



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

2017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) 東北地方太平洋沖地震前後での地殻応力の増減と余震の相関の実測説明 (Fig.1)
- 2) 高温延性花崗岩の水圧破砕特性と透水性向上に対する水圧刺激の効果 (Fig.2)
- 3) 樹脂メルト式真三軸実験システムを用いた400°C超の花崗岩の水圧破砕とそれに伴う透水性変化 (Fig.3, Fig.4)
- 4) 亜臨界/超臨界地熱貯留層環境下における岩石き裂の間隙水圧誘起すべり挙動 (Fig.5)

In 2017, our research activities were as follows:

- 1) Stress buildup and drop in the inland shallow crust caused by the 2011 Tohoku-oki earthquake events (Fig.1).
- 2) Effect of hydraulic stimulation on hydraulic fracturing characteristics and gain in permeability of high-temperature ductile granite (Fig.2).
- 3) Hydraulic fracturing of granite under the condition of 400°C or higher and its permeability change (Fig.3 and Fig.4).
- 4) Slip behavior induced by pore pressure of rock cracks under subcritical/supercritical geothermal reservoir conditions (Fig.5).

東北地方太平洋沖地震前後での地殻応力の増減と余震との相関

地殻応力は地下で発生する方向性を持った力(圧力)で、場所毎に大きさと方向の異なる三次元的な圧力が同時に作用しており、地震発生のトリガーとなる。本研究では1991年~2016年にかけて岩手県釜石鉱山の地下約300m地点において測定された地殻応力の大きさの変化に着目した。東北沖地震1年後の地殻応力の3成分である最大、中間、最小主応力の大きさは、地震前に比べて2倍~4倍大きくなっているが、徐々に減少して、3年後以降は地震前のレベルに戻っていることがわかった。図1は東北沖地震における5m以上の地震すべりの分布図に三陸沖低地震活動域(SLSR: Sanriku-oki Low-Seismicity Region)を重ねたものである。SLSRはいわゆる地震の空白域と言える場所である。東北沖地震によるすべりの小さな領域(5m未満のすべり)は釜石沖にコの字型に分布している。また、この領域はSLSRに含まれている。釜石地域は東北沖地震のすべり域の西側外縁に位置しているが、本震によるすべりは釜石沖のコの字型の領域で止まったと推察される。釜石沖で発生した地震の規模と発生頻度を調べると、東北沖地震前(1955年~2010年)は、約5.5年おきにマグニチュード4.7~5.1の地震が発生していた。一方、東北沖

Stress buildup and drop in the inland shallow crust caused by the 2011 Tohoku-oki earthquake events

To examine the change in in-situ stress from before to after the 2011 Tohoku-oki earthquake, we performed stress measurements after the earthquake in the Kamaishi mine. The in situ stress measurement period was from 1991 to 2016. The results showed that the magnitudes of three-dimensional principal stress and vertical stress drastically increased during the mainshock and, at one year after the earthquake, were more than double those before the earthquake. The principal stress magnitudes then decreased with time, and they had returned almost to pre-earthquake levels by about five years after the earthquake. The SLSR (Fig.1) lacks historical great earthquake ruptures and showed relatively low levels of moderate-size earthquakes ($M = 4.7 \sim 5.1$) over the past ~50 years before the 2011 Tohoku-oki earthquake at an average interval of 5.5 years. However, earthquakes in the SLSR suddenly became much more frequent after the Tohoku-oki mainshock, and the magnitudes of these earthquakes increased. Furthermore, the interval between earthquakes off Kamaishi gradually increased with time after the Tohoku-oki mainshock and reached approximately 0.3 years at one year. At the same time, the magnitudes of these earthquakes returned to the same levels as those before the mainshock. That is, (a) the stress magnitude in the Kamaishi region drastically increased during the Tohoku-oki mainshock because the region

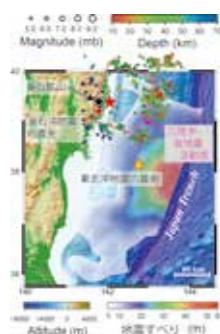


Fig.1 The total slip distribution of larger than 5 m of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Yagi & Fukuhata, 2011) and the SLSR (Ye et al., 2012).

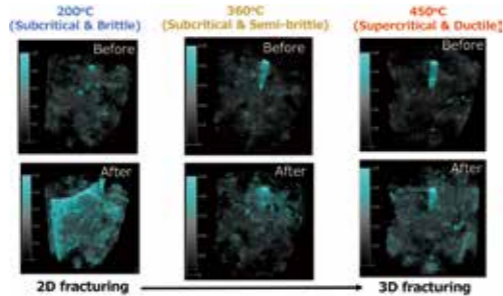


Fig.2 Fracture aperture distributions from CT data.



Fig.3 Large-scale hydraulic fracturing experiment under supercritical condition.



