

封圧下のP波速度変化とひずみ変化から 推定された湯坪地熱井コア試料の割れ目の性状

薛 自求** 西澤 修* 桑原 保人*** 鈴木 茂之****

XUE Ziqiu, NISHIZAWA Osamu, KUWAHARA Yasuto and SUZUKI Shigeyuki Correlation of microfractures with P-wave velocities and strain in cored rock samples from the Yutsubo geothermal well deformed under confining pressures. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 47(12) p.599-617, 25 figs.

Abstract: P-wave velocity and strain were measured under confining pressures up to 100 MPa in four cored rock samples recovered from the two geothermal wells (YT-1 and YT-2), in the Yutsubo area of Oita Prefecture. Samples are octagonal prisms with long axes parallel to the vertical directions of the wells. Lengths of diagonals of octagons are 70-80mm and the heights are 90-100mm, large enough for evaluating effects of macro-cracks. P-wave velocity and strain were measured in the vertical and three horizontal planes (45 degrees apart), with strain gauges attached at each surface of the prisms.

A sample YT-1-4 from YT-1 (898m) exhibited inhomogeneous deformation, which suggests strong effects of macro-cracks. Anisotropies in velocity and strain between vertical and horizontal planes were observed in two samples (YT-2-4 and YT-1-8) from YT-2 (1212m) and YT-1 (1696m), respectively. For investigating changes of microstructure in rock samples after measurements, blue dye epoxy-impregnated thin sections were prepared. New fractures appear along precipitated minerals in pre-existing fractures or pre-existing cracks. High-pressure clastation and new crevice formation around alternated grains may have been produced by the large unrecoverable strains observed in the sample YT-1-4.

要 旨

大分県湯坪地熱実験フィールドの地下岩盤物性を把握するために、調査坑井YT-1とYT-2のボーリングコアを用いて静水圧100MPaまでのP波速度とひずみを測定した。試料は対角線長70-80mm、高さ90-100mmの八角柱に整形され、マクロな割れ目がひずみや弾性波速度に及ぼす影響を調べるに十分な大きさとなっている。試料各側面には鉛直方向に、両底面には45度の角度で3方向にひずみゲージが貼られた。P波速度は鉛直方向と水平

面内45度ごとの4方向で測定された。試料YT-1-4(898m)では不均質な変形が見られたが、これはマクロな割れ目のためと考えられる。試料YT-1-8(1696m)とYT-2-2(1212m)では、水平方向、鉛直方向のひずみやP波速度に異方性が認められた。試料の微細構造を観察するため、測定後の試料に青色染料で着色したエポキシ樹脂を染み込ませた薄片を作成し、顕微鏡下の観察を行った。実験時の圧力载荷によって生じた新しい割れ目は先在割れ目に沿って発生していた。測定時の高い封圧による鉱物粒子の圧砕や、変質鉱物の塑性変形は、YT-1-4の試料で圧力除荷後にみられた大きな回復不能なひずみの原因と考えられる。

1. はじめに

地熱資源の探査では、断層や破碎帯の位置を明らかにし、割れ目のネットワークの特性を把握することが重要

**基礎地盤コンサルタンツ(株)

奈良県生駒郡三郷町立野南3-12-21

(Kiso-Jiban Consultants Co. Ltd., 3-12-21

Tatsuno Minami, Sango, Ikoma, 636 Nara.)

*地殻熱部 (Geothermal Research Department, GSJ)

***地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

****岡山大学理学部

岡山市津島中3-1-1 (Department of Science, Okayama University; 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama 700 Japan)

Keywords: Yutsubo, P-wave velocity, strain, anisotropy, geothermal well

な課題である。このための地表での弾性波探査や比抵抗探査のほか、坑井を利用した各種検層や探査も行われている。上述のような熱水貯留層の特性を把握するためには、割れ目に起因する岩盤の物性が検層や物理探査の結果にどのように反映されるかを理解しなければならない。このためには貯留層とその周辺の岩石の物性を調べることが必要である。

新エネルギー・産業技術開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 以下本文中ではNEDOと称す) は大分県湯坪地域にモデル実験フィールドを設定し、深さ約1700mの坑井を掘削して各種の検層を行うとともに、地表及び坑井での物理探査手法の研究を行った。坑井では広い範囲の深度にわたってスポット的にコアリングが行われ、8 15/32" のコアビットによってコア試料が得られている (NEDO, 1992)。これらのコアは割れ目を多く含み、また割れ目内には充填鉱物が存在する。このような割れ目や充填鉱物が岩石コアの物性にどのような影響を及ぼすかは、地熱貯留層とその周辺の岩石の物性を把握する上で重要である。

岩石中の割れ目は弾性波速度やひずみなどの力学特性及び流体の浸透率、導電性流体を含んだ状態での電気伝導率などの輸送特性に影響を及ぼす。割れ目の形状や分布特性は静水圧下での弾性波速度やひずみの測定によって間接的に、あるいは薄片を用いた顕微鏡観察によって直接的に調べることができる (Toksöz *et al.*, 1976; Hadley, 1976)。割れ目が特定方向に卓越して存在する場合には、静水圧下でのひずみ変化や弾性波速度変化に異方性が観測され、探査・検層データ解釈の上での重要な手掛かりとなる。静水圧下での岩石のひずみはDSA (Differential Strain Analysis) 法によって精密に測定することができ、岩石内部の割れ目に関する詳細な情報を得ることができる (Simmons *et al.*, 1974)。割れ目の異方性を明らかにするためには、複数の異なった方向についてひずみと弾性波速度を測定することが必要である。

例えば、Batzie and Simmons (1976) は地熱地帯の岩石中の割れ目を光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡、X線マイクロアナライザーなどで調べたほか、DSA法によるひずみの測定も行い、地熱地帯の岩石では微小な割れ目は充填鉱物により塞がれ、熱水は新しい大きな割れ目中を流動すると報告している。弾性波速度の測定はコラ半島の超深度掘削坑井 (Kola Superdeep Well) のコアリング試料についても行われ、4.3-9.5kmの低速度帯の実体とその成因に関して議論されている (Mints *et al.*,

1987; Vernik *et al.*, 1987; Vernik *et al.*, 1994)。

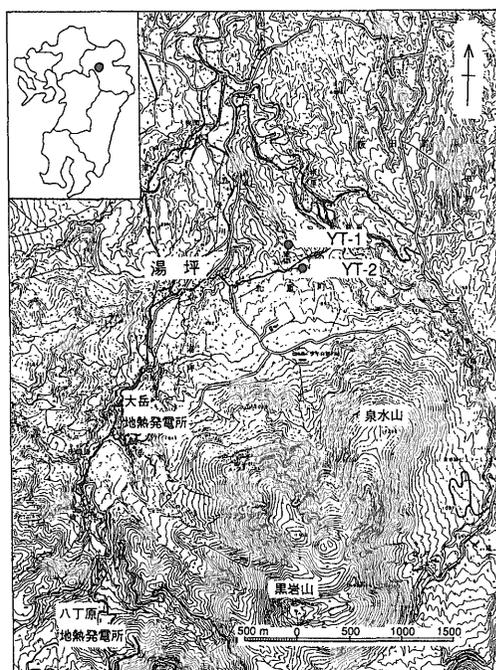
ここでは、湯坪地熱実験フィールドの坑井YT-1とYT-2から得たコア試料を用いた静水圧下でのひずみ・弾性波速度の測定結果と光学顕微鏡による観察結果とを併せて、この地域の地熱貯留層を形成する岩石中の割れ目の性状について議論する。

2. 実 験

2.1 試料

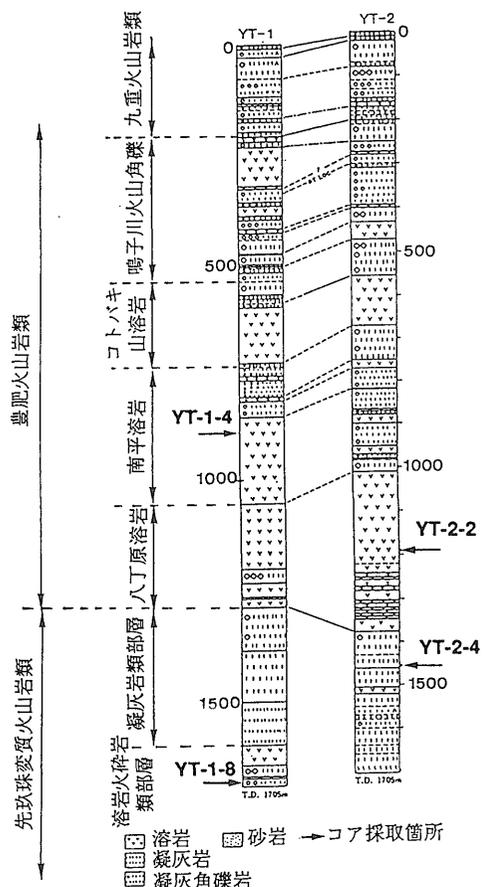
大分県九重町に位置するNEDOの湯坪地熱モデル実験フィールド (第1図) の試験井YT-1とYT-2の地質柱状図及び本試験に用いた岩石試料の採取箇所を第2図に示す。ボーリングコアより対角線長さ70-80mm、高さ90-100mmの八角柱形状の試料を長軸が深度方向と一致するよう切りとり整形した。試料YT-1-4とYT-1-8はYT-1孔のそれぞれ898mと1696mより、YT-2-2とYT-2-4はYT-2孔のそれぞれ1212mと1451mより得た。

試料長軸方向及びそれと直交する方向で45度ごと、計4方向の弾性波速度を測定するため、共振周波数2MHzの圧電素子を計5対貼り、パルス透過法によってそれぞ



第1図 湯坪地熱実験フィールドにおける坑井の配置 (NEDO, 1992a)

Fig. 1 Well location in the Yutsubo geothermal field (NEDO, 1992a).



