

(58) 静水圧下における湯坪地熱地帯ボーリング コアの弾性波速度とひずみ

基礎地盤コンサルタンツ(株) ○ 薛 自求
工業技術院地質調査所 西澤 修
工業技術院地質調査所 桑原 保人

Seismic Velocity and Strain in Rocks from the Yutsubo Geothermal Areas

Ziqiu Xue Kiso-Jiban Consultants Co., Ltd.
Osamu Nishizawa Geological Survey of Japan
Yasuto Kuwahara Geological Survey of Japan

ABSTRACT

The compressional wave (P-wave) velocity and strain in volcanic rocks were measured under hydrostatic pressure up to 100MPa. Three rock samples were obtained from the NEDO's two deep geothermal wells, YT-1 and YT-2, located at Yutsubo (Hohi area, Ohita Prefecture): they are two andesite lava taken from 898m of YT-1 (YT-1-4) and 1212m of YT-2 (YT-2-2), and one andesite-pumice conglomerate tuff taken from 1451m of YT-2 (YT-2-4). The sample shape is an octagonal column with the axis parallel to vertical direction and the sample sizes are 70-80mm in diagonal and 90-100mm in height, large enough for evaluating effects of macro cracks and joints. Vertical strains were measured at each side surface, and horizontal strains were measured at both ends in three directions 45 degrees apart. P-wave velocity was measured in vertical direction and in every 45 degrees at horizontal plane.

YT-1-4 showed remarkable inhomogeneous deformation below 10MPa, indicating effects of macro cracks and joints. However, velocities in four directions changed homogeneously, suggesting that cracks and joints are sealed with precipitation minerals. Pressure-strain curves are concaved slightly upwards in high pressure region, interpreted as crushing and rotation of precipitation minerals. Strains of YT-2-2 showed homogeneous change. The zero pressure velocity of YT-2-2 decreased after loading-unloading cycles. This seems to be caused by crushing of minerals in rock matrices. Velocity anisotropy between vertical and horizontal directions was observed in YT-2-4. This velocity anisotropy indicates preferred orientation of cracks that filled with precipitation minerals. Sealing of cracks by precipitation minerals is suggested by the large increase of strains in the high pressure region, where velocity increases only small amount.

1. はじめに

地熱地帯の熱水系探査や高温岩体開発では、貯留層の位置を明らかにするため、弾性波速度トモグラフィーを利用した探査手法が用いられる¹⁾。この場合、ボーリングコアの弾性波速度の実測は上記手法による解析と解釈に重要な手掛かりを与える。一般に地熱地帯の岩石試料は著しい変質や破砕を受けており、亀裂への充填鉱物が多くみられる。このため、常圧下で得た弾性波速度の値は地下の速度

との対比には使用できず、封圧下で弾性波速度を測定しなければならない。さらに、高封圧下の岩石のひずみを正確に測定すれば、岩石中に含まれるクラックの特性を調べることができるとともに、初期地圧の大きさや方向を推定することも可能である^{2), 3)}。本研究では、大分県湯坪地熱地帯の新エネルギー・産業技術開発機構の地熱井のボーリングコアより得た試料を用いて弾性波速度とひずみを測定し、幾つかの興味深い結果を得たので報告する。

2. 岩石試料と試験方法

湯坪地熱孔YT-1、YT-2のボーリングコアより、八角柱の試料を3つ切りだし、長軸が深度方向と一致するように整形した。YT-1-4(安山岩質溶岩)はボーリング孔YT-1の地下898mより、YT-2-2(安山岩質溶岩)とYT-2-4(安山岩質火山礫凝灰岩)はボーリング孔YT-2の地下それぞれ1212mと1451mより得た(湯坪地域の地質に関する詳細な情報は地質調査所成果報告書⁴⁾参照されたい)。長軸と側面4方向のP波速度を測定するために、共振周波数2MHzの圧電素子を5対貼付した。発振子と受信子は銅箔を介して試料に接着した。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)に記録し、コンピュータに取り込んだ。圧電素子はコンピュータで制御されたスイッチアレイによって切り換えられ、P波速度は常に互いに向かい合う一対の振動子を発振子と受信子として用い、パルス透過法によって測定した。また、ひずみゲージ(ゲージ長10mm)は供試体の各側面の鉛直方向に8枚、両端面には45度間隔のロゼット方式でそれぞれ3枚ずつ計14枚貼り付けた。ひずみはデータロガーにより計測し、 GPIBを介してコンピュータに取り込んだ。深度方向と水平面内のひずみゲージの出力より体積ひずみが算出される。

