

超臨界地熱発電実現のためのロードマップとブレークスルー

Roadmap and breakthroughs for super-critical geothermal power generation

*浅沼 宏¹、土屋 範芳²、梶原 竜哉³、山田 茂登⁴、相馬 宣和¹

*Hiroshi Asanuma¹, Noriyoshi Tsuchiya², Tatsuya Kajiwara³, Shigeto Yamada⁴, Nobukazu Soma¹

1.産業技術総合研究所・再生可能エネルギー研究センター、2.東北大学・大学院環境科学研究科、3.地熱エンジニアリング株式会社、4.富士電機株式会社

1.FREA, AIST, 2.Tohoku Univ., 3.Geothermal Engineering Co., Ltd., 4.Fuji Electronics Co., Ltd.

A team of Japanese geothermal researchers have been investigating a feasibility of commercial geothermal power generation using subduction-origin high temperature resources which is estimated to be super-critical conditions. The potential of the super-critical geothermal resources in Japan can reach to around one TW, and it can cover almost all the baseload electricity demand with drastically reducing emission of CO₂. Although there must be a number of scientific and engineering breakthroughs to establish super-critical geothermal power generation, the team has drew a roadmap after identification of key scientific and technological breakthroughs for power generation in 2050. The authors will describe principles and roadmap of the supercritical geothermal power generation in Japan in the presentation.

キーワード：地熱エネルギー

Keywords: Geothermal energy

東北地方の超臨界地熱資源の属性と資源量評価

Characterization and evaluation of supercritical geothermal resources in Tohoku District ,
Japan

*土屋 範芳¹、山田 亮一¹

*Noriyoshi Tsuchiya¹, Ryoichi Yamada¹

1.東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻

1.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

東北地方に賦存する超臨界地熱資源について、地質学的アプローチ（カルデラデータベース、温泉データベース、変質帯データベース、鉱山データベース、花崗岩データベース）と、地球物理学的アプローチ（重力構造データ、電磁探査データ、地震波探査データ）をGIS上に統合化し、現在の火成活動、温度構造、熱水循環系の規模、裂か帯の性状、熱源の深度、脆性破砕帯の深度、貯留層の規模、熱水だまりの検証を行った。このGISから、（1. 火山カルデラ温泉・変質帯：表層異常を示す）、（2. 高地殻熱流量：浅所異常を示す）、（3. 地震空白域：深部異常を示す）、（4. 地震波低速度域：テクトニクス的な異常を示す）の属性評価から、超臨界地熱の有望地域を抽出した。

その結果、4つのPで示すカテゴリー（有望性(promising)、蓋然性(probability)、可能性(possibility)、発展性(potentiality)）で東北地方の超臨界地熱資源を類型化した。

有望性(Promising)とは、小規模(数千KW/h)を含む全ての地熱発電の実現可能性で、地表浅所の地熱兆候に加えて、アクセス、支障権益、既存インフラ整備網を考慮した有望度が高い超臨界地熱資源。

蓋然性(Probable)とは、規模を問わない地熱発電の可能性について、実際に存在する地表部の地熱兆候の頻度や規模からみた存在確率を示す。

可能性(Possible)とは、地表部の地熱兆候は弱い、地球物理データからみて比較的浅所に高温熱水貯留層がシーリングされていると推定される地域で、コスト的、技術的困難さはあるが大規模発電が期待される超臨界地熱資源およびその地域。

発展性(Potential)とは、地表部の地熱兆候は乏しいが、地殻熱流量が高く、テクトニクス場から比較的浅所にマグマインプットが存在し、大規模発電を可能とする大規模貯留層が複合して存在することが期待される広汎な地域を示している。

キーワード：超臨界地熱、地震活動、火山活動

Keywords: supercritical geothermal, seismic activity, volcanic activity

温泉から見たスラブ脱水流体の地球化学的特徴 - 私たちの研究と課題 -

Geochemical characteristics of slab-derived fluid acquired from a study of hot spring waters: our research history and awaiting solutions

*大沢 信二¹、網田 和宏²

*Shinji Ohsawa¹, Kazuhiro Amata²

1.京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設（別府）、2.秋田大学大学院工学資源学研究科附属理工学研究センター

1.Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Research Center for Engineering Science, Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

近年、温泉とプレートの沈み込みにともなって発生すると考えられる深部流体（スラブ脱水流体）の連関についての研究が盛んである（例えば、風早ほか，2014；Kusuda *et al.*，2014）。私たちは、中央構造線沿いの高塩分温泉とスラブ脱水流体の関連性の追求をはじめ（網田ほか，2004；大沢，2004），CO₂に富んだNa-Cl組成の高塩分泉に目星を付けたほか，スラブ脱水流体のLi/B比やCH₄/CO₂比と発生深度との間に規則性があるらしいことを予想した（大沢ほか，2010；網田ほか，2014）。このような温泉科学的な取り組みがなされる一方で，沈み込み帯に産する各種地質試料に包蔵される微小な流体である「流体包有物」の研究からスラブ脱水流体の実態を探る研究も行われており（例えば，Nishimura *et al.*，2008；Yoshida *et al.*，2011；Yoshida *et al.*，2015），マントル捕獲岩中の流体包有物の研究からはスラブ脱水流体はCO₂に富んだNa-Cl組成の高塩分水流体であり（Kawamoto *et al.*，2013；Kumagai *et al.*，2014），有馬温泉の高塩分温泉水の主要化学組成との類似性から，有馬温泉の起源流体をプレート脱水流体に関係づけようとする解説も世に出はじめている。その後，私たちは，有馬温泉および周辺地域で高塩分温泉の調査をする機会を得て水質と同位体のデータを入力したところ，有馬温泉の高塩分温泉水と水質がよく似ているにもかかわらず，有馬型熱水の同位体組成（ δD - $\delta^{18}O$ ）を持たず，付随するCO₂やHeは地殻起源であることを見出し，CO₂に富んだNa-Cl組成の高塩分温泉水であっても必ずしもスラブ脱水流体とは結びつけられないことを示した（大沢ほか，2015）。温泉を通して地球深部流体を研究するのは容易でないことを再認識させられるとともに，これまで同様に温泉水の成分の中にスラブ由来であることを明示する地球化学的指標を見出すことがこれからも重要な課題であると考え。

【文献】

網田和宏ほか（2005）温泉科学，55，64-77.