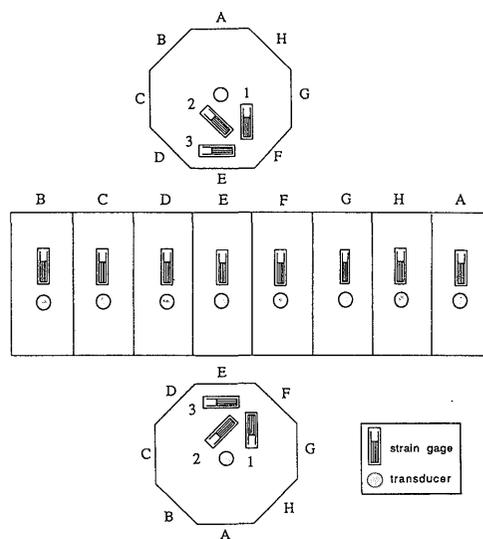
第2図 坑井YT-1, YT-2の地質柱状図及びコア試料採取箇所 (NEDO, 1992b)

Fig. 2 Geological columns of wells YT-1, YT-2 and locations of recovered sample. (NEDO, 1992b)

れの方向のP波速度を測定した。また、試料の各側面の鉛直方向にゲージ長10mmのひずみゲージを8枚、両底面には45度間隔のロゼット配置で3枚ずつ、計14枚貼り付けた(第3図)。岩石試料内部に圧力媒体(オイル)が浸入しないように、振動子やひずみゲージを貼り付けた後シリコンゴムで試料表面を被覆した。

2.2 静水圧試験

静水圧の負荷方法は100MPaまで2サイクルの載荷一除荷とし、第1サイクルの載荷過程では2.5MPaごとに増圧させ、除荷過程では10MPaずつ減圧させた。第2サイクルでは、載荷と除荷のいずれも圧力を10MPaずつ



第3図 試料側面と上下底面における振動子及びひずみゲージの配置

Fig. 3 Locations of PZT transducers and strain gauges.

変化させた。圧力の変化後所定の値を保持して、ひずみ変化をモニターしながら、圧力による試料の変形が安定したことを確認した後にP波速度とひずみを測定した。ただし、試料YT-1-4については割れ目による影響を詳細に調べるために、第1サイクル初期の負荷ステップはさらに小さくした(10MPa以下では1MPaずつ、10-40MPa間は2MPaとした)。

弾性波の波形はウェーブメモリ(分解能10ビット、サンプリング間隔50ns)を介してコンピュータに取り込んだ。互いに向かい合う一対の振動子が発振子と受振子となるよう、別のコンピュータで制御されたスイッチアレイシステムによって発振パルス信号と振動子との接続が切り換えられた。各圧力での弾性波の波形を並べることにより、初動の読み取り精度の向上を図った。ひずみはデータロガーで計測し(1ゲージ法)、 GPIBを介してコンピュータに取り込んだ。ここでは側面(A-H)や上下面(TOP, BTM)の番号をそのままゲージ番号として用いるとともに、ひずみは圧縮を正值とした。また、岩石試料の変形(圧縮)度合いを示す体積ひずみについては、全ひずみゲージの平均ひずみを3倍して算出した。

3. 実験結果

3.1 試料YT-1-4

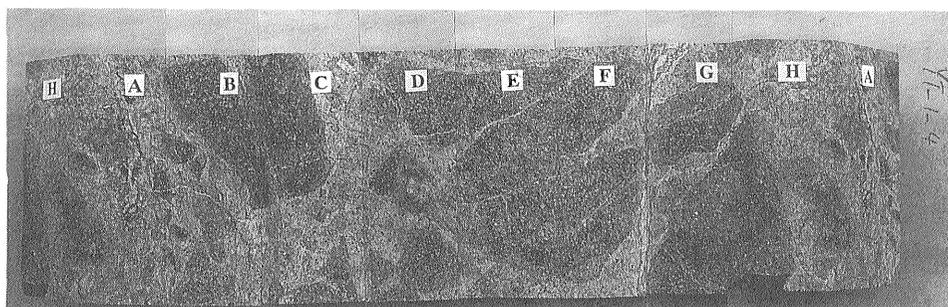
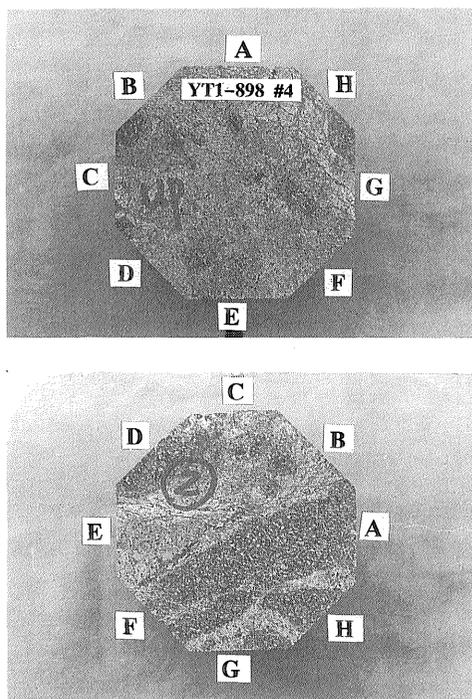
この試料はYT-1孔の地下898mの南平溶岩層より得ており、ガラス質の石基とひび割れた溶岩角礫からなる。溶岩は堅硬緻密で岩石は全体として暗灰白-黒白を呈する (NEDO, 1992a)。試料の展開図 (第4図) では肉眼で確認できる巨視的割れ目が多く存在する。第5図は第1サイクルの荷重過程で得た静水圧-ひずみ曲線を示している (断線したゲージを除く)。割れ目に近いゲージD及びBTM-3のひずみの増加が著しく、最大圧100MPaでは他のゲージの0.35%-0.45%より多く、両者とも約0.6%のひずみを示した。

割れ目のひずみへの影響を明らかにするために、割れ目に近い順に、ゲージDとBTM-3, G, Cの荷重の第1サイクルでの挙動を第6図に示した。割れ目に近いゲージDとBTM-3では、ゲージDは10MPaまではひずみが急激に増加するが、その後は増加の割合が小さくなる。これに対しゲージBTM-3は40MPaを過ぎてからはゲージDとのひずみ差を急激に縮め、最高圧力100MPaに達したときは同一のひずみを示すようになった。最高圧力100MPaに達したときのゲージD, G, Cのひずみを比較すると、それぞれ0.61%, 0.41%, 0.34%と大きく異なっていることが分かった。また、静水圧40MPaを境にひずみの増加する割合が異なることが各ゲージに共通して見られる。

一方、除荷過程ではゲージD, G, Cともに荷重過程よりも大きいひずみを示し、静水圧の負荷履歴によるひずみのヒステリシスが現れ、その傾向は割れ目に近いゲージほど顕著である (第6図)。第7図は体積ひずみと静水圧の関係を示している。体積ひずみにおいても、40MPaを境に増加の割合が変化する様子やひずみのヒス

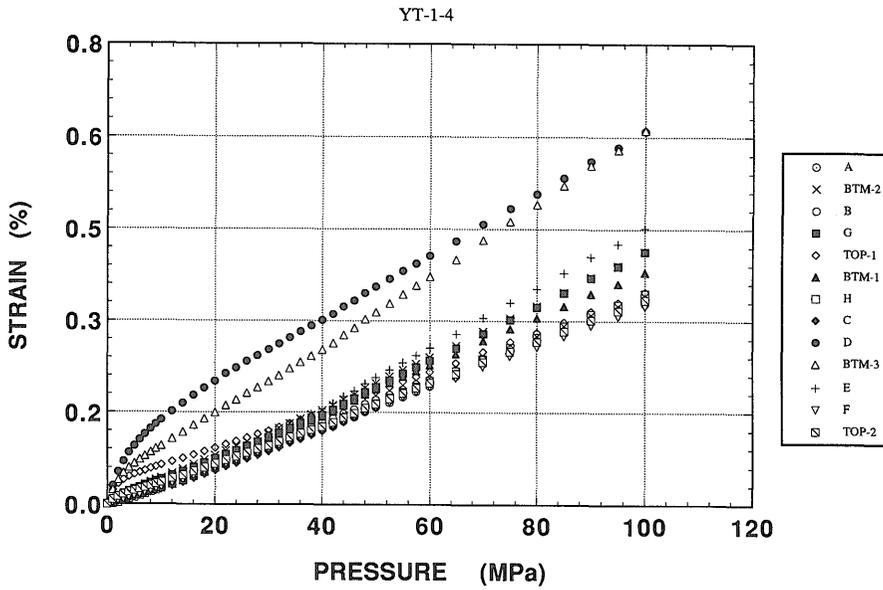
テリシスなどを確認することができる。第2サイクルでの体積ひずみのヒステリシスは第1サイクルの約半分までに減少している。DSA法 (第8図) により40MPa以下の範囲で求めたYT-1-4のcrack porosity (η_c) は約0.05%であった。また、試験が終了してから約12時間後の体積ひずみの残留ひずみ (静水圧を完全に除荷しても回復しない体積ひずみのヒステリシス) は約0.15%である。

