

岩石内のマイクロクラック進展の環境依存性

奈良 禎太¹・金子 勝比古²

¹北海道大学大学院 工学研究科 環境フィールド工学専攻 COE研究員 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:nara@eng.hokudai.ac.jp

²北海道大学大学院 工学研究科 環境フィールド工学専攻 教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

応力腐食によるサブクリティカル亀裂進展は、岩石の時間依存性の破壊挙動の重要な要素プロセスである。本研究では、試料として花崗岩を用い、鉱物粒子間の熱膨張の差に起因した熱応力を岩石内部に発生させることによって、マイクロクラックを進展させ、その環境依存性について検討した。なお、本研究では、マイクロクラック群としての挙動を観測することとし、それに伴う物性変化として、P波速度の変化を計測した。試験より、熱応力が花崗岩内部に発生した場合、湿度上昇時にP波速度の低下が認められた。これは、マイクロクラックが熱応力の助けを借りた応力腐食により進展したことを示している。ゆえに、熱応力による岩石の劣化現象においても、応力腐食亀裂進展が重要なプロセスであると考えられる。

Key Words : crack propagation, microcracks, stress corrosion, P-wave velocity, thermal stress

1. 序論

地下発電所や原油地下備蓄空洞に代表される地下岩盤構造物の建設や、高レベル放射性廃棄物の地層処分など、近年地下岩盤の利用が進められてきている。これらの岩盤構造物は、長期間にわたる安定性が保証されなければならない。このような場合、その設計において岩石の長期強度の予測が重要となる。この目的のもとに、岩石の時間依存性の変形・破壊挙動に関する基礎研究が実施されてきている^{1,2)}。ここで、岩石の破壊プロセスは、マイクロクラックの発生、伸長とその集積、局所化として説明されることから³⁾、岩石の長期強度を予測する上では、最も基本的な要素プロセスである亀裂の伸長挙動について十分な基礎知識を集積する必要があると考えられる。

Griffithの破壊基準によれば、亀裂先端の応力レベル(応力拡大係数)が臨界値、すなわち破壊靱性に達したとき、亀裂の動的な進展が起こる。しかしながら、実際には、応力レベルが破壊靱性に達していない場合でも、亀裂は緩やかに進展する。この現象は、サブクリティカル亀裂進展とよばれ、岩石においては、亀裂先端における、引張応力下で起こる化学結合の劣化・分断作用である応力腐食が主要な機構であると考えられている^{4,5)}。サブクリティカル亀裂進展に代表されるような岩石の時間依存性挙動は、応力状態のみならず、温度や湿度などの環境条件にも依存することから、環境因子の影響を考慮した基礎的検討が必要であると考えられる。

岩石では、破壊力学試験を用いて、外荷重による単一

巨視亀裂のサブクリティカル亀裂進展に関する研究が主に行われてきた。破壊力学試験を用いた研究により、大気環境下でのサブクリティカル亀裂進展への、先在クラックおよび水蒸気圧の影響が明らかとなった⁶⁻¹⁰⁾。

亀裂先端の応力レベルに注目すれば、岩石内のマイクロクラックの進展条件は、巨視亀裂における条件と等しいものと考えられる。ゆえに、巨視亀裂において観測されたサブクリティカル亀裂進展が、マイクロクラックにおいても起こるものと考えられる。そこで本研究では、内部応力、すなわち岩石内の温度を変化させ、鉱物粒子間の熱膨張の差に起因した熱応力を発生させることによる、マイクロクラックの進展現象の観測について述べ、その環境依存性を実験的に検討した。なお、マイクロクラックに対して亀裂進展量を直接測定することは困難であり、マイクロクラック単体が与える影響を定量化することもまた困難である。ゆえに、マイクロクラック群としての挙動を計測し、マイクロクラック群の進展に伴う物性変化として、P波速度の変化を調べることにした。

2. 応力腐食による亀裂進展

珪酸塩材料での応力腐食は、引張応力下でシロキサン結合に水が反応することによって起こる、結合の劣化・分断作用と考えられている⁹⁾。図-1に、亀裂先端でのシロキサン結合と水との反応の模式図を示す。また、応力腐食による亀裂進展が起こるとき、亀裂進展速度 dc/dt 、亀裂先端の応力拡大係数 K_I 、岩石実質部の活性化エネルギー

