

1. はじめに 低温液化ガスの岩盤内貯蔵に関する研究の中で、岩石や岩盤の線膨張ひずみの測定は、周辺岩盤の安定性の評価を行う上で重要である。しかし、現在低温下における岩石の線膨張ひずみの測定例は数少なく、測定されている例においては、測定方法により得られる結果が異なっている。^{1) 2) 3)} 従来の測定では長さ20～50mm、直径5～10mmの試料が多く用いられているが、一般に試料寸法が小さいと一定の含水状態を保つことがむずかしく、間隙水の影響を調べるのは困難である。測定精度や寸法効果の影響を考えた場合も、ある程度寸法の大きい試料を用いた方が、岩石の線膨張特性の測定として妥当な結果が得られるものと期待できる。今回は稲田花崗岩を用い、長さ200mm、直径20mmの従来よりは大きい円柱試料により、低温下（-110℃～室温）の線膨張ひずみの測定を行い、含水状態の違いによる影響を調べた。また、低温下の岩石内部に発生する微小クラックが、岩石の線膨張ひずみに及ぼす影響についても検討をおこなったので、その結果を報告する。

2. 実験方法 今回の実験に使用した線膨張計は押棒式のものであり、その測定温度範囲は-155℃から1000℃である。試料の寸法は長さ約200mm、100mm、50mmの3種類、それぞれ直径30mm以下の十分な大きさを持った試料で測定が可能なのである。試料には稲田花崗岩を用い、寸法は長さ約200mm、直径約20mmに整形し、含水状態の影響を調べるため乾燥状態と含水飽和状態の試料で測定を行なった。試料の状態は表-1に示す通りである。測定中、含水飽和状態を維持するため、試料はテフロンシートで包んだ。降温・昇温速度は30℃/hで、室温から-110℃まで冷却しながら線膨張ひずみを測定し、その後再び室温まで戻しながら、そのヒステリシスを調べた。なお、10℃/hのさらにゆっくりとした温度変化で測定を行なった結果、30℃/hのものとは一致した結果が得られ、30℃/hでも降温・昇温速度の影響がないことを確認した。測定結果には、低温下測定中の装置のドリフトと、押棒等に用いられている石英の熱特性の補正を行い、室温の変化による影響は小さいことが確認されたので、これは無視した。

3. 実験結果 実験より得られた稲田花崗岩の温度-線膨張ひずみの関係を、図-1、2に示す。含水飽和状態と乾燥状態の測定結果には、明らかな違いが見られ、含水飽和状態のものでは、間隙水が影響を及ぼしていることがわかる。今回得られた結果から、温度-線膨張ひずみ関係が直線的な部分は1次関数で、非線形な部分は3次関数で近似し、それを微分することにより線膨張係数をもとめた。その結果を図-3、4に示す。これらの結果から次の事がわかる。

3-1. 含水飽和状態； 降温過程において、室温から0℃付近まで温度-線膨張ひずみの関係がほぼ直線的であり、温度低下により収縮ひずみが発生し、線膨張係数は $5.6 \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$ であった。0℃から-10℃程度まで、間隙水の凍結膨張の影響により不連続な膨張性のひずみが見られる。この範囲の温度低下に伴った線膨張ひずみ増分は、 1.0×10^{-4} であった。その後、約-10℃から-60℃の範囲では、温度と線膨張ひずみの関係が再び直線的となり、温度低下に伴い収縮ひずみが発生する。この温度範囲における線膨張係数は $6.2 \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$ を示し、凍結膨張を示す以前の値よりも多少大きくなっている。さらに低温域の-60℃から-110℃の温度範囲では、温度低下に伴って線膨張係数が小さくなるような非線形性を示し、平均線膨張係数は $3.5 \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$ であった。昇温過程では、-60℃以下における温度-線膨張ひずみ関係の非線形性が小さく現れ、平均線膨張係数は $4.8 \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$ と降温時よりも大きな値を示した。また全実験温度範囲のひずみが、同一

表 1 岩石試料（稲田花崗岩）

試料番号	直径 (mm)	長さ (mm)	単位体積重量 (kg/cm ³)	有効間隙率 (%)	測定時の 含水状態
No. 3	18.39	200.05	2.640	0.82	飽和
No. 4	19.79	200.20	2.633	0.39	乾燥

温度における降温時のひずみよりも膨張側に発生し、室温まで戻した時の残留ひずみは、膨張側に 7.3×10^{-5} であった。

3-2. 乾燥状態; 全実験温度範囲の降温・昇温過程とも、温度-線膨張ひずみ関係が非線形で、全体的に温度低下に伴って線膨張係数が小さくなる傾向を示す。また含水飽和状態と異なって0℃付近でのひずみの不連続な発生は見られない。ただし、昇温時のひずみが同一温度における降温時のひずみよりも膨張側に発生しているのは、含水飽和状態と同様である。

