

研究ノート (査読あり)

断層試料中の希ガス放出と年代若返り : VG5400 の NGX 化による測定

Noble gas release and age rejuvenating during co-seismic faulting: analyzed by
NGX conversion of the electrical system of VG5400

佐藤佳子^{*,***}・熊谷英憲^{**,**}

Keiko Sato^{*,***} and Hidenori Kumagai^{**,**}

* 帝京大学理工学部総合理工学科, Teikyo University, Faculty of Science and Engineering,
Department of Integrated Science and Engineering

** 学習院女子大学, 国際コミュニケーション学科, Gakushuin Women's College, The
Graduate School of International Cultural Relations

*** 国立研究開発法人海洋研究開発機構海底資源センター, Japan agency for Marine-Earth
Science and Technology (JAMSTEC), Submarine Resources Research Center (SSRC)

Abstract

Noble gases are inert and rarely react with other elements, it is believed that, when the temperature of a mineral rises above its closure temperature, the mineral reaches equilibrium with the surrounding isotopic ratios and experiences "age rejuvenation." Sato et al. (2009) previously reported the isotope ratio measurement of noble gases released in frictional melting experiments as a method to reset the age of model faulted of molten rocks. This corresponds to a co-seismic sliding velocity of 1.6m/s and a stress of 1.4 MPa. In this friction experiment, the maximum temperature (about 1140°C) was reached in less than second sliding began ("*first fuse*"; Hirose and Shimamoto, 2005). The friction surface showed completely molten glass due to the heat of friction. Compared to the melted rock specimen, a large amount of atmospheric argon gas degassed during the "*first fuse*" in the granite experiment; the specimen melted within about five seconds of friction time, and most of the argon gas was released near the fault plane. This volatile gas release may affect atmospheric conditions near faults and the rejuvenation age of source rocks in large earthquakes.

Keywords: K-Ar dating, frictional melting, age rejuvenation, diffusion

1. はじめに

断層面には、シュードタキライトと呼ばれる再熔融しガラス化した岩石が発見されることがある。このガラス化したシュードタキライトは岩石の熔融の痕跡を根拠に、断層すべり等の際に発生した摩

擦熱によって加熱されたと考えられている。断層面に挟まれたメルトは、ガラス化するが、表面の凹凸は意味をなさなくなるため、滑り面が滑らかになると別のメカニズムで摩擦係数が下がっていくようになる。Shimamoto and Tsutsumi

(1994)では、円筒状の岩石試料（斑れい岩）を出発物質として、高速回転させ、滑り面を熔融した場合の摩擦の変位量を求めている。

一方、Hirose and Shimamoto (2005)によれば、この摩擦実験では滑り開始後1秒未満で、first fuse と呼ばれる最大値の1140度に達し、その後完全に熔融したsecond fuseに移り摩擦係数も下がっていくことが実験からわかってきた。Sato et al. (2009a)では、この実験条件にガス雰囲気条件を規定して、閉鎖環境下（closed system）での摩擦熔融実験を行った。力学的条件については、Hirose and Shimamoto (2005)に従い設定し、すべり速度1.6 m/s（co-seismicすべり速度に相当）、応力1.4 MPaで行った。断層面からの2 cm程度の範囲に摩擦による破壊と変成が見られ、数ミリ程度の範囲に摩擦熱編成による年代の若返りが見られ、ガラス化したメルト部分は年代が若返りまたはリセットしていることがわかった。また、この摩擦の際には摩擦熱による岩石から脱ガスしていることがわかり、摩擦熔融の際の短い時間でも大気との平衡にいたる同位体分別のメカニズムに対するヒントを得た。

一方、Zwingmann et al. (2019)によれば、断層粘土鉱物断層ガウジ中の希ガス同位体の放射起源 Ar 成分に注目し、K-Ar 系の同位体年代測定に関し、Ar の拡散の少ない低温領域での外因性の加熱（摩擦熱）について議論している。350°Cまでは外因性のある加熱による年代値に対する放射起源 ^{40}Ar の放出は無視できるとし、地震時よりも低い滑り速度で摩擦滑りが発生した場合、放射起源 ^{40}Ar の損失が約56%に上り、残りの粘土は放射起源 ^{40}Ar の約44%を引き継ぐとし