網田和宏ほか（2014）日本水文科学会誌，44，17-38.

Kawamoto *et al.*（2013）Proc. National Academy Science，110，9663-9668.

風早康平ほか（2014）日本水文科学会誌，44，3-16.

Kumagai *et al.*（2014）Contrib. Mineral. Petrol.，168，1056，doi:10.1007/s00419-0140105609.

Kusuda *et al.*（2014）Earth, Planets and Space，66，119；

<http://www.earth-planets-space.com/content/66/1/119>

Nishimura *et al.*（2008）J. Mineralogical and Petrological Sciences，103，94-99.

大沢信二ほか（2010）温泉科学，59，295-319.

大沢信二（2004）2004年地球惑星科学関連学会合同大会 セッション：J078断層帯のレオロジーと地震の発生過程（招待講演）.

大沢信二ほか（2015）温泉科学，64，369-379.

Yoshida *et al.*（2011）J. Mineralogical and Petrological Sciences，106，164-168.

Yoshida *et al.*（2015）Lithos，226，50-64.

キーワード：温泉、スラブ脱水流体、地球化学、CO₂、Na-Cl、高塩分

Keywords: hot spring, slab-derived fluid, geochemistry, CO₂, Na-Cl, hypersaline

高温酸性温泉と火山との関係

Relation of high-temperature acid hot-springs to volcanoes

*佐々木 宗建¹、土屋 範芳²

*Munetake Sasaki¹, Noriyoshi Tsuchiya²

1.産業技術総合研究所、2.東北大学大学院環境科学研究科

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2.Gradual School of Environmental Studies, Tohoku University

火山-熱水系は、熱と物質を深部から浅部へと効率的に運搬する場であり、観光保養資源、熱エネルギー資源、鉱産物資源を育み、人類に恩恵をもたらす場でもある。火山性温泉は火山中心部から周辺部に向かって酸性泉、中性塩化物泉、炭酸水素塩泉と泉質が異なる。地熱エネルギー資源はこのうちの中性塩化物泉の深部環境が主な開発対象であり、より中心部の酸性泉の深部については未踏課題となっている。そこで、本研究では高温酸性泉と火山との関係を調査し、地熱エネルギー資源の開発可能性を検討するための基礎資料とした。調査内容は、1)酸性泉形成の熱収支、2)流体岩石反応の進行度、3)泉質型の形成要因、4)深部環境の推定、5)開発のための課題整理、とした。

1)酸性温泉水はマグマ性流体（火山ガス）と天水との混合物である。酸素・水素同位体比組成に示唆される前者の寄与は最大で20%程度までである。純水系における高温蒸気（800℃）と低温水（25℃）の単純混合熱収支モデル計算は、温度約100℃で熱水卓越となるのに高温蒸気に約8割の低温水の混合が必要であることを示唆した。

2)酸性泉の流体岩石反応は初期陰イオン量に制約されつつ、溶解（・沈殿）が卓越する領域から中和が進行する領域へと移行する。酸性泉の溶存成分濃度は概略これらの境界に位置し、溶解（・沈殿）が十分に進行していることを示唆した。

3)酸性泉は大きくS04-C1型とS04型に分類され、前者はさらにHCl卓越型とS04卓越型に細分される。この細分の発生要因としてS02成分の自己酸化還元反応の温度圧力依存性と含硫黄鉱物の沈殿が考えられている。外的に酸化還元状態を制御した流体岩石反応モデル計算は還元的環境下でHCl卓越型が、酸化的環境下でS04卓越型が形成されることを示唆した。

4)酸性泉への地化学温度計の適用結果が意味するところは未だ不明確であるが、得られた温度で流体の沸騰を仮定して求めた深度を、文献の地質構造断面に投影すると、基盤岩より上位に位置した。マグマ性流体が天水と混合して酸性熱水溜を形成している深度を示唆しているのかもしれない。

5)地熱エネルギー資源の開発方法は小規模なバイナリ発電と大規模なフラッシュ発電に大別され、前者は湧出温泉水を、後者は掘削生産熱水を利用する。文献に見られる主な課題は温泉の持続性、ガス噴出、鉱物沈殿による閉塞、材料腐食であり、対策を検討したい。

本研究の今後の結果は、火山と酸性泉の関係の理解と、地熱エネルギー資源開発の基礎情報として役立つと思われる。

キーワード：酸性泉、火山、地化学

Keywords: acid hot springs, volcanoes, geochemistry

地殻深部の超臨界水分布と地震発生：東北日本の例

Seismicity Surrounding the Super-critical Fluid Distribution in the Crust: Some Cases in NE Japan

*小川 康雄¹*Yasuo Ogawa¹

1.東京工業大学火山流体研究センター

1.Volcanic Fluid Research Center Tokyo Institute of Technology

We have been imaging electrical conductors underneath the volcanic regions in NE Japan using magnetotelluric method. These conductors are compared with seismicity in detail. High seismicity distributes above the crustal conductors beneath Onikobe Caldera, Naruko Caldera, and Sanzugawa Caldera. In these areas, the cutoff depths of the earthquakes almost coincide with the top of the crustal conductor. The high seismicity zones are above the conductors and are in the resistive zones. These links between the fluid and seismicity imply that the fluid distribute in the ductile region and capped by silica cap due to the low solubility around 400 degree C (Saishu et al., 2014, Ogawa et al., 2014). The episodic invasion of fluids into the resistive zones will trigger seismicity by abruptly increasing pore pressures (Sibson, 2007, 2009).

