clastic caused the large hysteresis in volumetric strain of Kimachi sandstone. It is clear that these characteristics of the permeability have a close relation with the microgeometry.

KEY WORDS: Permeability, Volumetric Strain, Velocity, Hydrostatic Pressure, Hysteresis, Pore

1. は じ め に

岩石の透水係数は、静水圧、差応力、間隙水圧などが作用すると影響を受けることはすでに詳しく調べられている^{1)~3)}。しかも、透水係数はこれらの圧力の一義的な関数になっていないことが明らかになっている。つまり、圧力を繰り返し負荷させると、載荷過程と除荷過程では、透水係数の値が異なり、ヒステリシスが生じる⁴⁾。

これらの透水特性は、岩石内部に分布する空隙の微視的構造、特に、間隙水の通路となりうるポアやクラックから構成されるネットワークと密接に関係している⁵⁾⁶⁾。本研究では、偏平な微小亀裂をクラック、それ以外の空隙をポアと呼ぶことにする。これら

のポアやクラックの形状、大きさおよびその分布形態は、岩石を構成している鉱物粒子の種類や粒径などに影響され、岩種によってかなり異っている⁷⁾。従って、Brace⁸⁾が述べているように、岩種によって透水特性が異なる。

Bernabeら⁹⁾やKranzら¹⁰⁾は、人工岩石(Hot-Pressed Calcite)とジョイントを含んだ花崗岩について、静水圧の繰り返し負荷に伴う透水係数のヒステリシスを調べ、その原因が塑性流動の発生やジョイント内の間隙水が平衡状態に達するまでに時間を要するためであると報告した。彼らはこの種の現象を時間効果と呼んでいる。しかし、このような時間効果を配慮して測定した場合にも、透水係数のヒステリシスは認められた¹¹⁾。Sprunt and Brace¹²⁾やFeves and Simmons¹³⁾は、この現象が主に岩石の鉱物粒子同志をつなぐ架橋(ブリッジ)の破壊やポアやクラックの閉鎖によって起こると説明している。

これまでのこの種の研究は、花崗岩のような結晶質の岩石に関するものが多く、堆積岩に関する詳細な検討はまだなされていない。そこで、本研究では、空隙率の異なる2種類の砂岩について、その透水挙動、とりわけ、透水係数のヒステリシスと岩石内部の

* 1992年4月10日受付 7月3日受理 資源・素材学会平成4年度春季大会にて一部発表

1. 学生会員 北海道大学大学院 工学部資源開発工学科

2. 正会員 工博 北海道大学教授 工学部資源開発工学科

3. 正会員 工博 工業技術院地質調査所環境地質部 主任研究員

キーワード: 透水係数, 体積ひずみ, 弾性波速度, 静水圧, ヒステリシス, ポア

Table 1 Mechanical and physical properties of Shirahama and Kimachi sandstones.

Items	Shirahama	Kimachi
Uniaxial compressive strength (MPa)	60	31
Young's modulus (GPa)	9.1	6.1
Poisson's ratio	0.24	0.23
Porosity (%)	13	23
Compressional wave velocity (km/sec)	3.06	2.45
Shear wave velocity (km/sec)	2.15	1.61

微視的構造との関係についても検討することにした。このため、一定の間隙水圧の下で、静水圧を数回繰返し負荷するときの透水係数と体積ひずみを測定した。また、岩石内部のポアやクラックの状況を把握する一助として、両岩石について、透水試験と同様な載荷経路で静水圧を負荷するときの弾性波速度（P波およびS波）の挙動を調べた。さらに、負荷前後の岩石供試体から得た薄片を基に、ポアやクラックの形状や分布状態を偏光顕微鏡下で観察した。特に、白浜砂岩については負荷前後の供試体における空隙の変化を画像処理によって定量的に評価した。

以上の実験結果や顕微鏡観察結果を用い、静水圧下における両岩石の透水係数、体積ひずみ、弾性波速度の挙動、とりわけヒステリシスについて、岩石の微視的構造に基づき解釈した。

2. 供試岩石と透水試験法

2・1 供試岩石および供試体の準備

供試岩石として用いた和歌山県産白浜砂岩と島根県産来待砂岩の基本的な物性値を Table 1 に示す。堆積層理面に対する水の流れる向きによって透水係数が異なるという報告がある¹⁴⁾。そこで、本研究では、堆積層理面に直交するようにコアボーリングをし、直径 30 mm、長さ 60 mm の円柱形を切り出し、上下端面の平行度を約 1/100 に仕上げた。

