

花崗岩の熱履歴に伴う微視的構造と工学的性状の変化に関する実験的研究

——特に弾性波速度と透水係数について——

平間 邦興 丸山 誠
桑原 徹 鈴木 健一郎

An Experimental Study on Microfabric and Mechanical Properties of Granite with a Heating History

——On the Results of Elastic Wave Velocity and Permeability Tests——

Kunioki Hirama Makoto Maruyama
Tohru Kuwahara Ken-ichiro Suzuki

Abstract

The heating of rock produces changes in mechanical properties because of thermally induced microcracking. Estimation of long-term changes in rock properties is becoming increasingly important for applications such as in nuclear waste disposal and geothermal energy utilization. The authors investigated the variations of mechanical properties, mainly elastic wave velocity (V_p), permeability (k), and the microfabric of granite, depending on temperature and period of heating, and estimated their future degradation. In addition, the changes in V_p and k were evaluated from the investigation of microcracks based on crack tensor. The results showed correct in principle but rather crude.

概要

岩盤の熱による影響を把握することは、放射性廃棄物の地層処分や地熱開発に絡んで重要な問題となっている。この報文では、花崗岩の工学的性状、特に弾性波速度(V_p)と透水係数(k)の加熱温度と加熱時間による変化と微視的構造のそれに伴う変化を調べた。その結果、岩の長期的な工学的性状の変化を推定し、一方では、微小クラックの観察から推定される物性値の変化と実験結果を対応させることができた。

1. 緒言

放射性廃棄物の地層処分、地熱開発、地下原子力発電所などのプロジェクトの計画にあたり、岩盤の力学および水理学的挙動を把握するためには、熱の影響を考慮することが必要となる。この研究は、特に放射性廃棄物の地層処分に関連して、岩盤の熱履歴に伴う物性の長期的な変化を推定しようというものである。

地層処分の基本概念は、地下数 100 m 以深の堅固な地層中に、半減期が長くしかも放射能強度の高い放射性廃棄物を埋設処分することによって、長期間にわたって生物圏から隔離し、環境の汚染と人類の放射線被曝を防ぐことにある。そのため、現在の処分概念では、埋設処分

後約 1,000 年間の隔離機能を人工バリアとしてのガラス固化体、キャニスタ、充填材、埋戻し材などに持たせ、それ以上の長期（1 万～数万年間）の隔離機能は天然バリアとしての地層に期待しており、不確定要素の多い天然バリアの安全性評価が大きな課題となっている。

天然バリアとしての地層、すなわち岩盤は、断層、節理、亀裂といった地質学的不連続面を含んでいるのが一般的である。しかし、前にも述べたように地下数 100 m もの深部での不連続面は次第に閉塞する傾向にあり、存在は認められても、水理学的または力学的にはその存在が地表付近ほど岩盤の挙動に対して支配的ではなく、母岩自身のそれに近づくことが知られている。従って、母岩の微視的な挙動の把握も重要となってくる。しかも熱

源近傍での母岩は、熱の影響でその物性が変化することは当然予想されることである。しかし、安全性の評価において温度や時間に伴う物性の変化は考慮されていないのが現状である。

処分場に対しては、その環境を実験的に模擬して行なう試験の場合、重要となるパラメータとして、温度、地下水流速、地下水の Eh(酸化還元電位) や pH(水素イオン濃度)、圧力、水量などが指摘される。今回の研究では、目的を温度条件に対する物性の変化にしぼり、加えて時間効果を考えた。処分場の最高温度は、廃棄物の発熱量と岩盤の熱伝導率とのバランスで決まるが、通常90℃に保たれるということで、一つには100℃を考え、さらに200℃、300℃という高温状態についても実験を行なった。検討した物性としては、主に透水係数、弾性波伝播速度であり、補足的に弾性係数、一軸圧縮強度などについても調べている。一方、これら物性の変化に帰因するのは、造岩鉱物間の熱膨脹率のミスマッチなどによる微小クラックの伸展であるとの報告¹⁾より知られている。そこで、微小クラックの伸展状況を観察し、定量化することにより、クラックの分布状態と諸物性を関連づけることを試みた。ここでは、定量化の一手法として、クラックテンソルの概念を用い、その導出にあたっては、ステレオロジーの考え方を導入し直交3断面の観察により三次元的なクラック分布の定量化を試みている。熱源の温度と岩盤の熱伝導率が知れば、熱の影響を受ける岩盤の範囲がある程度推定できる。その範囲内と外では当然岩盤の性質が異なり、岩盤としての挙動を推定する解析において、それらは解析領域の中で分けられてしかるべきである。このとき、顕著な微視的構造の変化のある領域、すなわち熱の影響を受ける領域については、その構造変化に伴って物性を変化させねばならないことも当然考えられることである。

