

(12) 熱水履歴を受けた岩石の弾性波速度変化について

公害資源研究所

○松永 烈

公害資源研究所

山口 勉

公害資源研究所

宮崎 章

公害資源研究所 正会員 厨川 道雄

1. はじめに

最近、地熱開発や地下岩盤内貯蔵技術開発に関連して、岩石の高温下における各種物性値を求めることが盛んになっており、弾性波速度についても多くの測定がなされている^{1)~3)}。これら測定から、常圧下では加熱によって岩石の弾性波速度は減少することが明らかにされている¹⁾。この理由として、加熱による温度変化が急激でなくても、岩石を構成する鉱物粒子間で熱膨張の不一致により新たなクラックが発生するためであるとされている。これら測定の多くは電気炉内、あるいは室温まで冷却した試料を用いた測定であり、圧力容器を用いた高温高压下での測定例³⁾は多くない。しかし、地熱地帯のように高温熱水環境下に岩盤がある場合、流体によりおこる影響を無視できないものと思われる。このため、稲田花こう岩及び本小松安山岩をオートクレーブ及び電気炉によって加熱処理し、加熱処理前後のP波速度を測定し、高温高压熱水による影響を調べた。

2. 実験方法

2. 1 岩石試料

供試体は30cm立方の岩石ブロックよりコアリングし、直径3.5cm、長さ7cmの円柱とした。岩目による異方性を考慮し、互いに直交する3方向にコアを採取した。岩目の呼び方として、割れ易い順にrift plane、grain plane、hardway planeが使われている⁴⁾ので、以降各planeに直交する方向に波動が進行する場合を、それぞれR、G、H方向と呼ぶことにする。

2. 2 P波速度の測定

P波の測定はパルス透過法によって行った。トランスジューサは圧電素子で、共振周波数が500kHzのものである。透過波は16.7ns(60MHz)のサンプリング速度を持つトランジェントメモリに取込み、パーソナルコンピュータで解析した。

詳しくは後述するように、同一の供試体毎に、加熱処理を行う前後の乾燥状態と含水状態において、合計4回の測定を行った。

2. 3 供試体の処理方法

整形したコアは寸法を測定した後、真空乾燥炉内で105℃にて3日間乾燥した後室温まで冷却し、この状態でP波速度を測定した。乾燥状態での測定を行った供試体は、真空デシケータで3日間間欠的に脱気しながら含水させ、これを含水状態供試体としてP波速度を測定した。

含水状態の測定を終えた供試体は、オートクレーブあるいは電気炉によって加熱処理を行った。加熱温度は200℃及び300℃で、加熱時間はそれぞれ100時間としたが、オートクレーブによる200℃の場合のみ500時間の加熱も行った。オートクレーブを用いた場合、圧力は各温度における飽和蒸気圧とした。所定の温度までの昇温速度は、電気炉で毎分2℃、オートクレーブでほぼ毎分2.3℃であった。加熱後室温までは自然冷却したが、降温速度はほぼ毎分0.3℃であった。稲田花こう岩、本小松安山岩とも各条件毎に5個(R方向2個、G・H方向3個)の供試体を用いた。オートクレーブ処理での水・岩石重量比は約1.6:1であった。

加熱処理後再び乾燥状態と含水状態のP波を測定した。

加熱処理前後の供試体の重量変化、オートクレープ処理後の流体中の溶解成分濃度を求め、加熱処理の効果を調べた。また、P波速度の測定が終った供試体を切断・研磨し、薄片を作成すると共に研磨面のレプリカを取り、光学顕微鏡によって岩石組織を観察した。

3. 測定結果及び考察

3・1 P波速度測定結果 オートクレープにより300℃、100時間の加熱処理を行った稲田花こう岩と本小松安山岩の、処理前後の乾燥及び含水状態の観測波形の代表例をそれぞれ図1と図2に示す。両岩石