供試体のひずみを計測するために、合計 4 枚のクロス型抵抗線ひずみゲージを供試体の側面に互いに 90° ずつ離して張り付けた。供試体の体積ひずみはこれらのゲージから得た供試体の軸方向および周方向のひずみ量から計算して求めた。

1～2 週間続く静水圧下の透水試験の期間中、静水圧の媒体となる油が供試体内へ浸入するのを防ぐために、まず、粘性の低いシリコン樹脂（信越シリコン KE-45-TS）を 2～3 mm の均一な厚さになるまで数回に分けて塗り、それからさらに粘性の高い樹脂（信越シリコンシーラント 45）を重ね塗りし、供試体のコーティングを入念に行った。

2・2 透水試験の方法および試験装置

透水係数は Fig. 1 に示す装置を用い、Brace¹⁵⁾によって提案されたトランジェント・パルス法によって測定した。実験方法の詳細については高橋・薛¹⁶⁾を参照されたい。本方法は圧力条件を自由に設定することができ、定水位法や変水位法に比べて、測定精度が高く、しかも測定時間が短いなどの利点がある。静水圧の大きさと透水係数のヒステリシスとの関係を明らかにするために、間隙水圧を一定（3 MPa）にしたまま、静水圧の大きさを第 1 ステージ（7～19 MPa）、第 2 ステージ（19～37 MPa）、第 3 ステージ（37～49 MPa）と 3 つのステージに分け、第 1、第 2、第 3 ステージの順に、それぞれ 1 サイクルだけ静水圧を載荷－除荷させ、その間の透水係数と体積ひずみを測定した。このとき、載荷過程では静水圧を 3 MPa ずつ増加させ、除荷過程では静水圧を 6 MPa ずつ減少させた。なお、第 3 ステージだけは 1 サイクルの載荷－除荷をした後、再び 49 MPa まで載荷し、そこで試験

Fig. 1 Schematic drawing of the sample assembly and the permeability measurement system. S = Sample PS = Piston for Axial Loading P_c = Confining Pressure P_p = Pore Pressure SCI = Servo-Controlled Intensifier PP = Pore Pressure Pump IV = Isolation Valve V = Valve PT = Pressure Transducer RES = Reservoir (1,000 cc) DPT = Differential Pressure Transducer SV = Separate Valve

を終了した。

同一の間隙水圧下で 1 サイクルだけ静水圧を 49 MPa まで載荷－除荷する試験を既に行っているが¹¹⁾、それによると白浜砂岩、来待砂岩の残留体積ひずみはそれぞれ 0.3% と 0.7% であった。

2・3 弾性波速度の測定方法

透水試験に用いた供試体と同一のブロックから角柱（35 mm × 35 mm × 50 mm）の供試体を作り、長軸方向に伝播する P 波と振動方向が直交する二つの S 波の速度を測定するために、計 3 組の圧電素子を両端面にはりつけた。圧電素子（PZT）の共振周波数は P 波が 1 MHz、S 波が 0.5 MHz である。弾性波速度はパルス透過法を用いて測定した。弾性波の初動到達時間を測定するために、透過波と発振パルスをトランジェントメモリに記録した。トランジェントメモリの A/D 変換は分解能 10 ビット、サンプリングタイムは 20 nsec である。なお、これらの実験においては、供試岩石を乾燥状態とし、透水試験と同様な載荷経路で静水圧を負荷したときの弾性波速度（P 波および S 波）を測定した。

2・4 岩石の微視的構造の観察について

岩石に含まれているポアやクラックの形状、大きさ、分布状態を調べるために、種々の手法が考案されている。例えば、走査型電子顕微鏡や偏光顕微鏡を用いた直接的な観察法がある。この他に、樹脂を供試体に圧入するポアキャスト法¹⁷⁾や弾性波速度を用いたインバージョン法¹⁸⁾がある。

薄片を用いた偏光顕微鏡観察においては、ポアやクラックの識別が容易にできるように、薄片製作時に青色顔料を添加した樹脂をポアやクラックに充填する方法がよく用いられる。Ehrlich¹⁹⁾は、このような手法による観察結果を基に、圧力の負荷に伴う岩石の透水係数の変化と、負荷前後のポアの大きさや分布の変化との間に関連が認められると報告している。

