

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03882

研究課題名（和文）深部花崗岩ミュオン生成核種蓄積を用いた過去1千万年の宇宙線スペクトル変動の探索

研究課題名（英文）Search for secular variations of in cosmic rays over the past 10 million years using muon-induced cosmogenic nuclides in deep underground granite rocks

研究代表者

櫻井 敬久 (Sakurai, Hirohisa)

山形大学・理学部・客員教授

研究者番号：60150265

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：深度100 mまでの土岐花崗岩ボーリングコア試料を用いて、高エネルギー宇宙線ミュオンが地下花崗岩の石英中に生成し蓄積した宇宙線生成核種Be-10(半減期136万年)、Al-26(半減期72万年)の濃度を加速器質量分析法により測定した。また、ミュオンビーム照射実験とシミュレーションにより両核種の生成断面積を確定した。高エネルギー宇宙線ミュオンの地下深度分布と生成断面積から地下花崗岩における両核種の生成率と蓄積された核種の放射能濃度の深度分布を求め、実験結果と整合していることを明らかにし探索法の有効性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の100 mの深度での実験データは、国際的に見ても1例程度の先行研究しかない。さらに世界的にみても例をみない3次元の岩石情報を取得している土岐花崗岩体からの単一ボーリングコア試料による系統的分析測定結果は本研究が唯一のものである。本実験研究で導出した生成断面積は、世界に先駆けたデータであり学術的に大きな意義がある。また、高エネルギー宇宙線により過去1千万年の銀河の様子を調べることは社会文化的貢献でもある。

研究成果の概要（英文）：We have measured the Be-10 and Al-26 (with respective half-lives of  $1.36 \times 10^6$  yr and  $7.2 \times 10^5$  yr) concentrations in boring core samples from the Toki Granite down to a depth of 100 m, using AMS analysis. We, also, have determined the production cross-sections of Be-10 and Al-26 in the granite quartz by a 160 GeV muon beam exposure experiment, compared with a detailed simulation. Additionally, the depth profiles of Be-10 and Al-26 concentrations in rocks estimated from the known total muon flux deep underground and this study's cross sections were comparable to those of the concentrations measured at depths greater than 5 m. Overall, our study showed that these cross sections revealed by the high-energy muon beam experiment are a valuable tool for estimating variations in high-energy galactic cosmic rays over a few million years using in situ rocks and simulators.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 宇宙線生成核種 ミュオン 宇宙線永年変化 花崗岩 AMS分析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙線の永年変化は、宇宙線の超新星起源説により重要な研究課題となった (Prog. Theor. Phys. 15, 1956)。銀河を宇宙線が飛び交うボックス (leaky-box model) として、宇宙線強度が定常的であるためには銀河内での超新星の出現頻度と宇宙線の銀河からの逃げ出しがバランスする必要があり、宇宙線の銀河内滞在時間を知る必要があるからである。

現在、X線衛星による超新星残骸での宇宙線電子加速の観測や Fermi-LAT 衛星のガンマ線観測による宇宙線陽子加速の可能性の示唆 (Science 339, 2013) などから、 $10^{15}$  eV 程度までの宇宙線スペクトルの起源は、超新星残骸でのフェルミ加速 (衝撃波統計加速) によるものと考えられている。また、観測衛星 CRIS は宇宙線の原子核成分が星間物質と衝突して核破砕により生成する軽い安定同位体と放射性同位体の組成比観測から、半減期を利用して宇宙線核子の銀河内の滞在時間を  $1500 \pm 160$  万年 ( $70 \sim 400$  MeV/核子) と報告している (ApJ 563, 2001)。ただし、組成比はエネルギー依存性があり高エネルギーでは  $\sim 100$  万年の滞在時間である。さらに、宇宙ステーションの AMS-02 の宇宙線原子核組成観測は、宇宙線の銀河内伝播における再加速の可能性も示唆している (Phys. Rev. D95, 2017)。しかし、これらは定常的な宇宙線スペクトルについての知見である。

