

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25350500

研究課題名(和文)断層内石英粒子を用いた水和層年代測定法による最新活動時期の特定

研究課題名(英文) Identification of recent fault activity by measurement of hydration thickness using quartz from faults

研究代表者

丹羽 正和 (NIWA, Masakazu)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター・研究副主幹

研究者番号：90421685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、自然界の代表的な鉱物である石英の表面が水と反応してできる水和層の厚さから、断層の最新活動時期を推定するための試みである。断層活動が石英の水和層厚さに及ぼす影響を調べるため、二次イオン質量分析装置(SIMS)による水素イオンの分析から水和層の厚さを推定する手法を適用した。

チャートおよび花崗岩中の石英を用いた分析では、断層活動により鏡面状に磨かれて平滑になった断層面上の石英は、断層活動を伴わない自然の岩石表面と比べて試料表面付近の水素イオン濃度の大幅な増加が認められ、断層中の石英の水和層厚さの推定にSIMSが適用できる見通しが得られた。

研究成果の概要(英文)：We focused on hydration of quartz in faulted rocks to identify recent fault activity. Fault activity possibly facilitates a growth of the quartz hydration layer, though hydration rate of quartz is generally too slow. In this study, secondary ion mass spectrometry (SIMS) analysis was applied to examine an influence of fault activity on the quartz hydration. Based on the analyses for quartz from both faulted and unfaulted rocks in chert and granite, significant increase of hydrogen ion concentration along shiny fault planes was clear compared to natural, flat surfaces without fault slip. The SIMS analysis could be applicable for the estimation of hydration thickness of quartz along faults as well as the measurement of obsidian hydration thickness on the archaeological studies. The tests for still more samples should be further studies to examine geochronological application for fault activity.

研究分野：地質学

キーワード：石英 水和 断層 活動性 地質学

1. 研究開始当初の背景

(1) 断層の活動性評価は一般に、断層による変位層と断層を被覆する若い地層の年代から断層活動の時期を推定することによって行われるが(上載地層法)、日本列島のように隆起・侵食の激しい地域では、断層を被覆する若い地層との関係が露頭で欠如している場合も多く、上載地層法によって断層の活動時期が推定できない断層が数多く存在する。一方、基盤岩に発達する断層破砕帯の岩石から直接的に断層の活動時期が特定できれば、日本列島の断層の活動性評価の充実度が格段に増すことが期待される。

(2) 断層の活動時期を破砕帯の岩石から直接推定する手法としては、電子スピン共鳴(ESR)法(Fukuchi, 1996)や熱ルミネセンス法、光ルミネセンス法(Toyoda et al., 2000)などが取り込まれてきた。しかしこれらの手法では、最新の断層活動によるゼロセットが十分かどうかといった問題が残されており、信頼性の高い断層活動年代が安定的に得られるという認識には至っていない。また、K-Ar年代測定法(Niwa et al., 2016a)やフィッション・トラック年代測定法(Ito, 2004)などによる熱年代学的アプローチも試みられているが、地表付近では断層活動に伴う温度上昇がこれらの手法によるゼロセットの温度に達しない、あるいは温度上昇が十分に持続しないため、地表に露出する破砕帯の最新の活動時期を推定するのに直接適用することは難しい。

(3) 本研究では、これらの従来から試みられてきた手法とは全く別のアプローチとして、破砕帯で破壊された石英破断面の水和層厚さを測定することによって断層の最新活動時期を特定する方法の適用性について検討した。

2. 研究の目的

(1) 考古学分野では、石像や石斧などの材料となる黒曜石(ガラス)の年代を推定する手法として、水和層厚さの測定が適用されている(Stevenson et al., 1989)。火山ガラスについても、水和層の厚さと堆積時期との相関関係が見出されている(生田ほか, 2016)。堆積環境にもよるが、火山ガラスの水和速度は概ね $1 \mu\text{m}/\text{千年}$ のオーダーである。一方、石英はガラスと比べて水和速度が非常に遅く、室温での拡散係数にすると、前者は $10^{-21} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度、後者は $10^{-17} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度である(Ericson et al., 2004)。

(2) ただし、天然試料の観察や実験的研究からは、断層面において、水和したシリカの潤滑が地震性滑りに大きく寄与している可能性のある証拠が得られており(Hayashi and Tsutsumi, 2010; Kirkpatrick et al., 2013)、断層活動が水和層の成長を促進させている