ギー E_0^* 、亀裂の進行方向に平行な先在クラックの密度 ϕ 、水蒸気分圧 $P(\text{H}_2\text{O})$ 、ガス定数 R 、および絶対温度 T_a は、次の式で関係づけられる^{7,9)}。

$$\frac{dc}{dt} = v_1 P(\text{H}_2\text{O}) \exp\left(\frac{-E_0 (1 - \gamma\phi) + \beta K_1}{RT_a}\right) \quad (1)$$

ここで、 v_1 、 γ および β は材料によって決まる定数である。この式は、亀裂の進行方向に平行な先在クラックおよび、亀裂先端の応力拡大係数 K_1 により、応力腐食反応のエネルギー障壁が低下することを表している。

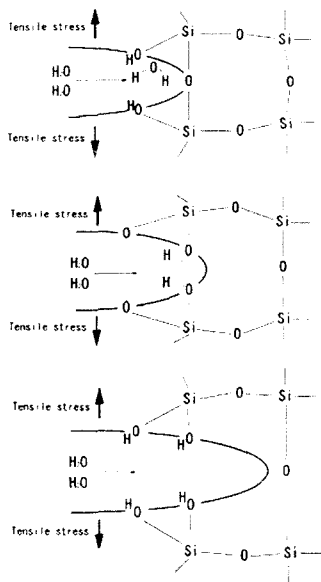


図-1 亀裂先端におけるシロキサン結合と水との反応

3. 岩石試料

本研究では、岩石試料として稲田花崗岩を用いた。稲田花崗岩は岩石試験に広く用いられており、力学的性質や弾性的性質に、先在クラックの選択的配向性に起因した直交異方性があることが知られている^{9,12)}。表-1に、乾燥状態の稲田花崗岩における、直交する3方向のP波速度を示す。本研究では、花崗岩の主軸を、乾燥状態でのP波速度の大きい順に軸1、軸2、軸3と定義し、それらの軸に垂直な面をそれぞれ面1、面2、面3と定義した。なお、本研究では、採石場において石目が記載されたものを試料として用いており、面3は「目」に、面2は「重ね」に、面1は「二番」に対応する¹³⁾。本研究では、これらの面に沿って用意した、一辺60mmの立方体供試体を用いてP波速度の測定を行った。

また、乾燥状態と含水飽和状態の重量の差から求めた見掛けの空隙率は0.48%であった。

表-1 稲田花崗岩における直交3方向のP波速度

	P-wave velocity [km/s]
axis-1	4.67
axis-2	4.26
axis-3	4.09

4. 試験方法

P波速度の測定法として、超音波パルス透過法を用いた。本研究では、温度および湿度を制御できるチャンバー内に岩石供試体を入れてP波速度の測定を行い、温度と湿度の影響を個別に調べることとした。発振子および受振子にはPZT圧電素子（厚み方向振動、共振周波数1MHz）を用い、立方体供試体各面の中央にシアン系接着剤を用いて直接接着した。図-2に、本研究で用いた装置および供試体の配置の模式図を示す。本研究での波動伝播特性測定装置では、温度と湿度を独立して制御できるチャンバー内に岩石供試体を入れた状態で、波動伝播特性を外部からリアルタイムで測定できる。

