

## 地殻エネルギーフロンティアの科学と技術 Science and Technology for Geothermal Frontier

土屋 範芳<sup>1\*</sup>  
TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学環境科学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

This project should cover multidisciplinary scientific fields such as geology, geochemistry, geophysics, water-rock interactions, rock mechanics, seismology, drilling technology, well logging technologies, reservoir engineering, and environmental science.

### (a) Characterization of rock mass in BDT

Preliminary work by the Japanese researchers has revealed some of the behavior of the rock mass in the BDT, such as hydrothermal brecciation and presence of hydrothermally derived fracturing (HDF) (Hirano et al., 2003). However, fundamental understandings of key parameters such as the stress state, lithological structure, mechanical and compositional homogeneity, and thermal characteristics require much additional work. Laboratory tests would be the most effective means to obtain fundamental knowledge on the ductile rock mass in the initial stages of the project combined with analysis of core samples and pore water collected from an experimental borehole. This combination of laboratory and borehole data will generate, new knowledge on the rock mass and provide constraints on, and validation of the laboratory tests.

### (b) Creation and control of the reservoirs

The HDF would create a brittle fracture network consisting of very fine fractures at grain boundaries, is created by cooling and depressurization from the borehole in the BDT. If a similar process operates during drilling then cooling of the ductile rock by the drill fluid may be expected to induce a grain-scale fracture network in the near field of the borehole during the drilling phase.

### (c) Numerical simulation

To achieve sustainable energy production from EGSs in the BDT, it is essential to design the area of heat exchange between water and rock, and the risk of shortcut flow paths must be carefully evaluated. Simulators with capability to handle T-H-M-C behavior of the rock mass are expected.

キーワード: 地熱  
Keywords: Geothermal

## 地熱地域の深部反射法地震探査: 白沢・七ヶ宿カルデラを例として Deep seismic reflection profiling in geothermal area: case study of Shirasawa and Shichigashuku calderas

佐藤 比呂志<sup>1\*</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>; 上嶋 誠<sup>1</sup>  
SATO, Hiroshi<sup>1\*</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>; UYESHIMA, Makoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> (株) 地球科学総合研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The university of Tokyo, <sup>2</sup>Japex Geoscience Institute, Inc.

はじめに:

東北日本においては、後期中新世から鮮新世にかけて多数のカルデラが形成された。この中で後期中新世のカルデラ群に伴う深部高温流体が、地熱発電の資源として期待されている。このような数 km という地下をターゲットとするには、流体の存否や断裂の状況などについて、地球物理学的な探査で把握することが、重要な課題となる。反射法地震探査は、地殻構造を断層や褶曲という分解能で描き出す手法である。とくに活断層の深部形状を描き出す目的で、90年代後半から深部反射法地震探査が実施されるようになった。東北日本においても、活断層の多くがカルデラの東側に位置することが多く、その深部延長を描き出す目的で、しばしばカルデラを横断して反射法地震探査が実施された (Sato et al., 2002a Tectonophys.; Sato et al., 2002b EPS)。ここでは、これらのカルデラ群を横切って実施された深部反射法地震探査の実例を示すとともに、地殻流体の検出に有効な手法である MT 法について紹介する。

白沢カルデラ: 白沢カルデラはピストンシリンダー型のカルデラで、溶結凝灰岩・湖成層のカルデラ充填堆積物が分布する。小規模な貫入岩は存在するが大規模なリサージェントはない。パイロサイスによる反射法地震探査によって、とくにカルデラの中央部の地下 3-5 km の深さに周波数の低い反射強度の大きい領域が、直交する測線の断面のいずれでも得られており、カルデラを生み出した冷却したマグマ溜まり中の流体の存在を示唆している可能性がある。これらは、自然地震によるトモグラフィ解析の結果 (Nakajima et al., 2006 EPS) とも調和的である。