本研究では薄片を用いた顕微鏡観察法を採用した。この方法は従来から細長い亀裂や幅が 1 μm 以下のクラックの観察には適していないと指摘されている²⁰⁾。しかし、手摺りを中心とした研磨により薄片の厚さを 50 μm 前後に仕上げ、阿部²¹⁾と同様に着色樹脂をポアやクラックに充填する方法を用いることにより、細長い亀裂が観察できるようになった。Fig. 2 は粒界や粒内を貫通する

Fig. 2 Optical photomicrograph of Kimachi sandstone from triaxial compression test (after Xue et al. 21). The fracture has formed around or across grains. The arrows show the direction of the maximum compression.

約 $20\mu\text{m}$ 程度の開口幅をもつ亀裂の様子を明瞭に観察できた例を示している。また、大きさ $20\mu\text{m}$ 程度のボアやクラックの観察が可能となった。これに関する詳細は薛ほか²²⁾を参照されたい。

3. 透水試験および弾性波速度試験の結果

3.1 透水係数に及ぼす静水圧の影響

透水係数は Fig. 3 に示すように、静水圧の増加に伴って減少するが、静水圧の負荷のステージが進むにつれ、透水係数の減少の程度が小さくなり、第 3 ステージではほとんど減少しなくなる。このため、透水係数-静水圧線図は下に凸の形になっている。これらの挙動は両岩種に共通している。ただし、静水圧の増加に伴う透水係数の減少の程度は白浜砂岩の方が来待砂岩よりかなり大きい。

静水圧の除荷に伴う透水係数の増加（回復）は、第 1 ステージでわずかにみられるが、第 2、第 3 ステージではほとんど認められない。その結果、同一圧力下の透水係数の値を比べると、除荷

Fig. 3 Variations of the permeability of Shirahama sandstone (a) and Kimachi sandstone (b) during pressure cycles.

Table 2a Hysteresis of volumetric strain, permeability and velocity of Shirahama sandstone.

Items		7 MPa (stage I)	19 MPa (stage II)	37 MPa (stage III)
Volumetric strain (%)	(%)	0.11	0.03	0.02
Permeability (%)	(%)	33.7	28.5	2.7
Compressional velocity (%)	(%)	3.6	2.6	1.2
Shear velocity (%)	(%)	2.6	2.1	1.0

Table 2b Hysteresis of volumetric strain, permeability and velocity of Kimachi sandstone.

Items		7 MPa (stage I)	19 MPa (stage II)	37 MPa (stage III)
Volumetric strain (%)	(%)	—	0.31	0.94
Permeability (%)	(%)	19.6	26.1	7.6
Compressional velocity (%)	(%)	2.1	1.9	0.6
Shear velocity (%)	(%)	1.5	1.8	1.3

*: Hysteresis is defined as the difference between values during loading and unloading.

時の方が載荷時より常に小さい。これらの挙動は両岩種に共通して認められる。ただし、第 1 ステージにおける除荷過程での透水係数の回復の程度については、来待砂岩の方が白浜砂岩に比べて少し大きい。

次に、静水圧の載荷-除荷に伴う透水係数のヒステリシスを比較すると、Table 2 に示すように、白浜砂岩の場合はステージが進むにつれて小さくなっており、第 3 ステージではほとんど認められない。これに対して、来待砂岩の場合、第 2 ステージの値が他のステージの値に比べて大きいという特徴がみられるものの、全体としてヒステリシスは白浜砂岩に比べて小さい。

3.2 体積ひずみ-静水圧の関係

Fig. 4 は透水試験で得られた体積ひずみ-静水圧の関係を示したものである。次に述べるように、静水圧の載荷-除荷に対する体積ひずみの挙動に関して、両岩石ではいくつかの点で異なっていることがわかる。第 1 に、白浜砂岩の場合、静水圧が小さい間は

Fig. 4 Volumetric strain response of Shirahama sandstone (a) and Kimachi sandstone (b) during pressure cycles.