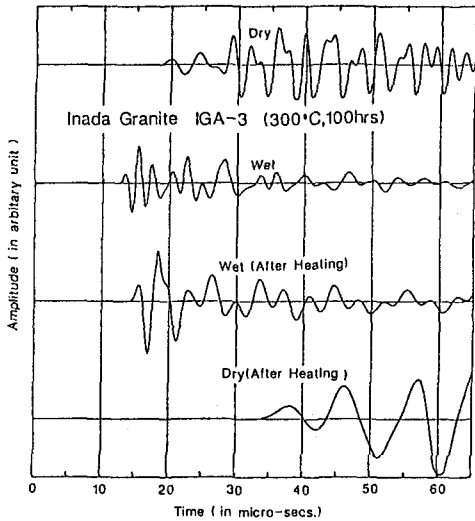


図1 稲田花こう岩のP波観測波形例

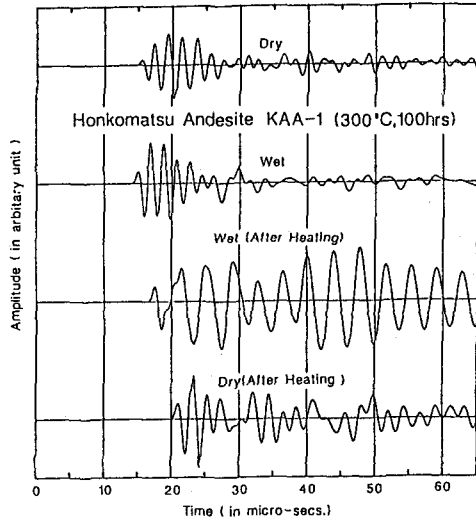
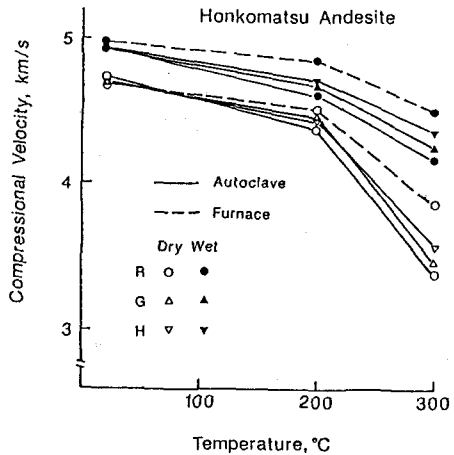
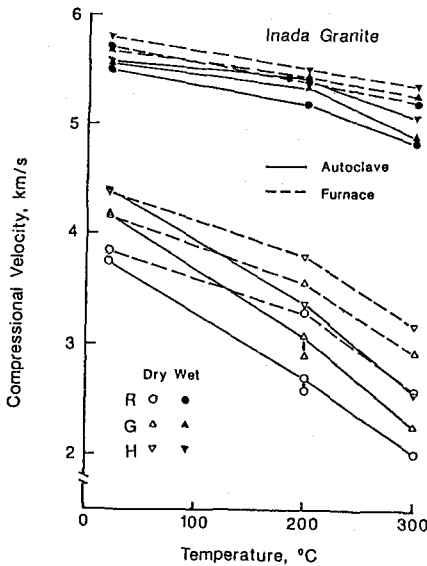


図2 本小松安山岩のP波観測波形例

とも、加熱処理の前後いずれも含水によってP波速度は増加するが、増加の割合は本小松安山岩より稲田花こう岩で大きい。岩石の空隙に水が浸透するとP波速度が増加することは良く知られており、速度増加の割合は、空隙が偏平な円盤状のものほど大きく、球形のものほど小さいとされている。今回の結果はそれと一致する。

図3と図4に各処理温度における両岩石のP波速度を示す。両岩石とも含水状態に比べ乾燥状態のP波速度は、加熱の影響が著しく、しかもオートクレープによる加熱を行ったものの方が、電気炉による加熱を行ったものより速度減



←図3 稲田花こう岩の各処理温度におけるP波速度
↑図4 本小松安山岩の各処理温度におけるP波速度

少が大きいことがわかる。さらに、稲田花こう岩では加熱温度の上昇と共にP波速度が暫減しているのに対し、本小松安山岩では200℃から300℃の間で急激に減少しており、この間に何らかの組織変化が起きたことを伺わせる。

図5、図6は両岩石のP波速度を処理前の速度によって無次元化したものである。第5図には Bauer と Johnson ¹⁾の求めた Westerly 及び Charcoal 両花こう岩の結果も示してある。この図からオートクレーブ