ている。また、150°C~450°Cでは地震時よりも低い摩擦滑り実験では、放射起源 ^{40}Ar の損失量が増加し、引き継がれる放射起源 ^{40}Ar の量は減少するとまとめているが、粘土鉱物の Ar の保持の問題については言及されていない。

Sato et al. (2009b)では、大気雰囲気ではなく窒素ガスで規定した閉鎖環境下（closed system）での実験を行い、力学的条件については、Hirose and Shimamoto. (2005)に従い、すべり速度1.6 m/s（co-seismicすべり速度に相当）、応力1.4 MPaで、断層摩擦実験を行った。ここでは海底地殻の主要な岩石である斑糲岩類から放出された揮発成分に注目し、岩石に寄与する Ar や He といった、地震の際に放出されるガスにも注目しており、Wakita et al.,(1980)、杉崎・杉浦 (1986)で示されたような、Ar や He の大気放出が断層起源であることを支持する結果となった。

そこで、本研究では、出発物質として大陸地殻の主要な成分である花崗岩類を用いて、新たにモデル断層としての摩擦実験を行い、断層年代の若返りの可能性に関して検討する。

2. モデル断層による摩擦熔融実験

2.1 出発物質 (starting material) の成分

今回のモデル断層実験では、Yuhara et al (2003, 2000)で年代と主要元素が報告されている領家変成帯の庵治地域の花崗岩類を使用している。庵治花崗岩類は中粒~粗粒の普通角閃石黒雲母を含む花崗岩であり、成分的に均質なため石材や実験材料としてよく利用されている。K-Ar年代(黒雲母年代；80.4~79.4 Ma, 角閃石年代；83.5Ma)とされている。実験に用いた庵治花崗岩類は、放射起源 ^{40}Ar の起源となる ^{40}K (カリウム) 由来成分と、

放射起源 ^4He の起源となる ^{238}U , ^{235}U (ウランウム) 由来の成分を含んでいる (Yuhara et al., 2003; 柚原, 2008). Table 1 には Yuhara et al. (2003) で年代値とともに報告されている SR-10 (花崗岩) の主要成分を参照している.

また, Yuhara et al. (2003) では, Rb-Sr 年代としてアイソクロン年代; $82.9 \pm 8.0\text{Ma}$ を決定している (Table 1). 庵治花崗岩類は, K_2O を 3.11% 含み, カリウムが非常に多く, 本研究の摩擦実験への出発物質として適している.

2.2 摩擦実験

希ガスは放出される量も, 大気中の成分量も非常に少ないと予想されるため, 海洋研究開発機構高知コア研究所内の高速摩擦試験機を用いた, 高速摩擦実験では, Fig. 1 のように, 大気成分の混入を避けるために窒素充填状態で閉鎖系での実験を行った. 実験装置内に大気の漏れ込みがないように, 真空装置に使用する O リングと同等のゴム状のシーリングを行った. また, ガスサンプリングについては, 直径 5 mm Φ のアルミチューブを用いて, 上位部からの注射器による吸引によりアルミチューブを大気に晒さず両端を封じて採取を行った (Fig. 1).

摩擦実験条件については, 実験では, 香川県庵治地区から採取された一対の円筒形花崗岩試料を, すべり速度 1.6 m/s (余震性すべり速度に相当), 1.0 MPa の一定垂直応力を加えた (Table 2). また, 花崗岩類の実験では, 摩擦圧力により石英が相転移を起こし表面が摩擦破壊されるため, 摩擦面をアルミで巻いて囲み表面から飛び散ることを防いだ. 装置内には, 酸素濃度計を設置して, 大気の漏れ込みをリアルタイムでチェックしながら実験を行った.

