

三軸応力下における岩石の比抵抗測定

Resistivity Measurement for Rock Samples under triaxial compression test

亀谷 裕志*・岩本 健*・細田 光一*・陳 渠*・西尾 伸也**・安部 透**
Hiroshi KAMEYA, Takeshi IWAMOTO, Koichi HOSODA, Chen QU,
Shinya NISHIO and Toru ABE

For the purpose of measuring resistivity of methane hydrate sample during triaxial compression, we developed a new test apparatus, which is based on the 4-electrode measurement system. Resistivity of 5 types of rock samples were measured in several confining pressures, and resistivity of 4 types of rock samples were measured during triaxial compression tests. We discuss the factors which influence the change of resistivity during the excavation of rock mass.

Key Words : electrical resistivity, electrical conductivity, triaxial compression test

1. はじめに

筆者らは、メタンハイドレート産出に伴う海底地盤の変形について検討を進めており、このなかで地盤材料の三軸応力下における比抵抗特性に着目し、試験システムの開発を行ってきた¹⁾。これは地盤の比抵抗や IP 特性などの電気的な特性が、地下の流体成分やその流動特性と強い相関性を持つため、三軸試験中に生じる供試体の状態変化を比抵抗特性により把握できることが期待されるからである。一方、測定結果の解釈に必要な基本特性や室内試験技術はまだ十分検討されているとは言えず、高圧・高温条件下や高流体圧条件下、供試体の変形下での比抵抗の変化を把握する必要がある。以上のことから、筆者らは、今回開発した試験システムの適用実験として、拘束圧下および軸圧縮時における岩石供試体の比抵抗変化を測定し、比抵抗の変化に影響する要因について検討を加えた。

2. 実験装置

開発した測定装置を図-1に示す。
拘束圧を加えた場合の比抵抗測定は一般には、供試体両端から電流を流し、その位置で電位差を測定する二電極法が用いられる²⁾。しかし、二電極法は接触抵抗や誘電分極の影響を受けるため、一般に測定精度が低い。一方、供試体両端から電流を流し、中央部の2点間で電位差を計測する四電極法は上記の誤差要因が含まれないため測定精度は良いとされている²⁾。これに加え三軸応力下の測定では①背圧の付加によって供試体の飽和度が保たれること、②拘束圧により電極と供試体の密着性が保たれること、から通常の大気中で行う測定と比較