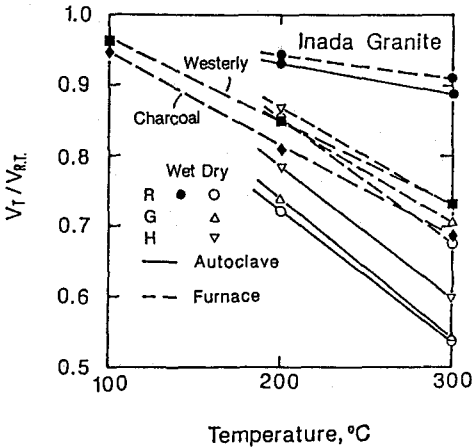


図5 室温時の速度で無次元化した稲田花こう岩のP波速度

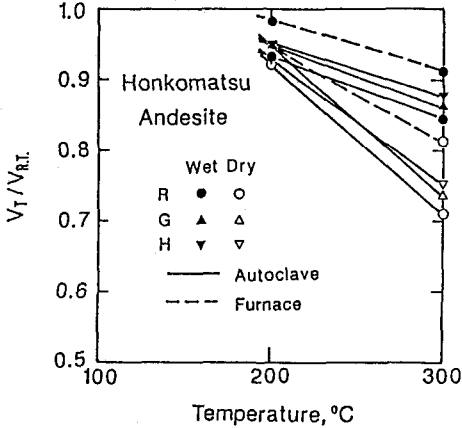


図6 室温時の速度で無次元化した本小松安山岩のP波速度

処理後の乾燥状態の速度減少が著しいことがわかる。。電気炉処理を行ったものは、Bauerらの結果に比べ直線の傾斜が若干急であるが、真空乾燥炉での乾燥の際にマイクロクラックが発生した可能性がある。

稲田花こう岩では岩目によるP波速度異方性が顕著である。そこでR方向のP波速度に対し、G、H方向の速度が加熱によりどの程度変化するかを求めた(図7)。室温乾燥状態で、H方向に約15%、G方向に8~10%速かったP波は、加熱処理を行うことによりH方向で2.2%以上、G方向で1.2%以上まで速くなっており、加熱によって速度の異方性が大きくなることがわかる。また、本小松安山岩では常温ではP波速度の異方性がほとんど認められないが、加熱処理を行うことによって若干の異方性が現れてくる。

3. 2 レプリカによるクラック観察結果

写真1に加熱処理を行った稲田花こう石のレプリカの顕微鏡写真を示す。各写真とも供試体表面近傍のものである。加熱温度が高いほど、また電気炉加熱よりオートクレーブ加熱の方がクラックの発達が著しいことがわかる。本小松安山岩では、斑晶内のクラックの増加が認められるが、著しい組織変化は認められなかった。

3. 3 供試体の重量変化と流体中のシリカ濃度

図8は加熱処理を行う前の乾燥、含水のそれぞれの状態での供試体重量が、加熱処理によって加熱後どの程度増減したかを表したものである。オートクレーブ処理を行うことにより、含水重量は0.05~0.1

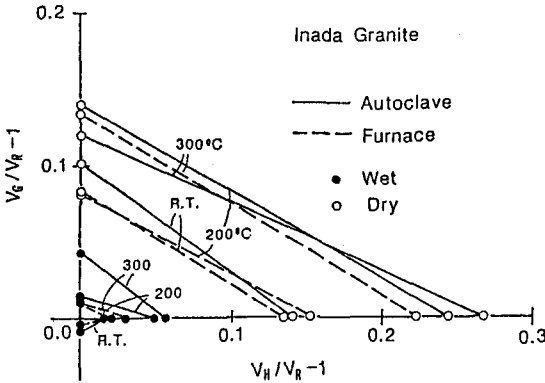


図7 稲田花こう岩の加熱による速度異方性の変化

5%増加し、乾燥重量は0.05~0.23%減少する。乾燥状態の重量減は、加熱による鉱物結晶や組織からの脱水と、熱水との反応による変質鉱物の生成や溶解によると考えられる。前者は電気炉処理の場合、後者はオートクレープ処理の場合に起こると考えられるが、後者による重量減が大きい。含水時の重量増は新たな間隙の生成によるものと考えられるが、この場合もオートクレープ処理の増加が著しい。

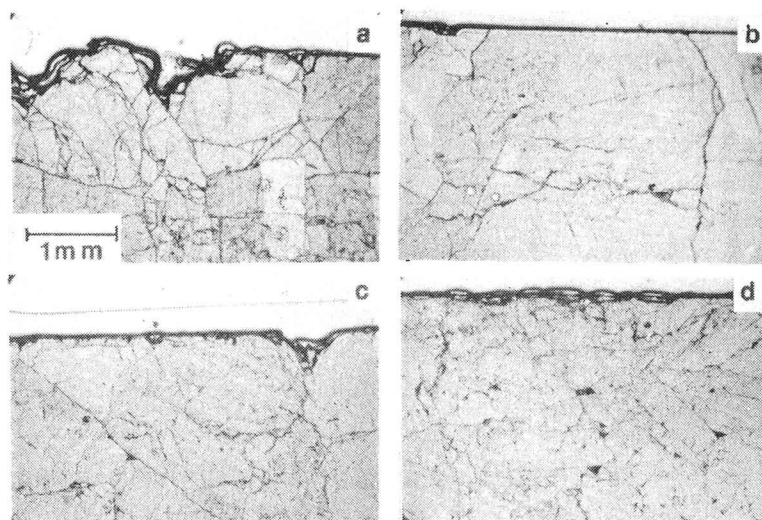


写真1 稲田花こう岩のレプリカの顕微鏡写真 (a: オートクレープ加熱300℃、100時間、b: 電気炉加熱300℃、100時間、c: オートクレープ加熱200℃、100時間、d: 電気炉加熱200℃、100時間)