可能性がある。実際、断層面でのシリカの水和・ゲル化は、摩擦溶融によるシュードタキライトの形成や、断層ガウジの流動化、粘土鉱物の分解などとともに、過去の地震性すべりの物質科学的な痕跡として主張されている(Faber et al., 2014)。

(3) 水和層厚さの測定は従来、偏光顕微鏡観察による屈折率の違いで水和層を認定し、その厚さを計測するという方法がなされていたが(勝井・近堂, 1967)、近年は加速器やSIMS(二次イオン質量分析装置)によってイオンビームを水和層に照射し、発生する二次イオンを分析することによって微小な水和層の厚さを計測する手法が提案されている(Ericson et al., 2004; Liritzis and Laskaris, 2009)。本研究においても、SIMSを用いてイオンビームを断層面などから抽出した石英表面に照射し、発生する二次イオンを分析することによって水和層の厚さを推定し、断層活動が石英の水和層厚さに及ぼす影響について検討した。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、付加体のチャート(米国カリフォルニア州のFranciscan Complexおよび中部日本の美濃帯)、東海地方の鮮新統土岐砂礫層中の石英、および敦賀半島の江若花崗岩中の石英を用いてSIMS分析を行った。各岩石の定常的な水和層の形成速度に対し、断層活動の影響により水和層がどれだけ成長しているかを評価するため、同じ岩石試料において、1) 鏡肌の明瞭な断層面、2) 断層活動による破砕や変位を被っていない自然の岩石表面で凹凸のほとんど無い部分、3) 研磨した岩石内部の面、のそれぞれについて二次イオンの深さプロファイルを取得して比較した。

(2) SIMS分析は材料科学技術振興財団に設置されているPhysical electronics PHI 6650またはPHI ADEPT 1010を用いて行った。一次イオンとしてCsイオンを照射し、二次イオンとしてH, Si, O, Alイオンの強度の試料表面からの深さ $10 \mu\text{m}$ までのプロファイルを取得した。石英標準試料も併せて計測し、規格化处理により、水和層の発達の指標としてHイオンの濃度の深さ分布を計算した。一次加速電圧は 5.0 kV 、検出領域は約 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 、測定精度は $\pm 40\%$ (2σ)である。

(3) Franciscan Complexのチャート試料は、Kirkpatrick et al. (2013)が断層鏡肌におけるシリカのゲル化を報告している露頭から採取した。この断層沿いでは、幅数 cm で岩石がカタクレーサイト化している。美濃帯のチャート試料は、木曾川沿いの鏡肌を伴う小断層およびその周辺の露頭のものである。小断層は熱水活動に伴う石英脈に沿って発達している。チャート中のこれらの断層の詳細

細な活動史は不明であるが、露頭での産状からは、数百万年前より古い時期の活動の産物であると考えられる。土岐砂礫層からは、美濃帯起源チャート礫の平滑な表面、および風化により軟質化（クサリ礫化）した濃飛流紋岩の礫から分離した石英粒子の表面を分析した。土岐砂礫層での分析は断層活動を伴わない堆積物中での石英水和層の成長の程度を調べるための位置づけである。敦賀半島の江若花崗岩においては、40Ma ごろに熱水変質を伴う断層活動によって形成されたと推定される断層ガウジ (Niwa et al., 2016a) に沿った鏡肌の明瞭な断層面上の石英、および花崗岩健岩部に発達する節理面上の石英を対象とした分析を行った。さらに、江若花崗岩中に発達する活断層である白木-丹生断層の断層ガウジ、および花崗岩を被覆する崖錐堆積物から分離した石英粒子（径 0.5~1 mm）についても、平らな面が上面に向くように試料台に固定して SIMS 分析を行った。

4. 研究成果

(1) Franciscan Complex および美濃帯のチャート試料を対象とした SIMS 分析の結果からは、断層鏡肌の面では、水素イオン濃度の大幅な増加が、試料表面から 1 μm 以上の深さにまで及んでいることが分かった（図 1 および 2 の赤色）。一方、同じ試料を #4000 までの研磨剤で研磨し、断層面の影響を除去した場合の分析では、試料表面近傍での水素イオン濃度の大幅な増加は認められない（図 1 および 2 の青色）。また、土岐砂礫層中のチャート礫表面と、クサリ礫化した濃飛流紋岩礫から分離した石英粒子表面の分析では、水素イオン濃度の増加部分は、せいぜい試料表面から 0.5 μm 以内の深さにとどまっている（図 3）。