七ヶ宿カルデラ: 宮城県南部の奥羽山脈東縁に位置するピストンシリンダー型のカルデラである。このカルデラを横切って、深部反射法地震探査相馬-米沢測線 (佐藤ほか, 2013 連合大会) と、ひずみ集中帯重点調査の一環として MT 探査が実施された。屈折トモグラフィによる P 波速度は、カルデラ充填堆積物に相当する速度低下領域を示すが、反射法地震探査ではとくに過去のマグマ溜まりに相当するような特異なパターンは認められない。MT 法によれば、スラブ上面から低比抵抗領域がスラブから火山フロントにほぼ垂直に伸びる他、カルデラ下の地殻上部で孤立した低比抵抗域が位置しており、流体の存在を示唆する可能性がある。

総合的なサイトサーベイ

解析方法やデータ取得についても、物理探査技術は進歩を続けており、自然地震や制御震源・電磁気的な手法など、総合したサイトサーベイが重要である。カルデラ下などの成層構造を示さないような岩体については、本来、反射法地震探査の成果は限定的であるが、断裂の発達状況の指数としての可能性を有している。地熱地域の深部微細構造、流体・断裂の存在状況は、物理探査の点からも先端的な課題である。

キーワード: 地熱地域, カルデラ, 反射法地震探査, MT 法, 白沢カルデラ, 七ヶ宿カルデラ

Keywords: geothermal area, caldera, seismic reflection profiling, magnetotelluric inversion, Shirasawa caldera, Shichigashuku caldera

## 水の減圧沸騰環境下における岩石の破壊現象 Occurrence of rock/mineral fracture under the rapid decompression boiling condition of water

平野 伸夫<sup>1\*</sup>; 青島 聡<sup>1</sup>; 笠原 尚也<sup>1</sup>; 岡本 敦<sup>1</sup>; 渡邊 則昭<sup>1</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>

HIRANO, Nobuo<sup>1\*</sup>; AOSHIMA, Satoshi<sup>1</sup>; KASAHARA, Naoya<sup>1</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; WATANABE, Noriaki<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of Environmental Studies, Tohoku University

In our previous water-rock interaction experiments under the various hydrothermal conditions using granite or artificial quartz samples, clear cracks or fractures in the samples were observed under the specific hydrothermal condition. We have named this phenomenon as "Hydrothermally Derived Fracture (HDF)". Understanding of this fracturing phenomenon may be useful for technological development of geothermal reservoir usage or clarification of vein formation mechanism in the Earth crust. In our previous experimental results, HDF were progressed under the high temperature and low-pressure condition. The result of detailed observation, it was thought that the thermal stress occurred with rapid cooling of rock/mineral sample surface by condensed vapor dew. Similarly, rapid decompression from the high-temperature/pressure state causes, the temperature drop by latent/sensible heat effect. Therefore, when the such rapid decompression was occurred around the rock/mineral samples, HDF may occur under the hydrothermal condition. And so, we attempted rapid decompression experiment from the over 20 MPa / 400°C hydrothermal condition. As a result, the fracturing in the samples was progressed clearly. Therefore, decompression fracturing is possible and the same phenomenon may arise subsurface of near the volcano or hotter and deeper crust with water.

キーワード: 熱水誘起割れ (HDF), 岩石熱水相互作用, 急減圧, 花崗岩, 岩石破碎

Keywords: Hydrothermally Derived Fracture, Water-Rock Interaction, rapid decompression, granite, fracturing

## 間隙水圧下での花崗岩の破壊と浸透率変化 Fracturing of granite under pore pressure and evolution of permeability

濱崎 翔平<sup>1\*</sup>; 片山 郁夫<sup>1</sup>

HAMASAKI, Shohei<sup>1\*</sup>; KATAYAMA, Ikuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