は圧力の載荷に伴う体積ひずみの増加（縮みを正とする）が著しいが、高圧になると小さくなる傾向が認められる。その結果、体積ひずみ-静水圧線図は全体として上に凸の形になっている。これに対して、来待砂岩の場合は、載荷に伴う体積ひずみの増加は、静水圧の低い領域よりも高い領域の方が大きい。その結果、体積ひずみ-静水圧線図は下に凸になっている。なお、体積ひずみの量は、白浜砂岩の方が来待砂岩に比べてずっと小さい。

第 2 に、Table 2 に示すように、静水圧を三つのステージでそれぞれ載荷-除荷させる間のヒステリシスは、体積ひずみの方が透水係数よりもはるかに小さいことが注目される。また、この体積ひずみのヒステリシスは、白浜砂岩の場合には、静水圧の小さい第 1 ステージでは大きい、以降は第 2、第 3 ステージの順に小さくなる。特に、第 3 ステージではほとんどヒステリシスがみられなくなる。これに対して、来待砂岩の場合、体積ひずみのヒステリシスは第 1 ステージで最も小さく、第 2、第 3

Fig. 5 Relation between permeability and volumetric strain of Shirahama sandstone (a) and Kimachi sandstone (b).

Fig. 6 Change of compressional wave velocity (V_p) of Shirahama sandstone (a) and Kimachi sandstone (b) during pressure cycles (V_{p0} is velocity at atmospheric pressure).

Fig. 7 Change of shear wave velocity (V_s) of Shirahama sandstone (a) and Kimachi sandstone (b) during pressure cycles (V_{s0} is velocity at atmospheric pressure).

テージの順に大きくなっている。全体として、ヒステリシスは透水係数の場合とは逆に、白浜砂岩の方が来待砂岩よりずっと小さい。

3・3 透水係数-体積ひずみの関係

透水係数と体積ひずみの関係を示したのがFig. 5である。両岩種とも、第1、第2ステージでは体積ひずみの増加に伴う透水係数の減少が著しく、第3ステージでは小さい。その結果、透水係数-体積ひずみ線図は右下がりの傾向を示している。しかし、体積ひずみの増加に伴う透水係数の減少の程度については、両岩種で大きな差異があり、透水係数-体積ひずみ線図の傾きは、白浜砂岩に比べて、来待砂岩の方がずっと緩やかである。

3・4 弾性波速度に及ぼす静水圧の影響

Fig. 6, 7に示すように、両岩種ともP波およびS波の速度は静水圧の増加に伴って増加しているが、増加の程度は圧力が増すにつれて次第に小さくなっている。なお、両岩種ともS波速度には振動方向の差による大きな違いがないことがわかった。

P波速度については、詳細にみると次のような差異が認められる。静水圧が19MPa(第2ステージ)と49MPa(第3ステージ)に達したときに、白浜砂岩の弾性波速度は、大気圧下の速度に比べて、それぞれ23.0%、32.5%増加しているのに対し、来待砂岩はそれぞれ17.4%、26.7%になっており、増加の程度は白浜砂岩に比べて約6%程度少ない。

P波およびS波の速度は、透水係数や体積ひずみと異なり、静水圧の除荷時の値の方が載荷時よりも大きい。静水圧の載荷-除荷によるP波速度のヒステリシスについては、Table 2に示すように、白浜砂岩の場合、第1ステージで一番大きく、ステージが進むにつれヒステリシスが徐々に減少している。これに対して、来待砂岩の場合は、第2ステージでやや大きい、第1、第3ステージでは極めて小さい。S波速度の場合にもほぼ同様な傾向が認められる。

3・5 薄片を用いた岩石の微視的構造の観察

偏光顕微鏡下で両岩石の鉱物組成を調べた結果をTable 3に

Table 3 Description of studied sandstones.

Sandstone	Avg. radius of grains	Modal analysis
Shirahama	0.12 mm	70% quartz 14% feldspar 10% clay 6% carbonite
Kimachi	0.76 mm	65% clastics 12% quartz 10% feldspar 9% zeolite 4% carbonite

示す。表中の数値(%)はポイントカウント法によって求めた各鉱物粒子の数の全体に占める割合である。白浜砂岩を構成する主な鉱物は石英と長石で、この他に少量の炭酸塩と粘土鉱物(主にイライトとクロライト)がある。これらの粒子の径は比較的均一で、全体に丸みを帯びている。これに対し、来待砂岩の場合は、火山岩片から変質した凝灰質の粒子を主とし、この他に石英、沸石および少量の炭酸塩鉱物が存在している。鉱物粒子の平均粒径については、Table 3に示すように、来待砂岩の方が白浜砂岩よりもずっと大きい。