(2) 本研究で分析対象とした土岐砂礫層は鮮新世の陸成（河川性）堆積物であることから、数百万年程度の期間では、自然状態での石英の水和層の成長は最も進行した場合でも 0.1 μm のオーダー以内であることが言える。したがって、断層鏡肌の試料表面から 1 μm 以上の深さにわたる水素イオン濃度の大幅な増加は、断層活動に伴って水和層の成長が促進された影響を見ている可能性が大きいことが主張される。美濃帯チャート試料については、断層活動による破碎や変位を被っていない自然の平坦面における測定結果（図 2 の緑色）より、不純物としての表面吸着物の影響が試料表面より 0.7 μm 程度の深さまで認められるが、それを考慮しても、断層鏡肌の面では、断層活動によりそれ以上に水和が進行したことが示唆される。

(3) 江若花崗岩から採取した石英試料を分析したところ、節理面上の石英、花崗岩を被覆する崖錐堆積物から分離した石英粒子、花崗岩を #4000 までの研磨剤で研磨した面上の

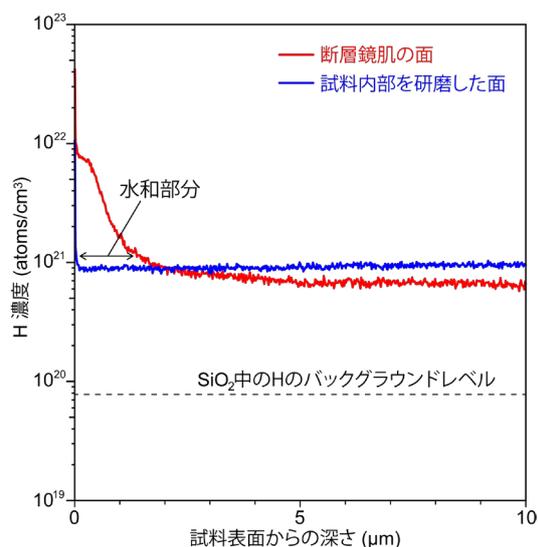


図 1 Franciscan Complex チャート試料の SIMS 分析結果

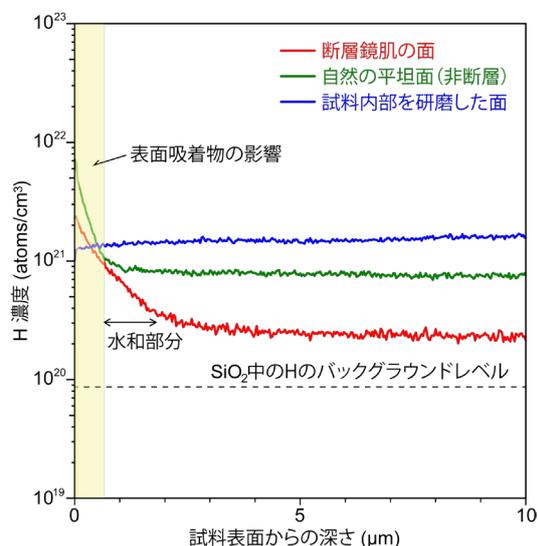


図 2 美濃帯チャート試料の SIMS 分析結果

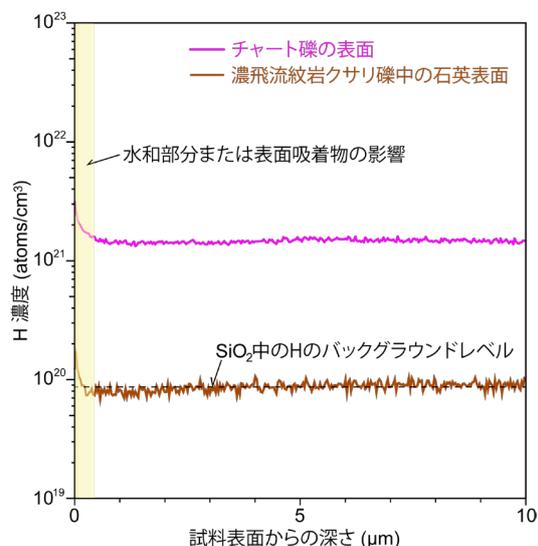


図 3 土岐砂礫層の試料の SIMS 分析結果

石英、活断層（白木-丹生断層）の断層ガウジから分離した石英粒子のいずれも、表面吸着物（不純物）の影響と推定される試料表面から約 1 μm の深さまでを除き、水素イオン濃度はバックグラウンドレベルかそれ以下となった（図4）。すなわち、チャートと異なり、江若花崗岩中の石英には一般的に水素イオンは全く含まれていないことが分かる。一方、40Ma ごろの熱水変質を伴う断層の鏡肌面上の石英では、バックグラウンドの 10 倍