高温岩体発電 (HDR) を始めとする涵養地熱システム (EGS) による地熱発電は従来の地熱発電と比べて、人工的に地熱貯留層を造成するという点で異なる。このシステムは天然の熱水や蒸気を使用しないため、従来の地熱発電の課題であった温泉の枯渇という問題が存在しない。また地熱貯留層の造成は水圧破碎とよばれ、地下深部の基盤岩に対する高圧水の注入に伴う破壊によって行われる。この破壊による基盤岩の流体の通りやすさを示す浸透率の変化は地熱貯留層の定量的な評価につながる重要な要素となる。本研究では間隙水圧下での花崗岩の三軸圧縮破壊において、浸透率に対する間隙水圧の効果を検証した。

実験試料は大陸を構成する花崗岩から緻密で細粒な庵治花崗岩を選定し、三軸圧縮試験による破壊実験を行った。破壊前後の試料の浸透率測定及び三軸圧縮破壊は広島大学設置の容器内変形透水試験機を用いた。花崗岩試料は予め水で飽和させた後、実験を行った。封圧を 20 MPa、三軸圧縮中に添加する間隙水圧を 0 MPa (非排水条件下で三軸圧縮破壊を行う) から 15 MPa の 5 MPa おきに設定し、三軸圧縮変形を行った。破壊した試料は樹脂に固定し、偏光顕微鏡及び走査型電子顕微鏡下で組織観察を行った。また三軸圧縮破壊実験と浸透率測定結果から間隙水圧と浸透率及び破壊強度の関係を議論した。

三軸圧縮破壊前の封圧 20 MPa における花崗岩試料の浸透率は  $2.0 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  となった。三軸圧縮破壊後の花崗岩試料の浸透率は破壊前と比べて増加し、封圧 20 MPa、間隙水圧 0 MPa における浸透率は  $2.5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  と得られた。また破壊後の試料の浸透率は間隙水圧の増加に伴い増加し、間隙水圧 15 MPa では浸透率は  $7.0 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  に増加した。加えて、浸透率と三軸圧縮中に添加する間隙水圧には比例関係があることが明らかになった。また三軸圧縮破壊強度は間隙水圧の増加に伴い減少し、間隙水圧 0 MPa においては 400 MPa であったが、間隙水圧 15 MPa では 350 MPa と減少した。破壊した試料には巨視的な破断面と小さなクラックを確認することが出来た。

三軸圧縮破壊中に添加する間隙水圧の増加により浸透率が比例的に変化する原因としては、間隙水圧が大きいほど生じるクラックの開口幅が増加し、またはクラックの連結・伝播の様子が著しく変化することに起因すると考えられる。またこのクラックの形態の変化が三軸圧縮破壊強度の減少にも影響しているとみられ、浸透率を議論の上ではこのクラックの分布や形態は一つのパラメータとなりうる。今後はより現実的な水圧破碎の再現を目指し、差応力下での水圧上昇による破壊実験や高温下での破壊実験における空隙率・浸透率測定を行う予定である。

キーワード: 花崗岩, 間隙水圧, 浸透率

Keywords: granite, pore pressure, permeability

## 低温水流入に伴うき裂開口幅変化の数値解析 The numerical study for behavior of fracture aperture associated with cold fluid flow

金田 浩輔<sup>1\*</sup>; 椋平 祐輔<sup>1</sup>; Swenson Daniel<sup>2</sup>; 伊藤 高敏<sup>1</sup>  
KANETA, Kousuke<sup>1\*</sup>; MUKUHIRA, Yusuke<sup>1</sup>; SWENSON, Daniel<sup>2</sup>; ITO, Takatoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学流体科学研究所, <sup>2</sup> カンザス州立大学機械工学科

<sup>1</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan, <sup>2</sup>Mechanical and Nuclear Engineering Department, Kansas State University, USA

Power generation of geothermal power plant sometimes decreases due to reduction of reservoir pressure. ReInjection of used geothermal fluid/cold fluid into the reservoir is conducted in several geothermal power plant to keep/recover the reservoir pressure. It is required for recharge of reservoir pressure that appropriate condition of reinjection in terms of injection pressure, amount of injected fluid, and heat balance. On the other hand, it is empirically observed at some of the geothermal field that amount of injected fluid increases when lower temperature fluid is injected. In this research, we investigated relationship between temperatures of cold fluid and fracture aperture, using numerical simulation.

