

Strength of Kumamoto Andesite in Non-Atmospheric Environments

by Hae-Sik JEONG^a and Yuzo OBARA^b

a. Graduate School of Engineering, Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan

b. Department of Civil Engineering, Kumamoto University

The uniaxial compression tests and Brazil tests in non-atmospheric environments were conducted on Kumamoto andesite to investigate the environmental dependence on strength of rock. The environments used in the experiment were organic vapor environments as methanol, ethanol and acetone, inorganic gas environments as argon, nitrogen and oxygen and water vapor environment.

The obtained results are as follows:

1. From the uniaxial compression test, it was clear that the uniaxial compressive strength of Kumamoto andesite decreases in order of the environment of acetone, ethanol, methanol and water vapor, that the strength in inorganic environments was independent on environments and that the average uniaxial compressive strength in inorganic environments was 1.7 times of that in water vapor environment.

2. From the Brazilian test, the tensile strength of Kumamoto andesite in environments except water vapor was almost constant, although that in methanol is slightly low.

3. Both uniaxial compressive strength and tensile strength of Kumamoto andesite were the lowest in water vapor environment and highest in inorganic environments and these strengths in alcohol environments existed between those in water vapor environment and inorganic environments.

4. Water is the most effective agent that promotes stress corrosion of rock among the materials used in this research and the strength of rocks is dependent on the subcritical crack growth due to stress corrosion.

KEY WORDS : Rock, Non-Atmospheric Environment, Uniaxial Compressive Strength, Tensile Strength, Stress Corrosion

1. 緒言

岩石強度は岩石内の造岩鉱物、粒径、先在き裂の量、形状、方向などの構造特性に影響されるとともに、岩石の置かれた応力状態、ひずみ速度や応力速度などの載荷状態、温度状態、含水状態などの岩石を取り巻く環境にも影響されることが明らかとなっている。

岩石の破壊は岩石内の先在き裂が重要な役割を果たすと考えられ、単一あるいは複数のき裂の挙動を力学的に取り扱う学問分野が生まれた。この分野は岩石破壊力学と呼ばれ、それに関する専門書も出版されている(例えば、日本機械学会, 1989)。岩石破壊力学では、岩石内のき裂先端の応力拡大係数が臨界状態、すなわち破壊靱性に達したとき破壊は音速の速さで進展するが、応力状態が臨界状態以下でもき裂が進展する現象が見られるとされている。この進展はき裂の緩進展現象(Subcritical crack growth)と呼ばれ、応力腐食(Stress corrosion)、拡散(Diffusion)、溶解(Dissolution)、イオン交換(Ion exchange)、き裂先端における小規模降伏(Microplasticity)などがこの原因と考えられている(Atkinson and Meredith, 1987)。ガラスでの緩進展現象はGrenet (1899)によって初めて報告されて以来、セラミックス(Wiederhorn, 1967)、石英結晶(Scholz, 1972; Martin, 1972)、

岩石(Atkinson, 1980)を用いた実験結果をもとに、ケイ素を主成分とする材料にも緩進展現象を起こすことが明らかとなった。とくに、応力腐食はき裂先端の応力集中により活性化された化学反応であり、これにより岩石の原子間結合の劣化や切断が発生し、臨界状態以下でゆっくりとき裂が進展すると考えられている。岩石のようなケイ酸塩質材料では水が化学反応物質とされ、岩石中の間隙水や空気中の水蒸気が大きな役割を果たすと考えられ、岩石中の間隙水が岩石の力学的挙動に与える影響を多くの研究者が実験的に明らかにしている(Atkinson, 1980; Waza et al., 1980; Meredith and Atkinson, 1983)。その中には、大島花崗岩を用いてひずみ速度を変化させた1軸圧縮試験を実施し、応力腐食指数を求めた研究もある(Sano et al., 1981)。しかし、空気中の水蒸気圧がガラスや岩石の力学的挙動に及ぼす影響についてはわずかな研究者が実験的に検討しているだけであり(Wiederhorn, 1967; Krokosky and Husak, 1968; 佐野ら, 1989; Obara et al., 1996a, 1996b, 2000)、さらに、岩石を取り巻く大気以外の環境の影響を詳細に検討した例は皆無である。

そこで、本研究では岩石の周辺環境を種々変化させて、それらが岩石強度に及ぼす影響を実験的に検討した。具体的には、製作したチェンバーを用い、供試体周辺環境を水蒸気環境、メタノール、エタノール、アセトンなどの有機蒸気環境およびアルゴン、窒素、酸素などの無機ガス環境を作成する。これらの非大気環境下において、岩石中の水分をほぼ完全に除去した熊本安山岩の1軸圧縮試験および圧裂試験を行い、周辺環境が岩石強度に及ぼす影響を明らかにする。