第9図は両底面及び側面の各振動子対で計測した5方向のP波速度と静水圧との関係を示している。静水圧が低い間は圧力の上昇に伴うP波速度の増加が大きいが、

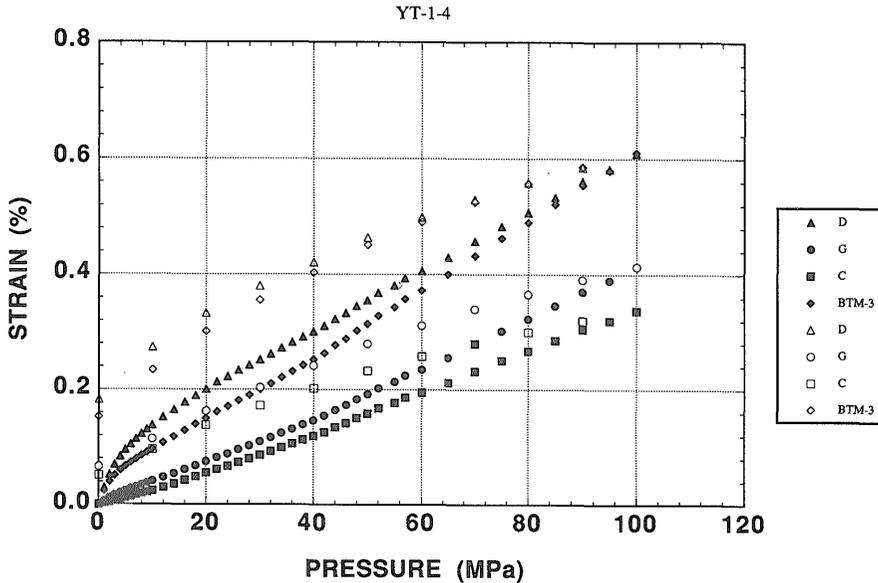


第4図 試料YT-1-4の上下底面及び側面展開図

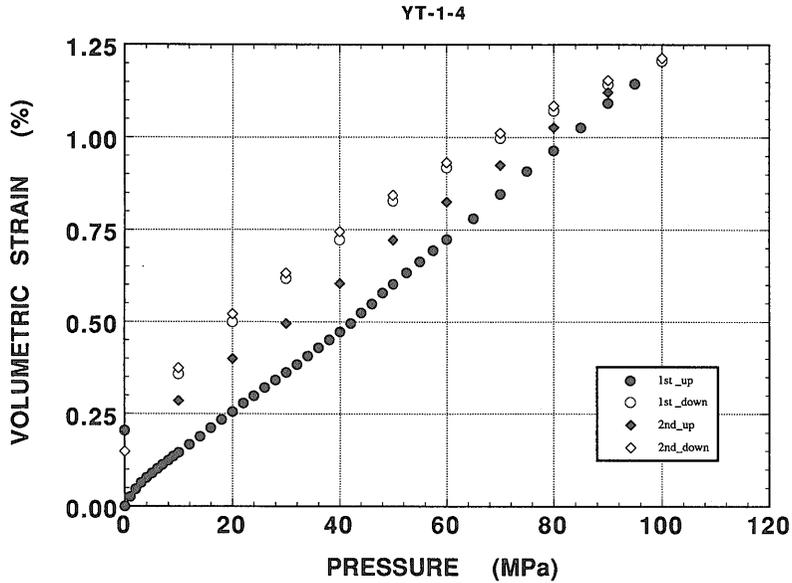
Fig. 4 Unfolded surface profiles for top, bottom and side A to H of sample YT-1-4.



第5図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-1-4のひずみの変化
 Fig. 5 Strains of sample YT-1-4 under loading step in first pressure cycle. Gauges D and BTM-3 showed much higher strains than others, suggested the sample was deformed inhomogeneously.



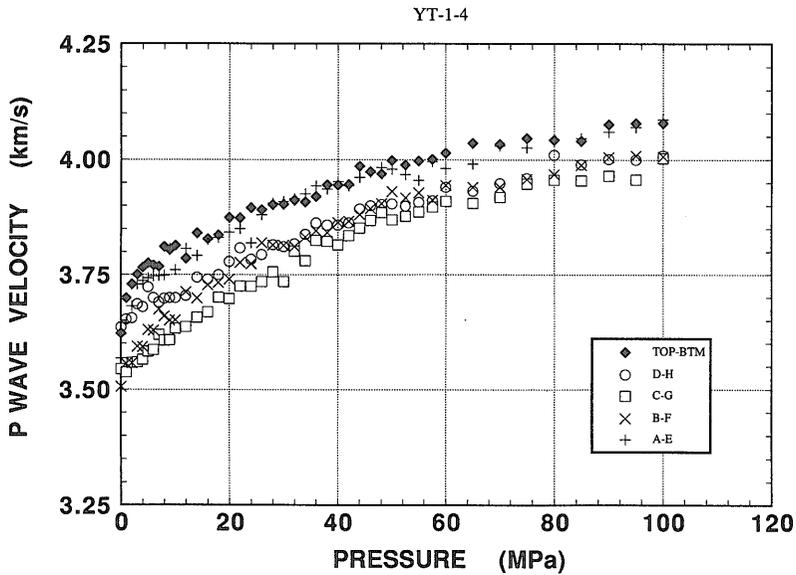
第6図 割れ目近傍に配置したゲージD, G, C, BTM-3の第1サイクルでのひずみ変化 (黒塗りシンボル: 圧力上昇過程, 白抜きシンボル: 圧力下降過程)
 Fig. 6 Strain change of gauges D, G, C and BTM-3 related to fractures, in first pressure cycle. Solid and open symbols indicate loading step and unloading step, respectively.



第7図 第1及び第2サイクルでの試料YT-1-4の体積ひずみの変化 (第6図のシンボルと同じ)。

第1サイクルでは圧力40MPaを境に体積ひずみの増加する割合が異なっている。

Fig. 7 Change of volumetric strain of sample YT-1-4 in first and second pressure cycles. The volumetric strain showed different trends beyond 40MPa in the first loading step. Symbols are the same as Fig. 6.



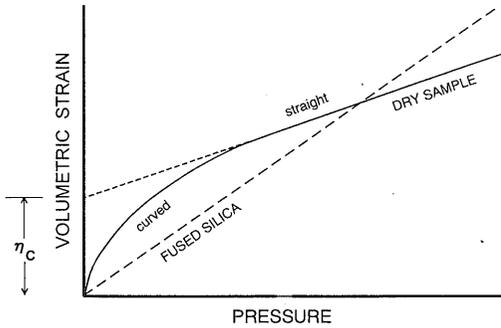
第9図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-1-4のP波速度の変化

Fig. 9 P-wave velocities measured along vertical and horizontal directions under loading step in the first pressure cycle for sample YT-1-4. All of the velocities increased homogeneously with pressure.

60MPaを過ぎてからはP波速度の増加する割合が小さくなっている。同一静水圧でのP波速度の最大値と最小値との差を全方向の平均P波速度で除した値をP波速度の異方性として求めると、100MPaでのP波速度異方性は2%程度に過ぎなかった。ひずみの不均質性に相応するP波速度の挙動がみられなかったことは、試料YT-1-4に含まれる巨視的割れ目に充填鉱物が存在することが考えられる。

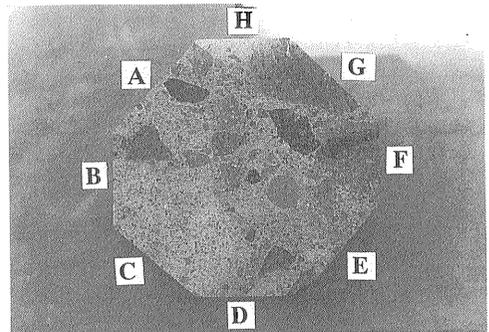
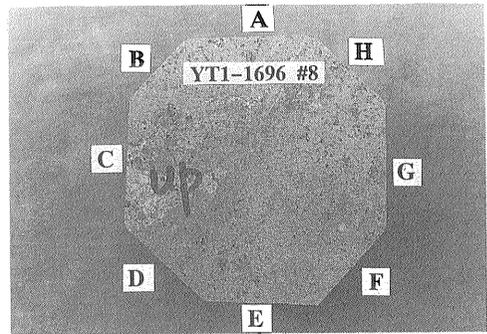
3.2 試料YT-1-8

この試料はYT-1孔の地下1696mの溶岩火砕岩類層より得ており、赤紫色-緑灰白の安山岩質火山礫凝灰岩である。第10図(a)に示すように肉眼で確認できる巨視的割れ目はほとんどないが、試料の下端部や側面D、Eに粒径の異なる火山礫片が多くみられる。この試料では、圧力が100MPaに達したとき、高圧容器の油圧シールが破損されたため試験が中止された。そのため、静水圧上昇過

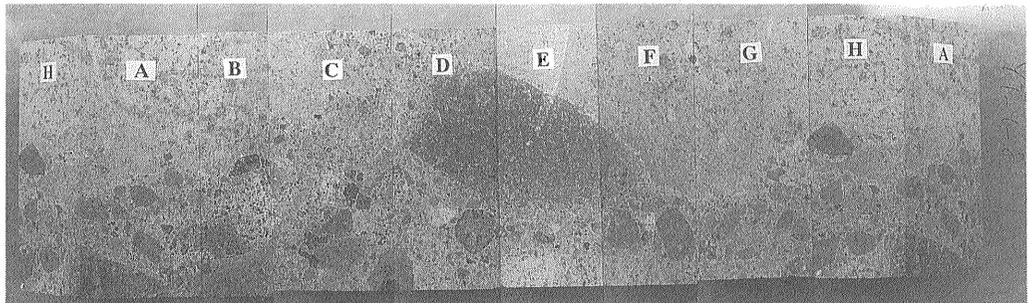


第8図 DSA法によるcrack porosity (η_c) の求め方 (Walsh, 1965)

Fig. 8 Graphical determination of crack porosity (η_c) by DSA method (Walsh, 1965).