3. 希ガス同位体分析と揮発成分の分析

採取したガスを封じたアルミチューブを真空ラインの自動クラッシング装置内に封入セットし, 真空内でアルミチューブを押しつぶしてガスの抽出を行った後,

まず, 精製前のガスを四重極質量分析計 (SRS 社製 RGA-200) で測定して, 揮発成分と希ガスの成分の存在度の測定を行い, この結果をもとにその後の高精度測定のためガスの分離精製を行った. その後 Ti-Zr ゲッターを 4 段で精製し, チャコールトラップでのガス成分の分離を 2 度行い, 測定可能な真空度に希釈した後, HD \cdot He \cdot Ne \cdot Ar \cdot CO $_2$ \cdot Kr \cdot Xe の順に測定を行った. 希ガス同位体分析に関しては, 海洋研究開発機構の希ガス同位体質量分析計 1 号機 GVI-5400HE (YOKOSUKA-MS) を使用した.

また, 2017 年に希ガス同位体質量分析計 2 号機 (KOCHI-MS) の制御電装系を同後継機の NGX 社の電装系へと改変し, デジタル制御での質量分析を実現した. また, 試料の揮発成分のガスを測定するために, この希ガス同位体質量分析計 2 号機 (KOCHI-MS) で, 測定前処理を行えるよう, 質量分析計内の感度の安定化と, 加速電圧と電磁場の測定安定性の向上を図った (Fig. 2).

また, 前位処理真空ラインについてもオンサイトでの試料 (液体もしくは気体) を前処理分析して精製したガスを導入分析できるように改良を行い, 濃度の濃いガスの分析や環境水中のガス抽出などの測定への対応が可能となり, もともと屋外や研究船等でのオンサイト分析にも可能とするために開発した希ガス前処理装置や Ti-Zr ゲッター, ハロゲンゲッター, 硫化ガスゲッターなどを備えた (佐藤・熊谷, 2020; Sato and Kumagai, 2024).

4. 測定結果と考察

花崗岩類の摩擦実験での放出ガスについては, 真空ライン内での Ta 炉での全溶解での測定と異なり, 摩擦熱だけではなく摩擦破砕によるガスも含まれている (Fig. 3).

花崗岩類では, 高速摩擦の際に石英の相転移が起きる可能性があり破壊されやすいため, 斑れい岩類の Sato et al., (2009a;b) での手順に加えて, 摩擦部分を

アルミで囲むなど慎重に摩擦実験を行った。花崗岩の摩擦試験のしやすい実験条件とのことで、応力が斑糲岩類 (1.3N) より、若干低く (1.0N) に設定された。

海洋研究開発機構の希ガス同位体質量分析計での測定の結果として、花崗岩類を用いた当実験では斑れい岩類とは異なり、 ^3He ・ ^4He は短時間では検出されなかった。そのため、もしくは、 He のサイトとなる鉱物が溶けるもしくは破壊するまでには至らなかったか、 ^{36}Ar が大量に存在したため、結果として低い割合に見えている可能性もある (Fig. 3)。

花崗岩類からは Ar が大量に放出されると予想されたが、この予想はあたらなかった。これは、今回実験条件の保持のため、6秒程度で摩擦を終了したため温度が約 800 度を少し超えた程度であることの寄与が大きいと判断している。瞬間的な温度はもう少しあがっている可能性があるが、今回は光温度計での測定ではないため、また、岩石内の熱伝導率の問題で時間分解能にかける可能性もある。

^{22}Ne , ^{40}Ar , CO_2 に関しては、 ^{36}Ar に対し斑れい岩類より割合として少なくなっている。含水鉱物の雲母や角閃石由来と考えられる水素や水蒸気は多く、おそらくは、水蒸気のサイトとなる雲母や角閃石から分解等により斑れい岩類より多くのガスが放出したと考えられることと整合的である (Fig. 3)。