In the case of the Shirasawa Caldera, there was high seismicity after 2011 in the central part of the caldera (Okada, 2014). We have found that this seismicity is located at the western rim of the conductor, which implies that fluids may have invaded laterally.

References:

Saishu H et al. (2014) Terra Nova

Ogawa Y et al (2014) Earth Planets Space

Sibson RH (2007) Geol Soc London, Spec Publ

Sibson RH (2009) Tectonophysics

Okada T et al. (2015) Geofluids

キーワード：地殻流体、地震、比抵抗、マグネトテルリック法

Keywords: geofluids, seismicity, resistivity, magnetotellurics

人工ニューラルネットワークを使った比抵抗による地温の推定

Estimation of the correlation between temperature and resistivity using ANN approach

*菅野 倅大朗¹、茂木 透²、内田 利弘³、梶原 竜哉⁴

*Kotaro Sugano¹, Toru Mogi², Toshihiro Uchida³, Tatsuya Kajiwara⁴

1.北海道大学大学院理学院、2.北海道大学大学院理学研究院、3.産業技術総合研究所、4.地熱エンジニアリング株式会社

1.Hokkaido University Graduate School of science, School of Science, 2.Hokkaido University Faculty of Science, 3.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4.Geothermal Engineering Co., Ltd

Accurate estimation of the underground temperature is essential for the resource evaluation of a geothermal reservoir. However, the quantity of temperature data measured in boreholes is usually limited and therefore the estimation of temperature distribution at depth is often difficult. Here, we have tried to indirectly estimate the underground temperature by geophysical data that depend on temperature, by applying the artificial neural network (ANN) approach.

By using ANN trained by geological and geophysical data, this study aims to estimate underground temperature by resistivity data obtained from magnetotelluric (MT) sounding. MT investigation can estimate resistivity of deep underground easily and reasonably. If we can estimate temperature of deep underground from MT data, for example, we can find a promising geothermal reservoir and decide the location for development of a geothermal power plant.

We chose the Kakkonda geothermal area, Iwate Prefecture, Japan, as a test site of this study. It is because the area is underlain by a high-enthalpy geothermal system, reaching 500°C at 3700m depth. In addition, many drillings and 2D or 3D resistivity surveys were carried out before.

We educated the ANN by position, depth and temperature data from well logs and resistivity data from MT sounding. After that, we tested various ANN structures to verify output temperature with observed well log temperature. As a result, we obtained good agreement at up to about 2.4 km depth where we have a lot of drilling data and fine resistivity data. However, fitness was not good at deeper part because drilling data were limited and the resistivity structure had low resolution at this depth.

キーワード：人工ニューラルネットワーク、比抵抗、温度

Keywords: Artificial Neural Network, Resistivity, Temperature

超臨界地熱貯留層における誘発地震発生現象理解のための実験的アプローチ

Laboratory study of induced seismicity in a brittle-ductile transition regime

*増田 幸治¹*Koji Masuda¹

1.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

地下深部数kmにある超臨界状態の岩体を利用した発電を実現するにあたって、誘発地震（注水等の人為的行為によって発生する地震）のリスク低減は重要課題のひとつである。現在開発されている地熱貯留層は比較的低温・低圧領域であるため脆性的な力学挙動を示し、誘発地震を引き起こすが、超臨界地熱貯留層では高温・高圧環境下のために、岩盤が延性的な力学挙動を示し、誘発地震の問題はないと考えられてきた。しかし、最近の地震観測によると、地下10km程度の地殻深部においても、微小地震が発生していることが観測されている。また、KTBなどの深部掘削でも脆性-塑性遷移領域においても地殻が脆性的性質を示すということが知られている。このように超臨界地熱貯留層領域でも地殻が脆性的性質をもち、微小地震が発生する場面があることがわかってきたが、その発生条件やメカニズムについては、超臨界地熱開発にとっても学問的にも重要な課題であるにもかかわらず、まだよくわかっていない。特に、超臨界地熱貯留層あたりの温度圧力条件、500℃、100MPa近傍での誘発地震発生条件についての検証が今後の超臨界地熱開発にとっても重要な知見となる。実際の開発前に、超臨界状態にある岩体内で発生する地震関連現象を理解しておくためには、脆性-塑性遷移領域での地震観測とともに、室内実験による検証が有用な手段となる。そこで、超臨界領域における誘発地震理解のために実験的アプローチの現状についてレビューし、その問題点や今後の課題を整理した。地殻深部環境において、間隙圧や間隙流体の温度変化による地震発生条件やそれによって誘発された地震のメカニズムと観測可能性を検証することが室内岩石実験における重要課題のひとつである。

キーワード：脆性-塑性遷移領域、岩石実験、誘発地震、超臨界地熱貯留層

Keywords: brittle-ductile transition, laboratory rock mechanics, induced seismicity, supercritical geothermal reservoir

封圧下高温き裂性花崗岩の浸透率

Permeability of high-temperature fractured granite under confining stress

*渡邊 則昭¹、江川 基樹¹、坂口 清敏¹、土屋 範芳¹

*Noriaki Watanabe¹, Motoki Egawa¹, Kiyotoshi Sakaguchi¹, Noriyoshi Tsuchiya¹

1.東北大学大学院環境科学研究科

1.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

A new and economically attractive type of geothermal resource was recently discovered in the Krafla volcanic system, Iceland, consisting of supercritical water at 450 °C immediately above a 2-km deep magma body. Similar resources may be widespread below conventional geothermal systems. However, in case of such geothermal resources, it is expected that the reservoir rocks are ductile and have low permeabilities. One of possible ways to enhance permeabilities of ductile rocks is hydraulic and/or thermal fracturing. Although creating fractures may be possible, there is concern about the permeability of the fractured rock after recovery of temperature and/or effective confining stress to the initial state, at which plastic deformation of fracture surface may occur. The present study has experimentally explored permeability of thermally fractured granite at temperatures of 350-500 °C under confining stress up to approximately 100 MPa. It has been found that, at each temperature, a change in stress dependency of permeability occurs at a specific stress level, beyond which permeability reduction with increasing effective confining stress is much larger, and the permeability reduction is irreversible, due to transition from elastic to plastic deformation of fracture surface.