* 2002年3月4日受付 7月29日受理

1. 熊本大学大学院生 自然科学研究科 博士後期課程 環境共生科学専攻

2. 普通会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科

[著者連絡先] TEL&FAX 096-342-3686 (熊本大学・環境システム工学科)

E-mail: obara@gpo.kumamoto-u.ac.jp

キーワード: 岩石, 非大気環境, 1軸圧縮強度, 引張強度, 応力腐食

2. 実験装置および供試体

岩石周辺の環境を制御し、その環境下で1軸圧縮試験および圧裂試験を実施するために、Fig.1に示すような真空チェンバーを製作した。チェンバーには、5つのポートとガス導入バルブが備えられており、上部には載荷棒を備えたベローズ付きフランジが取り付けられている。5つのポートの内、ひずみゲージの出力取り出し用が2つ、チェンバー内の圧力測定真空計の取り付け用が2つであり、残りのポートには排気装置につながる排気用バルブが取り付けられている。

排気用バルブは、Fig.2に示すようにフレキシブルチューブによって排気装置に接続されている。排気装置は粗引き用のロータリーポンプと超高真空用のターボ分子ポンプからなる。ロータリーポンプは回転式であり、シリンダとローターとの間の空間が時間的に変化することを利用して排気を行うものである(堀越, 1983)。一方、ターボ分子ポンプは円板に斜めにスリットを切った回転翼と、それとほぼ同じ形状で、スリットの傾きが回転翼とは



Fig.1 Photograph of the vacuum chamber.

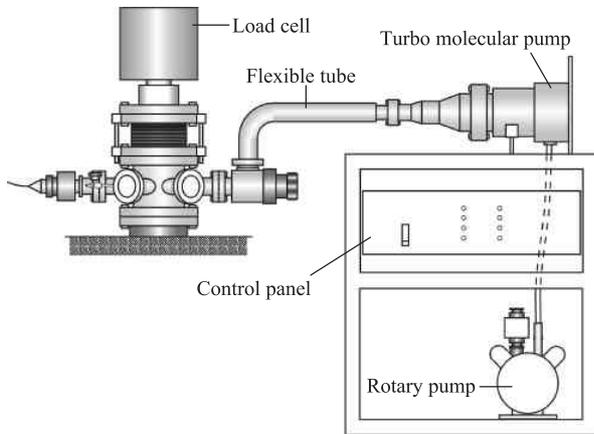


Fig.2 Schematic diagram of the evacuation system linked to the chamber.

Table 1 Specifications of the rotary pump and turbo molecular pump.

Rotary pump	
Type	2010
Pumping speed	170 l/sec
Ultimate pressure	1.0×10^{-2} Pa
Rotational speed	1800 rpm
Turbo molecular pump	
Type	H250M
Pumping speed	N ₂ 285 l/sec H ₂ 230 l/sec
Ultimate pressure	1.0×10^{-8} Pa
Maximum compression ratio	N ₂ 1.0×10^7 H ₂ 1.2×10^3
Rotational speed	51600 rpm

反対の固定翼とが、交互に配置された構造で、回転翼は約 52,000 rpm で回転し、分子は翼の隙間を通して排気される。したがって、油蒸気等のような分子量の大きいガスに対する圧縮比が大きく清浄な真空を得るのに適している(堀越, 1983)。なお、これらの性能を示すと Table 1 のようである。

用いた真空計は Fig.3 に示すように、低真空測定用のピラニー真空計(エドワード製:測定範囲 $10^5 \sim 10^0$ Pa)と高真空測定用のペニング真空計(エドワード製:測定範囲 $10^0 \sim 10^{-8}$ Pa)である。ピラニーおよびペニング真空計で測定されたチェンバーの内部圧力はコントローラを通して電圧として出力される。

実験に用いた供試体は熊本安山岩である。造岩鉱物は斜長石が 50 ~ 60%、輝石および角閃石が 2 ~ 3%、その他の石基で構成され、空隙率は約 7% である。熊本安山岩はほぼ等方均質であるので(Obara et al., 1992)、岩石ブロックからのコアボーリングは任意の方向に行った。採取したコアは、端面の仕上げ精度を 1/100 mm 以下で、1軸圧縮試験用は直径 $D=35$ mm、長さ $L=70$ mm に、圧裂試験用は直径 $D=35$ mm、長さ $L=20$ mm に成形し、供試体として使用した。