一般的に花崗岩類に含まれるウラン鉱物 (ジルコン・アパタイト) などに由来する壊変および核分裂生成起源の ^{84}Kr , ^{86}Kr , ^{129}Xe , ^{132}Xe などは、斑れい岩類に比べ若干多くなっている。そのため、岩石の主成分鉱物の影響が放出ガスの成分に影響すること、また、花崗岩が摩擦で全溶融までの温度には至らず、部分溶融にとどまったことなどが考えられる。

Zwingmann H. (2019)らの実験のように断層面が完全に粘土鉱物化してしまっていれば、温度が 300-400 度程度と低くても、鉱物のアルゴン保持サイトの閉鎖

温度もしくは Ar の保持力が低いため、 Ar が拡散により放出されやすいと考えられる。今回の実験には粘土鉱物に変質する前の雲母や角閃石が、 ^{36}Ar に比べて ^{40}Ar を保持するサイトを比較的に保っていることを支持するものである。また、希ガスの拡散実験 (e.g. Ozima and Podosec, 2000) のように、ある程度の高温が維持された状態の実験のように、温度条件を一定にして比較的長い時間の拡散時間が必要であるため、摩擦溶融実験を 30 秒程度行って全溶融を確認する必要があると考えている。しかしながら、斑れい岩類のように 30 秒程度溶融した場合について、単純計算での 6 倍程度ではなく、更に多くの希ガスが放出されると考えられる。これは、SEM 画像上で識別できる 1~2 mm 程度反応している部分 (Fig. 1) が断層面と見做せる場合については、Sato et al., (2009a)で議論されているように摩擦熱による反応範囲が 10~30 mm に及べば、摩擦熱の保持時間によっては、年代を数%若返らせる可能性がある。また、放出ガスを溶融部ないし破砕部が取り込めば過剰 Ar となり年代が古くなることも有り得る。断層の深度によって、断層の摩擦熱の影響、大気との拡散・混合による度合いによる年代の若返りなどや古くなるなどの異常が出るのではないかと考えられる。

5. まとめ

今回のモデル断層を用いた摩擦実験では、少なくとも希ガス放出において斑れい岩類の結果と花崗岩類の元素組成が異なっており、これは岩石の成分由来の希ガス成分が大気との平衡になる過程で摩擦熱による同位体分別と放出ガスの固結などにより、若返りや過剰アルゴンなどの年代異常に影響する可能性が窺われた。

大陸地殻に多く存在する花崗岩類の⁴⁰Ar (放射起源 Ar を含む) は年代測定にあたって過剰アルゴンとなる可能性があり, 地下深くにおいて摩擦による溶融が起これば, 基盤岩から放出されるガスが大気中に放出されるか, 断層内にとどまるかで年代異常の現れ方が異なる可能性がある。

さらに, カリウムを多く含む花崗岩類とそうではない斑れい岩類とでは, 摩擦試験条件が同様でも断層面の溶融度合いが異なるため, 断層運動中に⁴⁰Ar の放出が岩質ごとに異なる可能性を示している。

6. 謝辞

本研究では分析測定を進めるに当たり, 現: 高知コア研究所所長の廣瀬丈博博士及びスタッフの協力により海洋研究開発機構高知コア研究所の高速摩擦試験機, 並びに, SEM を使用させていただいた。本研究を進めるに当たり, 実験当時の所属の海洋研究開発機構横須賀本部のスタッフの方々に感謝の意を表するとともに, 特に鈴木勝彦博士, 羽生毅博士, 田村肇氏, 清水家齊氏よりいただいたご助力に感謝の意を表する。