キーワード：浸透率、き裂、地熱

Keywords: Permeability, Fracture, Geothermal

メルト包有物解析による古カルデラのマグマ溜まり深度と地殻流体活動の関連：東北日本，白沢カルデラの例

Depth distributions of magma chambers under old calderas revealed by melt inclusions, and their relation with geofluid activities: Examples from Shirasawa caldera, NE Japan

*宇野 正起¹、鈴木 拓¹、山田 亮一¹、奥村 聡²、土屋 範芳¹

*Masaaki Uno¹, Taku Suzuki¹, Ryoichi Yamada¹, Satoshi Okumura², Noriyoshi Tsuchiya¹

1.東北大学大学院環境科学研究科、2.東北大学大学院地学専攻

1.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 2.Department of Earth Science, Tohoku University

島弧マグマは地殻への水流体供給の最も主要なソースであり、そのマグマ溜まりの深度や含水量の把握は、上部地殻のダイナミクスを理解する上で重要である。特に、2011年の東北沖大地震以降、多くの群発地震が古カルデラ下で発生しており、流体活動が示唆されている(Okada et al., 2015)。白沢カルデラはそのような古カルデラの一つであり、現在の火山フロントの約15 km東側に位置する。その形成年代は7-8 Maであるが、白沢カルデラ下では地震波反射面や地震波低速度異常が観測され、現在でも地殻流体の供給が続いていると示唆されている。このようなカルデラ下の物質科学的な実態を明らかにするために、古カルデラ堆積物中のメルト包有物の解析を行い、マグマ溜まりの深度分布、メルトの含水量、分化過程を明らかにし、地球物理観測との比較を行った。

白沢カルデラの石英中のメルト包有物の主要元素組成は、低アルカリ流紋岩に分類され、斜長石の分化トレンドに載る。一部の試料はSiO₂に比較的乏しくK₂Oに富み、斜長石+石英の分化トレンドで説明できる。微量元素組成は島弧玄武岩で規格化するとSr, Eu負異常があり、斜長石の晶出と調和的である。したがって、石英中のメルト包有物は斜長石-石英間の共融点組成を反映していると考えられ、共融点組成の圧力依存性から捕獲圧力を推定することができる(e.g., Blundy and Cashman, 2001)。推定されたメルト包有物の捕獲圧力は、主に30-300 MPaに集中し、深さ11 kmから1 kmまで上昇しつつ継続的に分化したことが示唆される。また、最も初生的なメルト組成を含め、多くのサンプルが低アルカリ系列に分類されることから、玄武岩質メルトを起源と仮定すると、その発生深度は約10-20 kmと推定される(Best and Christiansen, 2001)。FT-IRによる揮発性成分測定から、メルト包有物の含水量は2.8-5.5 wt%, CO₂含有量は38 ppm以下である。この揮発性成分量から、少なくとも深度1-5 kmではメルトはH₂Oに飽和していたことが明らかになった。

一方、白沢カルデラ下では反射法地震探査によりカルデラ深度が1.5 km程度であること、深度2-5 kmに反射面があり、水流体に富む深成岩の存在が示唆されている(Sato et al., 2002)。また、地震波トモグラフィーにより5-10 kmに低V_p, V_s・高ポアソン比の領域が、10-20 kmに低V_p, V_s・中ポアソン比の領域が観測されており、水流体に富む領域と推測されている(Nakajima et al., 2006)。これらの低速度域や反射面は、本研究で見積もられた分化場(≒マグマ溜まり)深度の1-11 km、およびマグマ発生深度(10-20 km)に対応し、マグマ溜まりの残渣あるいは集積岩が流体貯留層となっていると考えられる。

Best, M.G., Christiansen, E.H., 2001. *Igneous Petrology*. Blackwell Science.

Blundy, J., Cashman, K., 2001. Ascent-driven crystallisation of dacite magmas at Mount St Helens, 1980-1986. *Contrib. to Mineral. Petrol.* 140, 631-650.

Nakajima, J., Hasegawa, A., Horiuchi, S., Yoshimoto, K., Yoshida, T., Umino, N., 2006. Crustal heterogeneity around the Nagamachi-Rifu fault, northeastern Japan, as inferred from travel-time tomography 843-853.

Okada, T., Matsuzawa, T., Umino, N., Yoshida, K., Hasegawa, A., Takahashi, H., Yamada, T., Kosuga, M., Takeda, T., Kato, A., Igarashi, T., Obara, K., Sakai, S., Saiga, A., Iidaka, T., Iwasaki, T., Hirata, N., Tsumura, N., Yamanaka, Y., Terakawa, T., Nakamichi, H., Okuda, T., Horikawa, S., Katao, H., Miura, T., Kubo, A., Matsushima, T., Goto, K., Miyamachi, H., 2015. Hypocenter migration and crustal seismic velocity distribution observed for the inland earthquake swarms induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in NE Japan: Implications for crustal fluid distribution and crustal

permeability. *Geofluids* 15, 293-309.

Sato, H., Imaizumi, T., Yoshida, T., Ito, H., Hasegawa, A., 2002. Tectonic evolution and deep to shallow geometry of Nagamachi-Rifu active fault system, NE Japan. *Earth, Planets Sp.* 54, 1039-1043.