岩石の周辺環境の影響を検討するためには、供試体内の水分を取り除く必要がある。そこで、通常の乾燥炉では 110℃ であるが、供試体内部の間隙水を完全に取り除くために、約 197℃ の炉の中で供試体を強制乾燥させた。1軸圧縮試験用供試体の乾燥途中の単位体積重量 γ および弾性波速度 V_p の変化を示すと Fig.4 のようであり、乾燥開始から一定時間おきに供試体を炉から取り出して測定したものである。図の横軸は経過時間、縦軸は γ および V_p であり、乾燥炉に入れる前の測定値を 1 日目にプロットしている。乾燥炉に入れて 1 日程度で、両者の測定値はほぼ一定となったが、供試体内部の水分除去の信頼性を高めるために 1 軸圧縮試験用供

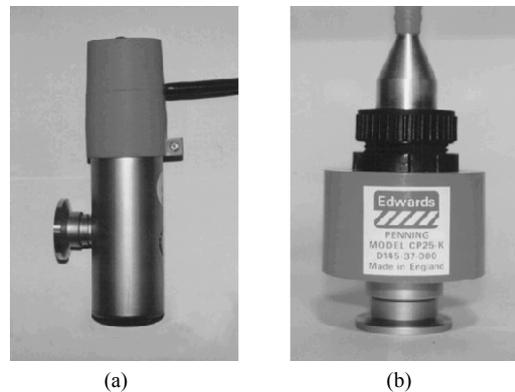


Fig.3 Photographs of the pressure gages. (a) pirani vacuum gage, (b) penning vacuum gage.

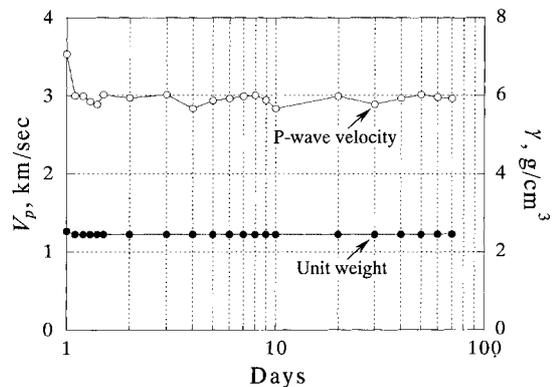


Fig.4 Changes of P-wave velocity and unit weight of the specimen during drying.

試体は約 80 日間炉乾燥した後炉から取り出し、実験直前までデシケータ内で保存した。なお、圧裂試験用供試体は、1 軸圧縮試験用供試体の体積に比較して小さいため、強制乾燥期間は 30 日とした。

3. 実験方法

1 軸圧縮試験および圧裂試験におけるチェンバー内での供試体の設置状態を Fig.5 に示す。両実験ともに、チェンバーは材料試験機にセットされ、材料試験機でベローズ付きフランジを上下に押すことにより、供試体に荷重される。1 軸圧縮試験では、供試体は上下の荷重棒の間に直接置かれる。一方、圧裂試験では、内部に圧裂用治具が置かれ、それに供試体が設置される。なお、圧裂用治具は ISRM の指針 (ISRM, 1978) に従ったものである。

実験は、チェンバー内の大気環境を排気した後、新たな環境を作り出し、一定圧力の非大気環境下で行われた。本実験で用いた環境は、メタノール、エタノール、アセトンの有機蒸気環境、アルゴン、窒素、酸素の無機ガス環境および水蒸気環境である。

実験中のチェンバー内の圧力変化の一例を Fig.6 に示す。まず、大気圧 (10^5 Pa) においてチェンバー内に供試体をセットし、ロータリーポンプを起動すると (図中 a)、チェンバー内圧力 p は減少する。次に、 p が約 10^0 Pa になったことを確認してターボ分子ポンプを起動させると (図中 b)、 p はさらに減少する。 p が 10^{-3} Pa 以下まで減少したことを確認した後、排気用バルブを閉じると同時にガス導入バルブより環境媒質をチェンバー内に吸入させる (図中 c)。このとき p は増加するが、供試体と荷重棒の接触状態が変化しないように注意し、この後 p を 10^3 Pa として一定に保つ