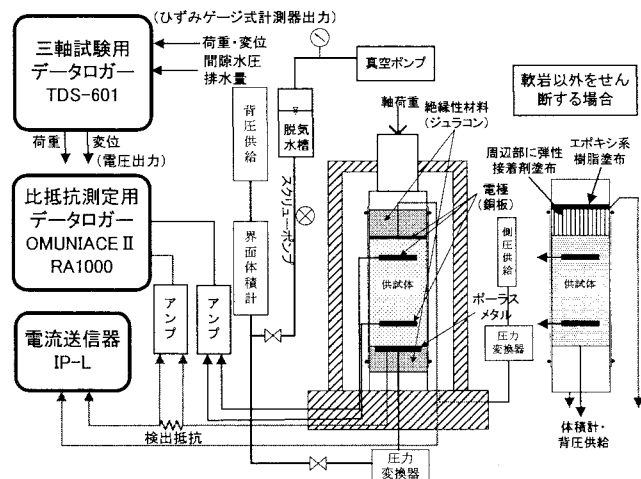


図-1 本研究で用いた比抵抗測定装置の概要

* 応用地質株式会社 コアラボ
**正会員 清水建設株式会社 技術研究所

しても利点が多いと考えられる。以上から作成した測定装置では四電極法を採用した。電位電極としては長さ40mm、幅3mmの1対の銅板を供試体側面に設置し、メンブレンの途中に加工したゴムチューブ製の袖口からリード線を取り出した。また、三軸試験装置そのままではエンドキャップや排水ラインが電気経路となるため、所定の電流を供試体内部にのみ流すことが出来ない。このような電気経路を遮断するため、排水経路は片面のみとし、エンドキャップの供試体と接する部分は非導電性のプラスチック系材料（ジュラコン）で作成した。このエンドキャップは変形するため軸圧縮応力の付加は30MPa程度が限界であったため、より強度の大きな岩石に対しては図の右端に示すように上部の金属性エンドキャップを接着剤等で絶縁して測定を行った。なお、いずれのエンドキャップを用いた場合も拘束圧下での測定結果は一致している。

圧密の途中段階ではメンブレンと供試体の間に排水されずに残る水が存在し、これが電気の経路となって誤差要因となる可能性がある。これは大気中の測定において試料表面に付着した水の皮膜の影響³⁾と同じであり、比抵抗の高い試料ではその影響が大きい。図-2は岡崎花崗岩における圧密段階での比抵抗の変化を示している。メンブレンと供試体間の水が完全に排水された時点で、比抵抗値は一定に達するため、客観的にその値を決定することが可能である。

比抵抗測定時には、電流送信機より通電周期1秒の交替電流を流し、検出抵抗を挟んだ電流電位および試料の電位差はアイソレーション用のアンプ（入力インピーダンス1MΩおよび10MΩ）を介して、データロガーに0.2秒間隔で収録した。通電した電流密度は0.5～5μA/cm²である。

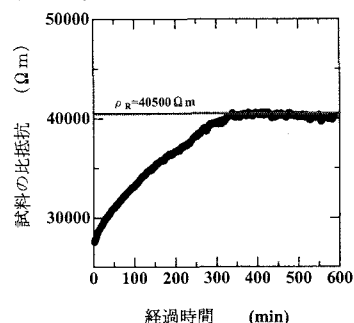


図-2 圧密過程の比抵抗の変化
(試料は岡崎花崗岩)

3. 実験結果

(1) 大気中での計測結果との対比

実験に用いた試料を表-1に示す。試料は石材商よりブロックで購入し、直径50mm高さ100mmの供試体を成形し、水道水中で3日間以上真空脱気して飽和させた。また2種類の砂岩については塩水（32500ppmのNaCl溶液）で同様に飽和させた。なお、同じブロックから直径50mm、高さ20mmに複数個の供試体を成形した上で、既往の実験⁴⁾と同じ手順で濃度の異なるKCl溶液で飽和した後、大気中で無分極電極を使用した二電極法の比抵抗測定を行い、間隙水の比抵抗と試料の比抵抗の関係を求めた（表-1にそのパラメータを併せて示す）。

表-1 実験に用いた試料とその基本特性

岩石名	産地	湿潤密度 g/cm ³	乾燥密度 g/cm ³	間隙率 %	F	ρ _c Ωm	C _m S/m
岡崎花崗岩	愛知県岡崎市	2.67	2.66	0.62	2960	58600	1.71×10 ⁻⁵
小松安山岩	神奈川県足柄下郡	2.66	2.60	5.87	216	559	1.79×10 ⁻³
多胡砂岩	群馬県多野郡	2.24	2.02	22.2	47.8	284	3.53×10 ⁻³
白浜砂岩	和歌山県西牟婁郡	2.43	2.28	14.7	48.8	109	9.15×10 ⁻³
田下凝灰岩	栃木県宇都宮市	2.02	1.69	33.1	46.6	15.1	6.63×10 ⁻²

図-3に間隙水の比抵抗と試料の比抵抗との関係を示す。図では大気中（二電極法）および拘束圧下（有効拘束圧0.5MPa）での比抵抗測定結果を対比しているが、両者はほぼ一致している。間隙水の比抵抗と試料の比抵抗との間には次の並列回路モデルと呼ばれる関係が成立つとされている⁵⁾。

$$\frac{1}{\rho_R} = \frac{1}{F \cdot \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} \quad (1)$$

