



准教授 坂口 清敏  
Associate Professor  
Kiyotoshi Sakaguchi

## 地殻環境・エネルギー技術の新展開

### Toward Advanced Environmental Geomechanics and Energy Technology

2018年に当研究室で行った主な研究は以下の通りである。なお、詳細説明は2つの研究に絞る。

- 1) 高温環境下における岩石き裂の間隙水圧誘起すべり特性 (Fig.1)
- 2) 新発想の真三軸試験システムによる400°Cでの稲田花崗岩の水圧破砕時のAEモニタリング (Fig. 2～Fig.5)
- 3) 超臨界地熱環境下における水圧破砕き裂生成に及ぼす岩石の異方性の影響 (Fig.6)
- 4) 超臨界地熱環境下における水圧破砕き裂生成に及ぼす鉱物粒径と注水流量の影響 (Fig.6)

In 2018, our research activities included the following topics:

- 1) The injection-induced slip characteristics of a rock fracture under high temperatures (Fig.1)
- 2) Acoustic-emissions measurements during hydraulic fracturing of Inada granite at 400 °C via the novel true triaxial system (Figs.2-5)
- 3) The influence of rock anisotropy on hydro-fracturing crack formation in a supercritical geothermal environment
- 4) The influence of grain size and injection rate on hydro-fracturing crack formation in a supercritical geothermal environment

#### 高温環境下における岩石き裂の間隙水圧誘起すべり特性

350～400°C以上の深部地殻における断層型貯留層を用いた地熱エネルギー抽出が提案されている。断層型貯留層を利用する場合、地震性すべりよりもむしろ非地震性すべりの発生(誘発)の可能性がある。しかし、非地震性すべりのすべり特性や貯留層の透水性への影響は不明である。本研究では、非地震性すべりの発生条件、すべり特性および透水性への影響を明らかにするために、200～500°Cの条件で、45°の傾斜を持つ引張り裂を有する円柱供試体(Fig.1)を用いて、き裂面に間隙水を注入するすべり実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。1) すべり開始とそれに続くすべりの間に特性に差があること、2) すべり開始時のすべり速度が破面の表面形状に影響されること、3) それに続く安定したすべりのすべり速度は温度が上昇するにつれて低下した。350～500°Cの温度下では、温度が上昇するにつれてすべり開始時の間隙水圧は低下した。したがって、温度が上昇するにつれて、より小さい間隙水圧でより遅いすべり、すなわち、より安定したすべりが起こり得ることが示唆された。すべり実験前後の浸透率の変化は200、250、300°Cで増加し、350°Cでは変化せず、500°Cでは半減した。

#### Injection-induced slip characteristics of a rock fracture under high temperatures

The suggested method of geothermal energy extraction involves using a fracture-type reservoir in deep crust more than 350°C. When using a fracture-type reservoir, there is a possibility of aseismic (rather than seismic) slip. However, the characteristic of aseismic slip, and its influence on permeability, are unknown. Therefore, in this study, to clarify aseismic slip's occurrence conditions, characteristics, and influence on permeability, we conducted an injection-induced slip experiment using a cylindrical specimen with a 45° tilted tensile fracture (Fig.1) at temperatures of 200-500°C. As a result, we clarified the following: (1) There was a difference in characteristics between the start of the slip and the subsequent parts of the slip; (2) the surface shape of the fracture affected the slip velocity at the beginning of the slip; and (3) the velocity of the subsequent steady slip tended to decrease as the temperature increased. In addition, at temperatures under 350 °C, the pore pressure at the beginning of slip decreased as the temperature increased. Therefore, a slower, more stable slip with a smaller pore pressure may occur as the temperature increases. The permeability difference from before to after the slip increased as the temperature increased from 200 to 300°C, remained steady through 350°C, and then decreased by half through 500°C.

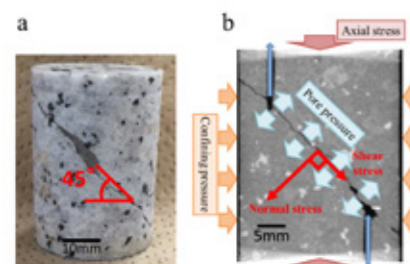


Fig.1 Granite specimen having a tensile fracture (a) and X-ray CT image of the specimen (b).