最近、深海底 (4830 m) のマンガングラストの  $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$  ( $T_{1/2} = 2.6 \times 10^6$  yr) が 280 万年前に異常増加していて、数  $10 \sim 100$  pc (パーセック) の距離での超新星爆発による放出物だという報告がされた (P.R.L. 103, 2009, JPS Proc. 14, 2017)。 $^{60}\text{Fe}$  は地球上では極めて生成されにくい星の元素合成物であるため、太陽系が超新星爆発直後に広がってきた超新星残骸に突入し、放出物の  $^{60}\text{Fe}$  が地球上への降下物として海底に堆積したものと考えられている。そのフラックスから超新星爆発の中心からの残骸の広がりか推定でき、且つ星間物質密度と宇宙線の拡散係数から宇宙線加速領域の形成場所および時間スケールが推定できる。計算では超新星爆発中心から数  $10$  pc のところで宇宙線強度が数  $10$  万年にわたり増加があるとしている。一方、観測衛星 PAMELA の宇宙線陽電子増加観測に関連するトピックを、この太陽系に近いところでの 280 万年前の超新星残骸からの局所的宇宙線注入のモデルで説明する試みもある (P.R.L. 115, 2015)。

我々の地球が属している太陽系は銀河系のオリオンアームにあり、銀河中心に対して  $250$  km/s で回転していて約 2.5 億年で 1 周する。1 千万年では約  $2$  kpc (キロパーセック) 回転移動していることになる。スパイラルアームには約  $100$  万年  $\sim 1000$  万年で誕生を繰り返す OB 型星が集まっており、太陽系はオリオンアームを運動しているため、アーム内の超新星残骸と遭遇する確率が高いと考えられる。

このような銀河宇宙線スペクトルの定常性に関わる学術的背景の基、我々の地球が 1 千万年にわたり照射されてきた高エネルギー宇宙線の変動について調べることは重要である。

### 2. 研究の目的

本研究は、高エネルギー宇宙線ミュオン ( $100$  GeV ミュオンで約  $0.5$  TeV 以上の銀河宇宙線陽子に相当) による長半減期の宇宙線生成核種 Be-10 (半減期 136 万年) と Al-26 (半減期 72 万年) に着目し、地下の岩石コアを用いてその蓄積量を測ることにより過去 1 千万年の間の高エネルギー宇宙線の時間変動の探索を行うことを目的としている。

### 3. 研究の方法

(1) 土岐花崗岩コアサンプルを用いて高エネルギー宇宙線ミュオンによって花崗岩石英中に生成される核種 Be-10 および Al-26 の濃度を深度別に測定して深度の関数として測定し生成核種の蓄積量のプロファイルを求める。測定は、化学的処理により花崗岩試料から石英を抽出し、さらに抽出石英から Be-10 および Al-26 の測定試料を作成して AMS 分析により行う。

また、土岐花崗岩に含まれる微量の自然放射性同位元素であるウラン系列およびトリウム系列核種の放射能測定を行い土岐花崗岩コアサンプルの深度特性を調べる。

(2) CERN にて土岐花崗岩コアのターゲットセットに  $160$  GeV ミュオンビーム照射実験を行い、照射試料を加速器質量分析法により分析した Be-10、Al-26 の生成量のデータセットを得ている。詳細なミュオン照射シミュレーションを行い、実験値を評価して高エネルギーミュオンによる Be-10、Al-26 の生成率を求める。

(3) 宇宙線ミュオンの地下深度強度観測データおよびミュオンエネルギースペクトルと (2) で求めた生成率より、ミュオン生成核種 Be-10 および Al-26 の生成量を深度の関数として計算する。

(4) 宇宙線スペクトルを基準として、(3)で求めた生成量について1千万年のミュオン照射による半減期を考慮した Be-10 および Al-26 の蓄積量を計算する。この蓄積量計算値と測定値を各深度で比較して、宇宙線強度の変動について考察する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 土岐花崗岩コアサンプルの深度特性