また、本研究で使用したチャンバーでは、図-3に示す範囲で温度および湿度の制御が可能である。

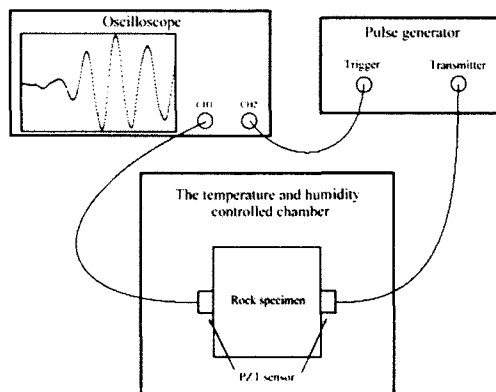


図-2 P波速度測定システム

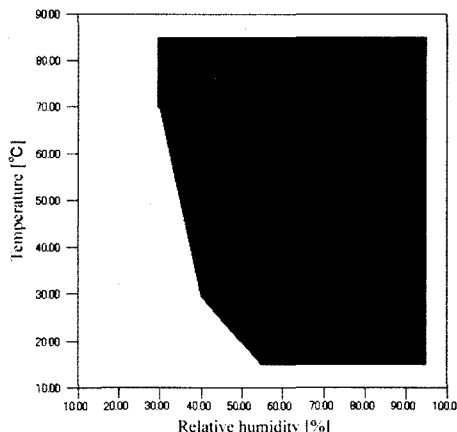


図-3 チャンバー内の温度・湿度の制御可能範囲

5. 試験環境

まず、温度20℃、湿度50%（水蒸気分圧1170 Pa）¹⁴⁾の状態から、湿度を50%に保ったまま、温度を55℃まで上昇させた（phase1）。昇温速度は5℃/hour以下とした。その後、その状態（温度55℃、湿度50%、水蒸気分圧7870 Pa）で958時間静置した（phase2）。次に、温度を一定に保った状態で湿度を80%まで上昇させ、その状態（温度55℃、湿度80%、水蒸気分圧12600 Pa）で764時間静置した（phase3）。次に、湿度を50%まで下げ、その状態（温度55℃、湿度50%、水蒸気分圧7870 Pa）で168時間静置した（phase4）。続いて、チャンパー内の水分の供給を止めることにより、湿度を可能な限り低下させ、148時間静置した（phase5）。このときの湿度計の表示は15～25%であった。その後、温度を20℃まで緩やかに降下させ、その状態で静置した（phase6）。温度の降下速度は、昇温時と同様に5℃/hour以下とした。

6. 試験結果

岩石試料を用いる前に、予備試験として、一辺40mmのステンレス鋼を用いて、様々な温度・湿度環境下でP波測定を行った。図-4に、ステンレス鋼を用いた試験で得られた波形の例を示す。この図より、ステンレス鋼においては、P波伝播特性に温度および湿度の影響が認められないことがわかる。

図-5に、稲田花崗岩を用いて得られた波形の例を示す。図より、稲田花崗岩においては、P波伝播特性に温度および湿度の影響が明確に現れていることがわかる。

図-6に、P波速度の経時変化を示す。図-6(a)(b)(c)はそれぞれ、軸1方向、軸2方向、軸3方向におけるP波速度の変化を示している。また、図-6において、チャンパー内の温度変化は実線で、湿度変化は破線で示されている。ただし、軸1方向については、ケーブルの断線のため、phase3で測定を終了した。

図-6より、全ての方向において、環境中の温度および湿度の変化に伴って、P波速度が変化していること、および、その変化の傾向は全ての方向において類似していることがわかる。まず、phase1すなわち温度のみが上昇する過程においては、全ての方向において、P波速度が上昇していることがわかる。その後のphase2において、温度および湿度を一定に保った場合、軸1方向ではP波速度が低下し（図-6(a)中(e)）、その後一定値に収束するという測定結果が得られた。軸2および軸3方向については、軸1方向よりもP波速度の低下の程度は小さかった。湿度を上昇させる過程であるphase3においては、全ての方向において、P波速度の低下が認められた

（図-6(a)(b)(c)中(h)）。なお、この過程においては、P波速度は低下した後、一定値に収束する、という結果が得られた。その後の湿度を低下させる過程であるphase4およびphase5においては、P波速度の明確な変化は認められなかった。温度を低下させる過程であるphase6においては、P波速度の明確な低下が認められた。