以上のように、熱に伴う物性の長期的な変化を実験により推定し、それらとクラックの伸展状況の関係について検討を行なった。以下にその概要を述べる。

2. クラック分布の表面観察による測定

材料内部の構造を表面から推定する場合、一般には種類の方向から切って切断面を観察しなければならない。しかし、内部の異方性が弱いという仮定のもとで、金谷²⁾は、互いに直交する3面のみの観察による方法を提案している。この方法のポイントは、表面に表われるクラックの交線と、その表面に置かれた直線との交点数のデータからクラックの分布密度を推定するというものである。

具体的には、まず試料に座標系を固定する。xy面に平行な表面を観察することになると、観測面に $k\pi/N$,

$k=0, 1, 2, \dots, N-1$ の角度をなす直線をランダムに引き、クラックの交線との交点数および直線の長さを計測し、単位長さ当りの交点数 $N_k^{(z)}$ を求めればよい。k本の直線は、各測定値に含まれる誤差を消去する意味で、平均化し次のような値を求める。

$$M^{(z)} = 2\pi \sum_{k=0}^{N-1} N_k^{(z)} / N \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$M_{12}^{(z)} = \pi \sum_{k=0}^{N-1} N_k^{(z)} \sin(2\pi k/N) / N \quad \dots\dots\dots(2)$$

同様にして yz 面および zx 面の観察を行ない、 $M^{(y)}$, $M_{23}^{(y)}$, $M^{(x)}$, $M_{31}^{(x)}$ を計算する。これらのデータから空間内の任意の方向 \mathbf{n} を持つ直線とクラック面との交点数の分布 $N(\mathbf{n})$ が推定される。単位法線ベクトル \mathbf{n} を持つクラック面の分布密度 $f(\mathbf{n})$ は $N(\mathbf{n})$ が与えられると決まる。ここで、分布密度 $f(\mathbf{n})$ は、考えている領域内のクラックのうち、単位法線ベクトルが方向 \mathbf{n} の周りの微小立体角 $d\Omega$ 内にあるものの面積の合計が単位体積当り $f(\mathbf{n})d\Omega$ であるように定義されている。

今、 $f(\mathbf{n})$ の2次のモーメントテンソルを R_{ij} とする。すなわち、

$$R_{ij} = \int n_i n_j f(\mathbf{n}) d\Omega \quad \dots\dots\dots(3)$$

この意味は、いま考えている領域の体積を V とし、その中にあるクラックに番号を $1, 2, 3, \dots, N$ とつけ、それぞれの単位法線ベクトルを $\mathbf{n}^{(1)}, \mathbf{n}^{(2)}, \dots, \mathbf{n}^{(N)}$, 重み $S^{(1)}, S^{(2)}, \dots, S^{(N)}$ をつけると、

$$R_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{\alpha=1}^N n_i^{(\alpha)} n_j^{(\alpha)} S^{(\alpha)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