図1は、実験で用いた土岐花崗岩コアサンプル(深度5m, 20m, 100m, 200m 付近, 直径60mm)の写真である。深度約500mまでの土岐花崗岩コアサンプルから7点の深度についてバルク試料(60mm径、20mm厚)を作成して、U-238系列、Th-232系列核種の深度別濃度のガンマ線スペクトル測定を行った。図2は、ウラン系列の娘核種 Ra-226、Pb-214、Bi-214 とトリウム系列の娘核種 Ra-224、Pb-212、Bi-212 の放射能濃度の深度分布を示している。ウラン系列では、深度75~300mにプラトーを示しており、深度10mおよび400~500mの約2倍の濃度である。同様に、トリウム系列においても深度75~300mに深度400~500mの約1.5倍の濃度のプラトーを示している。なお、プラトーの放射能濃度は、標準試料 JG-2 (岐阜県苗木花崗岩) のウラン、トリウムの含有率から計算された放射能濃度 0.14 Bq/g に近い値を示している。土岐花崗岩コアサンプルのウラン系列およびトリウム系列濃度は、400m 付近を境に深度依存性があることを示している。

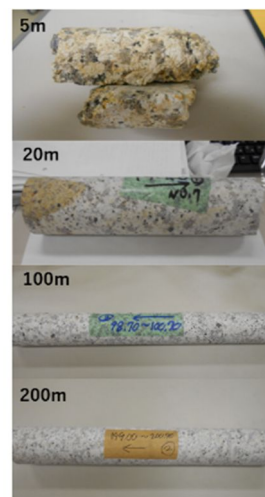


図1. 土岐花崗岩コアサンプルの写真

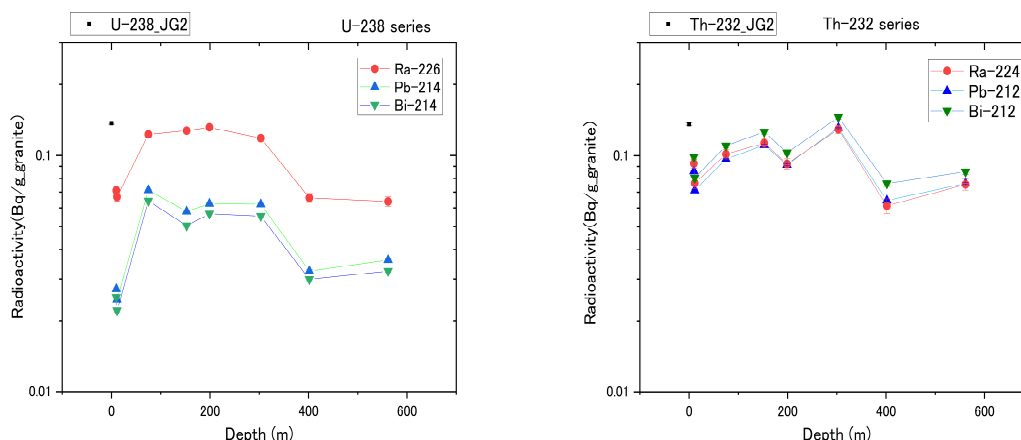


図2. 土岐花崗岩コアサンプルのウラン、トリウム系列放射能濃度の深度分布

##### (2) 160GeV ミュオンビーム照射実験とシミュレーション

CERN の 160GeV ミュオン ( $\mu^+$ ) ビームラインに高純度石英板及び土岐花崗岩コアを設置してミュオン照射実験を行った(図3)。本研究では、照射実験セットについて PHITS により詳細なミュオン照射シミュレーションを行い実験結果について評価した。照射実験は、石英板へのミュオンビームの直接照射によりミュオンによる直接核破碎生成率を求め、その後方に置いた土岐花崗岩によりミュオンによる二次生成粒子による核破碎生成率を求めている。

図4の上段パネルは、石英板および花崗岩石英成分に生成された Be-10 および Al-26 の生成率の実験結果とシミュレーション結果を示している。パネル内の左端のデータは、石英板へのミュオンビームの直接照射による直接核破碎生成率を示している。花崗岩中の

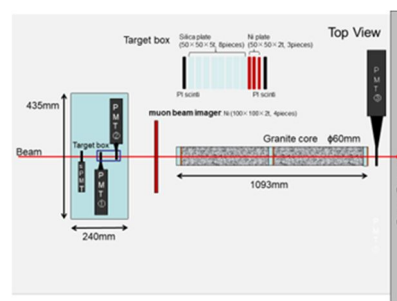


図3. 160GeV ミュオン照射実験セットアップ

Be-10 および Al-26 の生成率は、各々直接核破碎生成率の 2.4、3.0 倍に増加している。図 4 の下段パネルは、花崗岩石英成分における生成率を石英板直接核破碎生成率で規格化した表記である。シミュレーション値も実験値と同様な増加を示している。しかし、シミュレーション値は、実験値の 32%、40%と小さい値を示した。