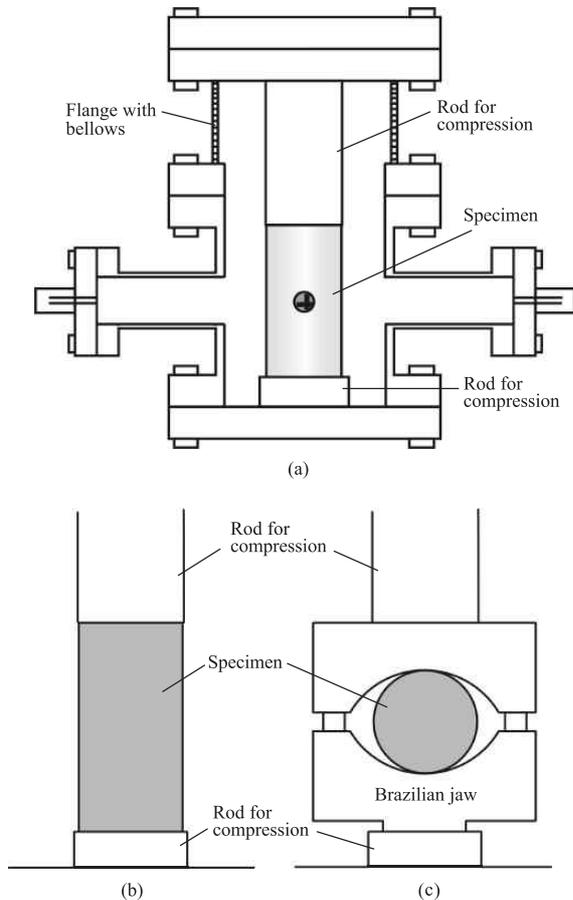


Fig.5 Schematic diagram of the set up of the specimen. (a) Cross section of the chamber, (b) Uniaxial compression test, (c) Brazilian test.

(図中 d)。この操作によりチェンバー内はほぼ完全に所定の環境に置き換えられたと考えられる。この状態を約 6 時間保持した後、1 軸圧縮試験および圧裂試験を行った (図中 e)。本実験では、チェンバー内の圧力を 10^{-3} Pa にした後に新しい環境を作り出してあり、完全とは言えないが、実験前のチェンバー内の大気中の水分は十分取り除かれたものと考えられる。

1 軸圧縮試験および圧裂試験にはそれぞれ容量 500 kN および 100 kN のサーボコントロール材料試験機を使用した。荷重は変位制御で行った。

なお、実験結果を示す場合、1 軸圧縮試験においては、材料試験機のロードセルを用いて荷重を測定し、それを供試体の断面積で除して応力とした。また、供試体の $L/2$ の位置に、ゲージ長 5 mm のクロスゲージを 2 枚、互いに向かい合うように円周表面に貼り付け、対応するひずみゲージの値を平均して軸ひずみおよび横ひずみとした。一方、圧裂試験においては、荷重 P を測定し、 $2P/\pi DL$ に代入して引張応力を算定した。また、変位は材料試験機の変位計を用い、荷重軸方向の供試体の直径変位を測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 1 軸圧縮試験

有機蒸気と無機ガスおよび水蒸気環境下における 1 軸圧縮試験における応力・ひずみ線を示すと Fig.7 のようである。試験は各環境下で 2 ~ 3 個の供試体を用いて実施し、図には各環境下の 1

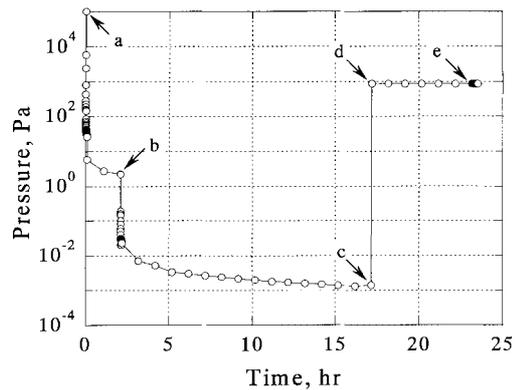


Fig.6 Change of the pressure in the chamber during the test. a: starting of rotary pump, b: starting of turbo molecular pump, c: injection of vapor or gas, d: keeping the pressure, e: starting of the test.

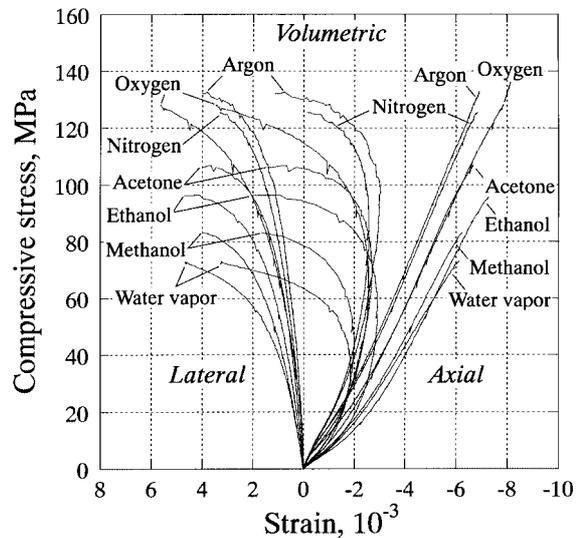


Fig.7 Axial, lateral and volumetric curves of uniaxial compression test in each environment.