ここで、ρ_R；岩石の比抵抗（Ωm）、ρ_w；間隙水の比抵抗（Ωm）、F；地層係数

ρ_c（Ωm）は粒子自体の導電性による比抵抗成分であるが、通常の岩石では粒子自体はほぼ非導電性であり、ρ_cは粒子と間隙水の界面に生じる電気二重層による表面伝導が原因とされている。（1）式は導電率（比抵抗の逆数）で次のように表記することも出来る。

$$C_R = \frac{1}{F} \cdot C_w + C_m \quad (2)$$

ここで、 C_R 、 C_w 、 C_m は各成分の導電率 (S/m) を表す (S はジーメンズ= Ω^{-1})。図-4に2種類の砂岩について間隙水の導電率と試料の導電率との関係を示した。間隙水の導電率が6 S/mまでの領域では、間隙水の導電率と試料の導電率の関係は測定手法によらず(2)式で示される直線関係になる。しかし、間隙水の導電率がより高くなると大気中(二電極法)で測定した結果はこの直線関係からはずれる。これは二電極法では試料端面と電極との間の接触抵抗が測定誤差となり⁴⁾、抵抗が低い試料でその影響が大きくなるためと考えられる。

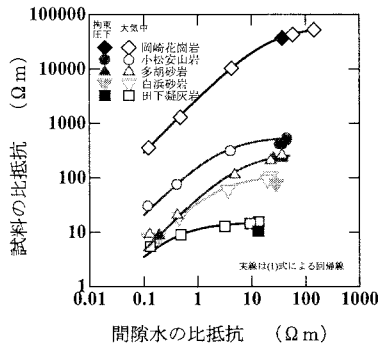


図-3 間隙水の比抵抗と試料の比抵抗の関係

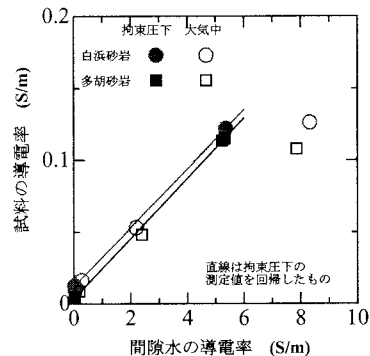


図-4 間隙水の導電率と試料の導電率の関係

(2) 拘束圧による比抵抗の変化

表-1に示した各岩石試料は水道水または塩水で脱気した後、測定装置にセットを行い、等方圧で圧密した後、比抵抗の測定を行った。試験時の背圧は0.5MPaとし、圧密圧力は原則として1, 1.5, 2.5, 4.5MPaの4段階またはこれに8.5MPaを加えた5段階とした。図-5に測定された比抵抗と有効拘束圧(拘束圧と背圧の差圧)との関係を示す。花崗岩、安山岩、砂岩については拘束圧の増加に伴い比抵抗が増加する傾向が認められる。これは拘束圧が加わるによりマイクロクラックの閉塞、あるいは間隙の収縮が生じるためと考えられる。一方で、田下凝灰岩の場合は拘束圧による比抵抗の変化はほとんど認められない。田下凝灰岩では試験時に十分な間隙の収縮が生じていなかった可能性もあるが、むしろその比抵抗の特性が大きいのと思われる。図-3によれば田下凝灰岩は比抵抗の絶対値が最も小さいと共に、間隙水の変化による試料の比抵抗の変化も小さい。田下凝灰岩は粘土鉱物を比較的多く含むことが知られており⁶⁾、その粘土鉱物と間隙水の境界に電気二重層が発達し、これを媒介とする表面伝導成分が卓越していると考えられる。このため、間隙構造の多少の変化は電気伝導に影響を与えないものと推測される。