また、試験開始時と試験終了時のP波速度を比較すると、試験終了時のP波速度は開始時よりも小さくなっていることがわかる。

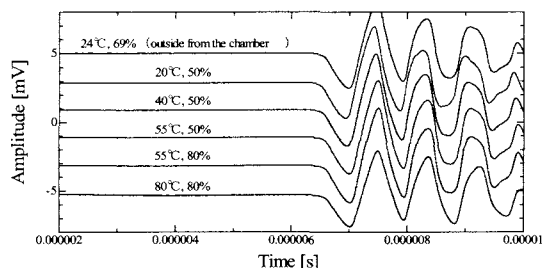


図-4 ステンレス鋼で得られた波形

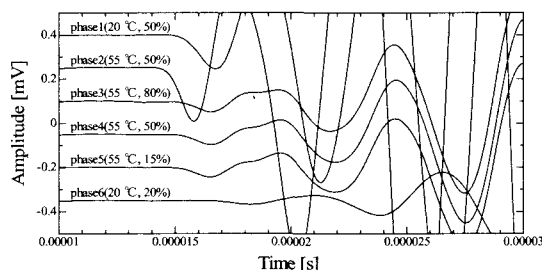


図-5 稲田花崗岩で得られた波形

7. 考察

温度・湿度変化に伴うP波伝播特性の変化は複雑ではあるが、新たな知見を含んでいる。phase1では、P波速度は温度の上昇とともに増大しているが、これは、鉱物の熱膨張による先在クラックの閉塞によるものと考えられる。しかしながら、軸1方向においては、P波速度はphase1で上昇した後、phase2において低下している（図-6(a)中(e)）。これは、熱応力の発生に伴う先在クラックの進展を示していると考えられる。また、phase3におけるような、温度一定（熱応力一定）の状態で湿度のみを上昇させた場合のP波速度の低下は、湿度の影響によるマイクロクラックの進展を示す新たな知見である。そこで、花崗岩内部での温度変化によって生じる熱応力により、岩石内の亀裂先端にどの程度の応力拡大係数が生じるのかを知る必要があると考えられる。ゆえに、鉱物粒子間の熱膨張の差に起因して生じる、マイクロクラック先端の応力拡大係数について考察する。

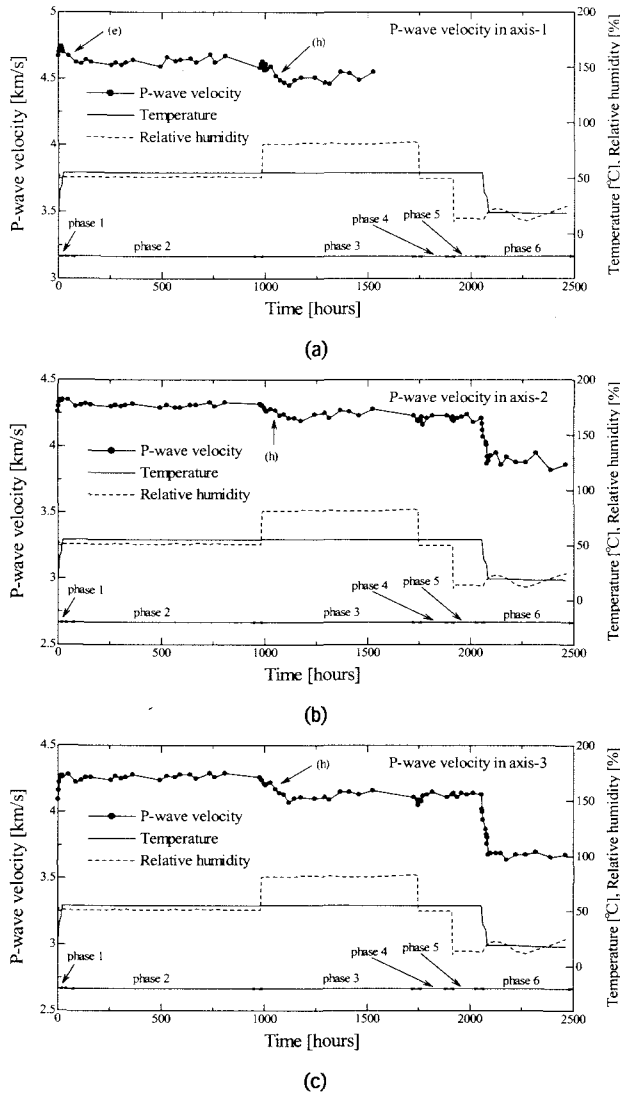


図-6 稲田花崗岩におけるP波速度の経時変化。(a)：軸1方向，(b)：軸2方向，(c)：軸3方向
 図中(e)は温度上昇時のP波速度の低下領域，(h)は湿度上昇時のP波速度の低下領域を示す。