Fig.4 Permeability test after the hydraulic fracturing under over 400°C

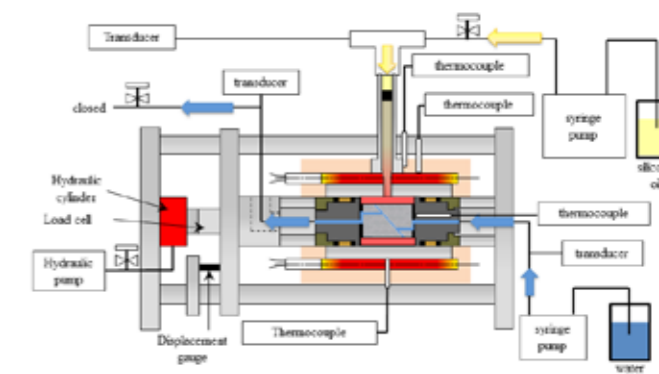


Fig.5 Slip experimental system under subcritical/supercritical geothermal reservoir condition

地震後の1ヶ月間は10日に1回程度の頻度でマグニチュード5.5~5.9の地震が発生している。また、東北沖地震の1年~2年後の期間では、4か月に1回の発生頻度になり、その規模は東北沖地震前とほぼ同じ規模に戻っている。この地殻応力と釜石沖地震の相関から、「東北沖地震発生直後の地殻応力の上昇は、釜石沖でSLSRがバリアとなりすべりが止まったことが原因である。この結果、地殻応力が上昇し釜石沖で地震が増加した。頻発した地震により地殻応力が解放され、釜石鉱山における東北地震後2年目以降の応力値は減少し地震の頻度も減少した。」という地震-地殻応力関係が理解される。本研究は、地震発生のトリガーとなる地殻応力を浅所(地下数百m)であっても定期的に定点で測定すれば、甚大災害と成り得る巨大地震のすべり破壊挙動を理解することに資する情報が得られることも示しており、地震研究の新たな手法の確立への貢献が期待される。

高温延性花崗岩の水圧破砕特性と透水性向上に対する水圧刺激の効果

高温延性岩体中への地熱貯留層の造りが提案されている。しかしながら、延性条件下の岩石に対する水圧刺激による破壊特性は未解明である。本研究では、温度200°C~450°C、封圧40MPaの条件下で、中心にポアホールを有する花崗岩供試体に対して水圧刺激実験を行った。その結果、全ての温度環境においてき裂の生成が確認され、生成されるき裂の形態は温度によって異なることを明らかにした。これは、破砕流体の粘度が温度によって変化するためである。200°Cの条件では、線形に連続したき裂が生成され、このときの破砕水圧は封圧よりも大きかった。なお、この結果は室温環境下と同じであった。一方、450°Cの条件においては、多くの離散き裂が供試体全体に亘ってクラウド状に生成され、この時の破砕水圧は封圧と同程度であった。空隙率および透水性は全ての温度環境下において増加した。このことから、脆性-延性遷移温度を超える条件下においても、水圧刺激によって十分な透水性を持った地熱貯留層の造りは可能であるとした。本研究は土屋研および駒井研(渡邊准教授)との共同研究である。

probably acted as a barrier to further rupture propagation; (b) the increased stress made earthquakes occur more actively in offshore Kamaishi both in terms of frequency and magnitude; and therefore, (c) the frequent aftershock occurrence caused the stress in Kamaishi mine to decrease and to return to approximately the same level as before the 2011 Tohoku-oki earthquake as well as increasing the cumulative postseismic slip in this region. In addition, the consistency between the change in measured stress and the change in seismicity in the Kamaishi regions suggests that the results of stress measurements, even those at a much shallower depth than the earthquake source fault, can be useful for understanding rupture propagation behavior.

Effect of the hydraulic stimulation on hydraulic fracturing characteristics and gain in permeability of high-temperature ductile granite

The creation of geothermal reservoirs in high-temperature ductile rock has recently been suggested. However, the characteristics of fracturing by hydraulic stimulation under ductile conditions of rock are not yet clear. In this study, hydraulic stimulation experiments on granite at temperatures of 200-450°C were conducted by injecting water into cylindrical granite with a borehole at a confining pressure of 40 MPa. The formation of fractures was observed at all temperatures, but fractures formed in different manners depending on the temperature, perhaps due to different water viscosities. At the lowest temperature, fractures propagated linearly from the borehole, and the borehole pressure required for the fracturing was much larger than the confining pressure, similar to hydraulic stimulation at room temperature. However, these fracturing characteristics disappeared with increases in temperature. As the temperature increased, the fracturing pattern shifted to the formation of a larger number of shorter fractures and less borehole pressure was required. Porosity and permeability increased significantly by hydraulic stimulation at all temperatures, and permeability gain was high even at the highest temperature, which exceeded the brittle-ductile transition temperature.