多胡砂岩については、水道水および塩水(比抵抗の値は25倍にしてプロットしている)の2種類で試験を行っている。有効拘束圧に対する比抵抗の変化率(図の勾配)は、塩水で飽和したものの方が水道水で飽和したものの倍程度大きくなっている。

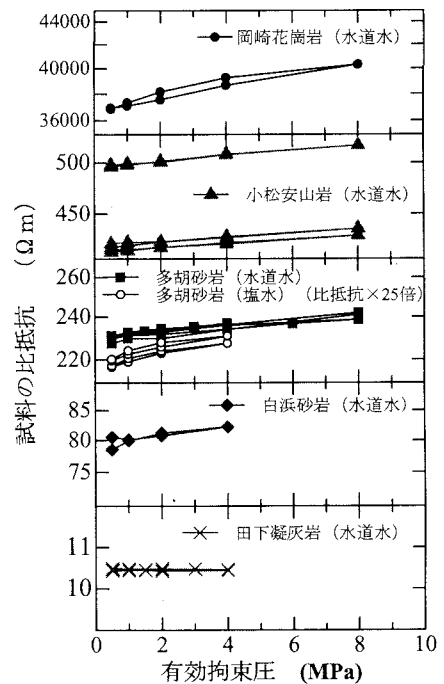


図-5 各試料の有効拘束圧と比抵抗の関係

(3) 軸圧縮による導電率の変化

表-1に示したうち岡崎花崗岩を除く岩石について軸圧縮を行いながら比抵抗の測定を行った。試験は所定の拘束圧と背圧0.5MPaを加え、ひずみ速度0.035%/minとし、排水径路を開いた状態でひずみ2~3%に達した時点で終了した。また吸排水量から体積ひずみの計算を行った。各図に示す体積ひずみは軸ひずみと同じく圧縮側が正である。図-6は拘束圧0.5~8MPaの4段階で実施した多胡砂岩のである。応力~ひずみ曲線および図-7に示す試験後供試体の破壊形状は拘束圧の増加に伴い脆性挙動から延性挙動へと遷移している。破壊後の体積ひずみは有効拘束圧が0.5, 2MPaの場合は膨張側に生じ、4, 8MPaでは圧縮側に生じている。

図-6の下段は、この体積ひずみの変化に合うように比抵抗ではなく導電率を主軸としてプロットを行っている。いずれの拘束圧でも初期段階で導電率はわずかながら低下する傾向を示し、最大軸差応力に近づく軸ひずみ1%付近から増加方向へ転じている。最大軸差応力前後の導電率の変化は有効拘束圧の値によって変化し、脆性破壊を示す0.5MPaでは破壊に伴う導電率の増加は大きく、逆に延性破壊を示す8MPaではその変化は明瞭でない。破壊により亀裂が発生し、その開口により間隙流体が流入して体積ひずみが発生するとすれば、それは新たな電気の流路となる。したがって導電率の変化は体積ひずみに依存するはずである。実際に拘束圧0.5、2MPaにおける導電率の上昇は破壊後の体積膨張量に依存するようにも見える。一方で、有効拘束圧が、4、8MPaでは軸差応力が最大値に達した後、体積ひずみが圧縮側に発生しているにもかかわらず、導電率は上昇する。拘束圧が高い場合、圧縮変形に伴い粒子破碎が生じるため体積が圧縮し、一方で粒子の表面積が増加して表面伝導による電気伝導が増加するためではないかと推定している。

図-8に種々の岩石に対するせん断時の導電率の変化を示す。試験時の有効拘束圧は0.5MPaであり、また2種類の砂岩については水道水および塩水（32500ppmのNaCl溶液）で飽和した供試体を、それ以外は水道水のみで飽和した供試体を用いている。図から以下の傾向を見て取ることができる。