We conducted numerical simulation for the change in fracture aperture when cold fluid flows into the fracture, using 2D FEM code " GEOCRACK2D " (Swenson et al., 1995). We set the condition that cold fluid was injected into a single fracture within high temperature rock mass. In this simulation, cold fluid flowed from center of fracture to edge of fracture. Fluid pressure was 1 MPa at center of fracture and 0 MPa at edge of fracture. This given pressure condition made fluid flow from center of fracture to edge of fracture. Initial temperature of rock mass was 300 °C and that of cold fluid was 100 °C. Initial stress condition was 20 MPa in x direction and y direction.

As a result of simulation, the fracture aperture increased with time although 20 MPa of normal stress worked on the rock mass and fluid pressure was at most 1 MPa. It was also simulated that the rock mass around the fracture was cooled down by cold fluid and cooled area extended with time. Normal stress on the fracture decreased. The area where normal stress decreased extended over time.

These results can be interpreted that cooling of rock mass by cold fluid caused thermal shrinkage of rock mass, which decreased normal stress on the fracture surface. Finally, the fracture aperture became large, suggesting increasing in permeability.

We also conducted the simulation for the effect of difference in initial temperature between rock mass and cold fluid. We compared the change in fracture aperture about four temperature difference conditions. Fluid flow, fluid pressure, temperature of rock mass and initial stress condition were same with first simulation. Temperature of cold fluid was 100 °C, 150 °C, 200 °C and 250 °C.

As a result of simulation, the fracture aperture increased drastically when the temperature difference between rock mass and cold fluid was bigger than 150 °C. The fracture aperture slightly increased when the temperature difference is smaller than 100 °C. The bigger temperature difference was, the earlier fracture aperture opened. The results of simulation suggested that there was the critical value in temperature difference between 100 °C and 150 °C. It was summarized that the fracture aperture increased and that the fracture permeability became large when the temperature difference was bigger than the critical temperature difference.

キーワード: 地熱貯留層, き裂, き裂開口幅, 熱弾性, 熱収縮, 熱水還元・涵養

Keywords: Geothermal reservoir, Fracture, Aperture, Thermal elasticity, Thermal shrinkage, ReInjection



## 水圧刺激時の微小地震データに基づく破壊可能な断層面積 ” Slip-able area ” 評価の 試み Slip-able area: New index to evaluate the fault area under critical state based on micro- seismic data at stimulation

椋平 祐輔<sup>1\*</sup>; 浅沼 宏<sup>2</sup>; Haring Markus<sup>3</sup>; 伊藤 高敏<sup>1</sup>  
MUKUHIRA, Yusuke<sup>1\*</sup>; ASANUMA, Hiroshi<sup>2</sup>; HARING, Markus<sup>3</sup>; ITO, Takatoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 流体科学研究所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所・再生可能エネルギー研究センター, <sup>3</sup> Geo Explorer Ltd.  
<sup>1</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University, <sup>2</sup>AIST, <sup>3</sup>Geo Explorer Ltd.

Unexpected occurrence of felt earthquake has been big issue as critical environmental burden associated with geothermal development and other energy extraction. The magnitude of seismic events induced by fluid stimulation is generally small enough to be perceived on the ground. However, at the Basel, Switzerland, some of the events had large magnitude, resulting in the shutdown of engineered geothermal system (EGS) project. Our previous study has revealed the fundamental characteristics and the trigger mechanisms of the large event at Basel. However, we have not reached full understanding of physics of the large events, which enable us to control or manage the magnitude of induced events.