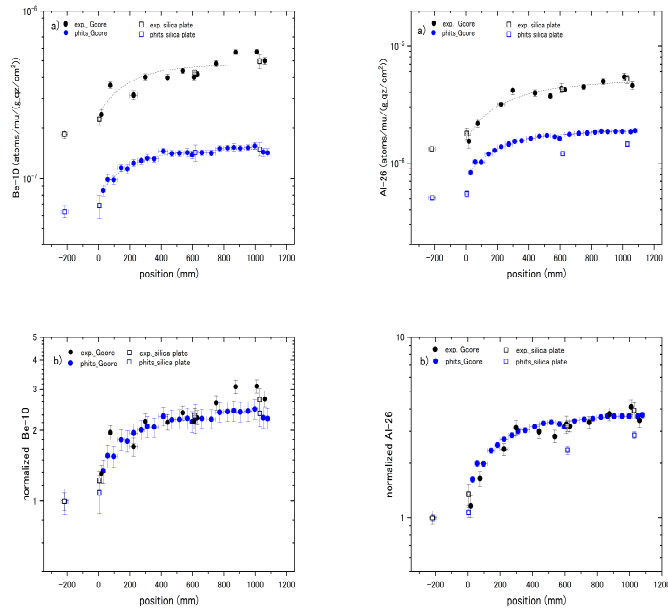


図 4. 花崗岩および石英板における Be-10 および Al-26 の生成率 (実験およびシミュレーションの比較)

### (3) 160GeV ミューオンの生成断面積

実験で求められた Be-10 および Al-26 の生成率から生成断面積を求めた。Be-10 および Al-26 は、各々、石英 (SiO<sub>2</sub>) の酸素とケイ素をターゲットとして生成される。ミューオンによる石英板直接核破碎生成断面積は、 $9.2 \pm 0.6$ 、 $132 \pm 8 \mu\text{b}$ 、花崗岩中石英では  $20.6 \pm 1.1$ 、 $402 \pm 32 \mu\text{b}$  であった (Sakurai et. al. PHYSICAL REVIEW D 109, 102005, 2024)。

### (4) 土岐花崗岩石英中の Be-10 および Al-26 濃度

図 5 に土岐花崗岩から抽出した石英中の Be-10 と Al-26 の濃度の測定結果を示す。Be-10 は、深度 5 m、20 m、50 m、100 m のコアサンプルについての濃度である。Al-26 は、深度 5 m、20 m のコアサンプルについての濃度である。土岐花崗岩は、北半球の緯度 35.4° 高度 475.6 m に位置している。比較データとして南半球ニュージーランドの緯度 -45.8° 高度 535 m に位置している Macraes 金鉱山岩石の石英中の Be-10 と Al-26 の濃度を示した (Kim, et al. EPSL. 223, 2004)。両地点の Be-10 と Al-26 の濃度の深度分布は同様な結果を示している。