圧力媒体となるオイルが試料内部に浸入しないようにシリコンゴムで表面を被覆した後に、圧力容器にセットされ静水圧を負荷した。載荷経路は100MPaまで2サイクルの載荷-除荷とし、第1サイクルの載荷過程では2.5MPa毎に、除荷過程では10MPaずつ減少させる度に、ひずみの変化が安定するまで圧力を保持し、P波速度とひずみを計測した。また、試料YT-1-4の亀裂の挙動を詳細に調べるために、第1サイクルの負荷ステップはさらに小さいものを採用した。第2サイクルでは、載荷と除荷のいずれも、圧力を10MPaずつ変化させた。なお、ここでのひずみは圧縮+に取っている。

3. 実験結果

3.1 試料YT-1-4について

この試料はYT-1孔の地下898mより得ており、Fig. 1に示すように表面には肉眼で確認できる亀裂が多く存在する。Fig. 2に示すように、ゲージ毎に静水圧-ひずみ曲線が異なるが、これはゲージと亀裂の距離を反映しているものと考えられる。ここでは一例として、ゲージD、G、Cの結果を示している。亀裂に一番近いゲージDでは、圧力が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り、40MPaを境にひずみの増加傾向が異なっている。同様な現象はゲージEでも確認できた。これに対して、ゲージG、ゲージCでは全体のひずみ増分は違うものの、40MPaを境に増加の様子が変わることは一致している。最高圧力100MPaに達したときのゲージD、G、C

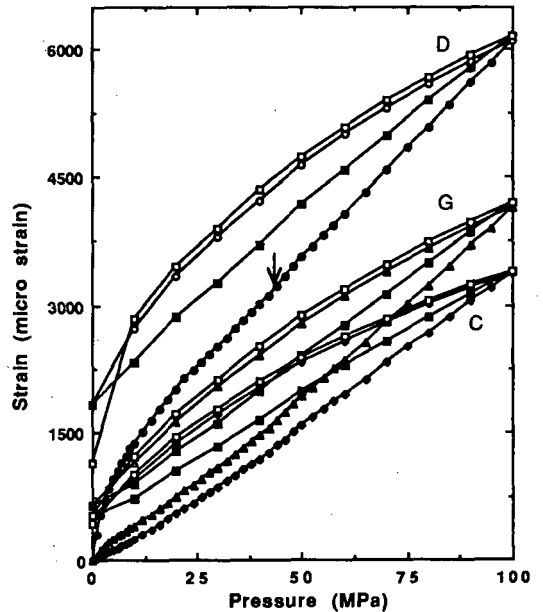


Fig.2. Strains of gages D,G,C versus pressure for sample YT-1-4. Solid symbols correspond to loading and open symbols correspond to unloading.



Fig.1 Unfolded surface profile for side A to side H of sample YT-1-4.

のひずみ量はそれぞれ0.61%、0.41%、0.34%と大きく異なっている。一方、除荷過程ではゲージD、G、Cともに載荷過程よりも大きいひずみを示し、応力履歴によるひずみのヒステリシスが現れているが、2サイクル目では約半分までに減少し、応力履歴の影響がサイクルを重ねるにつれて徐々に小さくなっている。Fig. 3は全ゲージの平均値を基に算出した体積ひずみと静水圧の関係を示している。ここでも、ゲージDでみられた載荷初期のひずみが著しく増加する様子及び40MPaを境に増加率が変化する様子を確認することができる。これはゲージDの挙動が試料の変形に大きく寄与していることを示唆している。静水圧を完全に除荷した時の平均体積ひずみのヒステリシスは約0.15%である。

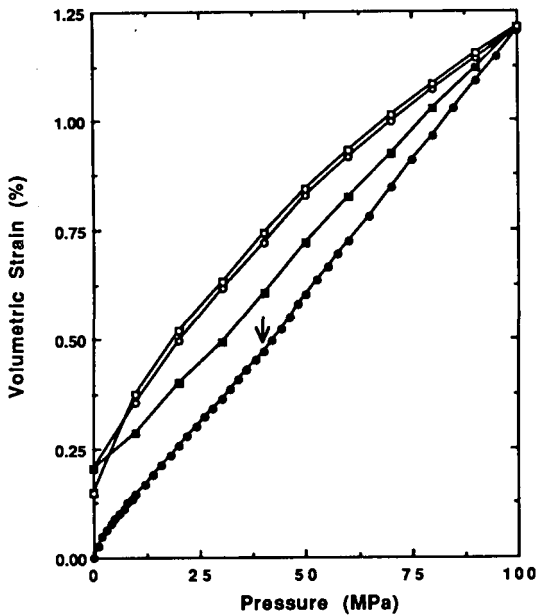


Fig. 3. Volumetric strain versus pressure for sample YT-1-4. The circles indicate 1st cycle and the squares indicate 2nd cycle respectively. Symbols and those indications from Fig. 4 through Fig. 8 are the same as this figure.