図-7(a)に示されるように、周辺鉱物に比較して熱膨張率が大きな鉱物粒子が存在し、この鉱物粒子の粒界から周辺鉱物中にマイクロクラックが存在している場合を考える。この場合、温度上昇に伴って鉱物粒は膨張するが、周辺に存在する材料の弾性率が大きい場合は、その膨張変形が拘束され、結果として鉱物粒内に圧縮応力が生じる。この状況は、力学的には、鉱物粒子の粒界に内圧が作用する問題に置き換えることができる。この内圧は、鉱物粒子の形状、鉱物粒子と周辺鉱物との熱膨張率の相違および、それらの弾性率に関係するが、ここでは、問題の単純化のために、一軸の内圧 p が作用するものとする(図-7(a)参照)。

上記の問題においては、亀裂が粒径よりもはるかに小さい場合では、遠方で一様な応力を受ける半無限板外側

クラックの問題と近似でき(図-7(b)参照)、亀裂が長くなると、内面に自己平衡集中心力が作用する問題に近似できる(図-7(c)参照)¹⁵⁾。図-7(b)では、応力拡大係数 K_I と亀裂長 c の関係は次式で表される^{15,16)}。

$$K_I = 2\eta p \sqrt{\pi c} \quad (2)$$

ここで、 $\eta = 1.1215$ であり、 p は熱応力に相当する。熱応力は、材料のヤング率、温度変化および鉱物粒子間の熱膨張率の差より評価できる。一方、図-7(c)では、応力拡大係数 K_I と亀裂長 c の関係は次式で表される^{15,16)}。

$$K_I = \left(1 + \frac{0.2}{c/a}\right) \frac{2ap}{\sqrt{\pi(a+c)}} \quad (3)$$

ここで、 a は鉱物粒の半径であり、 $2ap$ は表面力を表す。

石英と長石の熱膨張率の差¹⁷⁾を考慮して、式(2)(3)を用いて応力拡大係数 K_I の値を計算した。 K_I と c/a の関係を図-8 に示す。ただし、ヤング率は 60 GPa とし、初期温度 (20°C) からの温度変化 ΔT が 15°C (上昇後の温度 T は 35°C), 25°C (上昇後の温度 T は 45°C), 35°C (上昇後の温度 T は 55°C) の 3 通りについて計算した。図より、亀裂が短い場合 ($c/a < 0.7$)、熱応力 p が一定であれば、亀裂の伸長に伴って応力拡大係数は増大することがわかる。サブクリティカル亀裂進展の立場から考えれば、亀裂伸長に伴ってその進展速度は増大する。これに対し、亀裂が長くなると ($c/a > 0.7$)、熱応力が一定であれば、亀裂の伸長に伴って応力拡大係数は低下する。したがって、亀裂伸長に伴ってその進展速度は低下する。

図-9 に、稲田花崗岩を用いた定変位ダブルトーション試験^{18, 19)}より得られた、応力拡大係数と亀裂進展速度との関係 ($K_I - \log (dc/dt)$ 関係) を示す^{6, 9)}。この試験では、花崗岩の直交異方性を考慮して、亀裂の進行方向と開口方向を考慮した 6 種の供試体を用意した。例えば、1・2 とは、亀裂が軸 1 方向に進み、軸 2 方向に開口するような供試体を表す。すなわち、図-9 において、●と○は面 3 に、▲と△は面 2 に、■と□は面 1 に平行に亀裂進展が起こるとききの $K_I - \log (dc/dt)$ 関係を示している。

図-8 に示されている応力拡大係数の値と、図-9 に示される $K_I - \log (dc/dt)$ 関係を考慮すると、本研究におけるような条件で花崗岩に熱応力が加わる場合でも、マイクロクラックが進展するのに十分な応力拡大係数が亀裂先端に加わることがわかる。特に、湿度の上昇による P 波速度の低下は、花崗岩内のマイクロクラックが応力腐食により進展したことを示していると考えられる。

本研究で得られた結果について考察をまとめると、軸 1 方向における phase2 開始時の P 波速度の低下は、熱応力の増大に伴ったマイクロクラック先端の応力拡大係数の増大による、マイクロクラックの進展の結果得られたものと考えられる。phase2 において、P 波速度がほぼ一定値となった測定結果は、マイクロクラックの多くが $c/a > 0.7$ の状態にあり、亀裂の進展がほぼ収束した状態にあったことにより得られたものと解釈できる。phase3 において、熱応力一定の状態で湿度が増大すると、これに伴って亀裂進展速度が増大して亀裂が進展するが、亀裂の伸長に伴って応力拡大係数が低下する。そのため、亀裂進展は湿度上昇後のある時間内で活発に起こり、その後抑制されるという現象が、図-6 中(h)に示される P 波速度の変化に現れたものと考えられる。したがって、湿度上昇直後に P 波速度は低下するが、時間の経過とともにその変化は小さくなると考えることができる。