つの供試体の結果を合わせて描いている。また、試験条件と試験結果を Table 2 に示している。試験におけるチェンバー内の圧力は 10^3 Pa であり、ひずみ速度は $5.6 \sim 14.1 \times 10^{-6}$ である。環境にかかわらず軸ひずみは応力レベルが低いと下に凸の曲線を描き、応力が大きくなるとほぼ線形に挙動し、破壊直前で上に凸の曲線となっている。しかし、線形部分の直線の傾きや破壊強度が環境によって異なっていることがわかる。

そこで、破壊強度の 50% の応力における接線ヤング率 E およびポアソン比 ν を環境ごとにプロットすると Fig.8 のようである。ヤング率は $15 \sim 23$ GPa であるが、無機ガス環境下のヤング率は水蒸気や有機蒸気のそれに比較して 1.2 ~ 1.5 倍になっている。一方、ポアソン比は環境にかかわらずほぼ一定と考えられ、その平均は約 0.19 である。

次に、1 軸圧縮強度 S_c について同様にプロットすると Fig.9 の

Table 2 Results of uniaxial compression test.

	Strain rate ($10^{-6}/\text{sec}$)	Uniaxial Compressive strength (MPa)	E (GPa)	ν	Environment
1	10.3	73.0	14.5	0.23	Water vapor
2	6.8	80.6	17.0	0.18	
3	14.1	83.8	16.8	0.24	Methanol vapor
4	13.5	85.2	16.8	0.19	
5	10.4	86.8	15.3	0.21	Ethanol vapor
6	13.4	96.6	17.9	0.18	
7	6.3	98.5	18.2	0.19	Acetone vapor
8	9.2	106.8	19.4	0.17	
9	6.3	128.6	19.7	0.18	Argon
10	6.8	132.7	21.3	0.16	
11	6.9	133.8	20.9	0.17	
12	6.3	113.2	16.9	0.14	Nitrogen
13	6.0	125.4	21.4	0.18	
14	6.0	137.3	22.7	0.17	
15	6.8	130.3	18.4	0.19	Oxygen
16	6.6	130.1	19.5	0.21	
17	5.6	132.1	19.3	0.17	

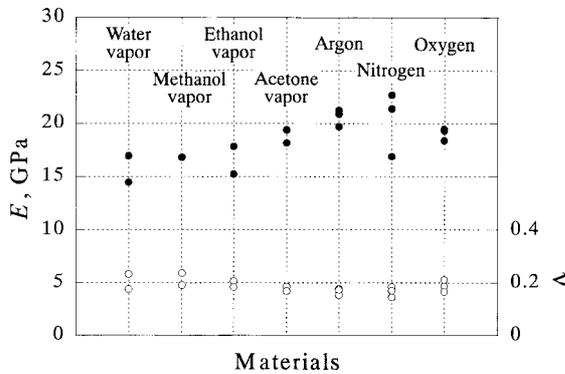


Fig.8 Comparison of Young's modulus and Poisson's ratio in each environment.

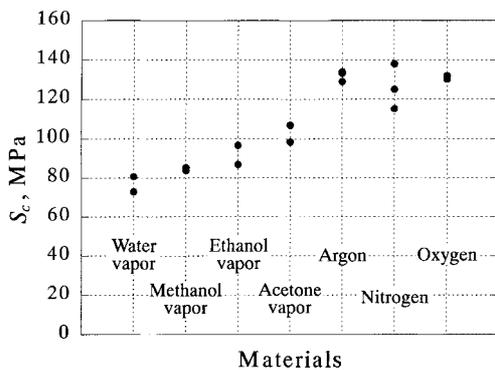


Fig.9 Comparison of the uniaxial compressive strength in each environment.