引用文献

- Hirose, T. and Shimamoto, T., 2005, Growth of molten zone as a mechanism of slip weakening of simulated faults in gabbro during frictional melting. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **110**, 1-18.
- Ozima M. and Podsec F. A., 2002, Noble Gas Geochemistry (2nd edition), Cambridge (Cambridge University Press), 300 pp., ISBN 05 2180 3667.
- Sato, K., Hirose, T., Tamura, H., Kumagai, H., Mizoguchi, K., 2009b, Volatile gas analysis released from simulated faults during frictional melting. *JAMSTEC Research, IFREE Special issue*, 51-57.
- Sato, K., and Kumagai, H., 2024, Preprocessing apparatus and method for gas analysis. International patent (EU) , Patent no. : EP3176578.
- 佐藤佳子, 熊谷英憲, 2020, ガス分析用前処理装置及びガス分析前処理方法. 特許第 6765117 号.
- Sato, K., Kumagai, H., Hirose, T., Tamura, H., Mizoguchi, K., Shimamoto, T., 2009a, Experimental study for noble gas release and exchange under high-speed frictional melting. *Chemical Geology*, **266**, 96-103.
- 杉崎 隆一, 杉浦 孜, 1986, 長野県西部地震に伴う温泉ガス, 火山ガスの前兆的組成変動 --地殻歪および岩石破壊と地下ガス組成変動--. *地震*, **39**, 99-109.
- 柚原雅樹, 2008, 讃岐領家変成帯, 庵治花崗岩の微量元素ならびに希土類元素組成. *福岡大学理学集報*, **38**, 45-51.
- Yuhara M., Kagami, H., Nagao, K., 2000, Geochronological characterization and petrogenesis of granitoids in the Ryoke belt, Southwest Japan Arc: constraints from K-Ar, Rb-Sr and Sm-Nd systematics. *Island Arc*, **9**, 64-80.
- Yuhara, M., Miyazaki, T., Kagami, H., and Yuhara., M. 2003, Rb-Sr and K-Ar geochronology and petrogenesis of the Aji Granite in the eastern Sanuki district, Ryoke Belt, southwest Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **98**, 19-30.
- Wakita, H., Nakamura, Y., Kita, I., Fujii, N., Notsu, K., 1980, Hydrogen Release: New Indicator of Fault Activity. *Science*, **210**, 188-190.
- Zwingmann, H., den Hartog, S. A.M., Todd, A., 2019, The effect of sub-seismic fault slip processes on the isotopic signature of clay minerals--Implications for K-Ar dating of fault zones. *Chemical Geology*, **514**, 112-121.