と書ける。重み関数は、どのような型でも可能であるがここでは、クラックの面積を考えている。一方、クラックと等価な面積を持つ円を仮定し、その直径 r に対して $S^{(\alpha)} = \pi r^{(\alpha)3}/4$ を重みと考えれば、小田の提案するクラックテンソル $F_{ij}^{(3)}$ と一致する。また、開口幅 t を r の一次関数で近似した第2種クラックテンソル P_{ij} は重みとして、 $S^{(\alpha)} = \pi r^{(\alpha)5} c^3/4$ (c は $t=cr$ における定数) を用いているといえる。すなわち、これらクラックテンソルは、表面観察より得られた R_{ij} を用いて、

$$F_{ij} = \frac{\langle r^3 \rangle}{\langle r^2 \rangle} R_{ij} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$P_{ij} = c^3 \frac{\langle r^5 \rangle}{\langle r^2 \rangle} R_{ij} \quad \dots\dots\dots(6)$$

で表わされる。ただし、クラックの大きさと方向は独立であるとする。しかし、 r なる値は、直接測定することが困難である。そこで、直径 r の円が空間に分布しているときのある断面に表われる交線長さ l (この量は十分測定可能である) の分布から r を推定することを考える。このとき l と r は次の関係にあることが知られている。

$$\langle l^n \rangle = \frac{\langle r^{n+1} \rangle}{\langle r \rangle} \int_0^{\pi/2} \sin^{n+1} \theta d\theta \quad \dots\dots\dots(7)$$

上式を用いて式(5)および(6)を書き換えると、最終的に求めるテンソル量は、

$$F_{ij} = \frac{3}{8} \pi \frac{\langle l^2 \rangle}{\langle l \rangle} R_{ij} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$P_{ij} = \frac{5c^3}{32} \pi \frac{\langle l^4 \rangle}{\langle l \rangle} R_{ij} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。ただし、 $\langle \rangle$ は平均を表わすものである。

3. 実験方法および顕微鏡観察

この試験に用いた試料は、茨城県笠間産の黒雲母花崗岩（単位体積重量 2.62 g/cm³，間隙率 1.96%）であり、供試体として、直径 50 mm，高さ 100 mm の円柱を用いた。供試体の加熱には、加熱炉（Max, 1,000°C）を用い、昇温速度は供試体に衝撃が加わらないように毎分 2°C 程度とした。この程度の昇温速度では、熱履歴によるクラックのみが発生し、熱勾配によるクラックは発生しないと考えられる⁴⁾。同時に数本の供試体を加熱炉に入れ、所定の温度となつてから、所定時間加熱した後、炉より取り出しそのまま常温まで冷却する。温度条件および加熱時間を表一にまとめた。また、透水試験および微小クラックの観察方法は次のとおりである。

3.1. 透水試験

熱履歴を受けた花崗岩の透水性の変化を調べる目的で透水試験を行ない、透水係数を求めた。供試体上端面より浸透圧 5 kgf/cm² をもって強制的に透水させ、拘束圧として 10 kgf/cm² をかけている。これは供試体とゴムメンブレンとの間の漏水防止のためで、すべての供試体において同一条件とした。

3.2. 偏光顕微鏡による観察

加熱後、透水試験の行なわれた試料について、偏光顕微鏡により写真撮影を行ない、微小クラックの伸展状況の観察を行なった。顕微鏡観察用の薄片は、各々の円柱供試体より直交 3 断面から作製した。円柱底面と平行な断面 1 およびそれと直交する断面 2 および断面 3 である。

4. 実験・観察結果および考察

4.1. 弾性波速度 (V_p) について

新鮮な花崗岩の平均弾性波速度 V_p は、4.5 km/sec で

	温度(°C)	加熱時間(日)
L-series	100(105~120)	7, 20, 40, 45, 70, 100
M-series	200(200~220)	7, 18
H-series	300(300~320)	7, 20, 40, 80