ようである。水蒸気環境下における 1 軸圧縮強度の平均値は 77 MPa であり、メタノール、エタノールおよびアセトンの有機蒸気環境下における 1 軸圧縮強度の平均値は 85 MPa, 92 MPa および 103 MPa であり、順に大きくなっている。一方、アルゴン、窒素および酸素の無機ガス環境下における 1 軸圧縮強度の平均値は 129 MPa であり、窒素環境でのそれはわずかにバラツキがあるものの、平均 125 MPa であり、3 つの無機ガス環境下における 1 軸圧縮強度はほぼ同様と見なすことができる。したがって、強度の無機ガス環境依存特性はないと考えられる。 S_c の傾向は Fig.8 に示したヤング率の傾向とよく似ている。しかし、無機ガス環境下における 1 軸圧縮強度の値は、使用した環境の中で最も小さな強度を示した水蒸気環境下のその約 1.7 倍と大きい。

4・2 圧裂試験

有機蒸気と無機ガスおよび水蒸気環境下における圧裂試験における応力・変位線を示すと Fig.10 のようである。試験は各環境下で 2 ~ 4 個の供試体を用いて実施し、図には各環境下の 1 つ供試体の結果を合わせて描いている。また、得られた引張強度を Table 3 に示している。すべての試験において、チェンバー内の圧力は 10^3 Pa であり、荷重の変位速度は、水蒸気環境下で、 10^{-3} および約 10^{-5} mm/sec、有機蒸気環境下で 5×10^{-5} mm/sec であり、無機

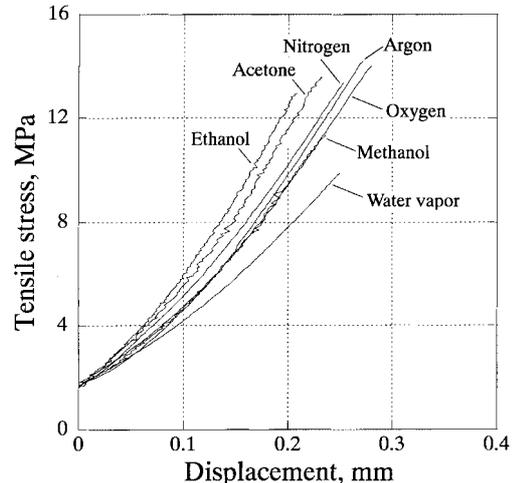


Fig.10 Stress-displacement curves of Brazilian test in each environment.

Table 3 Results of Brazilian test.

	Loading rate (mm/sec)	Tensile strength (MPa)	Environment
1	1.0×10^{-3}	8.3	Water vapor
2	1.0×10^{-3}	8.4	
3	1.0×10^{-3}	9.9	
4	1.0×10^{-3}	11.0	
5	4.6×10^{-5}	8.4	
6	4.6×10^{-5}	8.5	
7	4.6×10^{-5}	8.6	
8	4.6×10^{-5}	8.6	
9	4.9×10^{-5}	11.3	Methanol vapor
10	4.8×10^{-5}	11.9	
11	4.9×10^{-5}	12.9	Ethanol vapor
12	4.8×10^{-5}	13.1	
13	4.9×10^{-5}	12.5	Acetone vapor
14	4.9×10^{-5}	13.6	
15	1.0×10^{-3}	13.2	Argon
16	1.0×10^{-3}	14.2	
17	1.0×10^{-3}	14.7	
18	1.0×10^{-3}	12.5	Nitrogen
19	1.0×10^{-3}	13.4	
20	1.0×10^{-3}	13.8	
21	1.0×10^{-3}	12.9	Oxygen
22	1.0×10^{-3}	14.0	
23	1.0×10^{-3}	15.3	

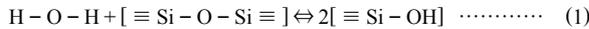
ガス環境下では 10^{-3} mm/sec である。チェンバー内の圧力は 10^3 Pa であるので、試験開始時には大気圧との差圧分の応力が供試体に作用している。そこで、チェンバーの寸法を考慮して差圧に対応する荷重を求めて供試体に作用している引張応力を算定すると約 1.7 MPa であったので、Fig.10 での応力は変位が 0 のときにこの値となっている。また、これらの曲線の中で最も傾きの小さいものは水蒸気環境下のそれであり、他の環境下における曲線の傾きには大差は見られない。

次に、各供試体の引張強度 S_t を環境ごとにまとめて比較すると Fig.11 のようである。環境ごとに結果はばらついているが、水蒸気環境下の結果をみると、変位速度が小さいと強度もわずかに小さくなっているようである。しかし、これらの値に顕著な差は見られず、その平均値は 9.0 MPa と他の環境下のそれに比較して最も小さい。また、メタノール、エタノール、アセトンの有機蒸気環境下における平均引張強度はそれぞれ 11.7 MPa, 13.1 MPa, 13.1 MPa である。これらの実験の変位速度と同じ水蒸気環境下の強度を比較すると約 1.3 ~ 1.5 倍と大きくなっている。さらに、アルゴン、窒素、酸素の無機ガス環境下における平均引張強度はそれぞれ 14.0 MPa, 13.2 MPa, 14.1 MPa である。これらの実験の変位速度は 10^{-3} mm/sec であるが、 10^{-5} mm/sec になると強度はわずかに減少すると考えられる。このことを考慮しても水蒸気環境を除いた各環境での引張強度に大きな差異は見られない。