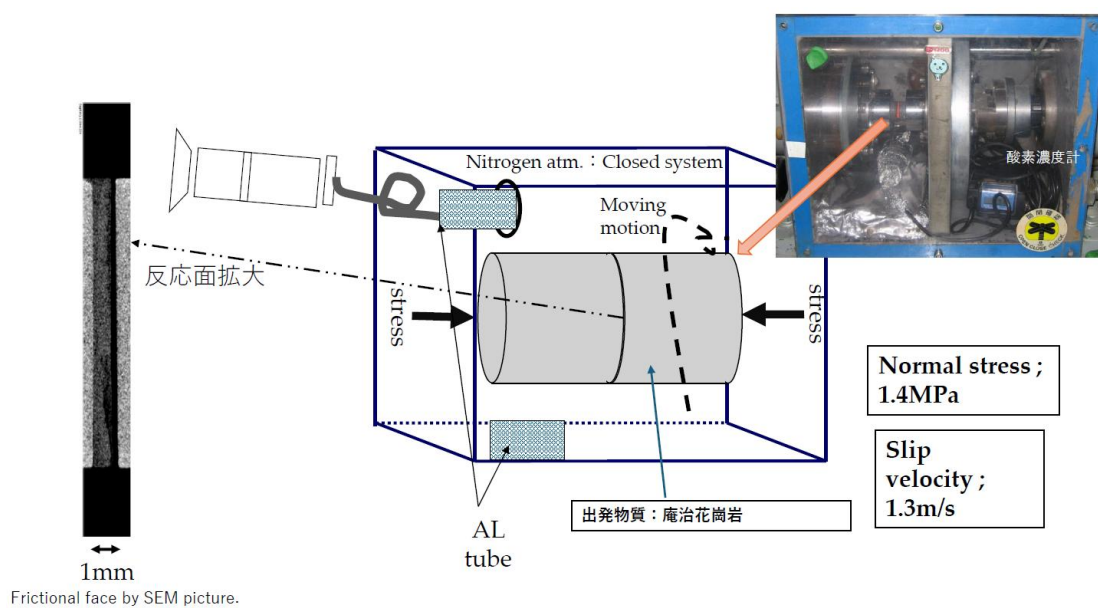


Fig. 1 窒素雰囲気中での摩擦加熱実験と放出ガス回収

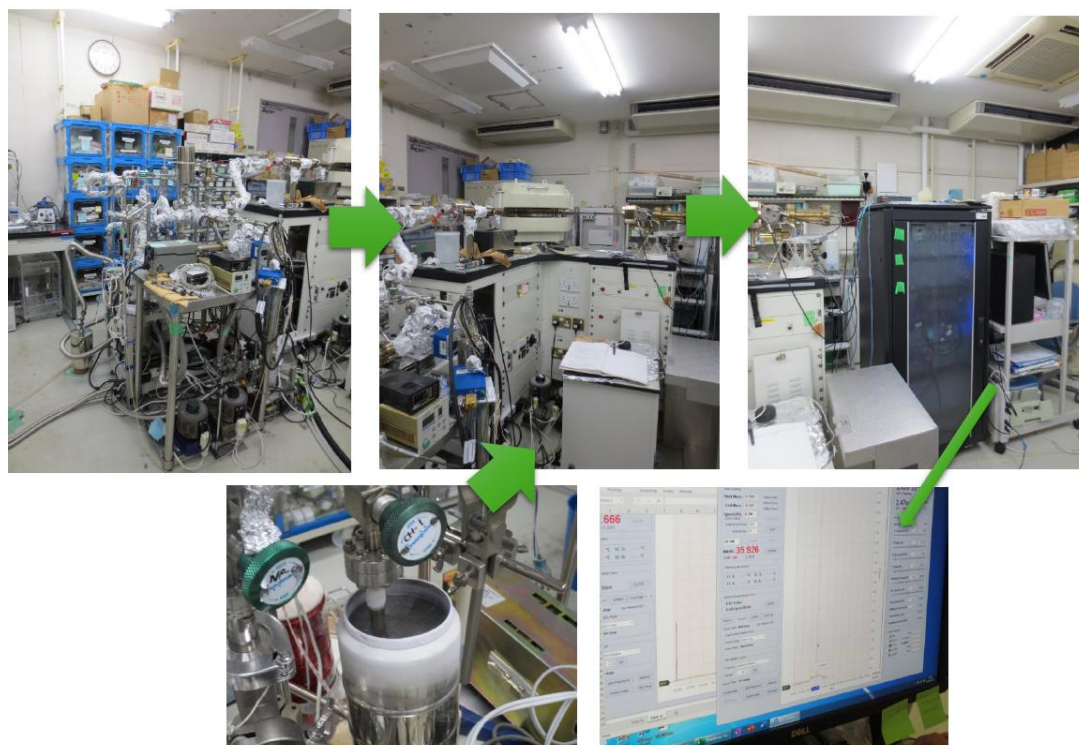


Fig. 2 海洋研究開発機構の2017年にNGX化したGVI-5400HE希ガス同位体質量分析計の電装系

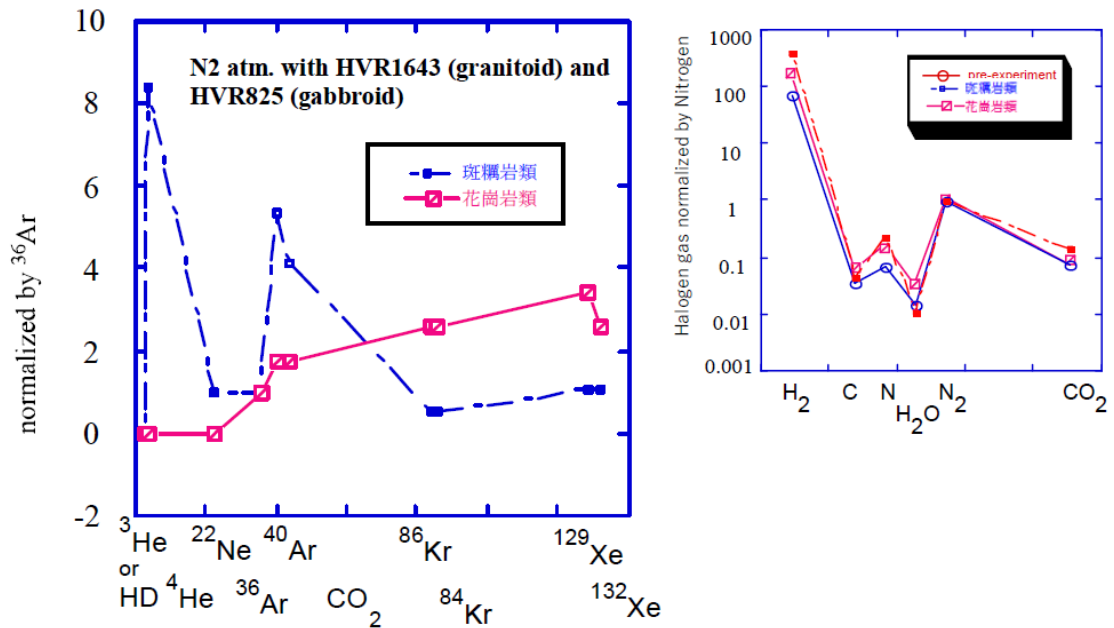


Fig.3 斑れい岩類 VS 花崗岩類の窒素雰囲気中で摩擦溶融実験の放出ガスの結果 (斑れい岩類、Pre-experiment ; Sato et al., (2009b), 花崗岩類 ; 本稿)

Table 1

主要元素	花崗岩類	斑れい岩類
SiO_2	70.21	52.60
TiO_2	0.35	1.00
Al_2O_3	14.45	13.30
FeO^*	2.68	14.20
MnO	0.06	0.20
MgO	0.83	6.00
CaO	2.94	10.40
Na_2O	3.39	2.30
K_2O	3.11	0.70
P_2O_3	0.08	0.20
Total	98.10	100.90

Table 1 実験に用いた花崗岩 (庵治) の平均化学組成と斑れい岩 (ジンバブエ) の化学組成

Footnote:

花崗岩 : Yuhara et al., 2003, Table 1: SR-10

斑れい岩 : Sato et al., 2009a, Table 2: Starting material

Table 2