表一 試験条件

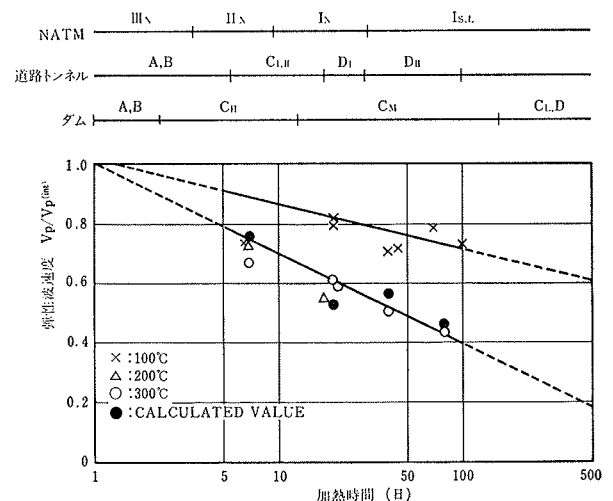
あり、加熱放置されたすべての供試体は加熱する前にこの速度を持っていたと考え、減少の割合を加熱温度、加熱時間によりまとめたのが図一である。縦軸には、新鮮な花崗岩の平均速度 4.5 km/sec との比を、横軸には、時間を日単位で対数目盛上にとっている。H-series は、時間の対数に対して線型的に減少していることがわかる。横軸 1.0 との切片は、弾性波速度減少の始点であり、この結果から少なくとも 24 時間程度 300°C で加熱すると、花崗岩の本来持っている動的性質は変化してくることを意味する。参考のために、横軸に 3 種類の岩盤分類における V_p の範囲を付記した。例えば、ダム の岩盤分類で考えると、当初、弾性波速度の意味では A・B 級であった岩盤も、1 年後には C_L 級に落ちているといえる。一方、H-series の挙動から L-series のそれを推定すると、やはり時間の対数に対して線型的に減少すると考えられる。ただし、その減少率は H-series に比べると緩やかである。ここで L-series について実験式

$$V_p/V_{p(int)} = a - b \log t \quad (t: \text{day unit}) \quad \dots\dots\dots(10)$$

を考えると、a=1.2, b=0.15 で近似される。実際の処分場での動的な性質を考える場合には、温度分布と時間を考慮して、V_p の分布が推定され、幾つかの領域に分割して考えるのが適当であろう。今回の結果は、領域分割の助けとなると思われる。

4.2. 透水係数 (k) について

透水係数についても、加熱時間の影響を調べるに当って新鮮な花崗岩の平均的な透水係数 (1.2×10⁻⁹ cm/sec) で正規化したものを考える。縦軸には、その透水係数との比を、横軸には加熱時間をそれぞれ対数目盛上にとっている。まず、H series の結果について考察する。H series は 300°C の温度を保持したものであるが、加熱時



図一 弾性波速度と加熱時間の関係 (付: V_p による岩盤分類)

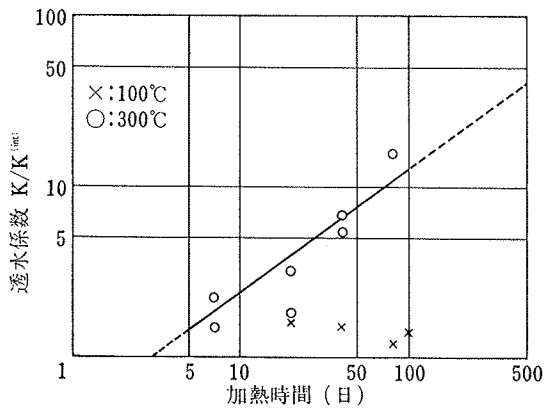


図-2 透水係数と加熱時間の関係

間に対して非常に敏感であることがわかるとともに、両対数紙上で透水係数と時間の間には良好な線型関係があるといえる。その近似式は、

$$k/k(int) = 0.46t^{0.71} \quad (t: \text{day unit}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

となる。

ところで加熱温度 100°C の場合は、結果として20日間の加熱で多少の変化がみられたが、100日間の加熱でもその値にほとんど変化はない。透水性の変化を内部の微視的クラックの密度変化であると考え、100°C程度の温度では、微小クラックの発生はあまり起こらないか、起こったとしても連続性が乏しいために透水性の変化にはそれほど大きく影響しないといえる。また、弾性波速度と比較すると、透水係数は熱履歴の影響を受けにくいことがわかる。したがって、熱水を伴わず、熱源そのものが周辺岩盤に与える影響だけを考えるなら、100°C程度の温度では、透水性の時間的変化は無視できることがわかる。

