

## 論文の内容の要旨

論文題目

Experimental study of the shear failure process of rock  
in seismogenic environments: Formulation of shear failure law

(地震発生環境条件下における岩石のせん断破損過程に関する実験的研究)

氏名

加藤愛太郎

1. はじめに 地震発生過程は、断層のせん断破損構成則(破壊物理法則)によって記述される。近年の地震波形解析の進展により、断層面上での強度分布は非常に不均一であることがわかってきた。つまり、断層面上では既存の弱面上でのすべり破損過程と既存の弱面を含まない岩石の破損過程の両者が共存していると考えられる。しかしながら、岩石の破損過程に関する研究はほとんど行なわれておらず、岩石の破損過程の性質を地震発生層に相当する温度・圧力条件下で調べることは、地震の発生過程を理解する上で大変重要である。本研究では、せん断破損構成則として岩石の破損過程が記述可能なすべり変位量依存性構成則に基づき、地震発生環境条件下における構成則パラメータ(図 1)の温度・有効法線応力・すべり速度依存性を解明することを目的として、以下の研究を行なった。試料としてつくば産花崗岩(長さ40mm、直径16mm)を用いた。空隙率は0.93%、粒径は0.5mm~2mmである。

2. 構成則パラメータの温度・有効法線応力依存性 地震発生層では、温度、封圧、間隙水圧が常温・常圧下と比べて大きく異なっており、せん断破損構成則を規定するパラメータ( $\tau_p$ ,  $\Delta\tau_b$ ,  $D_c$ , 図1)は、温度と有効法線応力(封圧、間隙水圧)によって変化すると考えられる。このような効果を定量的に把握することは地震発生過程を理解する上で必要不可欠である。歪み速度を $10^{-5}/s$ に固定し、温度480℃以下、封圧480MPa以下、間隙水圧400MPa以下での様々な温度、有効法線応力(封圧、間隙水圧)条件下で破壊実験を行なった(地殻内の深さ約17kmまでの条件が再現可能)。それぞれの環境条件下で得られた構成曲線をもとに、構成則パラメータの温度・有効法線応

力依存性を定量的に評価した。温度 300°C以下では温度の効果はほとんど現れず、最大せん断強度 $\tau_p$  (図2)は有効法線応力 $\sigma_n^{eff}$ の線形関数として記述でき、破損応力降下量 $\Delta\tau_b$  (図3)と臨界すべり変位量  $D_c$  (図 4)はほぼ一定値になる。一方、温度 300°C以上では、各構成則パラメータは温度と有効法線応力 $\sigma_n^{eff}$ の両者の関数として記述できる。最大せん断強度 $\tau_p$ は、温度 300°C以下における $\sigma_n^{eff}$ との線形関係から期待される値に比べ減少し、 $\sigma_n^{eff}$ が大きい程その減少量は大きい(図2)。破損応力降下量 $\Delta\tau_b$ は温度の増加にともなって減少し、 $\sigma_n^{eff}$ が大きい程より減少する(図3)。臨界すべり変位量  $D_c$ は主に温度の増加にともなって増加し、 $\sigma_n^{eff}$ が大きい程より増加する傾向にある(図4)。破壊実験後の破損面近傍の顕微鏡観察により、温度 300°C以上では黒雲母が顕著に塑性流動しており、同時に石英が若干塑性流動していることを確認した。破損面近傍のほとんどの粒子がクラックにより破碎されており、脆性破壊に若干の塑性流動が混合した結果、上記の様な温度 300°C以上における構成則パラメータの変化が生じたと考えられる。また、乾燥試料を用いた場合には、300°C以上においても強度の減少量は小さく、湿潤試料を用いた場合に比べ強度が大きくなる(図2)。このことは、水により応力腐食などの化学反応が進行することで、乾燥状態にくらべ試料の強度が低下することを示唆する。

典型的な地殻内の温度・圧力・間隙水圧条件(静水圧)下における構成則パラメータ( $\tau_p$ 、 $\Delta\tau_b/D_c$ )の深さ変化を図5に示す。最大せん断強度 $\tau_p$ は、深さが 10km 以浅では深さに対して線形に増加するが、深さ 10km 付近で深さに対する増加率が徐々に減少し、15km以深ではほとんど一定値をとる。この振る舞いは脆性-塑性遷移領域に対応する。 $\Delta\tau_b/D_c$ は深さ 10km 以浅で一定値をとる(図5)。10km 以深では、 $\Delta\tau_b/D_c$ は深さとともに減少し破損過程の安定性が増し、動的な破損過程が発生し難くなる。このことは、地殻内の地震活動の下限が温度 400°C付近(深さ 15km 程度)に相当する要因の一つと考えられる。