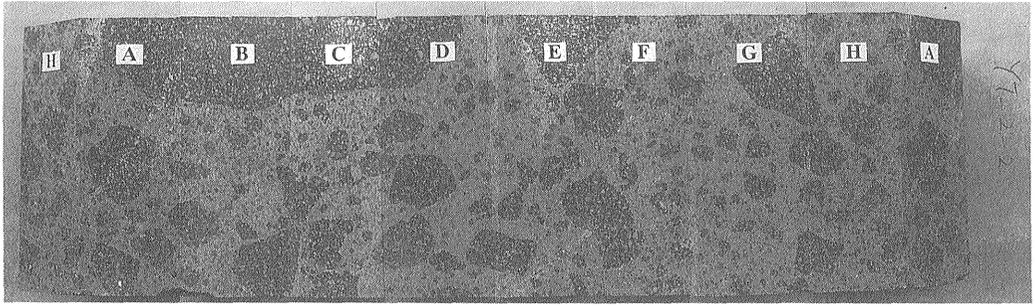
(a)



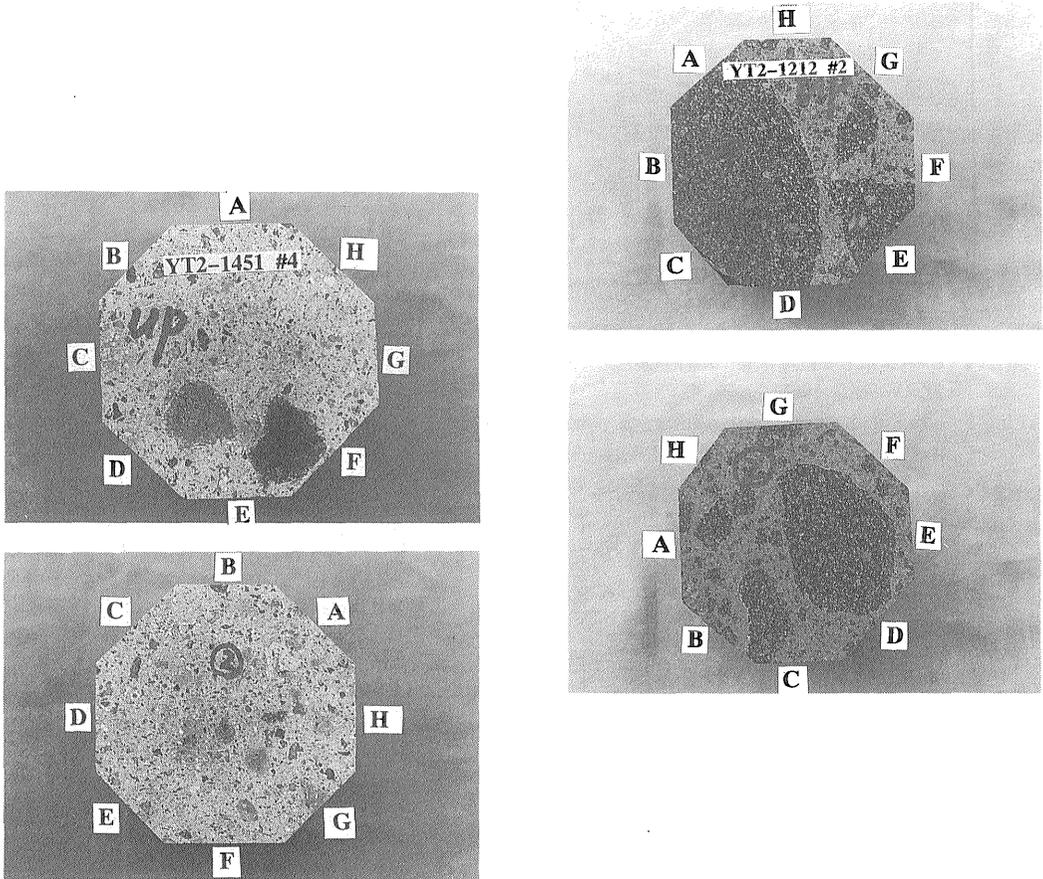
第10図 試料の上下底面及び側面展開図

(a)YT-1-8, (b)YT-2-2と(c)YT-2-4

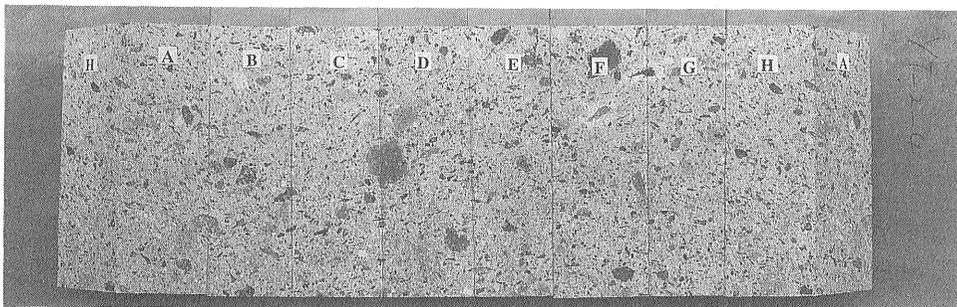
Fig. 10 Unfolded surface profiles for top, bottom and side A to H of samples. (a) YT-1-8, (b) YT-2-2 and (c) YT-2-4.



(b)



(c)



程のデータしか得られなかった。第11図は圧力の増加に伴う全ひずみゲージの変化を示している。試料のマトリックス部分に位置するゲージHとBTM-3は大きいひずみを、マトリックス中に含まれる大きい火山礫片上に位置するゲージD、Eは小さいひずみを示しており、礫片の存在がひずみの圧力変化に影響を及ぼすことが分かった。これらのひずみを深度方向(V)と水平面内(H)に分けて平均したところ、第12図のようにHの方がVよりも大きいひずみを示し、異方性が認められた。

一方、P波速度では第13図に示すように、鉛直方向を含むほかの4チャンネルとも圧力の上昇に伴い小さい増分を示し、試料に含まれる微小割れ目が少ないことを示唆している。鉛直方向及び水平面内の平均値のP波速度の圧力変化をみると、第14図に示すようにひずみと同様に異方性が認められ、その異方性は静水圧の増加につれて増大している。最高圧力100MPaにおけるひずみとP波速度の異方性はそれぞれ23%と4%である。

3.3 試料YT-2-2

試料YT-2-2はYT-2孔の地下1212mの八丁原溶岩層より得ており、薄緑色を帯びている(第10図(b))。角礫状部分と細かく破碎された同質マトリックス部分からなり、数mm-数cmの粒径の異なる変質礫片が多く含まれている。一つの礫はTOP面の半分と側面A、B、C、Dにまたがっている。

第15図は第1サイクルの載荷過程で得た静水圧-ひずみ曲線を示している。試料YT-1-4やYT-1-8に比べると、ひずみが少ないだけでなく、ゲージごとのひずみのばらつきも少ない。第1サイクルの体積ひずみと静水圧との関係を第16図に示す。静水圧の負荷に伴って体積ひずみはほぼ直線的に増加し、低圧領域での微小割れ目の閉鎖によるひずみの急激な増加は見られなかった。第17図に示すH方向とV方向の平均ひずみを比較しても、両者にはほとんど差異はなく、静水圧の増加に対してほぼ直線的に増加している。

第18図は第1サイクルの静水圧の負荷過程のP波速度の変化を示しており、各方向間の差異は他の試料に比べて小さかった。第19図は第1、第2サイクルでの全方向のP波速度の平均値と静水圧の関係を示している。また、静水圧10MPa以下では、第2サイクルのP波速度が第1サイクルの値よりも小さく、試験が終了してから約12時間を経過しても弾性波速度は回復しなかった。

3.4 試料YT-2-4

試料YT-2-4はYT-2孔の地下1451mの凝灰岩類層より得ており、TOP面を除いては大きな岩片がほとんど認められない(第10図(c))。第20図は第1サイクルの載荷過

程で得た静水圧-ひずみ曲線を示している。試料YT-2-2に比べて、圧力増加に伴うひずみのばらつきが大きい。第1サイクルのH方向及びV方向の平均ひずみを第21図に示す。両方向ともひずみは20MPaまでは急激に増加するが、その後増加の割合は小さくなり、ほぼ直線的に変化している。V方向のひずみがH方向のひずみよりも大きく、両方向のひずみ差は圧力の増加とともに増大する。ひずみの異方性は圧力100MPaでは約0.08%に達する。また、静水圧の負荷履歴に伴うひずみのヒステリシスも認められた。

一方、P波速度では第22図に示すように、静水圧の上昇に伴う速度の増加が大きく、特にTOP-BTM間の増加が著しい。V方向とH方向のP波速度の異方性(第23図)をみると、ひずみの大きいV方向のP波速度がより大きい変化を示している。また、両方向の弾性波速度の差は静水圧の負荷に伴って小さくなる傾向が認められる。