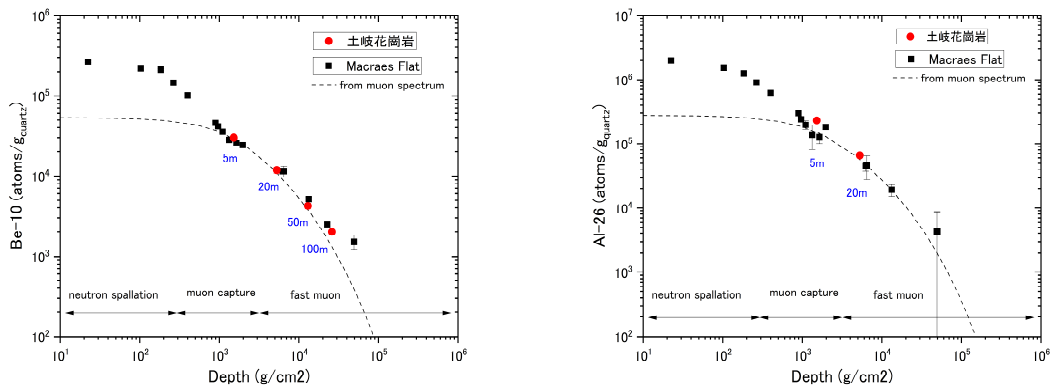


図 5. 土岐花崗岩の石英中の Be-10, Al-26 濃度の深度分布。破線は宇宙線ミューオンの地下深度分布から計算された Be-10, Al-26 濃度の深度分布。

図 5 において、破線曲線は、宇宙線ミューオンの地下深度に対する強度分布から計算した Be-10 と Al-26 の濃度深度分布である。濃度は、各深度でのミューオンの平均エネルギー、そして (3) に示した Be-10 と Al-26 の生成断面積を基にミューオンエネルギーを考慮して Be-10 と Al-26 の生成率を求め、それより放射平衡を仮定して計算した。5 m より浅いところでの濃度は宇宙線の中子による生成が寄与しているため、計算曲線とは異なっている。図は 20 m より深い地下岩石における Be-10 と Al-26 は、宇宙線高エネルギーミューオンにより生成されていることを示している。