4. 考察 今回の測定とは別に、低温下の岩石内部で発生する微小クラックの発生頻度を調べるため、AEの計測実験を実施し、その結果を図-1, 2に示した。ここで用いたAEセンサーは共振周波数 150KHz のものであり、図には冷却過程で発生したAEのイベント累積数を示した。

降温過程では、含水飽和状態、乾燥状態ともAEイベント累積数の増加にともなう、見かけ上線膨張係数が小さくなっていくことがわかる。このことから線膨張ひずみの非線形性は、内部で発生する微小クラックによる試料全体の膨張と、鉱物粒子の収縮の相互作用として現れるものと推測される。微小クラックの発生の原因としては、氷と鉱物粒子のあるいは鉱物粒子間の線膨張係数の違いによるものが考えられる。

昇温過程では、AE計測は行っていないが、降温時に示したひずみの非線形性が小さくなっていることから、微小クラックの閉合よりも鉱物粒子の膨張作用が卓越しているものと考えられる。また含水飽和状態と乾燥状態の違いとして、含水飽和状態の方が-10℃から-60℃の範囲で、線膨張係数が大きな値を示している。これは、いったん岩石試料全体を膨張させた間隙中の氷(鉱物粒子よりも線膨張係数が1オーダー大きい)が、鉱物粒子よりも急激に収縮するためと考えられる。

5. おわりに 今回の測定で、寸法の大きい試料を用いることにより、含水状態の岩石の低温下線膨張ひずみの測定が可能となり、その結果稲田花崗岩の線膨張ひずみは含水状態により異なった挙動を示し、測定中の含水状態の制御が重要であることがわかった。また、温度変化によって発生する微小クラックが、岩石の線膨張特性に影響を与えることもわかった。

参考文献

- 1) M.Mellor: "Phase Composition of Pore Water in Cold Rocks" CRRIL Research Report 292 (1970)
- 2) 岡林, 他: "低温液化ガスの岩盤内貯蔵に関する研究(その3)" 鹿島建設技術研究所年報, 第28号(1980) PP 61-66
- 3) 江原, 他: "低温下の岩石の熱膨張について" 材料, 第32巻, 第363号 PP 111-117

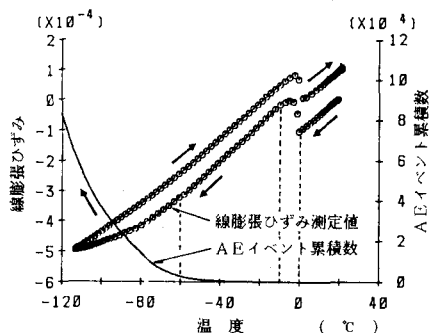


図-1 温度-線膨張ひずみ-AEイベント累積数の関係
— 含水飽和状態 —

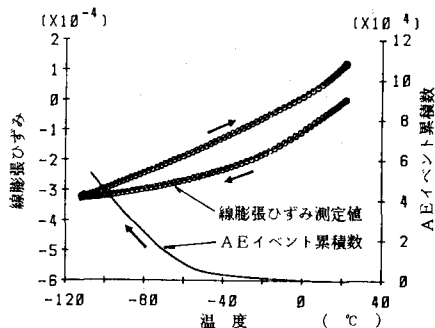


図-2 温度-線膨張ひずみ-AEイベント累積数の関係
— 乾燥状態 —

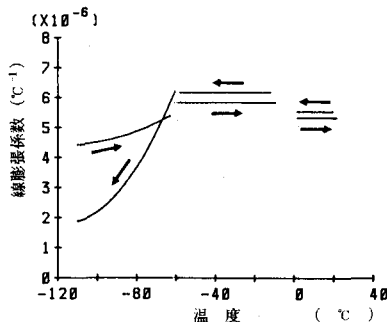


図-3 温度と線膨張係数の関係
— 含水飽和状態 —

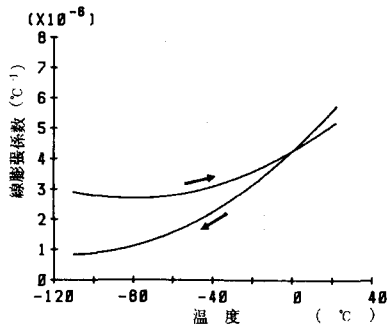


図-4 温度と線膨張係数の関係
— 乾燥状態 —