3.5 顕微鏡観察の結果

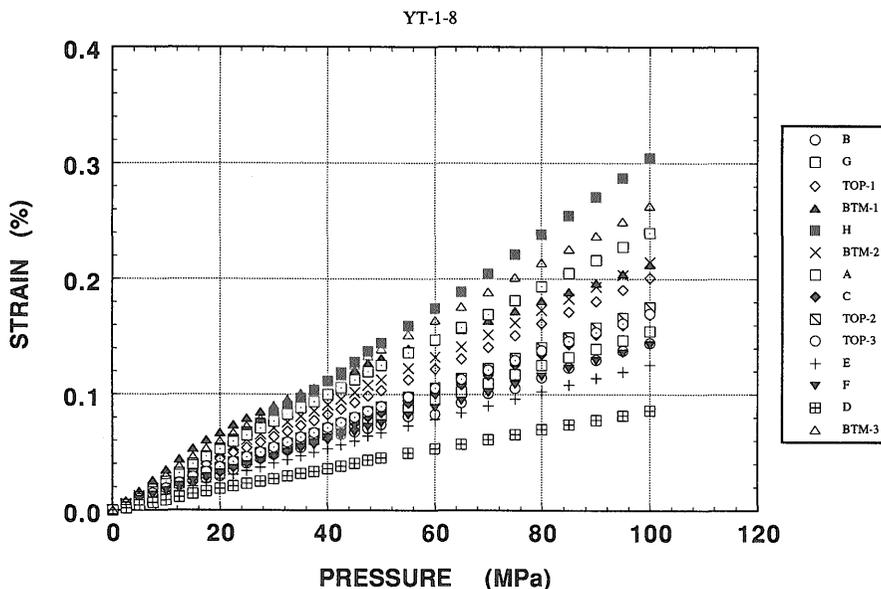
岩石試料の微細構造を観察するために、試験後の試料に青色染料で着色したエポキシ系樹脂を染み込ませ薄片を作成した。ただし、第24図、25図中の記号F.O.で示した部分は薄片作成過程での鉱物粒子の磨耗や脱落によってできたと考えられる。

第24図は試料YT-1-4とYT-2-2での先在割れ目と負荷履歴による新しい割れ目の関係を示している。先在割れ目では白色の充填鉱物(Cc)と着色樹脂が同時に認められるが、新しい割れ目では着色樹脂しかが見られない。先在割れ目(P.F.)から新しい割れ目が発生し、複雑な割れ目のネットワークが形成されている。

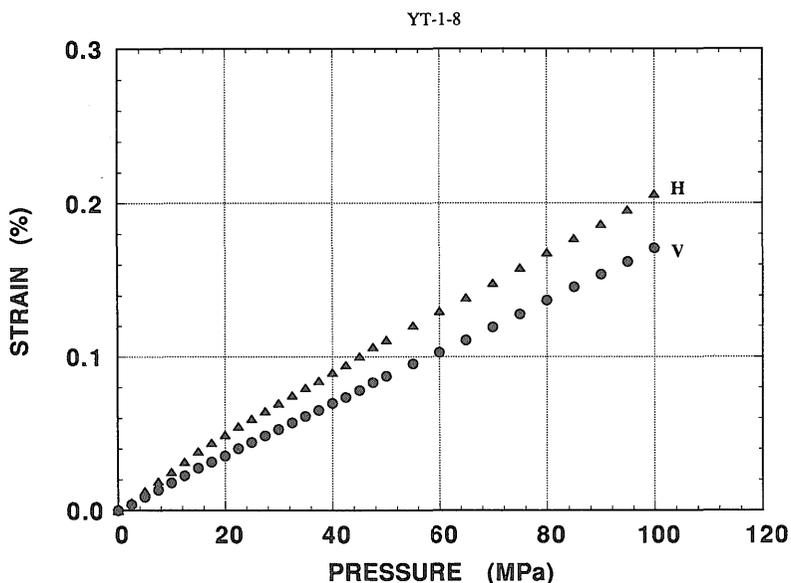
同図(c)では試料YT-2-2の微細構造の一例を示している。自破碎溶岩組織(先に急冷し固まった部分が流動を続ける溶岩体によって碎かれてしまい、その間をまだ固まっていない溶岩が埋める、Ab.L.)の割れ目や負荷履歴による新しい割れ目(N.F.)の存在が確認された。

第25図(a)と(b)が示すように、試料YT-1-4の巨視的な割れ目は方解石(Cc)によって充填されている。方解石と隣接する変質部(緑簾石、Ep)では静水圧の負荷履歴によって塑性変形(P.D.)や粒子の圧碎(G.C.)が起きており、新しい隙間(N.F.)が生じた。同図(c)ではモンモリロナイト系の鉱物粒子(Mon.)の周囲でも新たに生じた隙間が認められる。

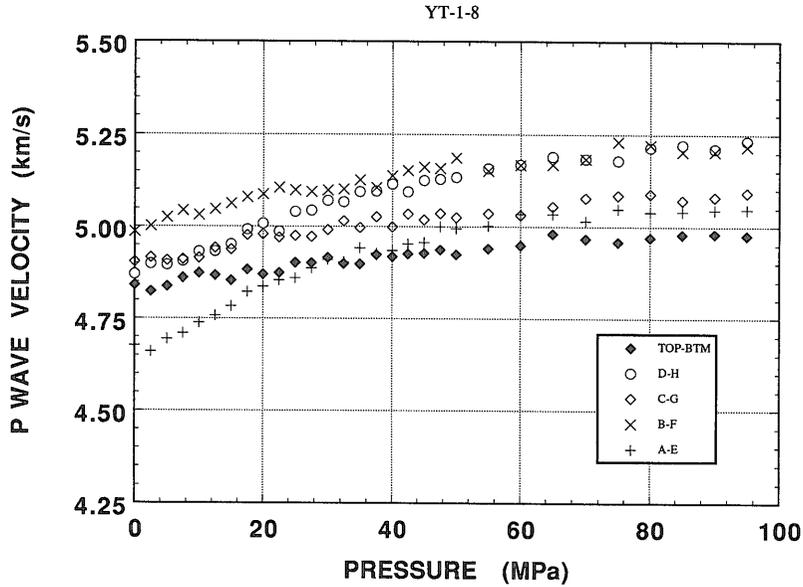
以下では塑性変形や新しい割れ目の発生と密接に関連する静水圧-ひずみ曲線の変曲点をはじめ、ひずみ不均質性や弾性波速度異方性について考察する。



第11図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-1-8のひずみの変化
 Fig. 11 Strains of sample YT-1-8 under loading step in first pressure cycle. Sample was deformed inhomogeneously with pressure.

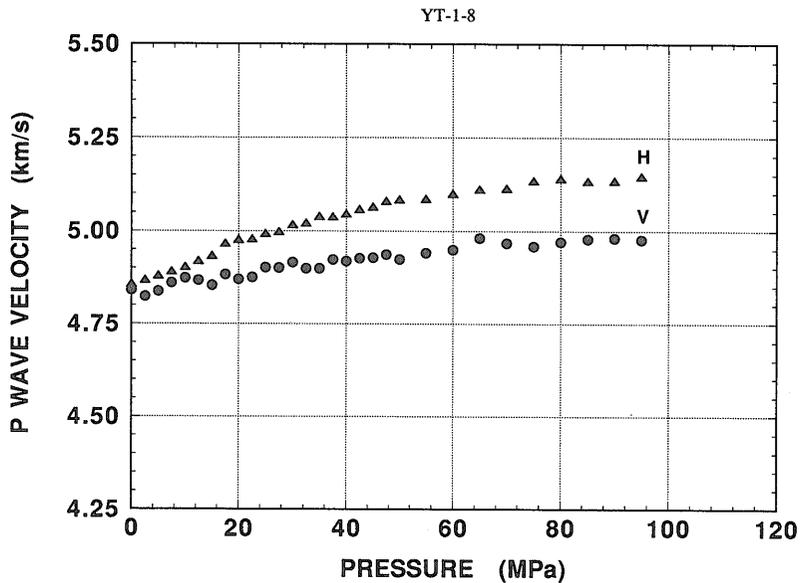


第12図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-1-8の鉛直方向と水平方向の平均ひずみの変化
 Fig. 12 Average strains in vertical and horizontal directions versus pressure for sample YT-1-8.



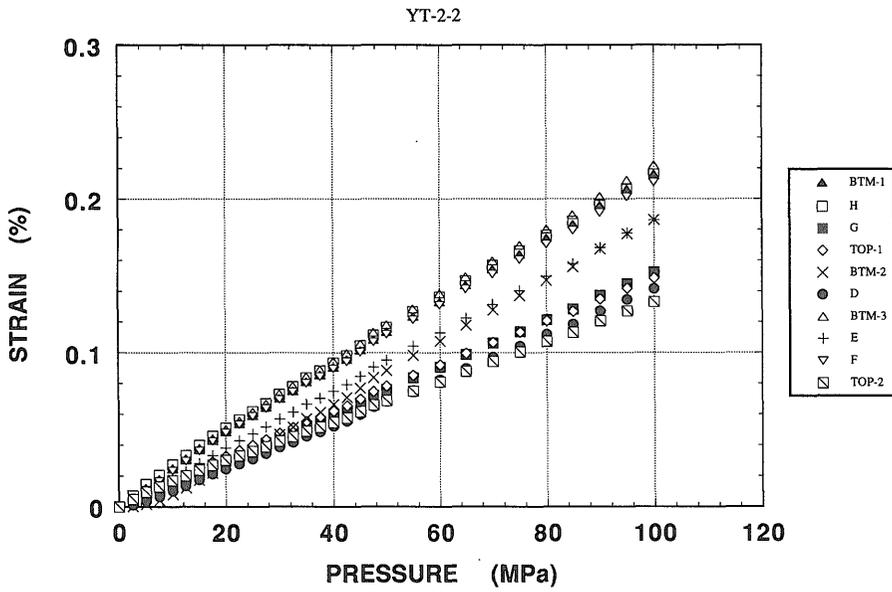
第13図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-1-8のP波速度の変化

Fig. 13 P-wave velocities measured along vertical and horizontal directions under loading step in first pressure cycle for sample YT-1-8.