### Concept of Slip-able area

Our previous study suggested that the dynamic behavior of pore pressure especially propagation of pressure at the shut-in correlate the event magnitude because many of large events occurred at the shut-in phase in Basel. The pore pressure gradient should exist from the well head to the pressure front during the stimulation. At the shut-in when pumping is stopped, the pressure source despairs and subsequently the pressure gradient may become small with time. Finally, the pore pressure in the reservoir will go back hydrostatic state uniformly. In the relaxation process of the pore pressure gradient, it can be expected that the pore pressure at the far field from the well might slightly increase to average pore pressure increase in whole reservoir. Pore pressure increase at the front of the stimulated zone may put large part of the fault plane into near critical state. In contrast, only some part of the fault plane may become critical state, when the pore pressure increases with the pressure gradient. This is the expected scenario for occurrence of the large event at the shut-in.

So, in this study, we originally defined new concept of Slip-able area, which describes the summation of fault areas in study area, under critical state during/after the stimulation. The informations used in estimating Slip-able are given by the detailed analysis of microseismic events and stress information. Slip-able area can provide the information of the potential fault area which can have shear slip at semi real time. Slip-able area can be directly converted into the event magnitude, suggesting it is also available to the risk assessment of the large event.

### Methodology of estimation for Slip-able area

We propose the methodology to estimate Slip-able area as follows.

1. Determine the number of the potential fracture within a given rock volume from microseismic data at the first stage of the stimulation.
2. Characterize the size of the fractures from source parameter of microseismic events and their critical pore pressure for shear slip.
3. Divide the reservoir area into a number of the block with the same size of step 1.
4. Determine the stimulated volume in three dimensions by the divided block and information on occurrence of microseismic events.
5. Infer the number of the fracture in a stimulated volume determined in step 4.
6. Estimate maximum increase in pore pressure at given time in each block of stimulated volume.
7. Identify the fault area of the fracture under critical state using the information assumed in step 2.
8. Integrate all fault area of the fractures identified in step 7.

We have to note that the methodology shown above includes some steps with much difficulty or impossible because determination of critical pore pressure is based on the information on orientation of fracture plane and stress information in study area. These informations are not available in many of the geothermal field. Estimation of fault area also required high quality data set of microseismic events. In these cases, it can be valid for simplification to use appropriate constant values like b value as a substitute for characterizing of fault size.

SMP48-06

会場:313

時間:5月2日 15:45-16:00

キーワード: 微小地震, 誘発有感地震, マグニチュード, 断層面積, リスクアセスメント, Basel  
Keywords: Microseismicity, Felt earthquake, Magnitude, Fault area, Risk assessment, Basel

## 脆性破壊による地殻の含水化：東南極セールロンダーネ山地の例 Hydration of crust through brittle fractures: Example from Sor Rondane Mountains, East Antarctica

宇野 正起<sup>1\*</sup>; 岡本 敦<sup>1</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>  
UNO, Masaaki<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

島弧下部地殻はその地震波速度から主に角閃岩から構成されていると考えられており、含水鉱物に富んでいることが示唆される。しかしながら、そのような島弧地殻への H<sub>2</sub>O 流体供給の量とその供給様式は明らかになっていない。地殻内に置ける流体移動様式としては、浸透流とチャネリングフローの2通りが上げられる。島弧地殻下の条件では粒界が閉じていることから、脆性破壊を伴うチャネリングフローが卓越することが予想される。本研究では、地殻への流体供給に対する脆性破壊の役割を明らかにする為に、東南極セールロンダーネ山地南東の、地殻-メルト吸水反応帯を調査した。

調査地域では、黒雲母-角閃石-かんらん岩に花崗岩質岩脈が脆性的に貫入しており、その間に反応帯が形成されている (Fig. 1)。その生成条件は鉱物組み合わせから大まかに下部地殻条件下と推察され、下部地殻条件下におけるメルト-岩石の力学・化学的相互作用を観察するのに適している。母岩に対する花崗岩質岩脈の体積割合は 10-20% 程度であり、境界部に厚さ約 5-10 cm の反応帯が形成されている。花崗岩脈から母岩までは大きく以下の4つの反応帯に分けられ、その鉱物組み合わせは下記の通りである：

i) 花崗岩脈

[quartz + plagioclase + K-feldspar + biotite + rutile + zircon ± muscovite]

ii) ホルンブレンド-トレモライト帯

[hornblende + tremolite ± quartz ± apatite ± biotite]

iii) トレモライト-黒雲母帯

[tremolite + biotite + spinel ± hornblende ± pyroxene]

iv) 黒雲母-角閃石かんらん岩

[olivine + orthopyroxene + biotite + hornblende + Cr-spinel ± magnetite ± apatite]