キーワード：地殻流体、古カルデラ、メルト包有物

Keywords: Geofluid, Old caldera, Melt inclusion

高温高压熱水の急減圧による岩石の破壊現象

Occurrence of rock fracture under the rapid decompression condition of hot water

*平野 伸夫¹、青島 聡¹、土屋 範芳¹*Nobuo Hirano¹, Satoshi Aoshima¹, Noriyoshi Tsuchiya¹

1.東北大学大学院環境科学研究科

1.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. This phenomenon was derived by heat stress of cooling by evaporation of water. And, this cooling effect is caused by latent/sensible heat of water. So, it is possible to generate heat stress by rapid decompression of high pressure hot water around the rock samples. Understanding of details and application of this fracturing mechanism may be useful for technological development of geothermal reservoir usage or clarification of vein formation mechanism in the Earth crust. We tried to rapid decompression experiment using granite sample. Experimental sample has a borehole, and rapid decompression is started in borehole bottom. Experimental conditions are from 500 C - 30 MPa to 600 C - 45 MPa. After the experiments, we confirmed the fracturing around the borehole by X-ray CT. In addition, we observed porosity and p-wave velocity of experimental samples. As a result, Fracture and porosity were increased with temperature rising. Maximum porosity was 3.3 %. P-wave velocity was decreased with temperature rising. And, some sample's has a very low P-wave velocity that it is below water's P-wave velocity 1.5 km/s. These results indicate that it is possible to make fracture in rocks under the hydrothermal conditions with rapid decompression.

キーワード：急減圧破碎、岩石熱水相互作用、花こう岩、熱水誘起割れ (HDF)

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

NaCl-H₂O流体の分子動力学計算：地殻における塩水の電気伝導度の予測Molecular Dynamics Simulations of NaCl-H₂O fluid: Prediction of Electrical Conductivity of Salt Water in the Crust*佐久間 博¹、市來 雅啓²*Hiroshi Sakuma¹, Masahiro Ichiki²

1.物質・材料研究機構、2.東北大学

1.National Institute for Materials Science, 2.Tohoku University

水の存在は、岩石の破壊強度や断層の摩擦強度を物理的・化学的に低下させる性質があり、その分布や量を知ることが地震発生のメカニズムを理解する上で重要である。地殻における水は、様々なイオンを溶かした塩水として存在すると考えられ、そのイオン電導により常温常圧では岩石よりも6桁以上高い電気伝導度を示す。この塩水と岩石の電気伝導度の差を利用して、電気伝導度の観測から塩水の分布を調べる研究が実施されている。しかしながら、塩水 (NaCl-H₂O) の電気伝導度は0.4 GPaまでしか知られておらず[1,2]、地殻を想定した高圧条件における塩水の電気伝導度が未解明であったため、地殻の高電気伝導度域を塩水の存在で説明できるかどうかの議論ができなかった。

我々は、地殻を網羅する温度・圧力条件でNaCl-H₂O流体の電気伝導度・密度・分子挙動を明らかにするため、古典分子動力学 (MD) 計算を実施した。実験データの無い高温・高圧・高塩濃度領域を対象とするため、まず臨界点を越えた水の物性を再現・予測するH₂O分子モデルを作成し、その基礎物性および溶媒としての性質をMD計算から議論した[3]。次にこのH₂O分子モデルを用いて、NaCl-H₂O流体の密度・等温圧縮率を計算し、これらのマクロな物性値の変化を水和数や水和半径というミクロな物性で説明した[4]。最終的にNaCl-H₂O流体の電気伝導度をMD計算から導出した[5]。

本発表では、NaCl-H₂O流体の地殻内での挙動を議論するとともに、電磁気観測により発見されている地殻や沈み込み帯の高電気伝導度帯を塩水で説明しようとした場合に、どのような塩濃度・存在量が必要かについて議論する。

References

- [1] Quist, A.S., and Marshall, W.L. (1968) *J. Phys. Chem.* 72, 684-703.
- [2] Bannard, J.E. (1975) *J. Appl. Electrochem.*, 5, 43-53.
- [3] Sakuma, H., Ichiki, M., Kawamura, K., and Fuji-ta, K. (2013) *J. Chem. Phys.*, 138 134506.
- [4] Sakuma, H., and Ichiki, M. *Geofluids*, doi: 10.1111/gfl.12138.
- [5] Sakuma, H., and Ichiki, M. *J. Geophys. Res. -Solid Earth*, in press.

キーワード：水、地震発生域、塩濃度、MD計算

Keywords: Water, Seismogenic zone, Salinity, MD simulation

ストークス流と浸透流の混相流シミュレーションコードの開発：ジオロジカルな時間スケールでの地熱システムの理解に向けて

Development of the Stokes-Darcy coupled flow code for simulating the geothermal system in geological time scale.

*古市 幹人¹、Bauville Arthur^{1,2}

*Mikito Furuichi¹, Arthur Bauville^{1,2}

1.海洋研究開発機構、2.Swiss National Science Foundation

1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Swiss National Science Foundation

The geothermal systems of subduction zones are of great interest as a resource of geothermal energy. In order to evaluate the sustainability and assess the environmental impact of geothermal systems it is important to model their formation and their dynamic evolution. We use numerical simulations to quantitatively investigate the dynamics of crustal deformation coupled with fluid and melt generation for periods ranging from tens of thousands up to millions years. Numerical codes solving Darcy's and Stokes equations are commonly used to simulate fluid flow in porous media and solid crust deformation in the geological time scale (e.g. Bauville et.al. 2015), respectively. However, these earlier numerical simulations did not address both the solid rock deformation and porous fluid flow in a coupled manner without large simplification.