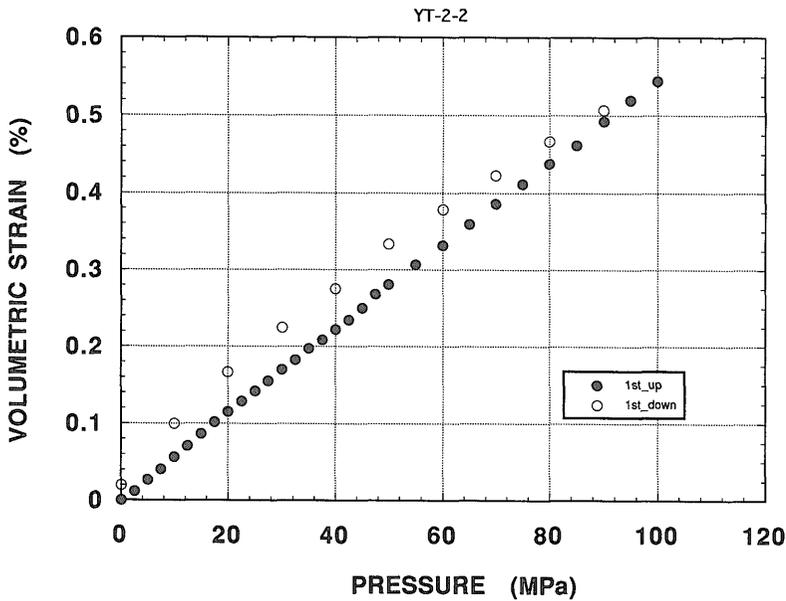
第14図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-1-8の鉛直方向と水平方向の平均P波速度の変化

Fig. 14 Average velocities in vertical and horizontal directions versus pressure for sample YT-1-8.



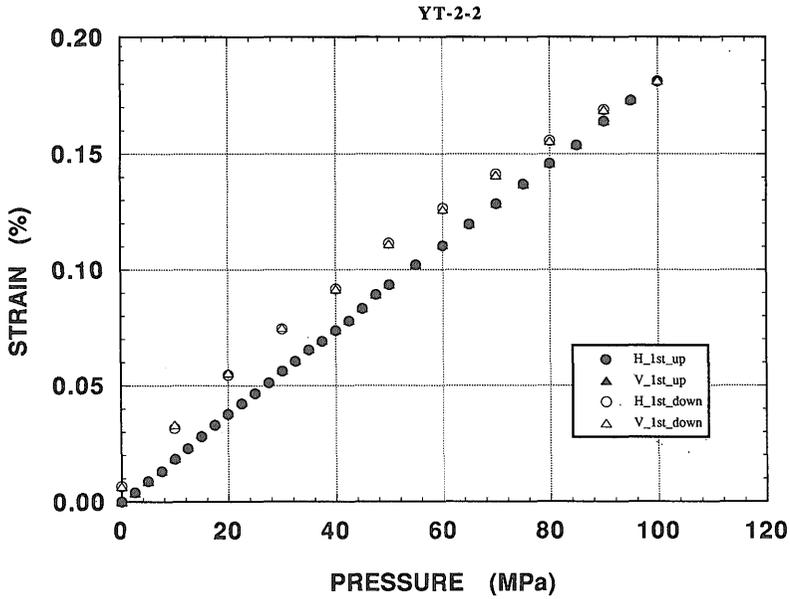
第15図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-2-2のひずみの変化

Fig. 15 Strains of sample YT-2-2 under loading step in first pressure cycle.



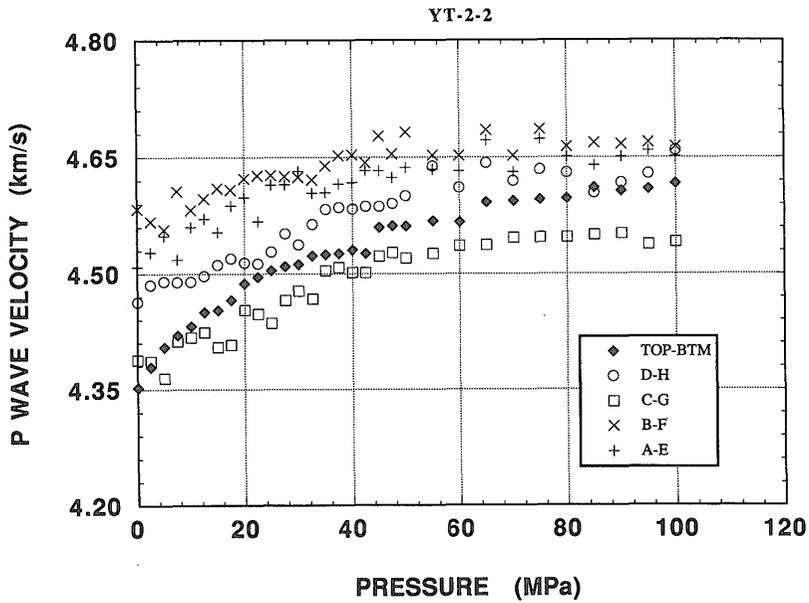
第16図 第1サイクルでの試料YT-2-2の体積ひずみの変化 (第6図のシンボルと同じ)。

Fig. 16 Change of volumetric strain of sample YT-2-2 in first pressure cycle. Symbols are same as in Fig. 6. The volumetric strain increased almost linearly with pressure at the loading step in the first cycle.



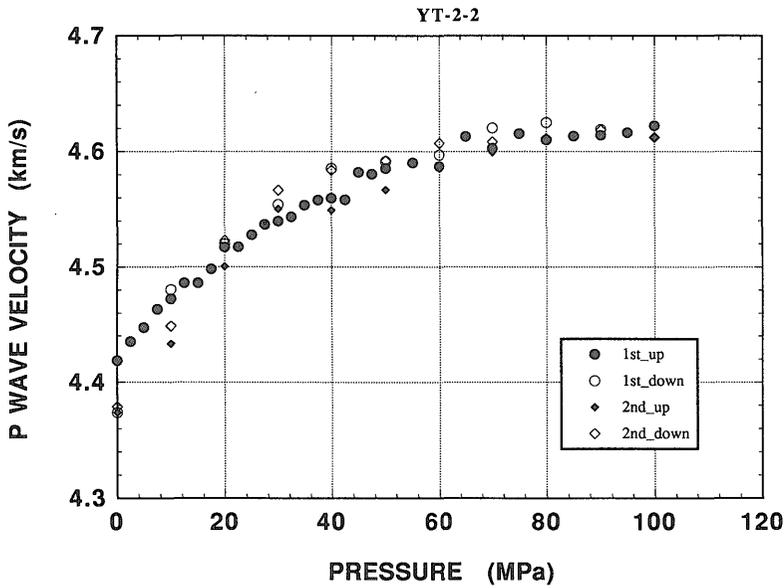
第17図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-2-2の鉛直方向と水平方向の平均ひずみの変化 (第6図のシンボルと同じ)

Fig. 17 Average strains in vertical and horizontal directions versus pressure for sample YT-2-2. Symbols are same as in Fig. 6.



第18図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-2-2のP波速度の変化

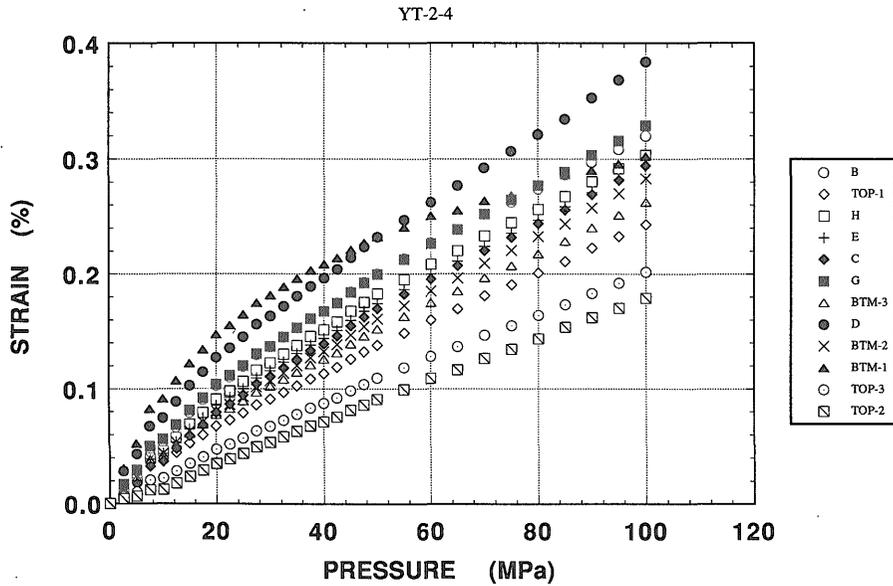
Fig. 18 P-wave velocities measured along vertical and horizontal directions under loading step in first pressure cycle for sample YT-2-2.