Fig. 8~11に示す偏光顕微鏡写真において、ポアやクラックは青色樹脂によって着色されている。Fig. 8は来待砂岩に多く含まれている典型的なポアの一例を示したもので、大きな面積をもつと同時に、円形に近い形状を呈している。Fig. 9にはポアが網状につながっている様子が認められ、それらの中にはアスペクト比の小さいものが含まれている。しかし、全体としては、Fig. 8に示すような大きいポアが空隙率に寄与する割合が大きい。浸透した着色樹脂により、複雑なポアの形だけでなく、ポアを囲む二次鉱物と思われる沸石の結晶の様子まで鮮明に識別することができる。これらの沸石の結晶の存在は、ポア周辺が間隙水の通路であったことを示唆している。また、ポアを取り囲む沸石は、Fig. 9に示すように、静水圧49MPaまで載荷した後も破壊しておらず、強固であることがわかる。

Fig. 8 Typical pore in intact Kimachi sandstone (after Xue et al. 22). The pore is surrounded with secondary crystallized zeolite. The impregnated blue-dye-epoxy shows the pore with complex geometry.

Fig. 9 Optical photomicrograph of Kimachi sandstone after stressed to 49 MPa. There is no visible evidence of pore closure.

Fig. 10 Optical photomicrograph of Shirahama sandstone. There is a visible evidence of small pore closure after the sample was stressed to 49 MPa. (a: unstressed sample b: stressed to 49 MPa)

粒径の小さい白浜砂岩では、Fig. 10 に示すように個々のポアの面積が来待砂岩に比べて小さい。多くのポアが鉱物粒子どうしの境界に分布しており、形状もまちまちである。

Fig. 11 Optical photomicrograph of a clastic plastically deformed sandstone after stressed to 49 MPa in Kimachi sandstone. The impregnated blue-dye-epoxy indicates the unrecoverable deformation of the grain.

Fig. 12 Binary images of Fig. 10. The black areas are the porous zones, while the white areas are the grains. Each scene is a 328 × 480 array of 10 μm wide pixels.

静水圧の負荷に伴う微視的構造の変化をみてみよう。来待砂岩については、偏光顕微鏡下で、21mm²に存在する大きな粒子について、最も短い径の寸法（平均0.037mm）を測定したところ、静水圧の負荷に伴い平均で約0.5μmほど縮んだことが明らかになった。火山岩片から変質した粒子は剛性が小さいため、静水圧によって非可逆的に圧縮されたことを示している。Fig.11はその一例で、静水圧下で起こった一様な縮みが除荷時に戻らないために、粒子の周囲にほぼ一定の幅の空隙が発生している。なお、粒子の縮みはひずみに換算すると約1%である。今回は試験終了後の残留体積ひずみを測定していないが、1サイクルだけ負荷したときの値は2・2で述べたように0.7%であった。今回は3サイクルの段階的な負荷をしており、この値を下回らない残留体積ひずみが生じたと考えられる。粒子の縮みと巨視的なひずみはオーダ的に一致しているといえよう。

白浜砂岩の場合、顕微鏡写真で確認できたように、ポアの分布がランダムであり、負荷前後のポアの変化を定量的に評価するために画像処理を行った。すなわち、偏光顕微鏡下で得た写真を最高解像度400DPI、読み取り諸調8ビット/画素、有効画素

Fig. 13
Relation between
pore area and
aspect ratio for
Shirahama
sandstone
(a) unstressed
sample
(b) stressed to
49 MPa.