**3. 構成則パラメータのすべり速度依存性** 前節において、構成則の温度・有効法線応力依存性に関して定量的な評価をおこなったが、地震発生環境条件下においてすべり速度の変化により構成則の性質がどのような影響を受けるのかに関してはほとんど解明されていない。すべり速度を低下させた場合に、物理化学過程が活性化し構成則パラメータはその影響も受けると予想される。温度・封圧・間隙水圧条件を固定し、歪み速度を  $10^{-5}/s \sim 10^{-7}/s$  の範囲内で変化させ、構成則パラメータのすべり速度依存性を評価した。ただし、歪み速度が  $10^{-7}/s$  の実験では、一回の実験に長時間を要するため試料の弾性変形時(強度の約半分まで)は  $10^{-5}/s$  の歪み速度で変形させた。すべり速度の減少にともなって、最大せん断強度 $\tau_p$  (図6)はすべり速度の対数関数に従いながら減少する。この関係は、乾燥試料を用いた常温下で行なわれた過去の実験でも得られており、クラック先端における応力腐食がその原因だと考えられる。破損応力降下量 $\Delta\tau_b$  (図7)と臨界すべり変位量  $D_c$  (図8)も、すべり速度の減少にともない減少する。しかしながら、本研究の温度・有効法線応力条件下においては、すべり速度依存性は顕著ではなく、温度・有効法線応力にほとんど依存しないことがわかった。応力腐食、破損面の固着や塑性流動が、すべり速度依存性のメカニズムと解

積できる。

4. まとめ 地震発生環境条件下における構成則パラメータの温度・有効法線応力・すべり速度依存性を室内実験を基に定量的に評価し、岩石のせん断破損過程の解明を行なった。間隙流体の存在下におけるせん断破損構成則の温度・有効法線応力・すべり速度依存性を調べた研究は重要な成果であり、地震発生過程をモデリングする上で貴重な拘束条件を与える。