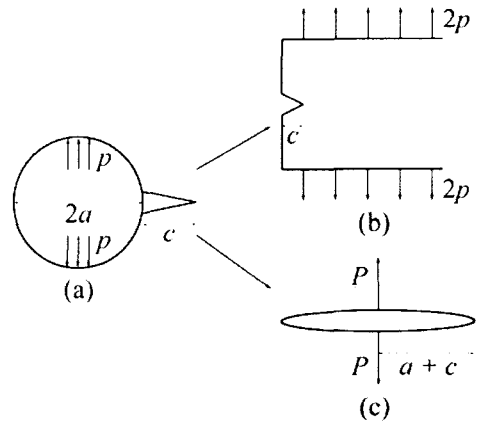


図-7 鉱物粒界から生じるマイクロクラックの模式図

- (a) : 鉱物粒中に内圧が作用している様子
- (b) : 亀裂が鉱物粒子よりもはるかに小さい場合
- (c) : 亀裂が十分長い場合

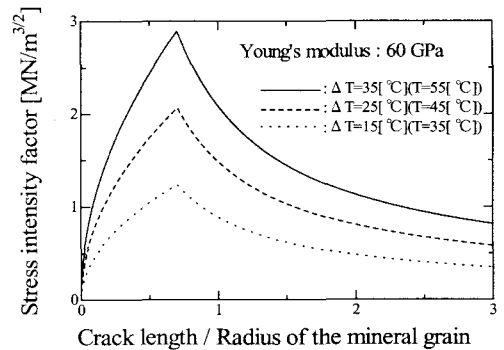


図-8 鉱物粒径に対する亀裂長の比とマイクロクラック先端の応力拡大係数との関係

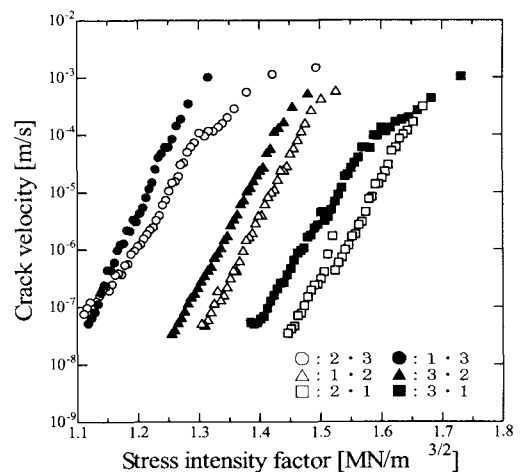


図-9 稲田花崗岩でのサブクリティカル亀裂進展における応力拡大係数と亀裂進展速度との関係^{6, 9)}

また、phase6 における、温度を低下させる過程での P 波速度の低下は、温度の降下速度が小さいことを考慮すると、亀裂の進展ではなく、鉱物粒子の熱収縮による、岩石内部の亀裂や空隙の開口によるものと考えられる。ゆえに、この過程では、新たな亀裂の進展は生じていないものと考えられる。

8. 結論

本研究では、周辺環境の温度および湿度を制御した環境下において、花崗岩内に鉱物粒子間の熱膨張の差に起因した熱応力を発生させることにより、岩石内のマイクロクラックを進展させ、その環境依存性について実験的に検討した。特に、花崗岩内のマイクロクラック群の進展を、P 波速度の変化を計測することにより調べた。その結果、温度を 55℃ まで上昇させてしばらく一定に保つと、P 波速度の低下が認められた。これは、熱応力の増大に伴ったマイクロクラック先端の応力拡大係数の増大による、マイクロクラックの進展によるものである。さらに、温度を 55℃ に保ったまま湿度を上昇させた場合にも、P 波速度の低下が認められた。これは、鉱物粒子の熱膨張率の差を考慮して計算された応力拡大係数の値を考慮すると、花崗岩内での応力腐食によるマイクロクラックの進展によって得られたものと解釈できる。したがって、本研究の条件で花崗岩に温度・湿度履歴を加えた場合でも、応力腐食によるサブクリティカル亀裂進展が、花崗岩内のマイクロクラックにおいて起こると結論づけられる。