亀裂の存在はひずみに著しい不均質性をもたらしたが、P波速度への影響は小さく、深度方向を含む5方向のP波速度の異方性は2%程度に過ぎなかった。Fig. 4は全方向のP波速度の平均値と静水圧の関係を示している。この曲線では圧力が小さい間は負荷に伴う速度の増加が大きいものの、圧力の増加につれて速度の増加する割合が小さくなる傾向がある。また、同一圧力におけるP波速度は除荷時の方が載荷時より大きく、応力履歴によるP波速度のヒステリシスが認められ、体積ひずみの挙動とよく似ている。

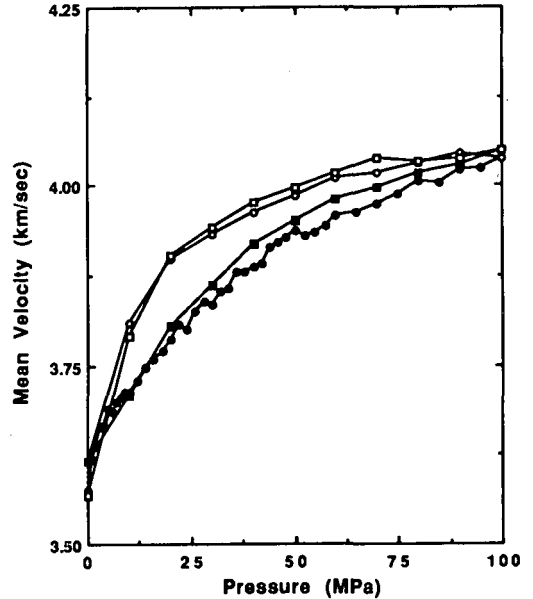


Fig. 4 Mean velocity of vertical and horizontal directions versus pressure for sample YT-1-4.

3. 2 試料YT-2-2、YT-2-4について

ボーリング孔YT-2の地下1212mより採集した試料YT-2-2は岩石のマトリックスに大きい岩片が点在し、薄緑色を帯びている。Fig. 5は得られた静水圧-体積ひずみ曲線を示しており、静水圧の変化に伴う体積ひずみは単調に増加し目立った特徴はなかった。

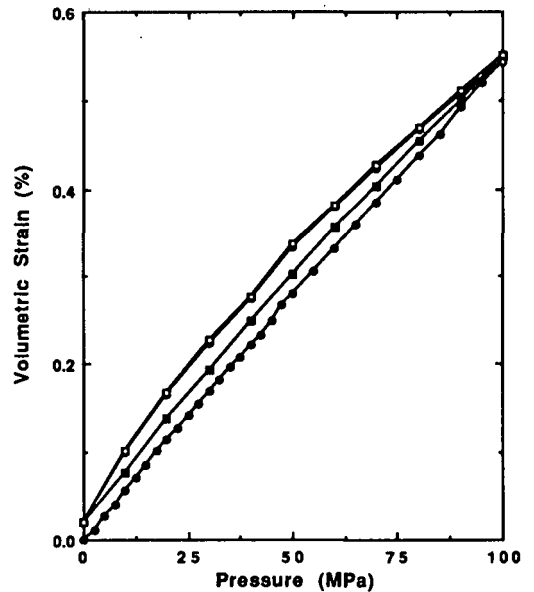


Fig. 5 Volumetric strain versus pressure for sample YT-2-2.

興味深いことは、Fig. 6 に示す静水圧-弾性波速度曲線における除荷過程に現れたP波速度の減少傾向である。第1サイクルでは約22MPa以下の圧力で、除荷時のP波速度が載荷時よりも大きく減少し、この傾向は圧力が小さくなるにつれて顕著になる。同じ現象は第2サイクルの除荷過程でも認められた。実験後、試料の表面を観察したところ、粒子の周囲に破壊(Grain Crushing)による白い粉が認められた。

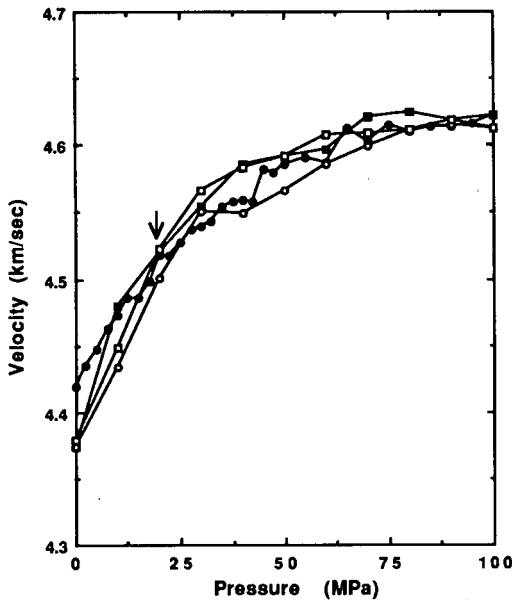


Fig.6 Mean velocity of vertical and horizontal directions versus pressure for sample YT-2-2.