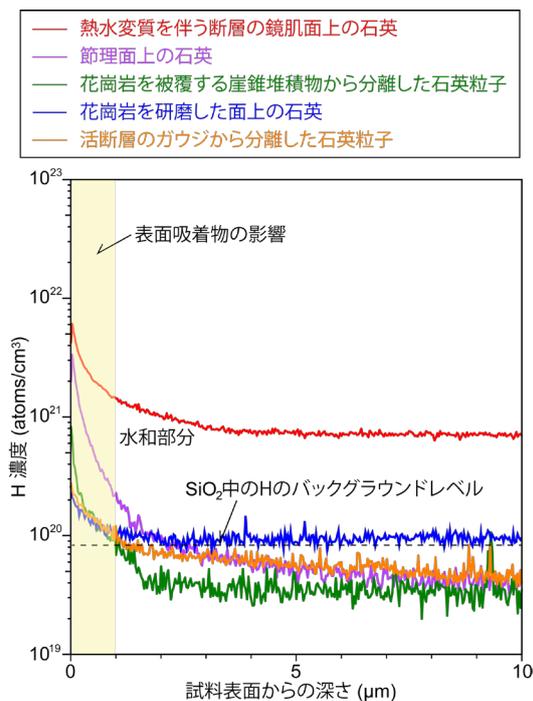


図4 江若花崗岩から採取した石英試料のSIMS分析結果

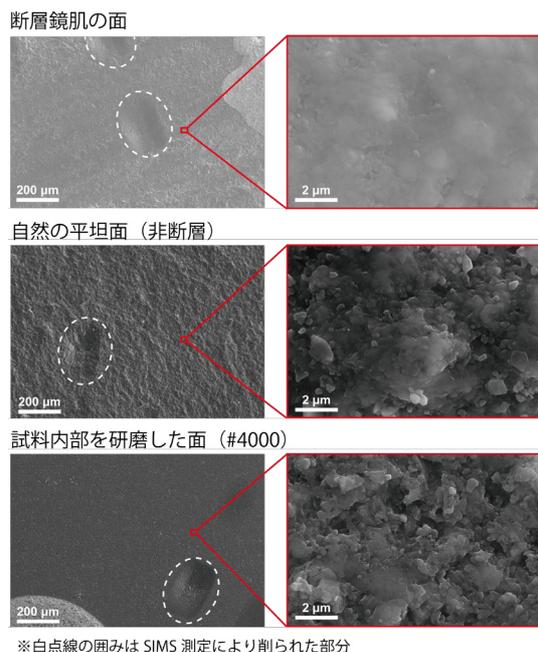


図5 SIMS分析を行った試料表面の電子顕微鏡写真（美濃帯チャート試料の例）

かそれ以上の濃度の水素イオンが検知され、特に試料表面から 2~3 μm 程度の深さまでは、それより深き水素イオン濃度が大きく増加しているように見える。

(4) 以上より、チャートおよび花崗岩のいずれの試料についても、鏡肌の明瞭な断層面では、断層活動に伴って水和層の成長が促進された可能性が大きいことが分かった。ただし、これらのうち美濃帯のチャートや江若花崗岩中の断層はそれぞれ断層沿いに広く熱水変質も被っており、温度上昇の要因として摩擦熱に加え熱水活動の影響も検討する必要があるほか、水和に関与した水の起源についても現地性・異地性の両方が考えられる。水和層の成長促進を支配する主な要因（すべり速度、温度、温度上昇の持続時間など）を特定するためには、フィールドでの事例に加え実験的検証の蓄積も必要であり、今後の課題である。

(5) また、SIMS分析を行った試料表面を電子顕微鏡で観察すると、1万倍程度のスケールでも断層鏡肌の面は十分に平滑であることが認められるのに対し、#4000までの研磨剤で研磨した面は1000倍程度のスケールでも凹凸が目立ってくる（図5）。SIMS測定では測定面の凹凸が測定精度に大きく影響するとされているが、本研究については、研磨面に対する測定結果がいずれの試料も深さ方向に水素イオン濃度の大きな変動がほとんどないことを踏まえると、測定面の凹凸による測定値への影響は考慮する必要はないと考えられる。