国際的に見ても 100 m 深度での先行研究は殆ど無く、且つ単一ボーリングコア試料に対する

結果は唯一のものである。測定結果は現在の高エネルギー宇宙線ミュオン強度から推定される濃度と同等であることを示しており重要な研究成果である。さらに、100 m を超える深度での測定結果は推定値と異なっている可能性があり、さらなる高エネルギーミュオン強度における永年変化について調べる要請を示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Sakurai, Y. Kurebayashi, S. Suzuki, K. Horiuchi, Y. Takahashi, N. Doshita, S. Kikuchi, F. Tokanai, N. Iwata, Y. Tajima, S. Gunji, E. Inui, K. Kondo, T. Oe, N. Sasaki, S. Abe, T. Sato, H. Matsuzaki, V. Vlachoudis	4. 巻 109
2. 論文標題 Production rates of long-lived radionuclides $^{10}\text{Be}$ and $^{26}\text{Al}$ under direct muon-induced spallation in granite quartz and its implications for past high-energy cosmic ray fluxes	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.109.102005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuguchi Takashi, Kato Takenori, Ogita Yasuhiro, Watanabe Minori, Yamazaki Hayoto, Kato Asuka, Itoh Daichi, Yokoyama Tatsunori, Sakata Shuhei, Ohno Takeshi	4. 巻 265
2. 論文標題 Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Implications for the magma chamber processes of Okueyama granite, Kyushu, Japan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 106091 ~ 106091
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2024.106091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuguchi, T., Hatsukawa, H., Suzuki, S., Imura, Motai, S., T., Nakashima, K., Nishiyama, T.	4. 巻 107
2. 論文標題 Morphological and chemical characterization of secondary carbonates in the Toki granite, central Japan, and the evolution of fluid chemistry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 2282-2290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2022-8229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 2. Yuguchi, T., Matsuki, T., Izumino, Y., Sasao, E. and Nishiyama, T.	4. 巻 106
2. 論文標題 Mass transfer associated with chloritization in the hydrothermal alteration process of granitic pluton.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1128-1142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuguchi, T., Ogita, Y., Kato, T., Yokota, R., Nishiyama, T.	4. 巻 192
2. 論文標題 Crystallization processes of quartz in a granitic magma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 104289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-57273-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakurai Hirohisa, Tokanai Fuyuki, Miyake Fusa, Horiuchi Kazuho, Masuda Kimiaki, Miyahara Hiroko, Ohyama Motonari, Sakamoto Minoru, Mitsutani Takumi, Moriya Toru	4. 巻 10
2. 論文標題 Prolonged production of <sup>14</sup> C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-57273-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Horiuchi Kazuho, Ohno Hiroshi, Iwahana Go, Iizuka Yoshinori, Matsuzaki Hiroyuki	4. 巻 459
2. 論文標題 Measurements of beryllium isotopes in ice wedges in Alaska	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 64 ~ 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.07.046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuguchi, T., Shoubuzawa, K., Ogita, Y., Yagi, K., Ishibashi, M., Sasao, E., Nishiyama, T.	4. 巻 104
2. 論文標題 Role of micropores, mass transfer, and reaction rate in the hydrothermal alteration process of plagioclase in a granitic pluton	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 536-556
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 2件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 櫻井敬久, 紅林泰, 鈴木颯一郎, 堀内一穂, 高橋唯, 堂下典弘, 菊地聡, 門叶冬樹, 岩田尚能, 田島靖久, 郡司修一, 乾恵美子, 近藤薫, 大江毅, 佐々木宣欣, 安部晋一郎, 佐藤達彦, 松崎浩之, Vlachoudis Vasilis
2. 発表標題 高エネルギーミュオンによる長半減期宇宙線生成核種Be-10, Al-26の花崗岩石英中の生成率と地下花崗岩における濃度の深度分布
3. 学会等名 日本物理学会2024春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 櫻井敬久
2. 発表標題 高エネルギーミュオンによる長半減期宇宙線生成核種 Be-10, Al-26の花崗岩における生成率
3. 学会等名 第 24 回 AMS シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 湯口貴史, 笹尾英嗣, 火原諒子, 村上裕晃, 尾崎裕介
2. 発表標題 土岐花崗岩における物質移行特性に関する研究: 鉱物の微小空隙がもたらす物質移動の遅延
3. 学会等名 日本地質学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 櫻井敬久, 川村容明, 鈴木颯一郎, 乾恵美子, 門叶冬樹, 森谷透, 武山美麗 他
2. 発表標題 2000年から23年間の大気中宇宙線生成核種Be-7濃度変動の観測
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 櫻井敬久、堀内一穂、鈴木颯一郎、岩田尚能、湯口貴史、門叶冬樹、松崎浩之
2. 発表標題 地下深部土岐花崗岩コア中の長半減期宇宙線生成核種Be-10の測定II
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会online(2021/9/16)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Sakurai, Y. Kawamura, F. Tokanai, et al.
2. 発表標題 Be-7 in Japan, Iceland and Thailand during solar cycle 24 descent phase
3. 学会等名 JPGU meeting 2021 online PEM08-P11 June3-6 e-poster
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀内一穂
2. 発表標題 多数試料Be同位体分析による古宇宙線変動の解明と古記録間の同期
3. 学会等名 日本地球化学会第68回年会，ハイブリッド開催 2021年9月1日 - 9月15日（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 湯口貴史，笹尾英嗣，五十公野裕也
2. 発表標題 花崗岩中の割れ目発生・発達プロセスの解明：熱水変質を指標としたアプローチ [R6P-04]
3. 学会等名 日本鉱物科学会 2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirohisa Sakurai, Fusa Miyake, Fuyuki Tokanai, Kazuho Horiuchi, et al.
2. 発表標題 14C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Sakurai, Y. Kawamura, F. Tokanai, et al.
2. 発表標題 Yearly variations in Be-7 concentrations in the surface air at Iceland and Japan for 16 years from 2003
3. 学会等名 11th Symposium on Polar Science online meeting
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 初川悠, 中島和夫, 湯口貴史
2. 発表標題 中部日本土岐花崗岩体に生じる熱水変質 炭酸塩鉱物の産状区分に基づくCL像観察と化学的特徴
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湯口貴史, 小北康弘, 加藤丈典, 横田倫太郎, 笹尾英嗣, 西山忠男
2. 発表標題 花崗岩体の石英の結晶化プロセス: 石英のCL累帯パターンとTitaniumQ温度計
3. 学会等名 日本鉱物科学会 2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sakurai, Y. Kawamura, F.Tokanai, et al.
2. 発表標題 Yearly variations in Be-7 concentrations in surface air at Iceland and Japan for 15 years from 2003: Solar modulation of cosmogenic nuclide
3. 学会等名 第10回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	堀内 一穂  (Horiuchi Kazuho)  (00344614)	弘前大学・理工学研究科・准教授   (11101)	
研究分担者	湯口 貴史  (Yuguchi Takashi)  (00516859)	熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・教授   (17401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------