4.3. 微小クラックの観察結果

先に述べたように、加熱による物性の変化は主に鉱物中の微小クラックの密度に大きく関係している。花崗岩の主な造岩鉱物は、石英、斜長石、雲母であり、顕微鏡による観察からクラックの発生または伸展しているのは、主に石英であり、一部斜長石にもみられる。Nur & Simmons⁵⁾ は、石英と他の鉱物との間の圧縮率の差がその原因であるとの報告をしている。

微小クラックの観察は、加熱温度 300°C の供試体について行なわれ、その加熱時間に依存したクラック密度の変化をクラックテンソルにより定量化した。写真-1~3 にその一

例を示す。写真-1が加熱時間7日のもの、写真-2は40日、写真-3は80日加熱のもので、クラックをトレースした図がそれぞれ図-3、4、5である(ただし、鉱物境界は無視している)。明らかに加熱時間が長期に及ぶものほどクラックの密度が高くなっていることがわかる。これらの顕微鏡写真からクラックが等方的な分布をしていると仮定して(加熱時間の短いものは異方性があることは図より明らかではあるが)クラックテンソルを求めてみると、その第1不変量 F_0 は、7日で1.4、20日で4.8、40日で3.6、80日で6.9となる。クラックテンソルの第1不変量は、クラックの大きさの3乗および単位体積当りの本数に比例する量で、クラックの相対的な密度を表わす量である。ところで弾性論からの推定³⁾より F_0 とヤング率との間には次のような関係があることが知られている。

$$\frac{E}{E^{(int)}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi}{6} F_0\right)} \quad \dots\dots\dots(12)$$

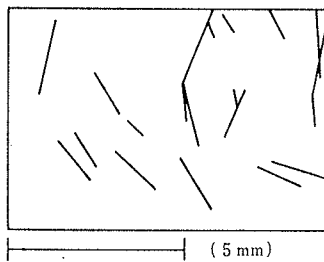


図-3 クラックのトレース (300°C 7 days)

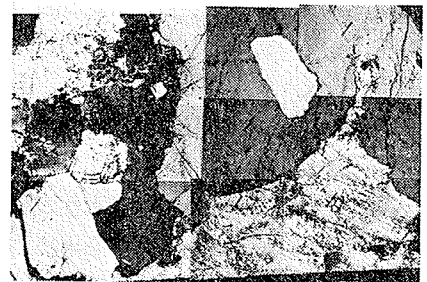


写真-1 (300°C 7 days)

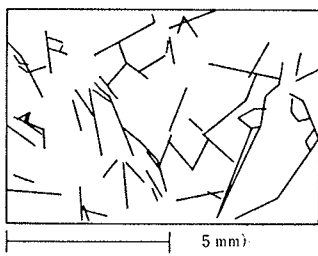


図-4 クラックのトレース (300°C 40 days)



写真-2 (300°C 40 days)

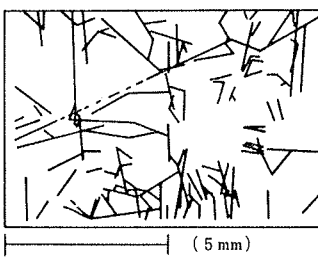


図-5 クラックのトレース (300°C 80 days)



写真-3 (300°C 80 days)

一方、弾性波速度 V_p は動的ヤング率の平方根に比例するから、 V_p と F_0 との間には、比例常数を1として、

$$\frac{V_p}{V_p^{(int)}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\pi}{6} F_0}} \quad \dots\dots\dots(13)$$

なる関係が成立する。求められた F_0 の結果を用いて各加熱時間における $V_p/V_p^{(int)}$ を推定してみると、図-1中の●印のようになる。非常に粗い近似とはいえ、弾性波速度の加熱時間に伴う減少を十分反映していると思われる。