一方、同一ボーリング孔の地下1451mより得た試料YT-2-4については、得られたP波速度とひずみの結果をそれぞれ深度方向と水平面内に分けて整理してみた。Fig. 7 に示す静水圧-平均ひずみ曲線より、両方向に大きい違いが存在することがわかった。すなわち、深度方向のひずみが水平面内のひずみよりも大きい値を示すが、その違いは静水圧の負荷に伴って大きくなっており、圧力100MPaでは最大約0.08%に達する。Fig. 8 に示すP波速度の結果では、両方向の速度差は静水圧の負荷に伴って徐々に減少し、70MPaを過ぎてからはほとんど変化しなくなる。P波速度の挙動がひずみとは対応していないことがわかった。

4. 考察

岩石に静水圧を負荷すると、圧力の増加とともに岩石のひずみが非線形的に増加するのは、アスペクト比の小さい微小亀裂の閉鎖に起因するとされている⁵⁾。通常、低い圧力ではアスペクト比の小さい空隙が多く閉鎖するため、ひずみの増加は急激になり、非線形性も著しくなる。

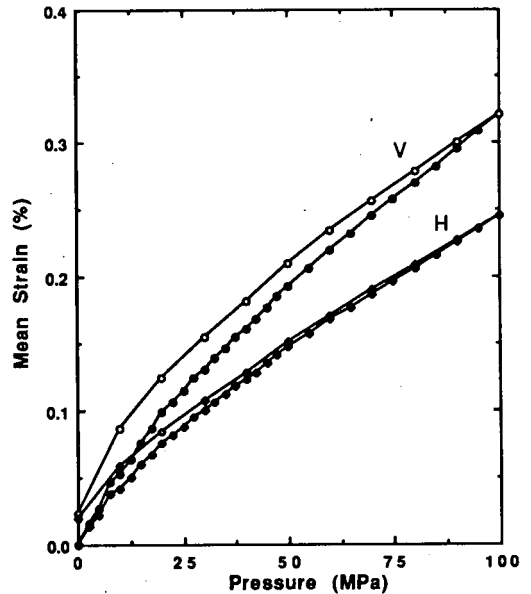


Fig.7 Mean strain along vertical and horizontal directions versus pressure for sample YT-2-4.

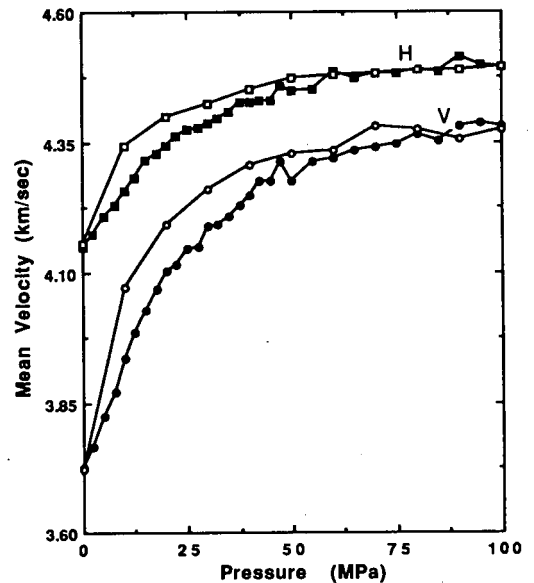


Fig.8 Mean velocity along vertical and horizontal directions versus pressure for sample YT-2-4.