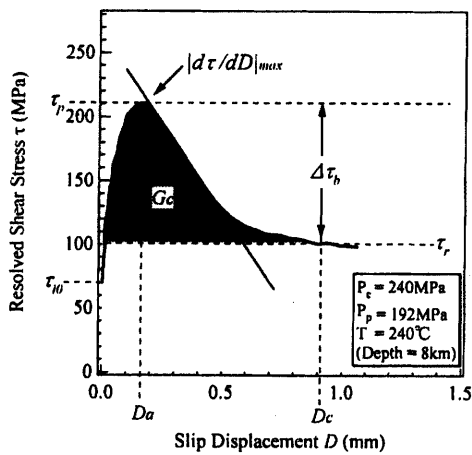


図1. すべり変位量依存性構成則

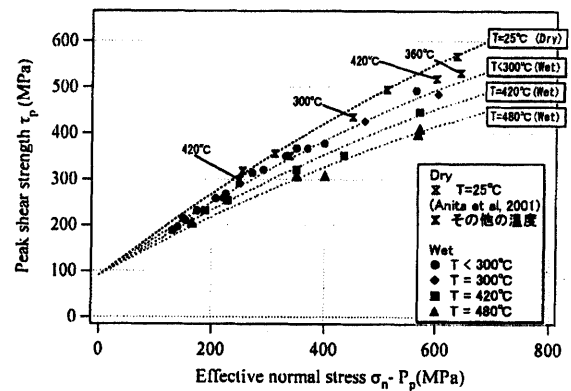


図2. 最大せん断強度 $\tau_p$ と有効法線応力 $\sigma_n^{eff}$ の関係

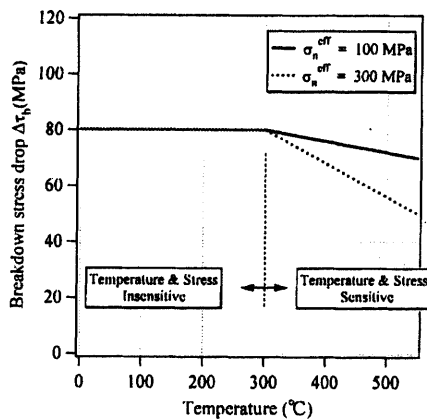


図3. 破損応力降下量 $\Delta\tau_p$ の温度・有効法線応力依存性

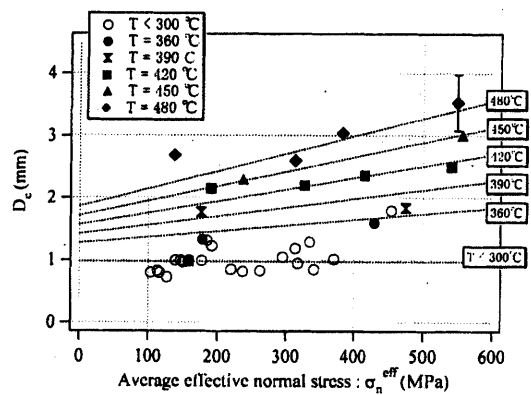


図4. 臨界すべり変位量 $D_c$ の温度・有効法線応力依存性

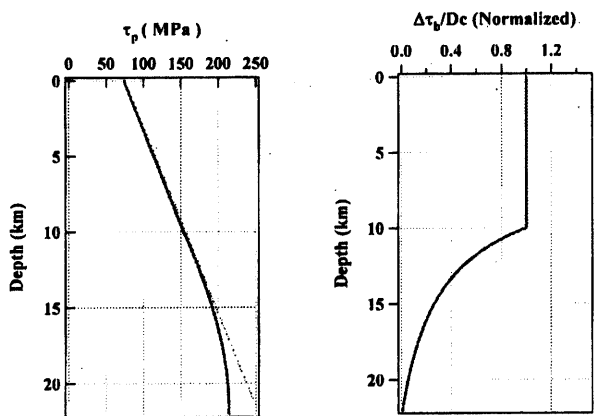


図5. 推定される $\tau_p$  (左) と $\Delta\tau_b/D_c$  (右) の深さ分布

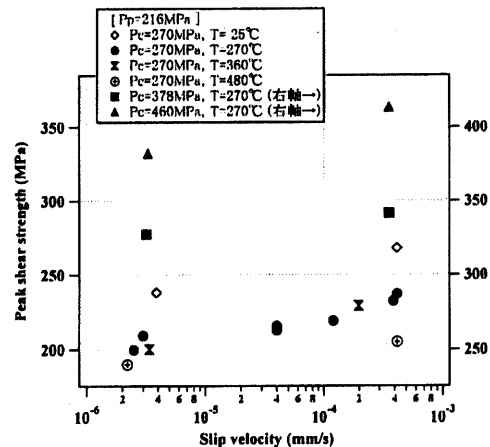


図6. 最大せん断強度 $\tau_p$ のすべり速度依存性

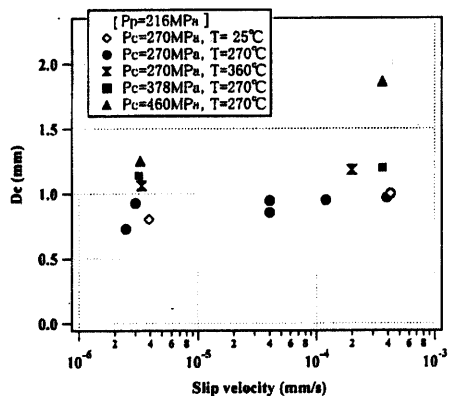


図7. 臨界すべり変位量 $D_c$ のすべり速度依存性

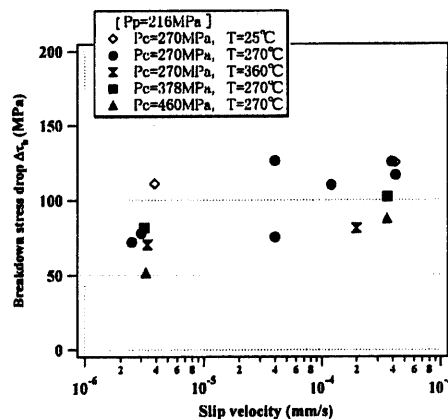


図8. 破損応力降下量 $\Delta\tau_b$ のすべり速度依存性