なお、載荷のひずみ速度あるいは変位速度が岩石強度に及ぼす影響については別の機会に発表する予定である。

5. 考 察

岩石のき裂の緩進展現象を起こす原因の1つは応力腐食であり、次式で示すような岩石の SiO_2 と H_2O との化学反応と考えられている (Michalske and Freiman, 1982)。

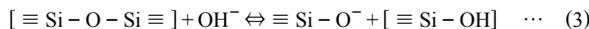


この反応は一般には標準状態では起こらないが、応力が集中しているき裂の先端のように、エネルギー状態が高い場所で発生する。

き裂の進展速度は次式で示すように、環境内に存在する水酸化イオン OH^- の濃度に依存しており、濃度が高いほどき裂進展速度が大きい (Wiederhorn, 1972)。

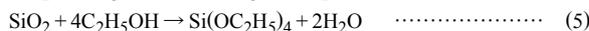
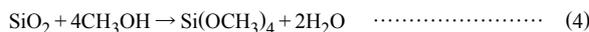
$$v^* = \frac{kT}{h} [\text{OH}^-]^n [\text{C}] \exp(-\Delta G^\ddagger / RT) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 h はプランク定数、 $[\text{OH}^-]$ は水酸化イオンの濃度、 n は化学反応の次数、 $[\text{C}]$ は $\text{Si}-\text{O}$ の有効濃度、 ΔG^\ddagger は自由エネルギーの変化量である。また、 OH^- と $\text{Si}-\text{O}$ との反応は次のような化学反応を起こし、応力腐食が発生する (Charles, 1958)。



本研究で使用した環境物質は、アルゴン、窒素、酸素の無機ガス、メタノール、エタノール、アセトンの有機蒸気および水蒸気であるが、この中で OH^- を持つ環境は水蒸気環境、メタノールおよびエタノール蒸気環境であり、これ以外の環境では応力腐食は発生しないと考えられる。

さて、メタノール (CH_3OH) およびエタノール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) と SiO_2 との反応は次式で表される。



この反応は高温における反応であり、標準状態では発生しない (Iler, 1979)。しかし、エネルギー状態の高いき裂先端では、式(1)と同様に、上記の反応が発生すると考えられる。この反応では、メタノールおよびエタノール分子に含まれる OH^- が直接 SiO_2 と結びつくのではなく、水が生成され、この水が式(1)に従って応

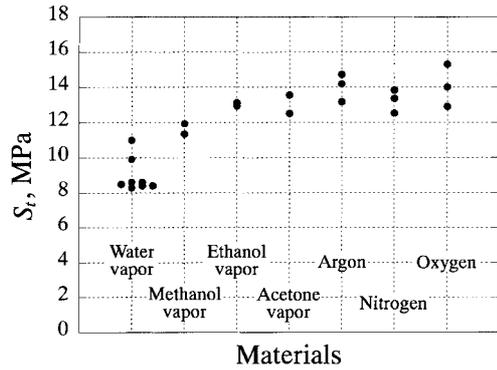


Fig.11 Comparison of the tensile strength in each environment.

力腐食を起こすと考えられる。また、高温においてメタノールに溶解する SiO_2 の量はエタノールに溶解する量の約 10 倍であることが知られており (Iler, 1979)、 SiO_2 とメタノールが結びついて発生する水の OH^- の濃度はメタノール蒸気環境の方が多いと考えられる。

これらを総合すると、応力腐食の程度は、水蒸気環境で最も大きく、次いで、メタノール、エタノール環境の順に小さくなり、アセトン、アルゴン、窒素、酸素環境では応力腐食は発生しないと考えることができる。

そこで、実験結果を見てみると、熊本安山岩の 1 軸圧縮強度および引張強度は共に水蒸気環境で最も小さく、次いでメタノール、エタノール環境の順に大きくなり、アセトン、アルゴン、窒素、酸素環境でのそれらは環境に依存していない。この結果は、上記の議論に矛盾せず、応力腐食は式(1)で表される化学反応が主たる原因であることを示している。すなわち、応力腐食を最も促進させる物質は水であると結論される。しかし、各環境におけるヤング率の値に大きな差異は見られず、応力腐食がヤング率に及ぼす影響は強度に比較して小さいと言える。