本研究の結果は、熱応力による岩石劣化現象においても、応力腐食による亀裂進展が重要な要素プロセスであることを示している。すなわち、大気環境下における岩石の劣化現象は、応力腐食に関係することが示されるとともに、応力腐食の制御により、岩石の劣化が制御できるものと考えられる。

参考文献

- 1) Lajtai, E. Z. and Schmidtke, R. H. : Delayed failure in rock loaded in uniaxial compression, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol.19, pp. 19-25, 1986.
- 2) 鄭海植, 尾原祐三, 菅原勝彦 : 水蒸気圧下の岩石の強度特性, *資源と素材*, Vol.118, pp. 9-16, 2003.
- 3) Scholz, C. H. : Mechanism of creep in brittle rock, *J. Geophys. Res.*, Vol.73, pp. 3295-3302, 1968.
- 4) Anderson, O. L. and Grew, P. C. : Stress corrosion theory of crack propagation with application to geophysics, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol.15, pp. 77-104, 1977.
- 5) Atkinson, B. K. : Subcritical crack growth in geological materials, *J. Geophys. Res.*, Vol.89, pp. 4077-4114, 1984.
- 6) 奈良禎太, 大野有希, 今井康暁, 金子勝比古 : 花崗岩における応力腐食による亀裂進展現象の異方性および粒径依存性, *資源と素材*, Vol.120, pp. 25-31, 2004.
- 7) 奈良禎太, 今井康暁, 金子勝比古 : 岩石におけるサブクリティカル亀裂進展の組織・環境依存性, *資源と素材*, Vol.120, pp. 431-439, 2004.
- 8) Nara, Y. and Kaneko, K. : Study of subcritical crack growth in andesite using the Double Torsion test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.42, pp. 521-530, 2005.
- 9) Nara, Y. and Kaneko, K. : Subcritical crack growth in anisotropic rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2006 (in press).
- 10) Nara, Y. et al. : Relation between subcritical crack growth behavior and crack paths in granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2006 (submitted).
- 11) 尾原祐三, 鄭海植, 松山友彦, 奈良禎太, 金子勝比古 : 熊本安山岩の応力腐食指数, *資源と素材*, Vol.121, pp. 84-89, 2005.
- 12) 奈良禎太, 金子勝比古 : 花崗岩の異方弾性定数の評価法に関する研究, *資源と素材*, Vol.119, pp. 396-402, 2003.
- 13) 笹田政克 : 稲田みかげ, *地質ニュース*, No.441, pp. 34-40, 1991.
- 14) Baumgartner, A. et al. : Global climatology, in *Engineering Meteorology*, Elsevier, New York, pp. 125-177, 1982.
- 15) 稲葉力 : 形状記憶合金を利用した岩石の静的破碎工法に関する研究, 京都大学博士論文, 1995.
- 16) 岡村弘之 : 線形破壊力学入門, pp. 216, 培風館, 1976.
- 17) Skinner, B. J. : Thermal expansion, in *Handbook of physical constants*, The Geological Society of America, INC., New York, pp. 75-96, 1966.
- 18) 佐野修 : 応力腐食による岩石内のクラック伸長現象の異方性に関する理論的考察, *材料*, Vol.37, pp. 159-165, 1988.
- 19) Sano, O. and Kudo, Y. : Relation of fracture resistance to fabric for granitic rocks, *PAGEOPH*, Vol.138, pp. 657-677, 1992.

DEPENDENCE OF THE PROPAGATION OF MICROCRACKS IN ROCK ON THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Yoshitaka NARA and Katsuhiko KANEKO

The propagation of microcracks in granite was investigated. Since it is difficult to observe the propagation of microcracks directly, the measurement of the P-wave velocity was conducted with controlling the temperature and the humidity. It was shown that the P-wave velocity was affected by the environmental conditions. The relative humidity had the strong effect on the P-wave velocity. When the temperature was high and the relative humidity increased, the P-wave velocity decreased due to the microcrack propagation by stress corrosion. It can be concluded that subcritical crack growth caused by stress corrosion occurs for microcracks due to the thermal stress and increase of the humidity.