(6) 江若花崗岩に対する測定では、活断層の断層ガウジから分離した石英粒子については、表面吸着物の影響が無視できる範囲では、バックグラウンドを有意に上回る水素イオンが検出されなかった。これは、地表付近での最近の断層活動では鉱物粒子の破壊により新しい破断面が形成されるため、水和層の発達しない、新鮮な表面を測定していることが考えられる。このことは、電子顕微鏡によって観察される石英粒子表面構造の傾向が、活断層と非活断層とで大きく異なる（最近まで繰り返し活動している断層ほど新鮮な破断面を持つ石英粒子が卓越する；Niwa et al., 2016b）ことと調和的である。

(7) 水和層の厚さの分析でSIMSが適用された例は、考古学分野で黒曜石を対象としたものはあるが（Liritzis and Laskaris, 2009）、本研究により、断層面上の石英、あるいは断層破砕帯中の石英粒子の水和層厚さの推定にもSIMSが適用できる見通しが得られた。今後は、前述の通り水和層の成長促進を支配する主な要因を特定するための実験的検証に加え、水和層の厚さの違いと断層の活動時期との関係を明らかにする上で適用事例を

蓄積していくことも課題である。

(8) 本研究ではさらに、断層活動に伴う石英の水和反応との相関を検討するための基礎資料とするため、断層破碎帯から抽出した石英の ESR 信号測定や、断層岩の化学組成分析を行った。ESR 信号については、酸素空孔に由来する信号 (E1' 中心信号など)、不純物に由来する信号 (Al 中心信号や Ti-Li 中心信号) のいずれについても、断層の活動性との明瞭かつ定量的な関係を得るまでには至らなかった。化学組成分析については、活断層のすべり面に沿って MnO の増加や FeO の減少、Ce の正の異常といった地下から上昇した地下水の酸化に伴う化学組成変化が特徴的に認められ、断層破碎帯の構造解析と組み合わせることにより、活断層と非活断層とを識別する指標の一つとなり得ることが示された。化学組成分析に係るこれらの知見は、石英の水和反応とも関係する断層沿いにおける水-岩石反応の特徴を復元する上で重要であると言える。

<引用文献>

- ① Fukuchi, T., Direct ESR dating of fault gouge using clay minerals and the assessment of fault activity, *Engineering Geology*, Vol. 43, 1996, pp. 201-211.
- ② Toyoda, S., Rink, W. J., Schwarcz, H. P., Rees-Jones, J., Crushing effects on TL and OSL on quartz: relevance to fault dating, *Radiation Measurements*, Vol. 32, 2000, pp. 667-672.
- ③ Niwa, M., Shimada, K., Tamura, H., Shibata, K., Sueoka, S., Yasue, K., Ishimaru, T., Umeda, K., Thermal constraints on clay growth in fault gouge and their relationship with fault zone evolution and hydrothermal alteration: Case study of gouges in the Kojaku Granite, Central Japan, *Clays and Clay Minerals*, Vol. 64, 2016a, pp. 86-107.
- ④ Ito, H., Apatite fission-track dating of fault-related rocks along the Nojima and Kusumoto faults and its tectonic significance, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, 2004, L21610, DOI:10.1029/2004GL020776.
- ⑤ Stevenson, C. M., Carpenter, J., Scheetz, B. E., Obsidian dating: Recent advances in the experimental determination and application of hydration rates, *Archaeometry*, Vol. 31, 1989, pp. 193-206.
- ⑥ 生田正文, 丹羽正和, 檀原 徹, 山下 透, 丸山誠史, 鎌滝孝信, 小林哲夫, 黒澤英樹, 國分(齋藤) 陽子, 平田岳史, 歴史時代に噴出した同一火山由来の軽石層の同定: 宮崎平野で見出された桜島文明軽石の例, *地質学雑誌*, Vol. 122, 2016, pp. 89-107.
- ⑦ Ericson, J. E., Dersch, O., Rauch, F., Quartz hydration dating, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 31, 2004, pp. 883-902.
- ⑧ Hayashi, N., Tsutsumi, A., Deformation textures and mechanical behavior of a hydrated amorphous silica formed along an experimentally produced fault in chert, *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, 2010, L12305, DOI:10.1029/2010GL042943.
- ⑨ Kirkpatrick, J. D., Rowe, C. D., White, J. C., Brodsky, E. E., Silica gel formation during fault slip: Evidence from the rock record, *Geology*, Vol. 41, 2013, pp. 1015-1018.
- ⑩ Faber, C., Rowe, C. D., Miller, J. A., Fagereng, Å., Neethling, J. H., Silica gel in a fault slip surface: Field evidence for palaeo-earthquakes?, *Journal of Structural Geology*, Vol. 69, 2014, pp. 108-121.
- ⑪ 勝井義雄, 近堂祐弘, 黒曜石の水和層による年代測定法, *第四紀研究*, Vol. 6, 1967, pp. 168-171.
- ⑫ Liritzis, I., Laskaris, N., 2009, Advances in obsidian hydration dating by secondary ion mass spectrometry: world examples, *Nuclear Instruments and Methods Physics Research B*, Vol. 267, 2009, pp. 144-150.
- ⑬ Niwa, M., Shimada, K., Aoki, K., Ishimaru, T., Microscopic features of quartz and clay particles from fault gouges and infilled fractures in granite: discriminating between active and inactive faulting, *Engineering Geology*, Vol. 210, 2016b, pp. 180-196.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Niwa, M., Shimada, K., Aoki, K., Ishimaru, T., Microscopic features of quartz and clay particles from fault gouges and infilled fractures in granite: discriminating between active and inactive faulting, *Engineering Geology*, 査読有, Vol. 210, 2016, pp. 180-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.013>
- ② 丹羽正和, 石丸恒存, 島田耕史, 地球科学の原子力安全への貢献 (その 2) 破碎物質の鉱物・化学分析と断層の活動性評