これらの反応帯は、花崗岩質メルトから放出された H<sub>2</sub>O と母岩との吸水反応として理解される。花崗岩脈の斜長石とそれに接するホルンブレンドに地質温度計<sup>[1]</sup>を適用した結果、この吸水反応の温度は約 700 °C と見積もられる。

本講演では、反応帯で形成された含水鉱物の量から、花崗岩質メルトから放出された H<sub>2</sub>O 量を見積り、含水メルトを通して島弧下に供給される流体量とその輸送、地殻への H<sub>2</sub>O 付加メカニズムを議論する。

引用：

[1] Holland and Blundy, 1994, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **116**, 433-447.

キーワード: 地殻流体, 脆性破壊, メルト, 吸水反応, 水-岩石相互作用, 南極

Keywords: geofluid, brittle fractures, melt, hydration reaction, fluid-rock interaction, Antarctica



Fig. 1 Biotite-hornblende-peridotite (brown) intruded by granitic dykes (white), Sor Rondane Mountains, East Antarctica. Note that reaction zones occur at the boundary: green or black layers are hornblende-tremolite zone and grey to reddish brown layers are tremolite-biotite zone.



## 宮城県岩沼市に見られる玄武岩質安山岩複合溶岩流の内部分化過程：分結脈から柱状節理へ

### Composite basaltic andesite lava in Iwanuma (Miyagi, Japan): Differentiation along segregation veins and columnar joints

木本 和希<sup>2</sup>; 石渡 明<sup>1\*</sup>

KIMOTO, Kazuki<sup>2</sup>; ISHIWATARI, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学東北アジア研究センター, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Center for NE Asian Studies, Tohoku Univ., <sup>2</sup>Dept. Earth Sci., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.

複合溶岩流は、中央部に斑晶質の層を持つ3-5mの薄いものがKuno (1950; 地質雑, 56, 167-172) などによって報告されていたが、我々は、よく発達した柱状節理が全体を貫く単一の冷却ユニットをなし、化学組成の異なる層の境界に分結脈が発達した、非常に厚い複合溶岩流を発見したので、ここに報告する。

中期中新世 (15-13Ma) の玄武岩質安山岩の厚さ 110 m 以上の溶岩が宮城県岩沼市の採石場に露出する。1-2m 間隔の柱状節理が露頭全体によく発達する。これは複合溶岩流であり、下部 (0-42m) はやや SiO<sub>2</sub> に富み (55 wt.%)、上部 (45-110 m) はやや SiO<sub>2</sub> に乏しい (52-54%)。露頭では下部と上部の間にシャープな境界は確認できないが、鏡下では完晶質に近い石基の斜長石が、下部はやや細粒 (0.3mm)、上部はやや粗粒 (0.5mm) である。溶岩流の底部には赤いクリンカーが確認できるが、上端は侵食されている。この溶岩流には、底から 6-14m, 45-64m, 80-95m の 3 層準にほぼ水平な分結脈が多数発達する。底から 6-14m のものは厚さ 1mm 程度で 1-10cm 間隔であり、ガラス質で斜長石と普通輝石の微晶を含む。45m 付近のものは厚さ 5-15mm で 10-15cm 間隔、52-64m のものは厚さ 3-5mm で 5-15cm 間隔であり、結晶質で斜長石、ピジョン輝石、Ca に乏しい普通輝石を含む。80-95m のものは厚さ 3-5mm で 5-7cm 間隔であり、中部と同様の組織・鉱物組み合わせを示す。組成から計算すると、中部の分結メルトはホストのメルトが約 70% 結晶化した後の残液である。これらの分結脈は、剪断応力や冷却収縮によって生じたほぼ水平な割れ目 (板状節理) に残液が浸み出して形成されたものと考えられ、それらは溶岩の底部付近と化学組成が苦鉄質な層準によく発達する。稀に見られる雁行状の分結脈は剪断変形の証拠である。