Run No.	岩質	滑り速度 m/s	ノーマルストレス Mpa	短縮された距離 mm	実験時の気体雰囲気 Nitrogen	最大温度 (°C)
825	斑れい岩		1.3	1.4	5.56 closed	1117
1643	花崗岩		1.3	1.0	0.92 closed Nitrogen	814

Table 2 モデル断層摩擦実験時のコンディション

Footnote:

花崗岩 : Yuhara et al., 2003, Table 1: SR-10

斑れい岩 : Sato et al., 2009a, Table 2: Starting material

Table 3

Purified	Mass No.	pre-experiment under N ₂ atmosphere ppm/atm	pre-experiment under N ₂ atmosphere ppm/atm	pre-experiment under N ₂ atmosphere ppm/atm
HD	3	3.0	n.d.	0.00E+00
⁴ He	4	3.0		25.6 2.82E-05
²² Ne	22	1.5		3.0 6.82E-04
³⁶ Ar	36	3.0		3.0 6.82E-04
⁴⁰ Ar	40	12.3		16.2 1.37E-03
CO ₂	44	4.6		12.4 1.37E-03
⁸⁴ Kr	84	1.5		1.5 2.06E-03
⁸⁶ Kr	86	n.d		1.5 2.06E-03
¹²⁹ Xe	129	1.5		2.1 2.75E-03
¹³² Xe	132	1.5		3.1 2.06E-03

Table 3 実験時のガス雰囲気と放出されたガスの分析結果