1712×2320ドットのカラーイメージスキャナでコンピュータに取り込み、ポアのみを抽出してから分析に供した。Fig. 12はこのように方法で得た負荷前後のポアの様子を示している。ポアの総面積が全体に占める割合は、試験前が6.54%、試験後は4.86%となり、静水圧の負荷によってポアの量が明らかに減少したことを示した。Fig. 13はポアを同じ面積を有する楕円で近似し、それらの楕円のアスペクト比（楕円の短軸と長軸の比）と面積の関係を示している。無負荷状態下の面積が大きくかつアスペクト比の小さいポアの多くは、静水圧の負荷により閉鎖していることがわかる。

4. 考 察

ここでは、顕微鏡による薄片の観察結果を基に、前章で得られた透水係数、体積ひずみ、弾性波速度の挙動と微視的構造との関連性について考察してみよう。

4.1 透水係数の挙動と微視的構造について

Fig. 8～11に示したように、岩石にはさまざまな形状や寸法のポアが存在している。この内で互いに連結し間隙水の通路を構成しているポアやクラックのみが透水性を支配している。

Mavko and Nur²³⁾によると、独立している非偏平楕円形のクラックの閉鎖に必要な静水圧の大きさ (P_c) はクラックのアスペクト比 (α) に比例する。

$$P_c = \frac{3E\alpha}{4(1-\nu^2)}$$

ここに、 E , ν はそれぞれヤング率、ポアソン比を表す。上式に示されるように、静水圧が比較的小さい間はアスペクト比の小さいポアが優先的に閉鎖することになる。この式を用いると、静水圧49MPaで閉鎖するポアのアスペクト比は、 0.6×10^{-2} (白浜砂岩)、 0.1×10^{-1} (来待砂岩) と評価される。

白浜砂岩については、この現象が直接確認されており、Fig. 13に示すように静水圧49MPaを負荷した後では 0.4×10^{-1} 以下のアスペクト比のものは閉鎖している。同図は、アスペクト比の小さいポアは、静水圧の下で一度閉鎖すると除荷しても再び開口しにくいことを示している。さらに、Fig. 13(a)に示すように、アスペクト比の小さいポアは面積が大きいものが多い。従って、これらのポアが主要な透水経路として機能する場合、静水圧によって

閉鎖すると、透水係数の急激な減少がもたらされるであろう。第1ステージにおいては、静水圧の載荷時に透水係数が急激に減少し、また、静水圧を除荷しても、透水係数はほとんど回復せずに、結果的に大きなヒステリシスを生じている。これらの現象は上記のポアの挙動によって説明することが可能である。

来待砂岩に関しても、第1ステージでは静水圧の載荷に伴い透水係数が著しく減少し、除荷しても透水係数の回復が小さい。従って、この現象については、白浜砂岩と同じメカニズムが働いていると考えられる。しかし、白浜砂岩に比べるとヒステリシスが相対的に小さいのは、アスペクト比の小さいポアの割合が少ないためであろう。

第2、第3ステージに進み、静水圧のレベルが高くなるにつれて、両岩種とも静水圧の増加に対する透水係数の減少する割合が次第に小さくなる。微視的構造との関連でいえば、白浜砂岩の場合、静水圧が高くなるにつれ、より大きいアスペクト比のポアやクラックが閉鎖するが、これらの総面積はFig. 13からわかるように次第に小さくなっているため、透水係数に対する寄与も小さくなる。来待砂岩についても同様な説明が可能であろう。

白浜砂岩、来待砂岩のいずれも、静水圧が37MPa以上の第3ステージにおいては、静水圧の増加に伴い、透水係数が減少する傾向は依然として認められるものの、第1、第2ステージに比べると、減少する割合は極めて小さく、また、ヒステリシスについても同様である。この場合には、アスペクト比の大きいポアだけが透水経路に関与しており、静水圧の変化に対して、閉鎖する現象はほとんど起こっていないことを示唆している。

4.2 体積ひずみの挙動と微視的構造の関連性について

体積ひずみは静水圧の除荷時の方が載荷時よりも常に大きく、静水圧の載荷に伴い非可逆的な圧縮が生じることを示している。このような体積ひずみの挙動に対しては、透水係数とは異なり、空隙と岩石粒子部分から構成される岩石の微視的構造のすべてが関与している。すなわち、空隙については、透水経路を構成しているポアやクラックはもちろんのこと、独立したポアも体積ひずみに寄与する。また、岩石を構成している鉱物粒子自体の変形および粒子間の相対的な変位（再配列）も体積ひずみに変化をもたらす。

ポアの閉鎖は見かけの剛性を高める作用をする²⁴⁾。静水圧の増加に伴い、アスペクト比の小さなポアの順に閉鎖していけば、静水圧-体積ひずみ線図は上に凸となる。白浜砂岩の場合は、Fig. 4(a)に示すように、この予測と同じ静水圧-体積ひずみ線図が得られている。ただし、ヒステリシスは透水係数に比べて極めて小さい。これは体積ひずみに対するポアの寄与が相対的に小さいことを示唆している。つまり、体積ひずみには岩石の固体部分の変形がポアの変形以上に関与しているのであろう。