YT-1-4でみられたひずみの挙動は肉眼で観察できる程度の亀裂に含まれるアスペクト比の小さい微小亀裂が静水圧によって閉鎖することによるものである。一度閉鎖した微小亀裂は除荷しても、完全には元の形に戻れず、ひずみやP波速度にヒステリシスが現われる。一般に、このような微小亀裂の影響はひずみと弾性波速度に同様な効果を与え

るため、両者は相応した挙動を示すことになる。

試料YT-1-4には様々な亀裂が含まれており、その一部では充填鉱物が存在する。実験結果をみると、ひずみに著しい不均質性が現れるが、残留体積ひずみ（静水圧を完全に除荷したときの体積ひずみのヒステリシス）は約0.15%しかなく、多くの亀裂が鉱物で充填されていることを示唆している。一方、弾性波速度については空隙に何も充填されていないときはP波速度が著しく小さくなるが、この試料のように空隙が鉱物で充填されると変化は小さく、ひずみで観測された顕著な異方性も見られない。水垣・玉生⁴⁾は充填鉱物についてX線分析を行い、方解石と斜長石であることが明らかにしている。

Fig. 2に示すYT-1-4の静水圧-ひずみ曲線では、40MPaを境に、それまでの緩やかな増加から更に急なひずみの増加が認められるのは、Brace⁶⁾が指摘したような鉱物粒子の変形を示唆している。水垣・玉生⁴⁾が行なったYT-1孔スポットコアの变质鉱物分析では、898m付近において多量のモンモリロナイトの存在が確認できた。試料YT-1-4が示したひずみの特異現象は、Batzle and Simmons⁷⁾が報告したような岩石に含まれる粘土鉱物の破砕や回転運動が原因であると思われる。試料YT-2-2でみられた除荷過程の弾性波速度の急激な減少は、薛ほか⁸⁾の凝灰質砂岩（来待砂岩）の試験でも認められた。彼らは試験後の試料より得た薄片を顕微鏡下で観察したところ、鉱物粒子の周囲に隙間が確認された。このような隙間の出現が除荷時の弾性波速度の急激な減少をもたらしたと考えられる。実験結果を比較すると、YT-2-2の方が来待砂岩よりも減少の度合いが小さいが、試料表面の鉱物粒子の周囲に粒子破壊による白い粉は明瞭に確認できるが、来待砂岩と同様なメカニズムと断定するには、薄片による顕微鏡観察が必要である。

一方、試料YT-2-4では深度方向と水平面内にひずみとP波速度の異方性が認められた。これは両方向で微小亀裂の分布が異なるためと考えられる。地下深部より地上に取り出された岩石には、様々な微小亀裂が存在する。そのうち、応力解放によって生じるものもあれば、ボーリング作業によって生じるものも考えられる。ボーリング作業によって生じる亀裂面は、コアの長軸方向に直交し、地下深部でも開口する亀裂面は、地圧の方向と平行する。試料YT-2-4の実験結果では、弾性波速度は静水圧の負荷に伴って、両方向の差は小さくなるが、ひずみの方では逆に差異が大きくなる。上述の亀裂の生成原因では、この現象の説明ができない。試料の両端面と側面で観測できる鉱物粒子の大きさを比較すると、端面の方が大きい粒子がよくみえる。しかし、これだけでは解釈が不十分であり、さらなる検討が必要である。

5. 結論

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) 試料に含まれる亀裂は、ひずみに大きな不均質性をもたらすが、亀裂の多くは鉱物粒子で充填されるため、弾性波速度ではひずみの不均質性に対応した顕著なばらつきは認められない。
- (2) 亀裂を充填した鉱物は高封圧下で大きいひずみをもたらす、ある静水圧値を境にひずみの増加傾向が変わる現象が認められる。
- (3) 除荷過程での弾性波速度がある大きさの圧力以下になると載荷時よりも小さい値を示すが、これは静水圧による粒子破壊が原因と考えられる。
- (4) 地熱地帯の岩石は熱水作用を受けており、弾性波速度やひずみには亀裂の他に鉱物粒子の影響も無視できない。

参考文献：

1. 朝倉ほか：火山地帯における断裂系の解明、物探学会90回学術講演会論文集、pp. 53-56, 1994
2. Simmons et al.: Differential strain analysis: a new method for examining cracks in rocks, J.G.R. Vol. 79, pp. 4383-4385, 1974
3. Ren and Roegiers: Differential strain curve analysis, a new method for determining the pre-existing in situ stress state from rock core measurements, Proc. Int. Congr. Rock Mech., 5th, 5, F11-127, 1983
4. 水垣・玉生：地熱探査技術等検証調査に伴うデータの解析・評価、地質調査所成果報告書、1993
5. Walsh: The effect of cracks on the compressibility of rock, J.G.R. Vol. 18, pp. 429-435, 1965
6. Brace: Volume changes during fracture and frictional sliding, a review, Pageoph, Vol. 116 pp. 603-614, 1978
7. Batzle and Simmons: Microfractures in rocks from two geothermal areas, Earth and Planetary Sci. Lett., pp. 71-93, 1976
8. 薛ほか：砂岩の微視的構造と透水特性、資源素材学会誌、Vol. 108, pp. 769-775, 1992