This presentation reports the preliminary results of the development of a coupled simulation code solving Stokes and Darcy equations. The governing equations are based on the work of Katz et. al (2007) which deals with compaction pressure in addition to the hydrostatic and dynamic pressure. Our implementation is designed to include concepts of fracture network commonly used in the engineering field of ground water simulation. We use a hybrid discretization scheme with 1) finite difference method with marker in cell scheme for the Stokes part and 2) finite volume method with unstructured grid for the Darcy part. The non-linear equations of the system are solved by a JFNK frame work (Furuichi and May, 2015). We will perform a series of numerical experiments to demonstrate the feasibility of our developed code.

キーワード：ストークス流、ダルシー流、非線形ソルバー

Keywords: Stokes flow, Darcy flow, nonlinear solver

深部地熱貯留層のナチュラルアナログ -秋田県比立内花崗岩体-

Natural analog of the deep geothermal reservoir -Hitachinai Granitic Rocks-

*清水 正太¹、土屋 範芳¹、宇野 正起¹、山田 亮一²

*Shota Shimizu¹, Noriyoshi Tsuchiya¹, Masaoki Uno¹, Ryoichi Yamada²

1.東北大学大学院環境科学研究科、2.東北大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University

現在、日本における地熱開発は温度が200-300°C、深度が1000-2000mの岩石が脆性的な領域で行われている。近年、再生可能エネルギーによる発電量の増加が期待される中で、純国産エネルギーで二酸化炭素排出量の少ない地熱発電でもより大きな発電が望まれている。

そこで本研究では、さらに大きなエネルギーを得るために既存の地熱開発よりも深部である、温度が350°C以上、深度が2000-5000mの領域を対象にしている。この領域では岩石が延性的な挙動をすると考えられ、誘発地震発生の可能性が低いことや流体が超臨界状態でありエンタルピーが高いことが期待できる。

これまで深部地熱資源に関する地球科学的な研究から、深部地熱資源は静岩圧下で存在すると考えられているため、深部地熱開発を目指す上で重要な静岩圧-静水圧境界の詳細な情報が求められている。そこで本研究の目的はその境界の物質的な証拠を明らかにし、深部地熱資源のナチュラルアナログを提示することとした。そのため花崗岩質岩体周辺のフィールド調査や岩体周辺の鉱物脈や変質帯、流体包有物などの地球化学的な検討を行う。

東北地方には火山やカルデラが多く存在しており、その下部に深部熱源として花崗岩があると考えられている。先行研究では秋田県田沢湖の西に位置する小相沢・大水端花崗岩体の研究が行われており、花崗岩-斑岩の系が超臨界地熱資源のナチュラルアナログとして提示されている。また、Fournier(1999)では静岩圧平衡のもとマグマ性流体を含み形成した脈がセルフシーリング帯とともに存在していることや斑岩銅鉱床型の変質帯を伴っていることが示されている。

そこで本研究では、花崗岩体と縁辺部の安山岩や玄武岩との接触部分にある鉱物脈や変質帯が深部地熱貯留層のアナロジーとなるか検討するために、秋田県中央部に位置する田沢湖複合岩体の北端、比立内花崗岩体を対象として研究をおこなった。ここでは熱源と考えられる花崗岩体とその縁辺部にある鉱物脈や変質帯には静岩圧-静水圧境界の物質的な証拠が期待できる。

フィールド調査の結果、変質部には珪化帯や粘土化帯がみられ、それに伴い数種類の鉱物脈もみられた。主に肉眼で白色の石英脈と暗灰色のガラス質脈、及び熱水角礫岩脈である。本研究では深部熱源と考えられる花崗岩とその周囲の岩石、及びそれらに伴う鉱物脈の主要成分、微量成分などの組成分析や流体包有物分析から、地熱流体が存在した深度や温度を推測し、また元素移動を考慮することで各鉱物脈の形成がどの段階なのかを考察する。脈形成にマグマ性流体もしくは熱水のどちらが関与しているのかは、静岩圧から静水圧へ遷移する段階と関連していると考えられ、深部地熱貯留層の新たな知見につながっていくことが期待できる。今回の発表では深部熱源である花崗岩の定置深度及び温度、さらに各鉱物脈の形成温度圧力条件、鉱物脈の分布から深部地熱貯留層の熱エネルギーなどのポテンシャルについて検討した。

キーワード：深部地熱貯留層、脆性-延性境界、地熱流体、鉱物脈

Keywords: the deep geothermal reservoir, brittle-ductile transition zone, geothermal fluids, mineral filling veins

水熱条件下における花崗岩き裂の溶解によるチャネリングフロー

Channeling flow generated by dissolution of granite fracture under hydrothermal conditions.

*田中 寛人¹、岡本 敦¹、渡邊 則昭¹、土屋 範芳¹

*Hiroto Tanaka¹, Atsushi Okamoto¹, Noriaki Watanabe¹, Noriyoshi Tsuchiya¹

1.東北大学大学院環境科学研究科

1.Graduate school of Environmental Studies, Tohoku University

Fractures act as dominant fluid pathways within the crust, and provide significant influences on transport of energy and heat. As silica solubility increases with increasing pressure and temperature, dissolution and precipitation of silica would provide significant effects on fracture permeability in the crust. Even for mineral dissolution within a single fracture, dissolution at free (non-contact) areas increases the aperture, whereas that at the contact areas decreases the aperture; therefore it is not clear how fracture permeability evolves by mineral dissolution under confining pressure.

The aim of this study is, based on the hydrothermal flow-through experiments, to reveal a porosity structure and permeability evolution during the dissolution of granite fracture. We developed a novel reactor, which enables us flow-through experiment under confining pressure at sub to supercritical condition (up to 350 °C, and examined the porosity structure by X-ray CT repeatedly. In the experiments, fine-grained Aji granite core (Φ10 mm, 400 mm in length) was used. We conducted two series of hydrothermal experiments. First one is fluid flow through a slit (parallel plates) in the rock core. The analyses of solution chemistry passing through the slit and surface morphology revealed that quartz dissolved preferentially; Qtz was dissolved about five times greater than plagioclase.