第19図 第1及び第2サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-2-2の平均P波速度の変化 (第6図のシンボルと同じ)。

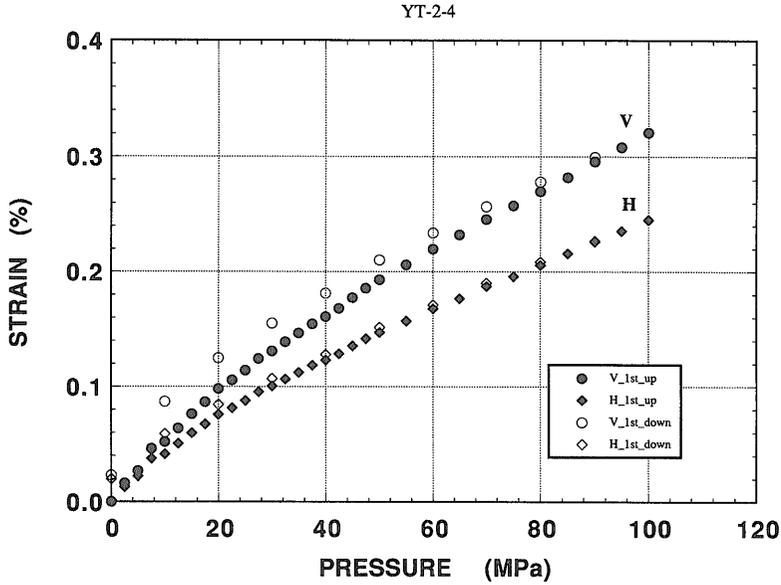
圧力10MPa以下の第2サイクルのP波速度は、第1サイクルの載荷過程の値がより小さい。

Fig. 19 Average velocities in vertical and horizontal directions versus pressure for sample YT-2-2. P-wave velocity at less than 10MPa in the second cycle was slightly smaller than that of the loading step in the first cycle. Symbols are same as in Fig. 6.



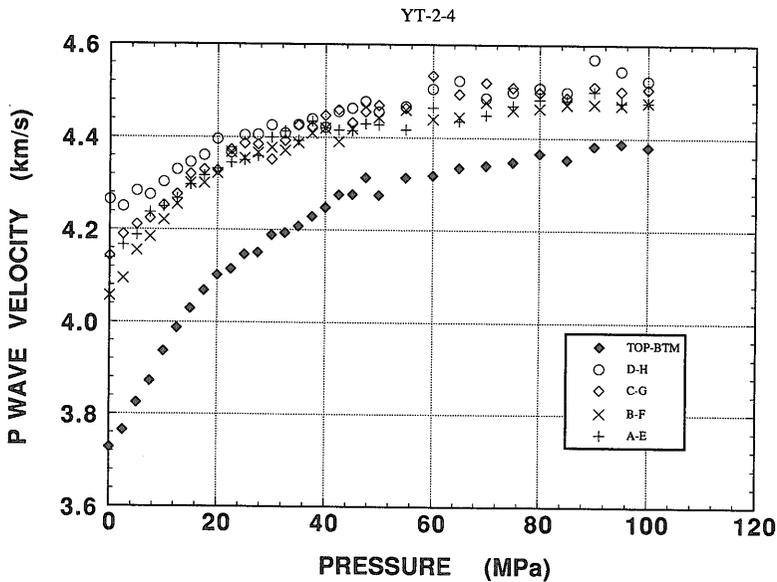
第20図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-2-4のひずみの変化

Fig. 20 Strains of sample YT-2-4 under loading step in first pressure cycle.



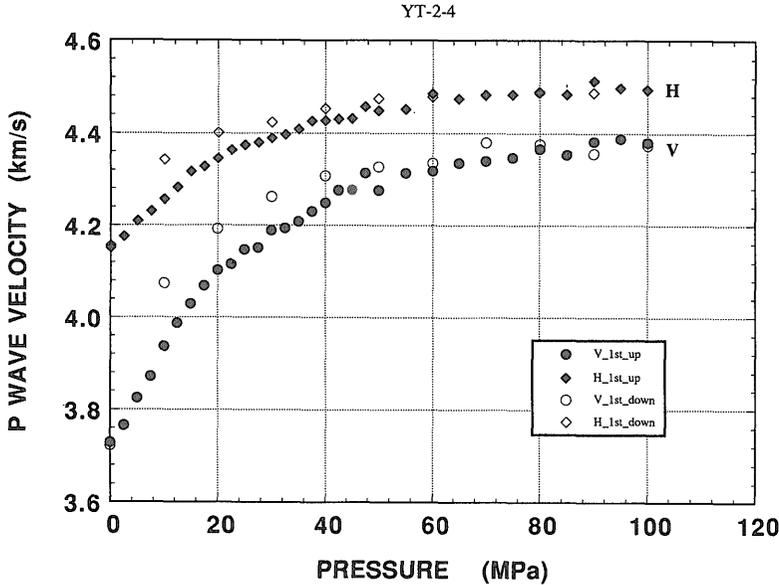
第21図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-2-4の鉛直方向と水平方向の平均ひずみの変化 (第6図のシンボルと同じ)

Fig. 21 Average strains in vertical and horizontal directions versus pressure in first pressure cycle for sample YT-2-4. Strains clearly showed increased anisotropy. Symbols are same as in Fig. 6.



第22図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-2-4のP波速度の変化

Fig. 22 P-wave velocities measured along vertical and horizontal directions under loading step in first pressure cycle for sample YT-2-4.



第23図 第1サイクルでの圧力上昇に伴う試料YT-2-4の平均P波速度の変化 (第6図のシンボルと同じ)。

Fig. 23 Average velocities in vertical and horizontal directions versus pressure in first pressure cycle for sample YT-2-4. P-wave velocity clearly showed anisotropy corresponding to strain. Symbols are same as in Fig. 6.

4. 考察

4.1 静水圧-ひずみ曲線の変曲点について

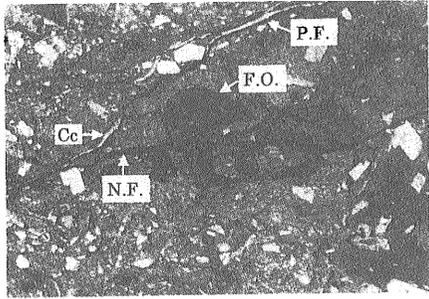
静水圧-ひずみ曲線では、低い圧力領域でのひずみの非線形的な増加は、アスペクト比の小さい微小亀裂(クラック)の閉鎖に起因するとされている (Walsh, 1965)。微小亀裂は一度閉鎖すると、応力を除荷しても完全に元の形に戻れないため、ひずみや弾性波速度にヒステリシスが現われる。一方、高い圧力領域では微小亀裂の閉鎖が少なく、ひずみがほぼ線形的に増加する傾向がある。しかし、試料YT-1-4でみられたように、高圧領域にひずみの変曲点、すなわち、ある圧力を境にひずみ増加の割合が変わる現象が存在する。

これまで Bedford Limestone (porosity 12%, 平均粒径1.0mm) を用いた静水圧下の弾性波速度やひずみを測定する試験での同様な変曲点現象の報告が幾つかある (Nur and Simmons, 1969; Batzle and Simmons, 1976; Johnston and Toksoz, 1980)。これらの場合、変曲点の圧力は約100MPaと高く、空隙破壊 (pore collapse) によるものと推測されている。Zhang *et al.*

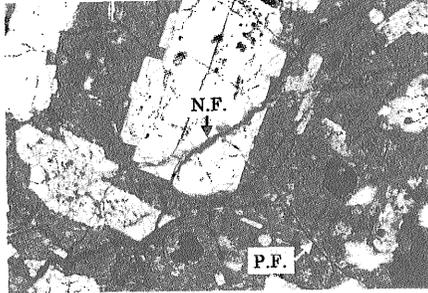
(1990) は Boise sandstone (porosity 35%, 平均粒径 0.46mm) が示す変曲点 (400MPa) の原因を究明した。顕微鏡下での薄片観察によると、試験後の試料では石英粒子どうしの接触破壊 (grain crushing) が確認された。上述の試験では、変曲点の圧力が非常に高いという特徴をもっている。これらに比べると、試料YT-1-4のひずみ変曲点の圧力は約40MPaとかなり小さい。試験後の試料YT-1-4の薄片観察では、空隙破壊や接触破壊の痕跡はみられず、鉱物粒子の塑性変形が確認された。塑性変形は割れ目周囲の変質部や粘土鉱物粒子で起きており、大きいひずみ量のほか、ひずみ変曲点をもたらしたと考えられる (Brace, 1978)。以上のようにひずみ変曲点の圧力は岩種によって異なり、薄片観察によってそのメカニズムを調べることが可能である。

4.2 試料中の割れ目と静水圧下でのひずみ・弾性波速度変化との関係

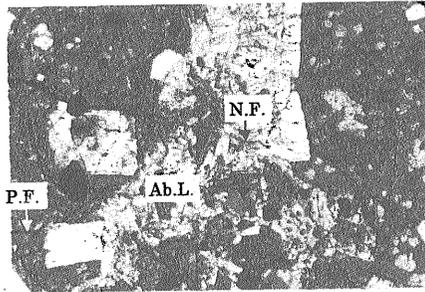
地下深部より採取された岩石には、様々な大きさの割れ目が含まれている。地熱井より得たコア試料では、しばしば割れ目に充填鉱物が介在したり、鉱物粒子が粘土化したりする。これらにより、ひずみの不均質性や弾性



(a)



(b)



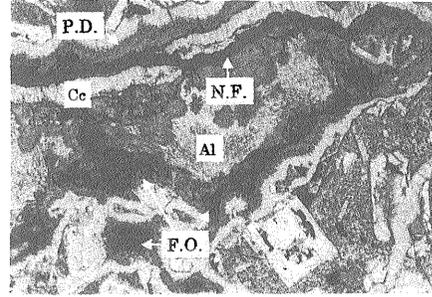
(c)

第24図 先在クラックや脈に沿って生じた新しい割れ目

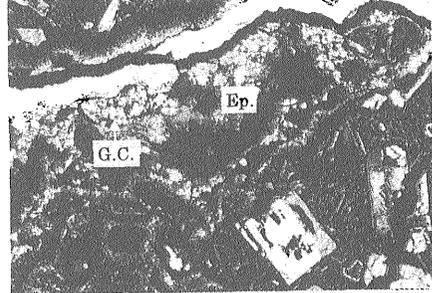
(a)試料YT-1-4 (幅 4mm) (b)と(c)試料YT-2-2 (幅 2mm)

Fig. 24 Optical photomicrographs of samples YT-1-4 and YT-2-2 after being compressed to 100MPa. (a, width of field: 4mm) and (b, width: 2mm) show new fractures following old fractures. (c) A typical texture of autobrecciated lava (width: 2mm).