柱状節理はほぼ水平な溶岩を垂直に貫き、分結脈を完全に切っている。柱状節理の節理面に接する岩石は柱の中央部の岩石よりも密度が低く、鏡下では気泡が見られるが、柱の中央部の岩石は高密度でほとんど発泡していない。このことは、柱状節理は分結脈 (板状節理) よりも後に、より低温の状態 で形成されたが、その時点でも多少メルトが残っており、割れ目の形成に伴ってその直近のメルトが減圧発泡したことを示唆する。

キーワード: 複合溶岩流, 分結脈, 板状節理, 柱状節理, 玄武岩質安山岩, 結晶分化作用

Keywords: composite lava flow, segregation vein, platy joint, columnar joint, basaltic andesite, crystallization differentiation

## シリカ鉱物析出による地殻の透水-不透水境界の形成 The formation of the permeable-impermeable boundary within the Earth's crust revealed by silica precipitation

最首 花恵<sup>1\*</sup>; 岡本 敦<sup>1</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>

SAISHU, Hanae<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 東北大学大学院環境科学研究科

<sup>1</sup>AIST, <sup>2</sup>Tohoku University

Silica is one of the dominant constituents of the Earth's crust. The permeable-impermeable boundary corresponds to the brittle plastic transition at 300-450 C [1]. Ubiquitous occurrence of quartz vein is one of the evidences that the spatial and temporal variations in permeability within the Earth's crust are affected by silica precipitation in aqueous fluids. However, the role of silica-water interaction on fracture permeability is still unclear.

The Kakkonda geothermal field, Japan, has the well WD-1a that penetrated the boundary between the hydrothermal convection zone and the heat conduction zone [2]. Calculation of quartz solubility along the well WD-1a revealed that (1) the depth of a local maximum of quartz solubility correlates with that of the strong reflector in seismic data at 350 C isotherm [3], and that of a maximum of fracture numbers revealed by the logs of FMI [4], and (2) the depth of a local minimum of quartz solubility correlates with that of the permeable-impermeable boundary, in either case of hydrostatic or lithostatic conditions [5]. These results indicate that (1) the preservation of open fractures at the margin of the Kakkonda granite is controlled by dissolution of quartz, and (2) the quartz precipitation could occur from both downwards- and upwards-moving fluids, which could divide the hydrothermal convection zone and the heat conduction zone.

The hydrothermal experiments of temperature dependence of silica precipitation were conducted at 24 and 31 MPa and 170-430 C, by using the solution made by dissolution of granite. The large amount of silica precipitation occurred only in the supercritical conditions of water (>390 C). Strong temperature dependence can be explained by the homogeneous nucleation of quartz in the surface energy of quartz of 130 mJ/m<sup>2</sup> [5].

The results of the calculation of silica solubility at the Kakkonda geothermal field and the hydrothermal experiments of silica precipitation suggest that rapid quartz precipitation via nucleation could occur when fluids are brought to the depth in the supercritical conditions of water. The forming and sustaining the permeable-impermeable boundary within the Earth's crust could be controlled by precipitation of silica minerals.

### References

- [1] Scholz (2002).
- [2] Doi et al. (1998) *Geothermics*, **27**, 663-690.
- [3] Matsushima et al. (2003) *Geothermics*, **32**, 79-99.
- [4] Muraoka et al. (1998) *Geothermics*, **27**, 507-534.
- [5] Saishu et al. (in press) *Terra Nova*.

キーワード: シリカ鉱物析出反応, 石英溶解度, 透水-不透水境界, 熱水実験

Keywords: Silica precipitation, Quartz solubility, Permeable-impermeable boundary, Hydrothermal experiment