Second experiments were performed with a tensile fracture introduced by Brazilian test, in which there was no shear displacement. In this fracture, very fine-grained gouge (granite powder) existed within some parts of the core sample. This experiment was conducted in three steps; at all steps, the fluid pressure was 20 MPa and confining pressure was 40 MPa (the effective pressure of 20 MPa). The first step was the flow through experiment (0.5 ml/min) at room temperature. At this stage (0-140h), fracture permeability decreased from 2.3×10^{-10} to 6.7×10^{-12} (m²), which is consistent with decrease in mean aperture from 65 to 36 μm revealed by X-ray CT images. At the second step (140-290 h), the core sample was set without fluid flow (stagnant fluid) at 350 °C. At this stage, permeability continuously decreased from 6.7×10^{-12} to 4.0×10^{-12} (m²), corresponding to the decrease in aperture from 36 to 21 μm. During the interval of stages 1 and 2, the aperture decreased uniformly for the entire fracture plane. These findings indicate that the aperture decrease attributes to the compaction of gouges within the fractures. At the final stage (290-300 h), flow through experiment (0.5 ml/min) was conducted at 350 °C. At this stage, permeability recovered immediately toward 8.5×10^{-12} (m²), and complex aperture structure was developed by mineral dissolution. Preferential dissolution occasionally occurred at the quartz grains as found in the experiment with a slit, but an interesting feature is that connected porosity network was developed regardless the minerals on the fracture plane. A flow simulation with using the X-ray CT-based 2D aperture distribution indicates that the preferential flow path (channeling flow) was developed along this porosity network. We interpret that this flow path was developed by preferential dissolution of gouge in the fracture. In contrast, the preferential dissolution of quartz does not contribute the flow due to the isolated distribution of quartz in granite. In natural settings, gouge was produced in fractures during fracturing or faulting of a rock. Our experiments suggest

that, even when the initial aperture was very small for these gauge regions, the preferential dissolution occur due to significant surface areas of the gauges, which would significant effects on the formation of the preferential flow path under hydrothermal conditions.

キーワード：チャネリングフロー、溶解、水熱

Keywords: Channeling flow, dissolution, hydrothermal

脆性から延性挙動を示す条件下における岩石き裂の力学的・水理学的特性

Mechanical and Hydraulic Characteristics of Rock Fracture Under Brittle-Ductile Transition

*武山 詳¹、坂口 清敏¹、渡邊 則昭¹

*Sho Takeyama¹, Kiyotoshi Sakaguchi¹, Noriaki Watanabe¹

1.東北大学大学院環境科学研究科

1.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

A new concept of Enhanced Geothermal System (EGS), in which geothermal fluids are produced from a fractured reservoir created artificially within an originally semi-brittle or ductile basement, has been proposed. To assess the potential of the new geothermal system, the "Japan Beyond-Brittle Project (JBBP)" has also been recently initiated, and the author have conducted fundamental investigations on mechanical and hydraulic characteristics of the new type of reservoir, in which the rock is first experiences hydraulically and/or thermally induced brittle failure, and then subjected to the temperature and pressure conditions where the rock exhibits semi-brittle or ductile stress-strain behavior at the natural condition. Kawarago tuff have been used in the present study, because brittle, semi-brittle and ductile stress-stain behaviors of the tuff specimen can be controlled only with confining stress level at the room temperature. At confining stresses up to 40 MPa, tri-axial compression and fluid flow experiments have been conducted on the specimens without and with thermal fracture.

キーワード：脆性－延性遷移領域、EGS、力学特性、水理学特性

Keywords: brittle-ductile transition zone, EGS, Mechanical Characteristics, Hydraulic Characteristics

延岡衝上断層のプレート沈み込み巨大分岐断層周辺における石英脈形成速度

The formation rate of quartz vein along seismogenic megasplay fault Nobeoka Thrust, southwestern Japan

*最首 花恵^{1,3}、岡本 敦²、大坪 誠³

*Hanae Saishu^{1,3}, Atsushi Okamoto², Makoto Otsubo³

1.産総研 再生可能エネルギーセンター、2.東北大学大学院環境科学研究科、3.産総研 地質調査総合センター

1.Renewable Energy Research Center, AIST, 2.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku Univ., 3.Geological Survey of Japan, AIST

Precipitation of minerals has a role to fill the fractures, to form mineral veins, and to affect spatial and temporal change of the permeability of the Earth's crust. However, the change of permeability of crustal rocks has been discussed based on the geophysical properties, not on the geochemical reactions as dissolution-precipitation of minerals. Based on the ubiquitous observation of quartz veins and silica sinters, silica polymorphs are one of the most effective minerals on permeability change. Okamoto et al. (2012) and Saishu et al. (2012) revealed that precipitated silica minerals and precipitation rate depend on the concentrations of minor components in the fluid by the precipitation experiments at 430 °C and 30 MPa. Saishu et al. (2014) also revealed that the depth of the local minimum of quartz solubility where the quartz precipitation is dominant reaction correlates to that of the permeable-impermeable boundary at the Kakkonda geothermal field.

Fault zones including the damage zone and the fault core have a controlling influence on the crust's mechanical and fluid flow properties. In the Nankai subduction zone, southwestern Japan, the velocity structures indicate the contrast of the pore fluid pressure between hanging wall and footwall of the megasplay fault (Tsuji et al., 2014). At Nobeoka Thrust, a major fault bounding the northern and southern Shimanto belt of the Cretaceous-Tertiary accretionary complex in Kyushu, southwestern Japan, the microchemical features of syn-tectonic mineral veins along fault zones of the Nobeoka Thrust provide evidence of temporal fluctuations in redox state during repeated earthquake cycles within a seismogenic megasplay fault in an ancient subduction zone (Yamaguchi et al. 2011). The measurement of the strike, dip, width and length of the quartz veins that fill mode I cracks (extension quartz veins) around the fault zone of the Nobeoka Thrust indicated that the fluid driving pressure ratio P^* at the time of fracture opening are 0.15-0.40 in the hanging wall and footwall, respectively (Otsubo et al., 2015). Otsubo et al. (2015) suggested two possible explanations for the observed spatial variations in P^* : spatial variations in pore fluid pressure P_f are directly responsible for P^* variations, or P^* variations are controlled by differences in mechanical properties between the hanging wall and footwall.