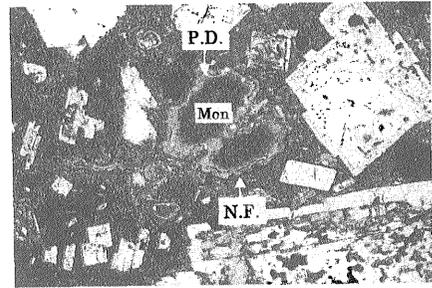
Cc: calcite P.F.: pre-existed fracture
N.F.: new fracture F.O.: falling off
Ab.L.: autobrecciated lava



(a)



(b)



(c)

第25図 試験後の試料YT-1-4の微視的構造の一例 (横: 2mm)

(a)割れ目を充填する鉱物 (b)(a)のクロスニコル (c)粘土鉱物の塑性変形による新しい隙間

Fig. 25 Optical photomicrograph of sample YT-1-4 after being compressed to 100MPa (width: 2mm). (a) precipitated minerals, (b) cross nicols of (a), (c) new fractures due to plastic deformation. Cc: calcite, F.O.: falling off, N.F.: new fracture, P.D.: plastic deformation, Al.: analcite, Mon.: montmorillonite, Ep.: epidote, G.C.: grain crushing.

波速度異方性が生じると考えられている。

試料YT-1-4のひずみ変化では、割れ目に近いゲージDやBTM-3がより大きいひずみを示した。これは変質・粘土化した割れ目周囲の鉱物粒子が塑性変形を起こしたためと考えられる。塑性変形した鉱物粒子は圧力を完全に除荷しても元の形に戻れないため、体積ひずみに大きいヒステリシスが現われる。しかし、この試料のP波速度では、ひずみの不均質性に相応する変化が認められなかった。これは割れ目の多くが方解石によって充填されていることが要因として挙げられる。このように、地熱コア試料の物性測定試験では、割れ目のほかに割れ目を充填する鉱物や変質・粘土化した鉱物粒子の影響を考慮しなければならない。

弾性波速度は岩石試料に含まれる割れ目のほかに、負荷履歴による新しい割れ目にも大きく影響される。Nur and Simmons (1969) によると、Bedford Limestoneの静水圧試験では、載荷過程に空隙破壊が発生し弾性波速度は増加する。空隙破壊とはアスペクト比の大きい空隙が静水圧負荷により破壊される現象であり、ひずみの変曲点とも関連している。一方、除荷過程では破壊された空隙による空隙率が増加し、弾性波速度は載荷過程よりも小さい値を示す特徴がある。Bedford Limestoneと同様の現象は薛ほか (1992) が行った来待砂岩 (凝灰質砂岩) の弾性波速度試験でも認められた。しかし、実験後の来待砂岩試料より得た薄片を用いた顕微鏡観察では、空隙破壊の痕跡は認められず、粘土鉱物の塑性変形による新しい割れ目の存在が確認された。

試料YT-2-2でみられた除荷過程の弾性波速度の減少割合は、来待砂岩のと比べて小さいが、薄片を用いた顕微鏡観察では、先在割れ目から新しい割れ目が発生したことが分かった。来待砂岩とは新しい割れ目の発生原因が異なるが、除荷過程での弾性波速度を低減させるには同様な役割を果たしたと考えられる。

試料YT-2-4では大気圧下のP波速度では水平方向と鉛直方向との差が大きい。静水圧が大きくなるにつれて鉛直方向のP波速度は著しく増加したため、両者の差異は徐々に小さくなった。しかし、最高圧力100MPaに達しても、依然として両試料の水平方向 (H) と鉛直方向 (V) のP波速度やひずみに差異が認められ、構造的異方性と考えられる。

試料YT-2-4と異なったP波速度とひずみの異方性を示すのが試料YT-1-8である。試料YT-1-8では大気圧下での鉛直方向 (V) と水平方向 (H) の弾性波速度やひずみはほぼ等しいが、封圧が高くなるにつれて水平方向の弾性波速度やひずみが大きくなっている。大きいひ

ずみを示す水平方向の方がP波速度の増加がより大きい。試料YT-2-4については、ひずみの大きい鉛直方向に微小亀裂が多く存在するため、P波速度が小さい値を示すと考えれば、ひずみとP波速度の変化や挙動を説明できる。しかし、試料YT-1-8については同様な説明ができず、今後の検討課題といえよう。

5. ま と め

湯坪地熱地帯のボーリングコアの静水圧下のひずみと弾性波速度を測定し、以下のような結論が得られた。

- (1) 試料YT-1-4に含まれる巨視的割れ目は、ひずみに大きな不均質性をもたらすが、割れ目の多くは鉱物粒子で充填されるため、静水圧を上昇させたときのP波速度ではひずみの不均質性に相応する変化が認められなかった。
- (2) 試料YT-1-4でみられたように、ある静水圧値 (ひずみ変曲点) を境にひずみの増加する割合の変化は、変質や粘土化した鉱物粒子の塑性変形に起因する。
- (3) 試料YT-2-2でみられた除荷過程ではある圧力以下になると、P波速度が載荷時よりも小さい値を示す結果は、負荷履歴による新しい割れ目の発生が原因と考えられる。
- (4) 試料YT-2-4とYT-1-8のひずみとP波速度では、異方性のパターンが異なり、試料YT-2-4については微小亀裂によって説明できるが、試料YT-1-8については説明ができない。
- (5) 地熱地帯の岩石は熱水変質を受けており、封圧下での弾性波速度やひずみの挙動は割れ目のほかに、割れ目中の充填鉱物にも影響される。

謝辞 本研究は地質調査所の流動研究員招へい制度の下で実施されたものである。原稿の完成にあたっては、環境地質部地震物性課の長秋雄主任研究官に貴重な助言をはじめ、多々ご指導をいただいた。ここに感謝の意を表する。

文 献

- Batzle M. and G. Simmons (1976) Microfractures in rocks from two geothermal areas, Earth and Planetary Sci. Letts, **30**, 71-93.
- Brace W.F. (1978) Volume changes during fracture and frictional sliding, a review, Pageoph, **116**, 603-614.
- Hadley, K. (1976) Comparison of calculated and observed crack densities and seismic velocities in Westerly granite, J. Geophys. Res.,

- 81, 3484-3494.
- Johnston, D.H. and M.N. Toksoz (1980) Ultrasonic P and S wave attenuation in dry and saturated rocks under pressure, *J. Geophys. Res.*, **85**, 925-936.
- Mints, M.V., N.I. Kolpakov, V.S. Lanev and M. S. Rusanov (1987) The character of the subhorizontal seismic boundaries within the upper part of the earth's crust (according to data from the Kola ultradeep well), *Geotectonics*, **21**, 444-451.
- NEDO (新エネルギー・産業技術開発機構, 1992a) 平成2年度地熱探査技術等検証調査, 断裂型貯留層探査法開発, 弾性波利用探査法開発 (坑井掘削・検層・坑井テスト及び断裂特性の総合評価) 報告書 (要約)
- NEDO (新エネルギー・産業技術開発機構, 1992b) 平成3年度地熱探査技術等検証調査, 断裂型貯留層探査法開発, 弾性波利用探査法開発 (坑井掘削・検層・坑井テスト及び断裂特性の総合評価) 報告書 (要約)
- Nur, A. and G. Simmons (1969) The effect of saturation on velocity in low porosity rocks, *Earth and Planetary Sci. Lett.*, **7**, 183-193.
- Simmons, G., R. Siegfried and M. Feves (1974) Differential strain analysis: A new method for examining cracks in rocks, *J. Geophys. Res.*, **79**, 4383-4385.
- Toksoz, M.N., C.H. Cheng and A. Timur (1976) Velocities of seismic waves in porous rocks, *Geophysics*, **41**, 621-645.
- Vernik, L., Y. Kuznetsov, R. Medvedev, and I. Turchaninov (1987) Physico-mechanical properties, in *The Superdeep Well of the Kola Peninsular*, edited by Y., Kozlovsky, 394-405.
- Vernik L., S. Hickman, D. Lockner and M. Risanov (1994) Ultrasonic velocities in cores from the Kola super deep well and the nature of subhorizontal seismic reflections, *J. Geophys. Res.*, **99**, 24209-24219.
- Walsh, J.B. (1965) The effect of cracks on the compressibility of rock, *J. Geophys. Res.*, **18**, 429-435.
- 薛自求・石島洋二・高橋学 (1992) 砂岩の微視的構造と透水特性, *資源素材学会誌*, **108**, 769-775.
- Zhang, J., T.F. Wong and D.M. Davis (1990) Micromechanics of pressure-induced grain crushing in porous rocks, *J. Geophys. Res.*, **95**, p. 341-352.

(受付: 1996年8月19日; 1996年12月2日)