来待砂岩の場合、静水圧-体積ひずみ線図は下に凸となっている。また、静水圧の増加に伴って体積ひずみのヒステリシスは増加する傾向をみせており、特に、37MPa付近では約1%に達する最大のヒステリシスが生じていることが注目される。これらは来待砂岩に多く存在する火山岩片から変質した凝灰質の粒子が軟らかく、静水圧37MPa付近で降伏すると考えれば説明しうる。これらの粒子が静水圧下で非可逆的な変形（縮み）を起こすことは、Fig. 11で示したように顕微鏡観察で直接確認されている。来待砂岩の体積ひずみの挙動に関しては、これらの粒子の変形の寄与が大きいと考えられる。このような現象は、BatzleとSimmons²⁵⁾が行った地熱地域の岩石を用いた研究でも認められている。上述した凝灰質の粒子の変形挙動は、当然のことながら透水挙動にも影響を及ぼすであろう。来待砂岩の透水係数のヒステリシスが第2ステージで最大となっているのはこれと密接な関係があるもの

と考えられる。

4・3 弾性波速度と微視的構造の関連性について

アスペクト比の小さいボアやクラックは、アスペクト比の大きいものよりも弾性波速度に著しく影響する²⁶⁾。白浜砂岩の場合、第1ステージ(7 MPa)における弾性波速度のヒステリシスは第3ステージの約3倍になっているが、これはアスペクト比の小さいボアやクラックの閉鎖によって説明される。一方、来待砂岩の場合、弾性波速度のヒステリシスは白浜砂岩よりも概して小さい。これは、4・1で述べたように、アスペクト比の小さいボアやクラックの閉鎖が少ないことを反映していると考えられる。

来待砂岩の場合、静水圧37 MPaのとき、体積ひずみが大きなヒステリシスを示しているのに対し、弾性波速度には大きなヒステリシスが認められない。個々の鉱物粒子で起こる塑性変形は弾性波速度には強い影響をもたらさないであろう。

4・4 まとめ

白浜砂岩と来待砂岩に関し、静水圧の载荷と除荷に伴う透水係数、体積ひずみ、弾性波速度の挙動を岩石の微視的構造と関連させる試みをした。白浜砂岩の場合は、石英粒子が卓越し、その境界を埋める形で存在するボアの大きさが相対的に小さいことを反映し、静水圧の载荷によりアスペクト比の小さいボアから起こる非可逆的な閉鎖がヒステリシスを含む諸現象の背景になっている。来待砂岩の場合、軟らかい凝灰質の粒子が多く、また、主要なボアが円形に近いことから、静水圧が大きくなって起こる粒子の塑性変形や粒子の再配列がヒステリシスを含む諸現象に大きく関与している。

なお、アスペクト比の小さいボアは、静水圧の载荷で閉鎖すると、除荷しても再び開口しないことが、白浜砂岩では確認され、来待砂岩では推定された。これが他の岩種でも起こることの可否、および発生メカニズムなどに関する検討は今後に残された課題である。

5. 結 言

白浜砂岩と来待砂岩について、静水圧の载荷-除荷に伴う透水・変形特性を調べた。試験した静水圧の範囲内で認められた白浜砂岩と来待砂岩の透水・変形特性における差異は、岩石内部のボアやクラックおよび構成粒子の特性を反映している。得られた主な結果は次の通りである。

(1) 静水圧の増加とともに、体積ひずみ(縮みを+に取る)や弾性波速度は増加し、透水係数は減少する。

(2) 静水圧の载荷-除荷に伴い、透水係数、体積ひずみ、弾性波速度にはヒステリシスが生じる。体積ひずみのヒステリシスは空隙率の高い来待砂岩の方が空隙率の低い白浜砂岩よりも大きい。しかし、弾性波速度や透水係数のヒステリシスに関しては、むしろ白浜砂岩の方が大きい。この現象は静水圧が比較的低い第1ステージで著しい。