In this study, the amount and rate of silica precipitation for the formation of the extension quartz veins of the Nobeoka Thrust were calculated to consider the relationship between the time frequency of fracture opening-closing and the precipitation of silica minerals. The initial pressure was lithostatic condition. Basically, the larger pressure drop enhances the larger amount of silica precipitation and the faster sealing of cracks. However, the precipitation rate depends not only PT conditions but also the host rock and fluid compositions etc. The time for the formation of quartz vein at Nobeoka Thrust was estimated in the various models, for example, that pressure drop from lithostatic to lithostatic, hydrostatic, and atmospheric pressure.

References: Okamoto et al. (2010) GCA., 74, 3692-3706; Otsubo et al., (2015) AGU abstract; Saishu et al. (2012), Am.Min., 97, 2060-2063; Saishu et al. (2014) Terra Nova, 26, 253-259; Tsuji et al. (2014) Earth Planet. Sci. Lett., 396, 165-178; Yamaguchi et al. (2011) Earth Planet. Sci. Lett.,

302, 369-377.

キーワード：延岡衝上断層、石英脈、析出反応速度

Keywords: Nobeoka Thrust, Quartz vein, Precipitation rate

深部地熱資源開発におけるMT法比抵抗探査の有効性の検討

Availability of magnetoelluric resistivity survey to explore deep geothermal resources

*山谷 祐介¹、浅沼 宏¹*Yusuke Yamaya¹, Hiroshi Asanuma¹

1.産業技術総合研究所・再生可能エネルギー研究センター

1.Renewable Energy Research Center, AIST

A supercritical geothermal resource, which exists at a deeper part than a brittle-ductile transition, can be one of the dominant renewable energy sources in a volcanic zone. In order to find an appropriate field for utilizing this resource, highly accurate geophysical explorations should be required. A resistivity exploration including the magnetotelluric (MT) method is considered to be a powerful tool for this purpose because resistivity is very sensitive to existence and connectivity of fluids in rocks. We estimated an availability of the MT method to explore such a deep geothermal resource, applying the 3-D resistivity simulation.

We composed 3-D resistivity models to demonstrate geothermal fluids beneath old calderas in NE Japan, which included surrounding seawater and sediments. At first, the conventional MT method examined different bottom depths of the conductive body (=fluids zone). The MT responses from these different cases were compared. All models showed considerable response changes, which were more than 20% compared with the non-conductor model. The existence of the conductor itself can be identified by inversion analysis. However, the change was less than 5%, comparing the response between the models with the 6km and 10 km bottom depths. It might be difficult to identify this difference by any resistivity inversions because the estimated changes were smaller than observational errors.

Next, we calculated the MT responses in the situation that both the electric and magnetic fields were measured in the earth. The different measurement depths were examined. The calculated responses showed the highest change in the case that the measurement depth was deeper than an overlying conductive layer (e.g. sediments). This situation is similar to marine electromagnetic explorations. However, it is technically too difficult to measure the electric field in the earth. Finally, we calculated the MT like response in the situation that the magnetic field was measured in the earth, while the electric field was on the surface. This trial also showed the highest response change in the case that the magnetic measurement depth exceeded a conductive layer. Thus, the downhole magnetic field measurement can drastically improve the accuracy of the MT method. A development of the magnetometer to be available under the condition in high- temperature and pressure should be required in order to realize this method.

キーワード：地熱、比抵抗構造、マグネトテルリック法

Keywords: geothermal, resistivity structure, magnetotelluric method

分子動力学シミュレーションによる石英面間の高温の水の物理化学特性

Physicochemical properties of water confined between quartz surfaces at elevated temperatures by molecular dynamics simulation

*石川 慧¹、佐久間 博²、土屋 範芳¹

*Satoru Ishikawa¹, Hiroshi Sakuma², Noriyoshi Tsuchiya¹

1.東北大学大学院環境科学研究科、2.国立研究開発法人 物質・材料研究機構

1.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 2.National Institute for Materials Science

Interfacial water, of which physicochemical properties were different from bulk water, was recognized in the vicinity of solid surface. The physical properties of interfacial water show unique characteristics, for example the self-diffusion coefficient, thermal expansion coefficient and freezing point. The property of interfacial water is essential for understanding geophysical and geochemical phenomena.

Although the phenomena of interfacial water have been studied theoretically and experimentally, the dynamics of the interface at high temperature and pressure remains unclear. In this study, we performed the molecular dynamics (MD) simulations to understand the structure and dynamics of water confined between quartz surfaces at 298-573 K, 10 MPa.

We tested some systems of water confined between quartz surfaces characterized by the termination of silanol (Si-OH) group. At low temperature, the density profiles showed several layered structures near the surface, and the self-diffusion coefficient was reduced in 1.0 nm distance from the surface. At high temperatures, the layered structures were disappeared and the self-diffusion coefficient was reduced in 1.5 nm.

The activation energies of the diffusion process in confined geometries were calculated based on the Arrhenius theory, and these values were close to that of bulk water. This implied that the diffusion mechanism in confined geometries is similar that in bulk and the activation energy may be interpreted by the dissociation energy of hydrogen bond.

Based on these results, the relationship of between geophysical phenomena and interfacial water will be discussed.

キーワード：界面水、石英、分子動力学、自己拡散係数

Keywords: interfacial water, quartz, Molecular dynamics, self-diffusion coefficient