なお、アルコール環境における実験結果は、環境中の OH^- の濃度によって応力腐食の程度が異なることを示している。したがって、環境中の OH^- の制御を行った実験を実施することで、その影響を明らかにすることが可能であると考えられる。この実験結果については次の機会に公表する予定である。

6. 結 言

非大気環境下における熊本安山岩の強度特性を明らかにするために、メタノール、エタノール、アセトンの有機蒸気とアルゴン、窒素、酸素の無機ガスおよび水蒸気環境下における 1 軸圧縮試験および圧裂試験を行った。その結果を次のようにまとめる。

(1) 1 軸圧縮強度は水蒸気環境下で最も小さく、メタノール、エタノールおよびアセトンの有機蒸気環境の順に大きくなり、アルゴン、窒素および酸素の無機ガス環境下においては、水蒸気環境下のそれの約 1.7 倍であることを明らかにした。また、無機ガス環境下における 1 軸圧縮強度はほぼ同様と見なすことができ、強度の無機ガス環境依存特性はないことを示した。

(2) 水蒸気環境下の引張強度は他の環境下のそれに比較して最も小さい。また、メタノール環境での引張強度がわずかに小さいものの、エタノール、アセトンの有機蒸気環境およびアルゴン、窒素、酸素の無機ガス環境におけるそれは環境ごとに大きな差は見られないことを明らかにした。

(3) 強度の環境依存性は岩石の周辺環境に存在する H_2O と岩石の SiO_2 との化学反応である応力腐食に関係していると考え、応力腐食の程度は、水蒸気環境で最も大きく、次いで、メタノール、

エタノール環境の順に小さくなり、アセトン、アルゴン、窒素、酸素環境では応力腐食は発生しないと論じた。また、実験より得られた結果は、上記の議論に矛盾しないことを示し、応力腐食を最も促進させる物質は水であると結論した。

引用文献

- Atkinson, O. L.(1980) : Tectonophys., Vol. 65, p. 281 - 290
Atkinson, O. L. and Meredith, P. G.(1987) : Fracture Mechanics of Rock(Atkinson, O. L., eds.), Academic Press Ltd., p. 111 - 166
Charles, R. J.(1958) : J. Appl. Phys., Vol. 29, p. 1549 - 1560
Grenet, L.(1899) : Bull. Soc. Enc. Industr. Nat. Paris(Ser. 5), Vol. 4, p. 838 - 848
堀越源一(1983) : 真空技術, 東京大学出版会, 192p.
Iler, R. K.(1979) : The chemistry of silica, Wiley-Interscience, 801p.
ISRM(1978) : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 15, p. 99 - 103
Krokosky, E. M. and Husak, A.(1968) : J. Geophys. Res., Vol. 73, p. 2237 - 2247
Martin, R. J., III(1972) : J. Geophys. Res., Vol. 77, p. 1406 - 1419
Meredith, P. G. and Atkinson, O. L.(1983) : Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol. 75, p. 1 - 21
Michalske, T. A. and Freiman, S. W.(1982) : Nature, Vol. 295, p. 511 - 512
日本機械学会編(1989) : 岩石破壊力学とその応用, コロナ社, 166p.
Obara, Y., Jeong, H. S., Hirata, A., Sato, A. and Sugawara, K.(2000) : Proc. GeoEng2000, CD-ROM\paper\pdf\0536.pdf, Australia
Obara, Y., Sakaguchi, K., Nakayama, T. and Sugawara, K.(1992) : Proc. ISRM Symposium : Eurock'92, p. 7 - 12
Obara, Y., Sugawara, K. and Tokashiki, T.(1996a) : Proc. 2nd NARMS, Balkema, p. 1337 - 1342
Obara, Y., Hirokawa, H. and Sugawara, K.(1996b) : Proc. Korea-Japan Joint Symposium, Seoul, p. 109 - 114
Sano, O., Ito, I. And Terada, M.(1981) : J. Geophys. Res., Vol. 86, p. 9299 - 9311
佐野 修・工藤洋三・古川浩平・中川浩二・水田義明(1989) : 材料, Vol. 38, p. 228 - 234
Scholz, C. H.(1972) : J. Geophys. Res., Vol. 77, p. 2104 - 2114
Waza, T., Kurita, K. and Mizutani, H.(1980) : Tectonophys., Vol. 67, p. 25 - 34
Wiederhorn, S. M.(1967) : J. Am. Ceram. Soc., Vol. 50, p. 407 - 414
Wiederhorn, S. M.(1972) : J. Am. Ceram. Soc., Vol. 55, p. 81 - 85