(3) 来待砂岩の場合、第1ステージでのみ、静水圧の除荷に伴う透水係数の回復が認められるが、さらに高い静水圧下では白浜砂岩と同様に、静水圧の除荷に伴う透水係数の変化がほとんど生じない。弾性波速度は除荷過程の方が载荷過程よりも大きく、透水係数は逆に小さくなっている。

(4) 青色顔料を添加した樹脂をボアやクラックに充填した薄片を用い、偏光顕微鏡下で岩石の微視的構造を明瞭に観察することができた。

(5) 白浜砂岩の場合、アスペクト比の小さいボアは全体に占める割合が大きく、静水圧の下で非可逆的に閉じる。来待砂岩の場合は、アスペクト比の大きいボアが空隙率に占める割合が大きく、

静水圧下では、変質した火山岩片が非可逆的に圧縮される。

(6) (2), (3)の諸現象は、(5)で述べた両岩石の静水圧下で起こる圧縮のメカニズムの差異によって説明しうる。つまり、ヒステリシスの主因として、白浜砂岩の場合には、ボアやクラックの閉鎖を、来待砂岩の場合には、鉱物粒子の非可逆的な変形および再配列を挙げることができる。

謝辞 本研究の遂行にあたり、地質調査所西澤 修氏(地殻熱部)、楠瀬勤一郎氏(環境地質部)、桑原保人氏(地殻物理部)、ならびに北海道大学中村 章助手にご指導やご鞭撻を頂いた。また、薄片の作製に関しては地質調査所地質標本館の大和田 朗氏にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- Walsh, J. B. and Brace, W. F.: J. Geophys. Res., 89, 9425~9431, (1984)
- Zoback, M. D. and Byerlee, J. D.: J. Geophys. Res., 80, 752~755, (1975)
- Walsh, J. B.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, 429~435, (1981)
- Bernabe, Y.: Mech. of Materials, [5], 235~249, (1986)
- Koplik, J., Lin, C. and Vermette, M.: J. Appl. Phys., 56 [11], 3127~3131, (1984)
- Doyen, P. M.: J. Geophys. Res., 93, 7729~7740, (1988)
- Caruso, L., Simmons, G. and Wilkens, R.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, 381~392, (1985)
- Brace, W. F.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 17, 241~251, (1980)
- Bernabe, Y., Brace, W. F. and Evans, B.: Mech. Materials, [1], 173~183, (1982)
- Kranz, R. L., Frankel, A. D., Engelder, T. and Scholz, C. H.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, 225~234, (1979)
- 薛自求・石島洋二・高橋 学: 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 393~398, (1990)
- Sprunt, E. and Brace, W. F.: Proc. 3rd Cong. ISRM, IIA, 524~529, Denver, CO (1974)
- Fees, M. and Simmons, G.: Bull. Seism. Soc. AM, 66, 1755~1765, (1976)
- Zoback, M. D. and Byerlee, J. D.: Am. Asso. Petrol. Geol. Bull., 59, 154~158, (1975)
- Brace, W. F., Walsh, J. B. and Frangos, W. T.: J. Geophys. Res., 73 [6], 2225~2236, (1968)
- 高橋 学・薛自求: 地質ニュース, [421], 46~54, (1989)
- Pittman, E. D. and Duschatko, R. W.: J. Sed. Petrol. 40 [4], 1153~1157, (1984)
- Cheng, H. C. and Toksoz, M. N.: J. Geophys. Res., 84, 7533~7542, (1979)
- Ehrlich, R., Kennedy, S., Crabtree, S. J. and Cannon, R. L.: J. Sed. Petrol., 54, 1365~1378, (1984)
- Soeder, D. J.: Am. Asso. Petrol. Geologists Bull., 74, 30~40, (1990)
- 阿部正治: 地質ニュース, [404], 60, (1988)
- 薛自求・大和田 朗・高橋 学・楠瀬勤一郎・石島洋二: 地質ニュース, [439], 50~53, (1991)
- Mavko, G. M. and Nur, A.: J. Geophys. Res., 83, 4459~4468, (1978)
- Schatz, J. F.: ASME Appl. Mech. Div., 16, 141~170, (1976)
- Batzle, M. L. and Simmons, G.: Earth Planet. Sci. Lett. 30, 71~93, (1976)
- Anderson, D. L., Minster, B. and Cole, D.: J. Geophys. Res., 79, 4011~4015, (1974)