- ① 田下凝灰岩を除くいずれの岩石でもせん断に伴い導電率は上昇している。その変化は、破壊前・破壊時（応力低下時）、破壊後（体積ひずみ増加時）のいずれの過程でも生じている。
- ② 水道水で飽和した岩石同士では、小松安山岩の導電率が最も上昇している。
- ③ 田下凝灰岩はせん断に伴い導電率、体積ひずみ共ほとんど変化せず、破壊後も明瞭ではない。
- ④ 小松安山岩(a)や白浜砂岩(e)の結果によれば、導電率は破壊面の形成時だけでなく体積ひずみの増大によっても上昇する。これは破壊面が開口してその内部に流体が流入することにより、電流の経路が増大するためと考えられる。
- ⑤ 白浜砂岩((c)と(e))の結果では間隙水が塩水の場合が水道水よりも導電率の変化が大きくなっている。多胡砂岩((d)と(f))では両者の差はあまり明確ではない。

関根ら⁷⁾は割裂により人工的な亀裂を有する供試体の比抵抗特性を調べた結果、縦方向に亀裂を有する岩石の比抵抗は亀裂部分と岩石部分の並列回路で表されることを示している。狭在物を有さない亀裂の導電率は、その本数・幅・方向・間隙水導電率・比表面積および表面伝導度などに依存するがここでは議論を単純にするために間隙水成分のみが影響するものとする。この場合、全体の導電率は次の式で表される。

$$C_T = \sin \alpha \cdot (-\varepsilon_v) \cdot C_W + C_R \quad (3)$$

ここで、 C_T 、 C_R 、 C_W は全体、岩石部分および間隙水の導電率、 α は亀裂面の方向、 ε_v は体積ひずみである。図-8には試験後供試体の主な破壊面から α の値を求め、(3)式に従い推定した導電率の値を○印でプロットしている。塩水の場合は間隙水の導電率の影響が大きいため、(3)式でおよそは軸圧縮過程の導電率の変化を表すことが出来るようである。水道水の場合は(3)式で推定されるよりも試験による導電率の変化が大きい。これは軸圧縮過程でマイクロクラックや亀裂の形成により比表面積の増加すること（導電率の表面伝導成分が増大する）や、流路の短絡（迂回率の減少）がより大きく影響するためと考えられる。