価, 日本原子力学会誌, 査読無, Vol. 58, 2016, pp. 167-171.

- ③ 生田正文, 丹羽正和, 檀原 徹, 山下 透, 丸山誠史, 鎌滝孝信, 小林哲夫, 黒澤英樹, 國分(齋藤) 陽子, 平田岳史, 歴史時代に噴出した同一火山由来の軽石層の同定: 宮崎平野で見出された桜島文明軽石の例, 地質学雑誌, 査読有, Vol. 122, 2016, pp. 89-107.
DOI:10.5575/geosoc.2016.0003

- ④ Niwa, M., Shimada, K., Tamura, H., Shibata, K., Sueoka, S., Yasue, K., Ishimaru, T., Umeda, K., Thermal constraints on clay growth in fault gouge and their relationship with fault zone evolution and hydrothermal alteration: Case study of gouges in the Kojaku Granite, Central Japan, Clays and Clay Minerals, 査読有, Vol. 64, 2016, pp. 86-107.
DOI:10.1346/CCMN.2016.0640202

- ⑤ Niwa, M., Mizuochi, Y., Tanase, A., Changes in chemical composition caused by water-rock interactions across a strike-slip fault zone: case study of the Atera Fault, Central Japan, Geofluids, 査読有, Vol. 15, 2015, pp. 387-409.
DOI:10.1111/gfl.12096

[学会発表] (計5件)

- ① 丹羽正和, 島田耕史, 断層運動が石英の水和層厚さに及ぼす影響: SIMS による分析, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017年5月25日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)
- ② 丹羽正和, 田辺裕明, 石丸恒存, 島田耕史, 植木忠正, 花崗岩中に発達する断層や粘土脈に含まれる鉱物粒子の微細構造, 日本応用地質学会研究発表会, 2015年9月24日, 京都大学宇治キャンパス(京都府宇治市)
- ③ 田辺裕明, 丹羽正和, 石丸恒存, 島田耕史, 植木忠正, 花崗岩中に発達する断層や粘土脈についての現地調査, 日本応用地質学会研究発表会, 2015年9月24日, 京都大学宇治キャンパス(京都府宇治市)
- ④ 清水麻由子, 丹羽正和, 田中義浩, 青木和弘, 亀高正男, 六甲断層・五助橋断層の断層岩における化学組成変化, 日本地質学会第122年学術大会, 2015年9月11日, 信州大学長野(工学)キャンパス(長野県長野市)

- ⑤ Niwa, M., Shimada, K., Aoki, K., Seshimo, K., Tanaka, Y., Okubo, N., Kondo, K., Yasue, K., Ishimaru, T., Umeda, K., Difference of microscopic texture between fault gouges and hydrothermal clay veins, Geological Society of America 125th Annual Meeting, 2013年10月30日, デンバー(米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丹羽 正和 (NIWA, Masakazu)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター・研究副主幹
研究者番号: 90421685

(2) 研究分担者

島田 耕史 (SHIMADA, Koji)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・高速炉研究開発部門 もんじゅ運営計画・研究開発センター・技術副主幹
研究者番号: 10446403