ところで、透水性状とクラックの関係を考える場合は、その開口幅に言及してやらねばならない。図-6に示したのは、クラックのトレース長さと開口幅の関係である。図中には、7日加熱および20日加熱試料の顕微鏡写真から読まれたデータがプロットされている。この結果はトレース長さと開口幅の線型関係を示唆しており、図中の直線の傾き、すなわち式(9)中の定数Cの値は、 4.5×10^{-3} という値が得られた。ここで、透水係数テンソル K_{ij} は式(9)の P_{ij} と、

$$k_{ij} = \lambda (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \quad \dots\dots\dots(14)$$

なる関係にある。 λ は Poiseuille 流れを仮定すれば、動粘性係数 (ν) と重力加速度 (g) を用いて $g/12\nu$ である。 c の値と P_{ij} を用いて K_{ij} を推定すると、 10^{-5} から 10^{-4} のオーダーの値となり試験結果と大きく異なる。その理由は、写真から測定される開口幅は、切断面表面に現われる見掛けの幅であり、透水係数を規定する水理学的な開口幅とは異なるからであると考えられる。

5. まとめ

放射性廃棄物の地層処分における安全性の評価は、非常に長い時間スケールを考えている。それ故、種々の解

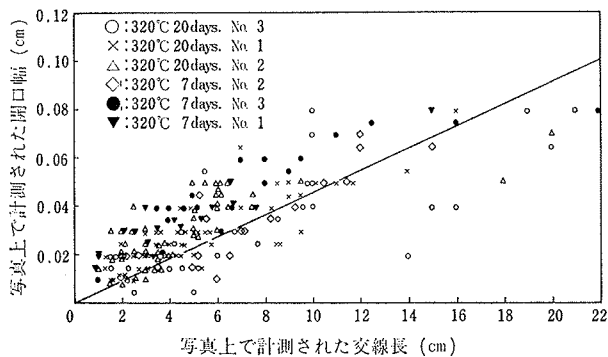


図-6 写真上で計測した交線長と開口幅の関係

析において周辺岩盤の物性値を不変のものとして考えるには危険が伴う。今回、加熱炉での加熱条件下で、主に透水性、弾性波速度について調べた結果、それらが熱に対して時間とともに顕著な変化をすることが明らかとなった。一方、その原因が、造岩鉱物中の微小クラックの伸展にあることも顕微鏡観察から確かめられた。これらの結果は、次のような点を示唆するものである。

(1) 加熱時間に伴う透水係数の向上は、加熱温度 300°C においては著しいが、100°C 程度の温度下で、数100日の加熱時間を経ても多少の変化しかない。従って今回の結果からは、100°C 程度の温度では、透水性の時間的変化は無視できるといえる。

(2) 加熱時間に伴う弾性波速度の減少は、加熱温度が 100°C 程度でも顕著であり、数千年後の耐震性を考える場合には動ヤング率を低下させる必要がある。例えば、花崗岩の場合 $V_p/V_p^{(int)} = 1.2 - 0.15 \log t$ が実験的に求められた。

(3) 微小クラックの分布からクラックテンソルを用いて推定される弾性波速度の減少は、実験結果とほぼ一致する。しかし、透水係数については、クラックテンソルによる推定値と実験値のオーダーが異なる。従って、相対的なクラックの密度を表わすクラックテンソルを用いて評価するには、開口幅の絶対値（水理学的開口量）の推定が今後の課題となる。

参考文献

- 1) Ide, J. M.: The Velocity of Sound in Rocks and Glasses, as a Function of Temperature, J. Geol., 45, (1937), pp. 687~716
- 2) 金谷: 岩盤中のクラック分布の表面観察による測定法, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, (1984), pp. 115~120
- 3) Oda, M., et al.: Elastic compliance for rock-like materials with random cracks, soils and foundations Vol. 24, No. 3, (1984), pp. 27~40
- 4) 江原, 他: 岩石熱サイクルに伴う AE について, アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集 3rd, (1981), pp. 177~182
- 5) Nur, A., and G. Simmons: The origin of small cracks in igneous rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 7, (1969), pp. 307~314