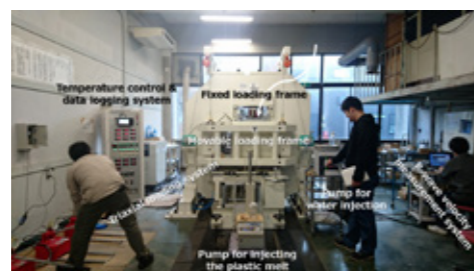


Fig.2 The novel true triaxial system

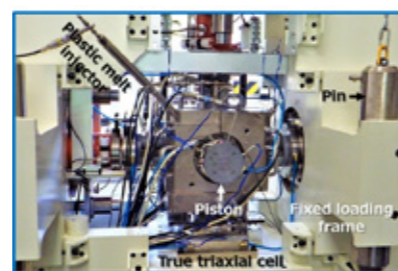


Fig.3 Closeup photo of the true triaxial cell

#### 新発想の真三軸試験システムによる400°Cでの稲田花崗岩の水圧破砕時のAEモニタリング

超臨界地熱開発に関連し、稲田花崗岩の水圧破砕実験を400°Cの温度下で行なった。使用した実験システムは、Watanabe et al. (2017) の概念に基づいて設計した新発想の真三軸試験システム (Fig.2～Fig.4) である。本実験システムでは、シール媒体として高粘度のプラスチック樹脂(ポリエーテルエーテルケトン(PEEK))を使用することにより、一辺100mmの立方体供試体 (Fig.5) に対して、500°Cまでの温度環境下水圧破砕実験を行うことができる。載荷応力は三軸全方向で最大150MPa、間隙圧は最大100MPaまで加えることができる。さらに、この真三軸システムには、3次元P波速度測定システムとAE測定システムを組み込むことができる。また、高粘度プラスチック樹脂用の新しい圧入装置を装備しているため、真三軸システムの使い易さが大幅に向上している。本研究では、本実験システムを用いて、真三軸応力状態で花崗岩の脆性-延性遷移温度にほぼ相当する400°Cで水圧破砕実験を行った。初期応力条件は、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ をそれぞれ40MPa、15MPa、5MPaとした。実験中は、AEの特性の変化もモニタリングした。

得られた主な結果は以下のようである。

- 1) 新発想の真三軸試験システムを用いて400°Cにおける花崗岩の水圧破砕実験に成功した。
- 2) ブレークダウン圧力は初期応力状態に制約され、400°Cの温度環境下の真三軸応力状態では、 $\sigma_2$ と $\sigma_3$ の間の値をとった。このような低いブレークダウン圧力は、温度と共に注入流体(水)の粘度が減少するためである。粘性の低い流体は既存の微小割れ目に浸透することがあるので、水圧破砕によって花崗岩中に密な微小割れ目ネットワークが形成されている可能性がある。
- 3) 花崗岩の水圧破砕時にAEが発生する可能性があることが、400°Cの温度環境下でも検出/捕捉されていることがわかった。
- 4) これらの予備的知見は、超臨界地熱貯留層の設計/管理に有用である。

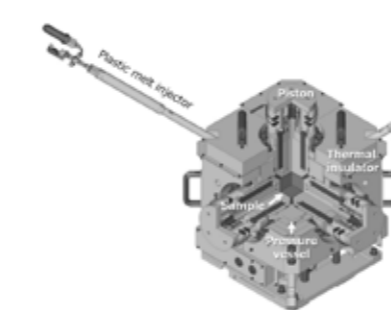


Fig.4 Internal structure of the true triaxial cell

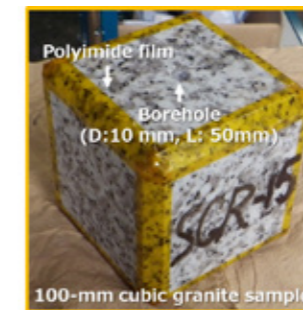


Fig.5 100 mm cubic granite specimen

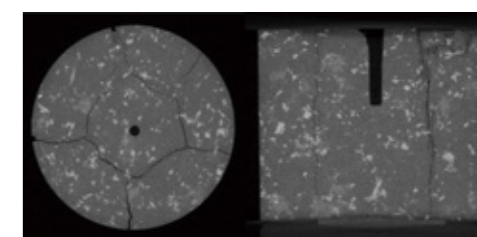


Fig.6 X-ray CT image of the specimen after the experiment

#### AE measurement during the hydraulic fracturing of Inada granite at 400 °C via the novel true triaxial system

We conducted a hydraulic fracturing experiment involving Inada granite at 400°C via the novel true triaxial system (Figs.2-4). This novel true triaxial system is based on the concepts introduced by Watanabe et al. (2017). Through the use of high-viscosity melted plastic (e.g., polyether ether ketone) as the sealing medium, we were able to conduct hydraulic fracturing experiments at temperatures of up to 500°C for a cubic specimen with a side length of 100 mm (Fig.5). We applied loading stresses up to 150 MPa in all directions and pore pressures up to 100 MPa. In addition, this true triaxial system includes a three-dimensional P-wave velocity measurement system and an acoustic-emissions measurement system. When we added a novel injector for the high-viscosity fluid (Figure 1a), the usability of the true triaxial system improved significantly. Through the use of this novel system, we were able to conduct hydraulic fracturing experiments at 400°C, which approximately corresponds to the brittle-ductile transition temperature of granite in its true triaxial stress state. We set the stress states  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , and  $\sigma_3$  to be 40, 15, and 5 MPa, respectively. During the experiment, we also monitored the changes in the acoustic emissions' properties.

The main results are summarized as follows:

- 1) We successfully conducted a hydraulic fracturing experiment on granitic rocks at 400 °C via the novel true triaxial system.
- 2) The initial stress state constrains the breakdown pressure, which is in the range of  $\sigma_2$  to  $\sigma_3$  for the true triaxial stress state at 400°C. This breakdown pressure is so low because the viscosity of the injecting fluid (water) decreases with the temperature increase. Because fluids with low viscosity can infiltrate preexisting microfractures, a densely microfracture network can be formed in the granite as a result of hydraulic fracturing.
- 3) The occurrence of acoustic emissions during the fracturing of the granite could be detected, even at 400 °C.
- 4) These preliminary findings are essential to the design and monitoring of supercritical geothermal reservoirs.