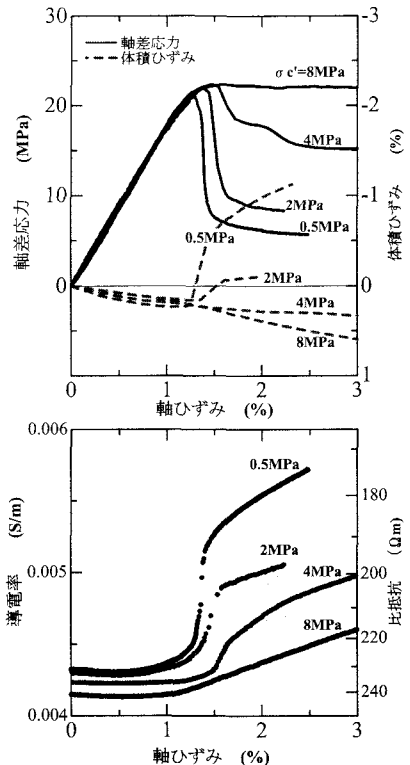


図-6 多胡砂岩の軸圧縮過程における導電率（比抵抗）の変化

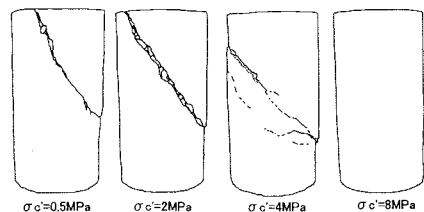


図-7 試験後の供試体破壊形状

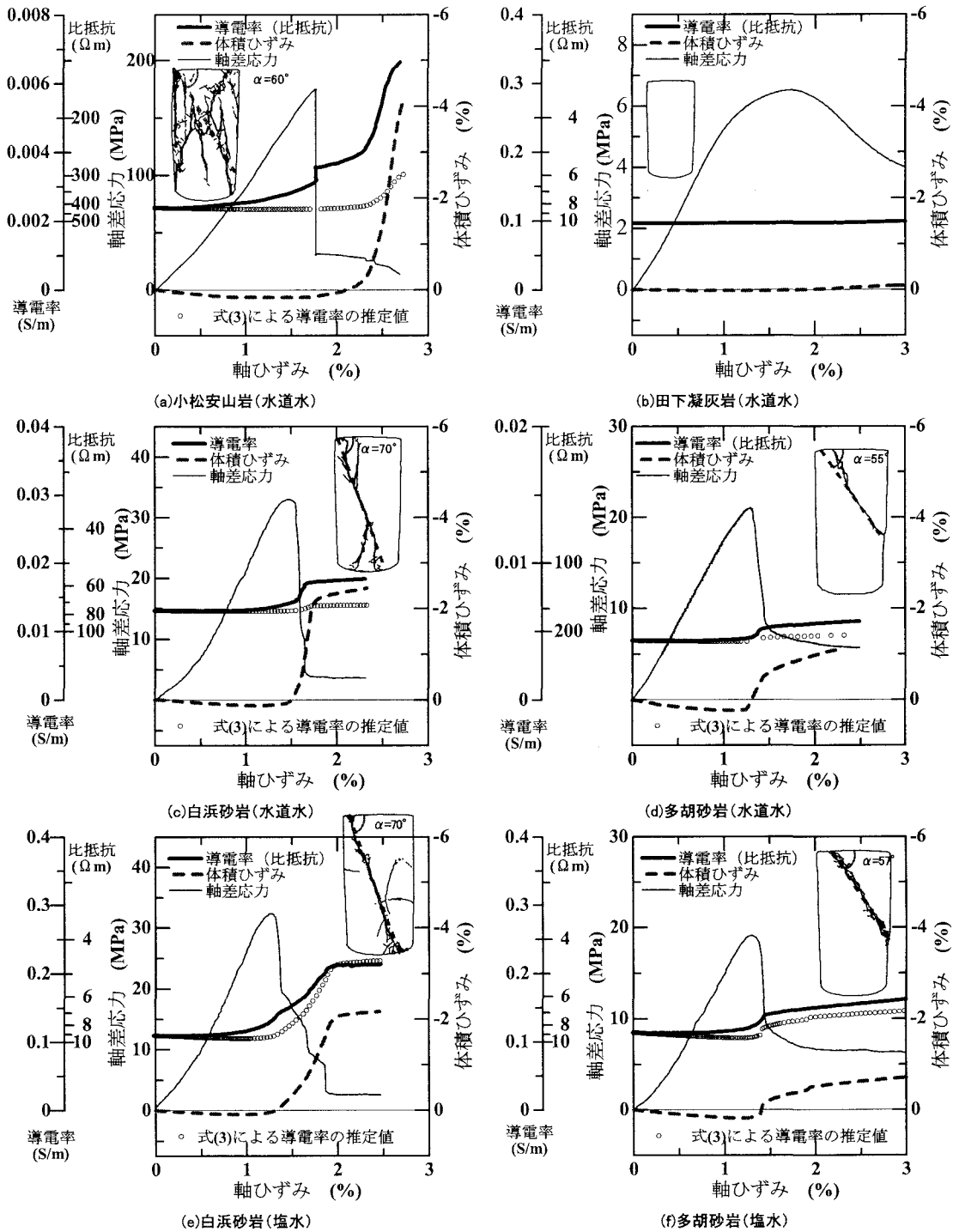


図-8 種々の岩石の軸圧縮過程における導電率（比抵抗）の変化；
各試験の有効拘束圧は0.5MPa，図中のスケッチは試験後供試体の破壊形状と主破壊面の確度

4. 考察

メタンハイドレート試料の三軸応力下における比抵抗特性を把握するために試験システムを開発し、その適用実験として岩石供試体を用いた等方圧下および軸圧縮過程の測定を実施した。開発した装置による等方圧下の測定結果は従来の手法のそれと一致し、十分な性能を有していることが確認できた。