特に本小松安山岩では300℃になると重量が急増しており、P波速度の低下と一致している。処理後のオートクレープ流体中のSiO₂濃度は、同じ温度・加熱時間でも本小松安山岩のほうが高い。SiO₂の溶解度は鉱物の種類によって異なり石英に比べクリストバライトや非晶質シリカの方が溶解度は大きい。石英を含まない本小松安山岩では、石基中のガラスあるいはクリストバライトが溶解したものと考えられる。このため、稲田花こう岩では、加熱により発生した石英粒内や粒界のクラックが熱水によって大きくなったのに対し、本小松安山岩では石基中に小さな間隙が増え、クラックは発達しなかったものと考えられる。

4 あとがき

電気炉による加熱だけに比べ、オートクレープ加熱処理を行った場合、P波速度の減少が大きくなることがわかった。これは加熱によるクラック発生と共に、熱水によるクラックや結晶粒界の溶解と拡大が起こるためと思われる。

今回の加熱実験は最高で500時間であったが、今後さらに長期間の実験や、透水試験や強度試験などとの比較が必要と思われる。

最後に、オートクレープの使用に際しては、資源第4部4課の佐藤嘉晃氏にお世話になった。ここに記して謝意を表す。

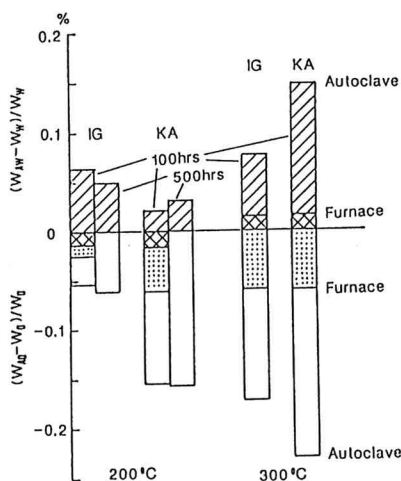


図8 加熱処理による供試体の重量変化の割合

参考文献: 1) Bauer, S. J. and B. Johnson, Proc. 20th US Sympo. Rock Mech., 7-18, 1979. 2) 緒方ら、日鉱会春期大会要旨集、317-318, 1978. 3) Enniss, D. O. et al., DOE/ET/28301-1, 1979. 4) 佐野、工藤、日鉱会秋期大会要旨集、G-6, 1984.

(12) The Compressional-Wave Velocity Changes of Rocks by Hydrothermal Alteration

Isao Matsunaga*

Tsutomu Yamaguchi*

Akira Miyazaki*

Michio Kuriyagawa*

*National Research Institute
for Pollution and Resources

It has been shown by many prior studies that thermally-induced cracks can significantly affect on the physical properties of intact rock. Many experiments have shown the compressional(P)-wave velocity decreases remarkably by heating, however these experiments were mainly conducted in electric furnaces or at room temperature and atmospheric pressure. Even though several experiments were conducted under hydrothermal conditions, rock specimens were heated only short time in autoclaves so that the effect of hydrothermal alteration was tend to be neglect in those experiments.

We measured the P-wave velocity of Inada granite and Honkomatsu andesite before and after heating by a electric furnace and autoclaves. The P-wave velocity measurements were done at room temperature and pressure for both the water-saturated and oven-dried conditions. Replica films which recorded traces of microcracks on polished surfaces were investigated optically to characterize development of thermally and hydrothermally induced microcracks as a function of temperature. Dissolved silica in fluid of autoclave was analyzed by the plasma emission spectroscopy.

The P-wave velocity of oven-dried Inada granite decreases with increasing the temperature and becomes about 55% after hydrothermally heating at 300°C, while the P-wave velocity of the water-saturated specimens does not change so much. The degree of the velocity decrease in hydrothermally heated specimens is higher than those of thermally heated ones. The velocity decrease of Honkomatsu andesite becomes markedly above 200°C for both water saturated and oven-dried specimens.

The optical observation indicates that the hydrothermal treatment in autoclave forms much more new cracks than treating in furnace and also widen earlier formed microcracks, which coincides the velocity decrease in Inada granite. On the other hand, the optical observation and the chemical analysis reveals that the velocity of Honkomatsu andesite is decreased by porosity increase in matrix and microcracks formation in and around phenocrysts.