軸圧縮過程の実験結果によれば、田下凝灰岩を除くすべての岩種で拘束圧の変化およびせん断による破壊-変形挙動により比抵抗が変化することが確認された。その変化は拘束圧の変化よりはせん断による破壊-変形による方が大きい。また、せん断時の比抵抗の変化は、①破壊前の応力変化、②破壊時の破壊面の形成、③破壊面の開口による体積膨張（間隙水の増加）、のいずれの過程でも生じる。間隙水の比抵抗が低い場合には③の要因が支配的になると言える。一方、通常の地下水（水道水）ではマイクロクラックや亀裂の形成による導電率の表面伝導成分の増加等の影響も大きい。このようなことから、もともと表面伝導成分や間隙率の小さな安山岩での比抵抗の変化が大きかったものと考えられる。現実問題としては、亀裂性の岩盤において掘削によるゆるみにより亀裂が開口し、そこに地下水が流入する現象は捉えられる可能性があるが、間隙率や導電率の表面伝導成分の大きな堆積岩では掘削影響領域を比抵抗変化で捉えることは相対的に難しいと考えられる。また、塩水環境下では亀裂面の開口による間隙水の流入の影響がそのまま比抵抗の変化がととして現れる。このことは比抵抗による掘削影響領域の調査が山間部よりも沿岸域で有効であることを示唆している。一方で、田下凝灰岩のように粘土鉱物を含む場合には、応力状態の変化や変形・破壊挙動が比抵抗の変化にほとんど結びつかないこともあり得る。また、本研究では対象としなかったが、飽和度の変化も比抵抗に大きな影響を与えることが知られており、これらを総合的に判断することが重要である。

5. おわりに

三軸応力下で四電極法により比抵抗を測定する装置を開発し、拘束圧下および軸圧縮過程における各種岩石の比抵抗の測定を行った。その結果、比抵抗は拘束圧の上昇によるマイクロクラックの閉塞、軸圧縮に伴うマイクロクラックや亀裂の形成、亀裂の開口による流体の流入などにより変化することが確認された。

本研究で用いた試験装置は、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム「環境影響評価グループ」の中でメタンハイドレート試料の比抵抗測定を目的として設計・製作されたもので、今回は測定装置の基礎的な性能試験の一環として実施した。今後は、メタンハイドレートを含む地盤材料について実験を継続していく予定である。

謝辞

東京大学地震研究所の吉田真吾助教授には装置設計でご指導いただきました。応用地質㈱の櫻井健氏、利岡徹馬氏には実験装置の製作、実験結果の評価でご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) <http://www.mh21japan.gr.jp/seika.html>
- 2) 物理探査学会編：物理探査ハンドブック 第5章，pp. 244～247，1998.
- 3) 千葉昭彦，熊田政弘：花崗岩および凝灰岩試料の比抵抗測定，物理探査，47，pp. 162-172，1994.
- 4) 亀谷裕志，櫻井健：岩石の室内比抵抗測定と透水係数推定の試み，第11回岩の力学国内シンポジウム，E05，2002.
- 5) T.J.Katube, J.P.Hume.: Permeability determination in crystalline rocks by standard geophysical logs, Geophysics, Vol.52, pp. 342-352, 1987.
- 6) 林為人，高橋学，杉田信隆：堆積岩を用いたトランジェントパルス法と変水位試験法との比較，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp353-358，1998.
- 7) 関根一郎，西牧均，石垣和明，原敏昭，斉藤章：岩石の比抵抗に対する割れ目とその狭在物の影響，応用地質，vol38，pp213-223，1997.